

Rapport d'enquête

Sur la fuite d'hydrogène survenue
au sein du site exploité par
ArianeGroup à Vernon (27)
le 9 janvier 2025

Bordereau documentaire

Organisme auteur : Bureau d'enquêtes et d'analyses sur les risques industriels (BEA-RI)

Titre du document : rapport d'enquête sur la fuite d'hydrogène survenue au sein du site exploité par ArianeGroup à Vernon (27) le 9 janvier 2025

N° : MTE-BEARI-2025-10

Date du rapport : 13/11/2025

Proposition de mots-clés : hydrogène liquide, dépotage

Avertissement

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 501-1 à L. 501-19 du Code de l'Environnement.

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités.

En conséquence, l'utilisation de ce rapport à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

Au titre de ce rapport on entend par :

- Cause de l'accident : toute action ou événement de nature technique ou organisationnelle, volontaire ou involontaire, active ou passive, ayant conduit à la survenance de l'accident. Elle peut être établie par les éléments collectés lors de l'enquête, ou supposée de manière indirecte. Dans ce cas le rapport d'enquête le précise explicitement.
- Facteur contributif : élément qui, sans être déterminant, a pu jouer un rôle dans la survenance ou dans l'aggravation de l'accident.
- Enseignement de sécurité : élément de retour d'expérience tiré de l'analyse de l'évènement. Il peut s'agir de pratiques à développer car de nature à éviter ou limiter les conséquences d'un accident, ou à éviter car pouvant favoriser la survenance de l'accident ou aggraver ses conséquences.
- Recommandation de sécurité : proposition d'amélioration de la sécurité formulée par le BEA-RI, sur la base des informations rassemblées dans le cadre de l'enquête de sécurité, en vue de prévenir des accidents ou des incidents. Cette recommandation est adressée, au moment de la parution du rapport définitif, à une personne physique ou morale qui dispose de deux mois à réception, pour faire part au BEA des suites qu'elle entend y donner. La réponse est publiée sur le site du BEA-RI.

Synthèse

Le 9 janvier 2025, ce qui a été interprété comme une fuite d'hydrogène liquide s'est produit lors d'une opération de dépotage d'un camion-citerne Air Liquide, sur le site ArianeGroup de Vernon (27). Vers 11h50, les détecteurs de gaz signalent la présence d'hydrogène au niveau de la zone de dépotage. Le Plan d'Opération Interne (POI) est déclenché, le personnel de la zone d'essai est mis en sécurité et un périmètre de sécurité instauré. Le POI sera levé à 18h00, aucun dommage humain, matériel ou environnemental n'a été constaté.

Le site de Vernon est spécialisé dans la propulsion cryotechnique. Le poste de dépotage concerné est équipé de dispositifs de sécurité (cheminée de dégazage, rampes d'aspersion). La citerne de 53 000 L transporte de l'hydrogène à -253°C. Les procédures ArianeGroup sont très détaillées et mobilisent trois opérateurs.

L'incident est lié à une fermeture incomplète de la vanne de fond de la citerne, possiblement due à une impureté ou à une obturation partielle de la mise à l'air libre du circuit de commande, générant une fuite canalisée et en phase gaz. Cette situation n'a pas été résolue pendant le balayage à l'hélium qui a été écourté par rapport à la durée initialement prévue. Les conditions météorologiques (froid, humidité, vent nul) ont favorisé l'accumulation du panache gazeux et ainsi déclenché les détecteurs.

Le BEA-RI retient comme facteurs contributifs de l'événement : des conditions atmosphériques défavorables (rabattement du panache d'hydrogène au sol) au moment de l'incident, des procédures n'intégrant pas le traitement des cas de fuite résiduelle sur la vanne, une durée de balayage à l'hélium réduite ainsi que la possible difficulté de mise à l'air libre de la commande de vanne.

La manipulation des liquides cryogéniques est hautement sensible : impuretés ou conditions inadaptées peuvent perturber gravement les opérations. La rigueur dans la maintenance, les balayages et la prise en compte du retour d'expérience terrain sont essentiels.

Le BEA-RI émet les recommandations suivantes à la société ArianeGroup :

- Réviser la fiche d'intervention utilisée pour le dépotage de la citerne impliquée le jour de l'évènement pour intégrer la marche à suivre en cas de difficulté de fermeture de la vanne de fond de la citerne (W11) ;
- Examiner l'opportunité de définir de nouveaux paramètres météorologiques à suivre et respecter pour permettre la réalisation d'un dépotage.

Le BEA-RI émet les recommandations suivantes à la société Air Liquide :

- Capitaliser le retour d'expérience des chauffeurs de camion-citerne concernant la situation de difficulté de fermeture de la vanne de fond de la citerne (W11) et l'intégrer dans la procédure de dépotage générique ;
- Assurer la complète mise à l'air libre de la commande de la vanne de sécurité y compris en cas de retrait du rilsan.

Sommaire

I.	Rappel sur l'enquête de sécurité.....	7
II.	Constats immédiats et engagement de l'enquête	7
	II.1 Les circonstances de l'accident	7
	II.2 Le bilan de l'évènement.....	7
	II.3 Les mesures prises après l'évènement	8
	II.4 L'engagement et l'organisation de l'enquête	8
III.	Contextualisation	8
	III.1 Établissement ArianeGroup de Vernon (27)	8
	III.2 L'installation.....	9
	III.3 La Semi-remorque de transport.....	10
	III.3.1 La citerne.....	10
	III.3.2 Le circuit pneumatique	13
	III.3.3 Les vannes à commande pneumatique	14
	III.4 L'hydrogène liquide et les gaz impliqués dans le processus de dépotage.....	16
	III.4.1 L'hydrogène liquide	16
	III.4.2 Les gaz utilisés dans le processus de dépotage	16
	III.4.3 Les gaz de l'air indésirables dans le processus de dépotage	17
	III.4.4 Le phénomène de l'air liquide.....	18
	III.5 L'organisation des dépotages.....	18
IV.	Déroulement de l'évènement.....	19
	IV.1 Déclenchement de l'évènement.....	19
	IV.2 L'intervention des secours publics.....	20
V.	Compte-rendu des investigations menées.....	20
	V.1 Reconnaissances de terrain.....	20
	V.1.1 Dépotages témoins.....	20
	V.1.2 Inspection des vannes sur la citerne concernée	25
	V.2 Analyses documentaires et entretiens	26
	V.2.1 Analyse a posteriori de l'évènement.....	26
	V.2.2 Conditions climatiques	27
	V.2.3 Retour d'expérience existant sur la difficulté rencontrée lors du dépotage	27
	V.2.4 Fiche d'intervention dépotage.....	27
VI.	Conclusions sur le scénario de l'évènement.....	28
	VI.1 Scénario	28
	VI.2 Facteurs contributifs.....	29
	VI.2.1 Les conditions météorologiques.....	29

VI.2.2	<i>L'absence de prise en compte d'une possible difficulté de fermeture de la vanne de fond dans la procédure de dépotage.....</i>	29
VI.2.3	<i>Une durée de balayage hélium insuffisante</i>	29
VI.2.4	<i>Difficulté de mise à l'air libre de la vanne de sécurité.....</i>	29
VII.	Enseignements de sécurité.....	29
VII.1	La sensibilité de la manipulation de liquides cryogéniques.....	29
VIII.	Recommandations de sécurité à destination de l'exploitant et du sous-traitant.....	30

Rapport d'enquête

Sur la fuite d'hydrogène survenue au sein du site exploité par ArianeGroup à Vernon (27) le 9 janvier 2025

I. Rappel sur l'enquête de sécurité

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 501-1 à L. 501-19 du Code de l'Environnement. Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents.

Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité.

Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités. La gestion post accidentelle des conséquences de l'accident ne relevant pas à proprement parler de l'enquête technique du BEA-RI, ce sujet ne sera pas détaillé davantage dans le présent rapport.

Enfin, il est rappelé que toute utilisation du présent rapport à des fins autres que la prévention des risques pourrait entraîner des interprétations erronées.

II. Constats immédiats et engagement de l'enquête

II.1 Les circonstances de l'accident

Le 9 janvier 2025, un camion-citerne opéré par Air Liquide est raccordé à un poste de dépotage sur le site ArianeGroup de Vernon. Une opération de dépotage d'hydrogène (H₂) liquide est prévue pour le remplissage de deux réservoirs. Le remplissage du premier a débuté vers 9h30. Vers 11h50, alors que l'opération se termine (la citerne n'est alors pas totalement vide, et les assainissements de la ligne de dépotage sont en cours), et qu'un écoulement de liquide est constaté au niveau d'un flexible, la détection gaz portative des opérateurs se déclenche. Une fuite d'H₂ liquide est alors suspectée au niveau d'un flexible de dégazage. L'aspersion d'eau prévue sur le poste de dépotage est mise en route et le POI est déclenché.

II.2 Le bilan de l'évènement

Aucun dégât humain, matériel ou environnemental n'est à déplorer suite à cet évènement.

II.3 Les mesures prises après l'évènement

À la suite de l'évènement, la citerne qui contenait encore de l' H_2 liquide a été déconnectée puis confinée sur le site pour contrôle de l'absence de fuite résiduelle. Elle a ensuite été contrôlée dans les locaux d'Air Liquide.

Les dépotages à partir de citernes de modèles différents ont ensuite été privilégiés sur le site ArianeGroup de Vernon dans l'attente des conclusions menées par les différentes entités impliquées.

II.4 L'engagement et l'organisation de l'enquête

Au vu des circonstances et du contexte de l'évènement, le directeur du bureau d'enquêtes et d'analyses sur les risques industriels (BEA-RI) a décidé le 13 janvier 2025 l'ouverture d'une enquête technique.

Les enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur place les 16 janvier et 19 février 2025. Ils ont rencontré les représentants de la société ArianeGroup, ceux de la société Air Liquide ainsi que l'inspection des installations classées. Ils ont également assisté, sur des sites différents, à des dépotages d' H_2 liquide et à une opération de maintenance de la citerne impliquée dans l'évènement.

Ils ont recueilli les témoignages des acteurs impliqués dans l'évènement et dans sa gestion. Ils ont eu, consécutivement à ces entretiens, communication des pièces et documents nécessaires à leur enquête.

III. Contextualisation

III.1 Établissement ArianeGroup de Vernon (27)

Le site de Vernon conçoit, développe, produit et teste des systèmes de propulsion à ergols¹ liquides.

L'essentiel de son activité concerne la propulsion cryotechnique (à hydrogène et oxygène liquides) pour les lanceurs spatiaux.

Le site est spécialisé dans la maîtrise des ergols cryogéniques comme l'hydrogène, l'oxygène et le méthane liquides. Le moteur réutilisable Prometheus® (oxygène-méthane liquides), réalisé majoritairement en impression 3D, est développé et produit ici, de même que les moteurs liquides du lanceur Ariane 6. Enfin, le développement et une partie des essais du mini-lanceur réutilisable Maia développé par MaiaSpace, filiale d'ArianeGroup, sont réalisés sur ce site.

¹ Un ergol, dans le domaine de l'aéronautique, est une substance destinée à fournir de l'énergie à un lanceur spatial, un satellite, ou tout autre objet propulsé astronautique.

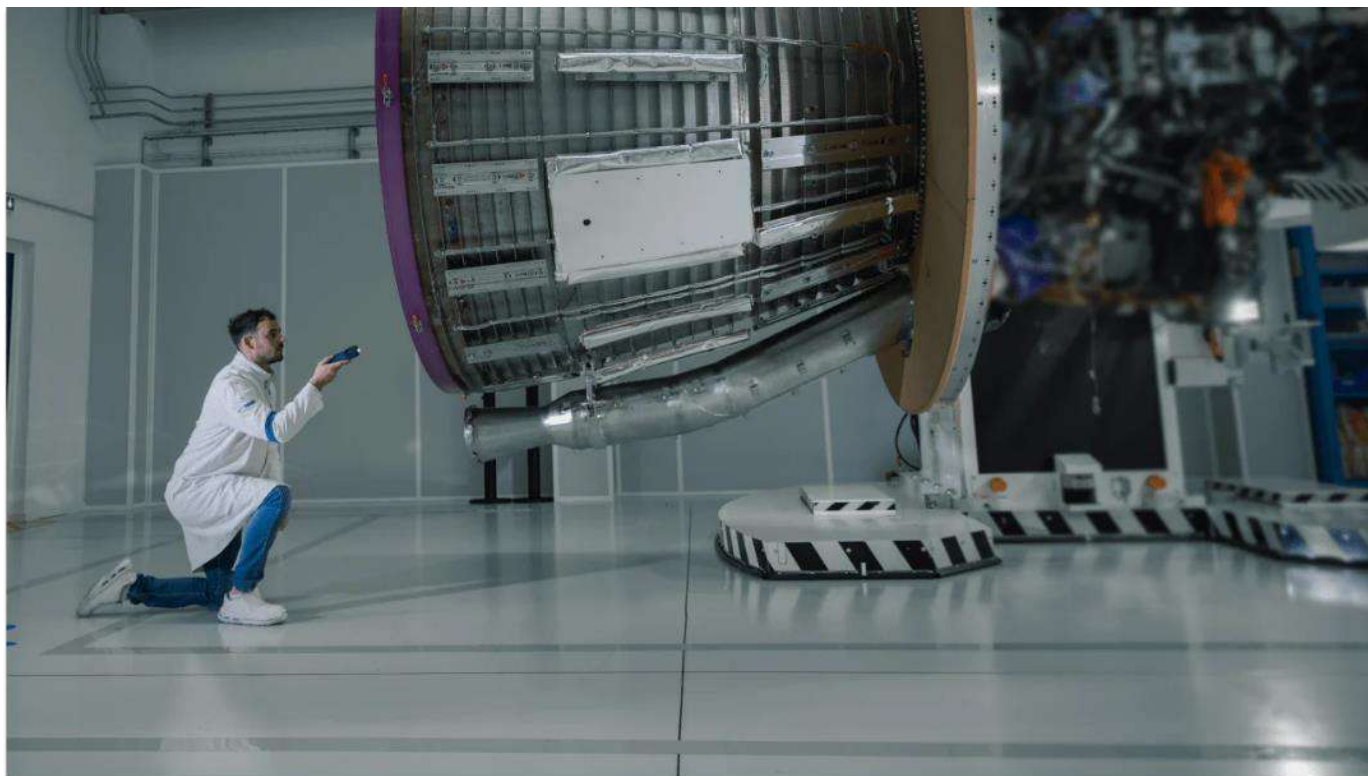


Figure 1 : moteur Vulcain2.1® au hall de montage (source ArianeGroup)

Le site d'essais, qui s'étend sur 116 hectares de forêts, comprend quatre bancs d'essais moteurs cryotechniques et des bancs d'essais de composants.

Il est classé Seveso seuil haut pour le stockage d'hydrogène.

III.2 L'installation

L'évènement s'est produit au niveau du poste de dépotage du banc d'essai PF52. Le poste de dépotage est situé à distance (environ 90m) des installations d'essai. Un linéaire de canalisation d'environ 100m sépare le point de raccordement du dépotage des réservoirs de stockage.

Il est équipé :

- D'une cheminée permettant de rejeter à distance les gaz purgés pendant les opérations de dépotage avec une hauteur favorisant leur dispersion ;
- De deux rampes d'aspersion d'eau permettant d'éviter la formation d'un nuage inflammable en cas de fuite non enflammée ou de lutter contre les effets d'un incendie : notamment refroidir et/ou protéger la citerne des effets thermiques.

Rampes d'aspersion
Cheminée
Raccordements sous auvent



Figure 2 : poste de dépotage

III.3 La Semi-remorque de transport

III.3.1 La citerne

La citerne est montée sur une semi-remorque routière tractée. La capacité de la citerne est de 53 000 litres soit de l'ordre de 3,8 tonnes d'hydrogène.



Figure 3 : Citerne en position sur une aire de dépotage

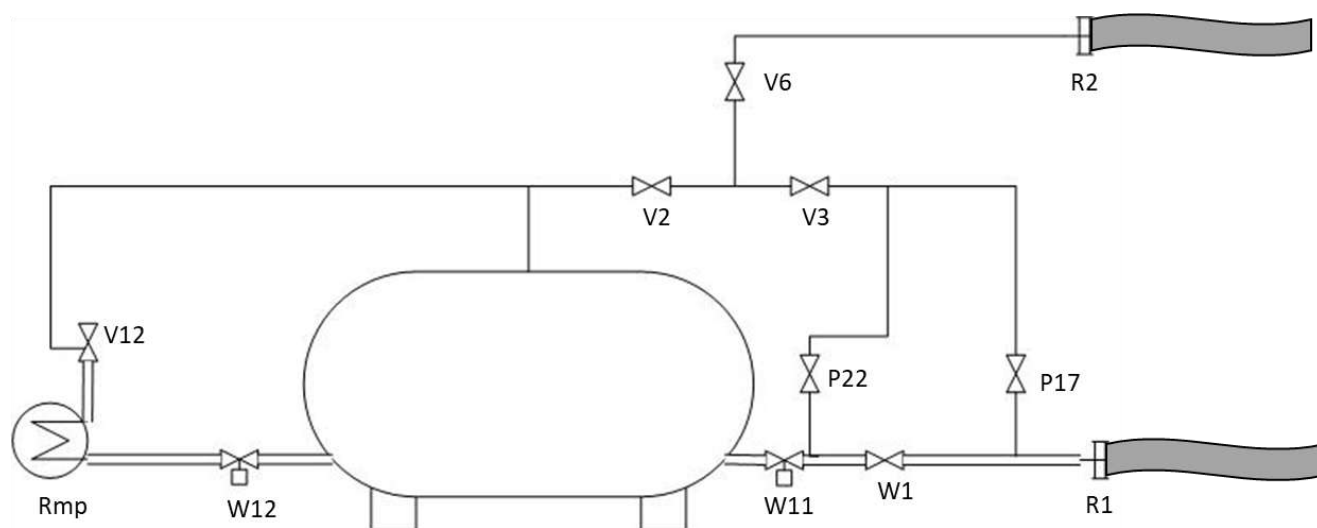
Durant le transport, l'hydrogène est sous forme liquide et à faible pression à une température de l'ordre de 20 K (-253,15°C). Pour limiter au maximum le réchauffement de l'hydrogène, la citerne est calorifugée.

La citerne est équipée de deux piquages en phase liquide. Ces deux piquages sont équipés de vannes à commande pneumatique et à sécurité positive. Le premier correspond au passage du produit (remplissage ou vidange de la citerne) et le second permet l'alimentation en hydrogène liquide du réchauffeur.



Figure 4 : Réchauffeur positionné sous la citerne

La citerne est également dotée d'un circuit gaz, qui est raccordé à l'installation fixe par flexible gaz permettant d'évacuer à la cheminée de l'installation soit de l'hydrogène gazeux soit le résultat des purges (mélange d'un gaz neutre et d'hydrogène sous forme gazeuse).



P17 : vanne de balayage de ligne W1
 P22 : vanne de balayage de ligne W11
 R1 : raccord vers flexible de dépotage
 R2 : raccord vers flexible de dégazage
 Rmp : réchauffeur

V2 : vanne de dégazage citerne
 V3 : vanne de dégazage ligne de soutirage
 V6 : vanne de dégazage vers flexible de dégazage
 V12 : vanne d'isolement du réchauffeur
 W1 : vanne manuelle de soutirage / remplissage
 W11 : vanne pneumatique de fond de la citerne, commandée par circuit azote
 W12 : vanne pneumatique d'alimentation du réchauffeur

Figure 5 : schéma de principe du raccordement d'une citerne pour un dépotage

Les principales étapes d'un dépotage, définies par Air Liquide pour le cas général, sont les suivantes (voir figure 5) :

- **Mise en place au poste de transfert et branchement** : mise à la terre, branchement du flexible de dégazage sur **R2** pour raccorder la citerne et la cheminée de dégazage du client, branchement du flexible de dépotage d'hydrogène liquide sur **R1** pour raccorder la citerne et la borne de dépotage du client. Un flexible en rilsan² alimenté en azote est enroulé autour du flexible de dépotage d'hydrogène liquide³. Les vannes **P17**, **V3** et **V6** permettant le balayage du flexible de dépotage sont ouvertes ;
- **Balayages avant transfert** : ces balayages permettent de chasser les impuretés pouvant être présentes dans les tuyauteries et qui conduiraient d'une part à polluer le transfert et d'autre part à générer des cailloux de glace pouvant perturber le dépotage. Un premier balayage en aval de la vanne **W1** permet de traiter les flexibles. Il est en général réalisé à l'azote (10 min) puis à l'hydrogène gazeux pendant 2 min. La vanne de dégazage **P22** est ensuite ouverte puis la vanne manuelle **W1**, le balayage à l'hydrogène gazeux est poursuivi 10 min ce qui permet de traiter l'ensemble de la tuyauterie jusqu'à la vanne de fond de la citerne **W11** (qui est en position fermée). La vanne de dégazage **P22** et la vanne manuelle **W1** sont ensuite fermées ;
- **Transfert** : Le dépotage est réalisé par une mise en pression du ciel gazeux de la citerne, qui est ajusté à 1 bar au-dessus de celle du stockage du client. Cette pression est générée par l'évaporation de l'hydrogène au travers du réchauffeur **Rmp** situé sous la citerne avec ouverture des vannes **W12** et **V12**. La vanne de fond de la citerne **W11** est ensuite ouverte, puis la vanne manuelle **W1**, jusqu'à la fin du transfert ;
- **Arrêt du transfert** : fermeture de la vanne de fond de la citerne **W11**, arrêt de l'alimentation du réchauffeur **Rmp** par fermeture de la vanne **W12**, fermeture des vannes du côté du circuit client au-delà du flexible de dépotage, ouverture de la vanne de balayage de ligne **P22** ;
- **Balayage des flexibles après transfert** : la pression dans la citerne est ramenée à 2 bars s'il reste moins de 50 % du volume de la citerne par ouverture de la vanne de dégazage citerne **V2**, fermeture de la vanne **V2** quand la pression voulue est atteinte, balayage de la ligne de transfert jusqu'à la vanne de fond de la citerne **W11** à l'hydrogène gazeux (à l'hélium chez ArianeGroup) depuis l'installation client pendant 20 min, puis fermeture des vannes **W1** et **P22**, ouverture de la vanne de balayage de ligne **P17** et balayage à l'azote jusqu'au dégivrage de la sortie de la vanne **P17** (environ 20 min) et arrêt de l'azote ;
- **Préparation au départ** : débranchement de l'alimentation azote, débranchement du dispositif de sécurité flexible en rilsan, retrait et rangement des flexibles de dépotage et dégazage, bouchonnage des **R1** et **R2**, retrait de la mise à la terre.

² Polymère thermoplastique dérivé de l'huile de ricin, utilisé un temps comme fibre textile synthétique, puis pour des conduites flexibles, des filets de pêche, des cordes pour instruments de musique, des colliers de serrage etc.

³ Ce dispositif est une sécurité. En cas d'arrachage du flexible de dépotage, le flexible en rilsan se romprait, entraînant l'ouverture du circuit d'azote et ainsi la fermeture de la vanne de fond de la citerne **W11**.

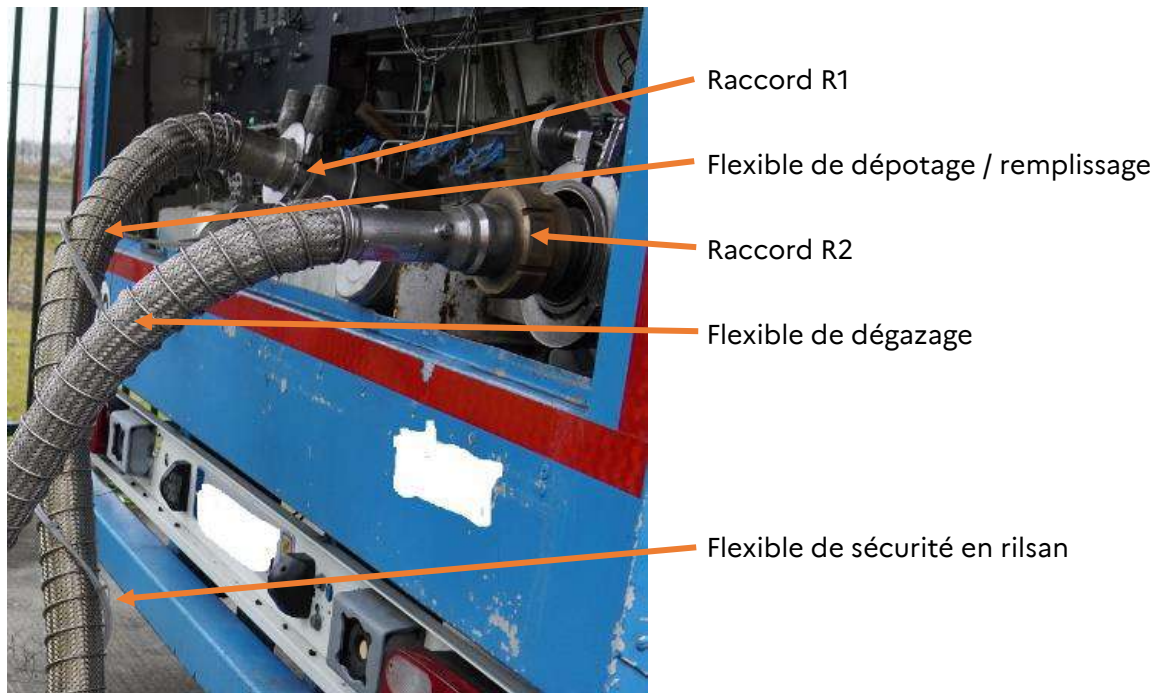


Figure 6 : raccordement des flexibles de dépotage et dégazage

III.3.2 Le circuit pneumatique

La semi-remorque est dotée d'une réserve d'azote qui permet l'alimentation des circuits de commande des vannes pneumatiques.

En substitution de cette voie d'approvisionnement, ces circuits peuvent être alimentés par l'installation fixe lors d'un dépotage. Dans cette situation, l'alimentation peut être réalisée soit avec de l'azote sous pression soit avec de l'hélium en fonction des procédures clients. Dans ces deux cas, la rupture de l'alimentation entraîne la fermeture des deux vannes pneumatiques (réchauffeur **W12** et entrée sortie de produit – **W11**) par manque de pression.

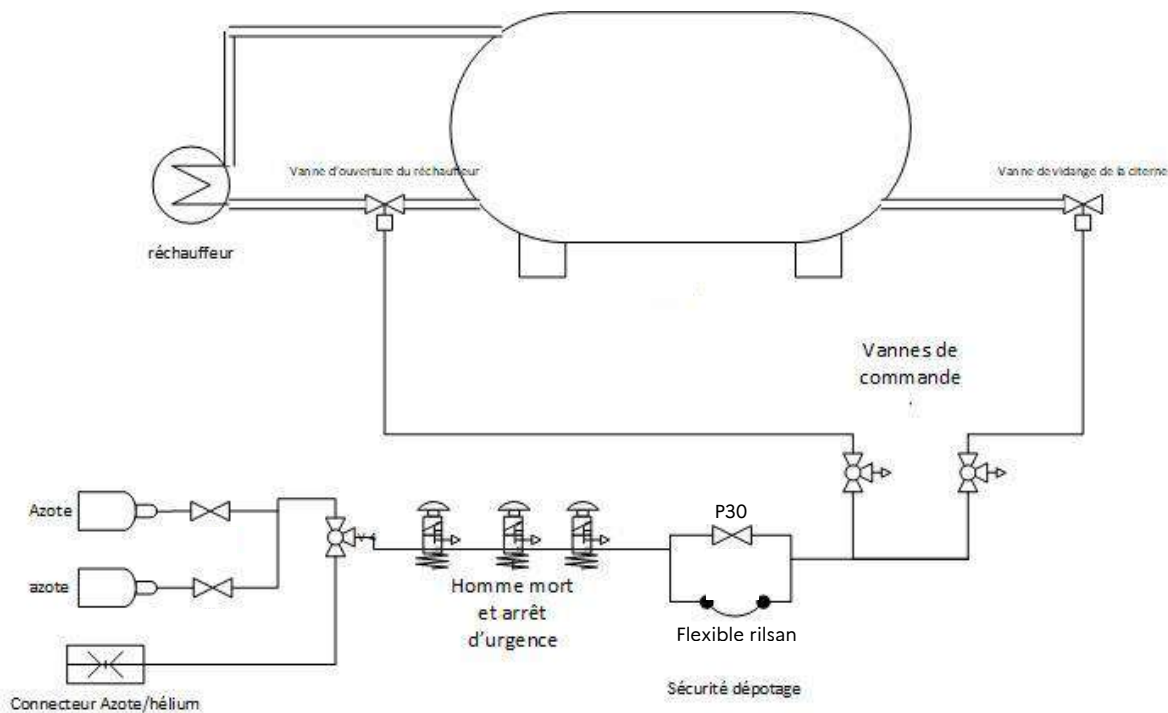


Figure 7 : schéma de principe du circuit pneumatique d'une citerne

La citerne est également munie de soupapes de sécurité pour éviter la surpression dans le réservoir, notamment durant le transport et le dépotage.

Lors du dépotage, les deux vannes à commande pneumatique **W11** et **W12** peuvent être refermées par manque de pression en cas d'arrachage du flexible « liquide » (mouvement incontrôlé du véhicule), d'absence du personnel de dépotage (fonction « homme-mort ») ou de l'actionnement d'un arrêt d'urgence

III.3.3 Les vannes à commande pneumatique

Les vannes à commande pneumatique sont constituées d'une partie clapet en contact direct avec l'hydrogène liquide et d'une partie actionneur (vérin pneumatique simple effet).

La partie clapet est constituée d'un corps de robinet fixe dans lequel est usiné un siège pour le clapet.

Joint en contact avec le siège

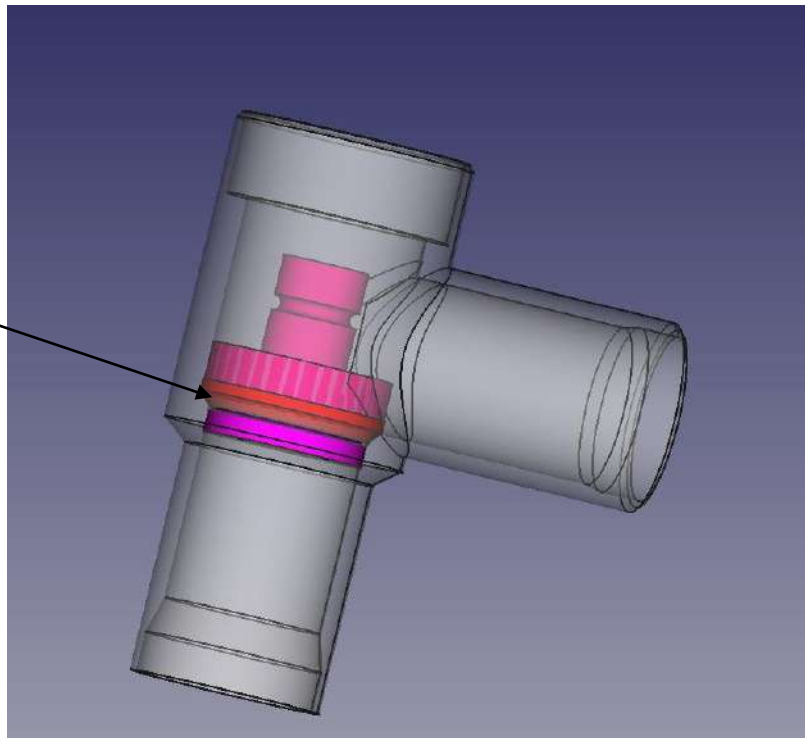


Figure 8 : Vanne en position fermée, le joint (en orangé) est en contact avec le siège

Sur la partie mobile est monté le clapet (joint racleur en plastique). C'est son application contre le siège via les ressorts de rappel du vérin qui assure l'étanchéité de la vanne.



Figure 9 : Joint racleur (en blanc)

La commande est réalisée par un vérin circulaire. La membrane vient, pour l'ouverture, comprimer les ressorts, entraînant vers le haut la commande.

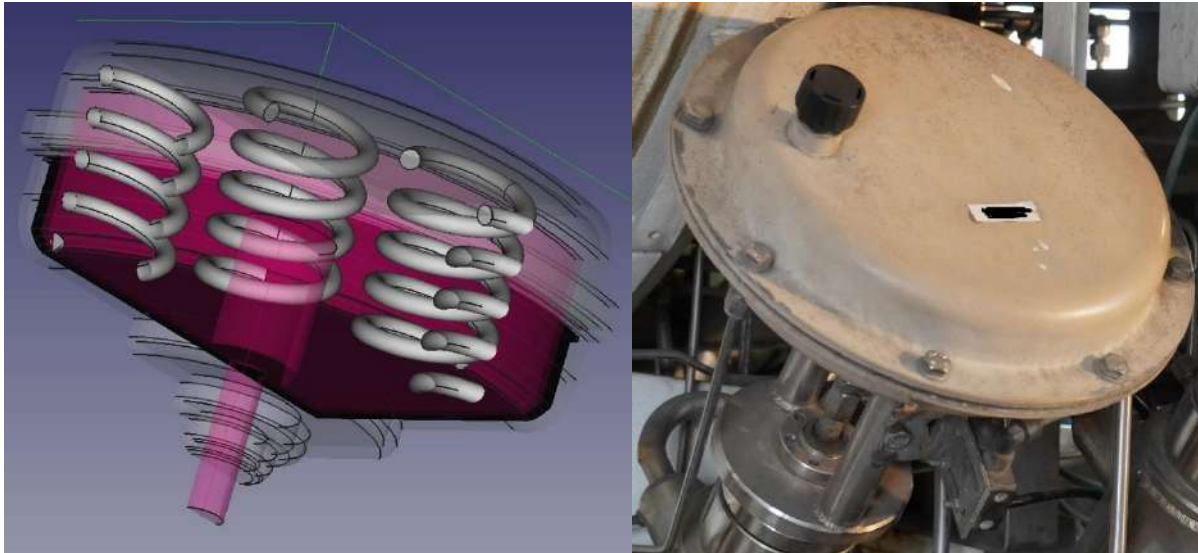


Figure 10 : Vue de la tête de la vanne pneumatique contenant les ressorts

III.4 L'hydrogène liquide et les gaz impliqués dans le processus de dépotage

III.4.1 L'hydrogène liquide

L'hydrogène liquide (H_2) est largement utilisé comme ergol (carburant) dans les moteurs de fusées, en particulier dans les étages supérieurs ou principaux des lanceurs spatiaux lourds. Le site ArianeGroup de Vernon s'en fait donc livrer régulièrement dans le cadre des essais menés sur les moteurs.

À température et pression ambiantes, l'hydrogène est gazeux. L'hydrogène liquide est obtenu par refroidissement à très basse température de l'hydrogène.

Il est transporté à l'état liquide. Sa température d'ébullition / liquéfaction est de $-252,9^{\circ}C$ dans les conditions normales de pression.

III.4.2 Les gaz utilisés dans le processus de dépotage

Avant et en fin de dépotage, un **balayage** est réalisé. Il doit remplacer l'air ambiant (azote, oxygène, humidité et autres gaz) par un gaz neutre dans toutes les sections qui seront en contact avec l'hydrogène liquide ou gazeux, avant l'introduction du produit, puis, en fin de dépotage, pour sécuriser le démontage ou la mise à l'air.

Ce balayage peut être réalisé soit à l'hélium, qui présente l'avantage de ne pas se liquéfier au contact de l'hydrogène liquide, soit à l'azote. Cette seconde option est plus répandue pour une question de coût.

Le balayage à l'azote nécessite une attention particulière car l'azote a une température de solidification de $-210^{\circ}C$ (63,2K) et une température de liquéfaction de $-195,8^{\circ}C$ (77,4K) sous 1 atmosphère. Ce balayage doit donc être suivi (avant dépotage) ou précédé (après dépotage) par un balayage à l'hydrogène gazeux. Dans le cas du poste de dépotage d'ArianeGroup, le balayage est réalisé à l'hélium.

Par ailleurs, **pour actionner certaines vannes pneumatiques** du circuit, un gaz comprimé (azote ou hélium) est utilisé pour assurer la pression nécessaire.

III.4.3 Les gaz de l'air indésirables dans le processus de dépotage

Plusieurs gaz naturellement présents dans l'air peuvent interagir de manière indésirable avec les équipements cryogéniques lors du dépotage d'hydrogène liquide (LH₂). L'azote (N₂), l'oxygène (O₂), le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O) présentent les risques les plus significatifs en raison de leurs propriétés physiques à basse température, justifiant la réalisation d'un balayage du circuit.

L'oxygène, dont la température de liquéfaction est de -183 °C, peut se condenser sur les parois froides des canalisations ou équipements en contact avec LH₂. Il se solidifie à des températures inférieures à -218,8 °C. Cette condensation locale d'oxygène pur est préoccupante car elle peut entraîner la formation de dépôts liquides fortement oxydants. Si ces dépôts s'accumulent dans des zones confinées, en particulier en présence d'hydrogène, le risque d'oxydation violente, voire d'explosion, devient non négligeable.

Le dioxyde de carbone, quant à lui, ne possède pas de phase liquide à pression atmosphérique. Lorsqu'il atteint sa température de sublimation, à -78,5 °C, il passe directement de l'état gazeux à l'état solide, formant ce qu'on appelle communément de la neige carbonique. Dans le contexte du dépotage cryogénique, cette particularité peut poser problème : si du CO₂ atmosphérique est piégé dans les lignes de purge ou de transfert, il peut se solidifier et provoquer des obstructions. Ces bouchons de neige carbonique risquent d'entraver le bon fonctionnement des détendeurs ou des filtres, perturbant ainsi l'équilibre thermique et mécanique du système.

Enfin, **la vapeur d'eau** constitue un autre facteur perturbateur important. En présence d'hydrogène liquide, la vapeur contenue dans l'air gèle instantanément sur les surfaces froides, entraînant la formation de glace. Cette glace peut s'accumuler au niveau des éléments mobiles ou sensibles comme les soupapes, les clapets ou les raccords d'étanchéité. Outre les risques de blocage mécanique, ces accumulations peuvent provoquer des fissurations ou des dégradations structurelles, notamment si des cycles de gel/dégel sont observés.

Gaz	Rôle	T° liquéfaction (°C)	T° solidification (°C)	Risques/Intérêt
LH ₂ (forme liquide) GH ₂ (forme gazeuse)	Produit principal	-252,9	-259,1	Hautement inflammable, très volatil
He	Balayage, pression	-268,9	Très haute pression	Parfaitement gazeux, inerte
N ₂	Balayage, pression, purge	-195,8	-210	Liquéfie facilement et solidifie au contact de LH ₂ → à utiliser à distance de l'hydrogène liquide et sous contrôle strict
O ₂ (air)	Air indésirable	-183,0	-218,8	Rendu liquide : réaction violente avec H ₂
CO ₂ (air)	Air indésirable	-78,5 (solide direct)	-78,5 (à 1 atm)	Risque de bouchon solide
H ₂ O (air)	Air indésirable	0	0	Gèle → colmatage, fuite, blocage

Figure 11 : Principales propriétés de l'hydrogène liquide et des gaz impliqués dans le processus de dépotage

III.4.4 Le phénomène de l'air liquide

Lorsque du LH₂ est transféré, sa très basse température (-253°C) peut entraîner la liquéfaction de l'air ambiant présent autour des équipements dans lesquels il circule (raccords cryogéniques, flexibles ou vannes), lorsque ceux-ci sont exposés à l'air ambiant. Ainsi, l'azote de l'air (point d'ébullition : -196°C) et l'oxygène (point d'ébullition : -183°C) se condensent et des gouttelettes apparaissent et s'écoulent des équipements concernés. Elles s'évaporent généralement avant de toucher le sol.

Ce phénomène est transitoire, il peut apparaître en début de dépotage compte tenu du refroidissement extrêmement rapide des surfaces, avant la formation de givre. Pendant la phase active du dépotage, une couche de glace (givre puis glace compacte) se forme rapidement à la surface des équipements exposés. Cette couche agit comme une barrière thermique, empêchant tout nouveau contact direct entre l'air et les surfaces très froides. En conséquence, le phénomène d'air liquide disparaît visuellement, remplacé par du givre ou de la glace.

III.5 L'organisation des dépotages

Les actions à réaliser lors des dépotages LH₂ sur le site ArianeGroup sont décrites et tracées dans des procédures et fiches d'intervention. Le site ArianeGroup possède des procédures spécifiques.

Le camion-citerne est pris en charge dès son arrivée sur le site, après les contrôles d'accès, pour une mesure de la température des essieux. Il est ensuite escorté sur l'aire de dépotage par un véhicule de lutte contre l'incendie.

En plus des dispositifs fixes sur le poste de dépotage, ce véhicule de lutte contre l'incendie est mobilisé et positionné à proximité de l'installation lors de chaque opération de dépotage. Il est équipé d'un canon en toiture (4 000 l/min).

Pour le dépotage, une fiche d'intervention, adaptée au modèle de citerne concernée est utilisée. Le déroulement de l'opération mobilise 3 personnes : un opérateur de pupitre (opérateur ArianeGroup) qui se trouve en salle de commande, un opérateur de banc (opérateur ArianeGroup) qui se trouve sur le poste de dépotage et le chauffeur de la citerne (personnel Air Liquide le jour de l'évènement) qui se trouve également sur le poste de dépotage.

Les actions à effectuer sont clairement attribuées à chaque intervenant et mobilisent alternativement les différents opérateurs qui sont en contact radio (moyen de communication entre les deux personnels ArianeGroup, l'opérateur de banc faisant le lien avec l'opérateur Air Liquide).

Pour le dépotage d'une citerne du type de celle impliquée dans l'évènement du 9 janvier 2025, la fiche d'intervention de 28 pages liste 447 étapes. Toutes ne sont pas à dérouler lors d'un dépotage puisque la procédure permet de traiter des cas différents comme la fin du dépotage avec une citerne vide ou non et des actions à réaliser en cas de difficulté rencontrée (de manière non exhaustive) à certaines étapes de la procédure.

IV. Déroulement de l'évènement

IV.1 Déclenchement de l'évènement

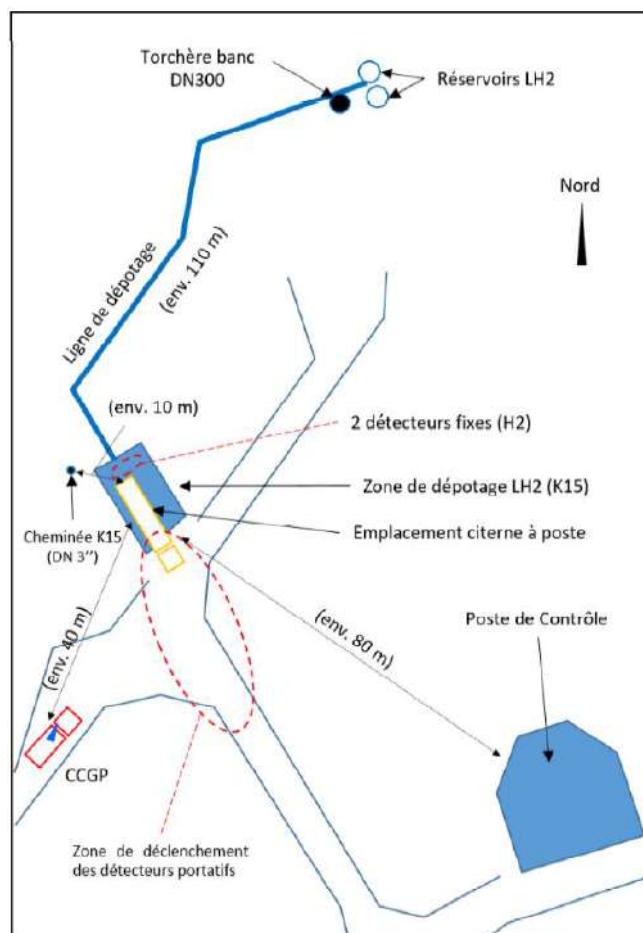


Figure 12 : Plan de masse de la zone de l'évènement
(Source : ArianeGroup)

Des essais moteurs devant être réalisés, il est décidé de compléter le remplissage des deux réservoirs du poste PF52. Il est prévu que la citerne se rende ensuite sur une autre zone de dépôtage du site pour finir de vider son chargement dans un autre réservoir.

Vers 11h50, alors que les deux réservoirs ont été complétés et que les opérateurs ont commencé l'étape de fin de dépôtage, et que la citerne est toujours connectée au poste de dépôtage, les opérateurs observent un écoulement liquide au niveau d'un des flexibles et les détecteurs de gaz se mettent en alarme.

Une suspicion de fuite "interne-externe"⁴ est considérée et le POI est déclenché.

La procédure de fin de dépôtage est interrompue et les opérateurs évacuent la zone.

L'aspersion d'eau est mise en route au niveau du poste de dépôtage tant au niveau de l'installation fixe que du véhicule de lutte contre l'incendie afin de réduire la probabilité d'inflammation d'un éventuel nuage d'hydrogène gazeux. Le personnel de la zone d'essai est mis en sécurité et un périmètre de sécurité de 900m est mis en place en lien avec les services de l'Etat.

Après analyse des éléments à disposition, la cellule de crise de l'exploitant réoriente la cause probable vers une fermeture incomplète de la vanne de fond de la citerne sans fuite interne/externe.

Une procédure est établie afin de fermer la vanne de fond de la citerne puis de finaliser la procédure de fin de dépôtage. Cette procédure, qui consiste notamment à reprendre le balayage à l'hélium, est mise en œuvre à 15h15. Des relevés de gaz montrent l'absence de concentration d'hydrogène dans l'air vers 16h00.

Le POI est levé à 18h00.

⁴ C'est-à-dire avec un déversement d'hydrogène liquide à l'extérieur des équipements.

IV.2 L'intervention des secours publics

Lors de cet évènement, le service départemental d'incendie et de secours est intervenu en renfort pour l'aspersion du camion-citerne.

La mise en place d'un périmètre de sécurité, en déclinaison des scénarios pré-identifiés dans l'étude des dangers a par ailleurs conduit à la fermeture d'une route en lien avec la police nationale pendant 2h40.

V. Compte-rendu des investigations menées

V.1 Reconnaissances de terrain

V.1.1 Dépotages témoins

Le BEA-RI a assisté à deux dépotages de LH₂, l'un réalisé avec la citerne impliquée le jour de l'évènement mais sur un autre site (dénommé site témoin dans la suite du rapport), l'autre sur l'aire de dépotage impliquée le jour de l'évènement mais à partir d'une autre citerne.

Ces observations permettent de dresser les constats suivants :

- La vanne de fond de la citerne air liquide se ferme progressivement, en quelques secondes. Ce mode de fermeture adouci permet de limiter les contraintes mécaniques sur les composants internes exposés à des températures cryogéniques. La vanne assure le passage de l'hydrogène liquide (LH₂) et sa fermeture est assurée par un système à ressorts agissant sur un piston, dont l'extrémité est équipée d'un joint d'étanchéité. Celui-ci vient se plaquer sur le siège de la vanne pour assurer la fermeture. Dans ces conditions de froid extrême, une fermeture trop rapide générerait un choc susceptible de fragiliser, voire de casser, la membrane. Le même phénomène de fermeture adouci est observé sur la seconde citerne observée ;
- Lors d'un dépotage, les phénomènes physiques suivants peuvent être observés :
 - o Phénomène d'air liquide observable en début de dépotage sur les canalisations mises en froid puis givrage ;



Figure 13 : Givrage du raccord du flexible de dépotage / remplissage

- Panache important en sortie de cheminée lors de la purge en fin de dépotage, avec givrage le long de la ligne de dégazage ;



Figure 14 : Givrage du flexible de dégazage avec panache de condensation (sur site témoin)

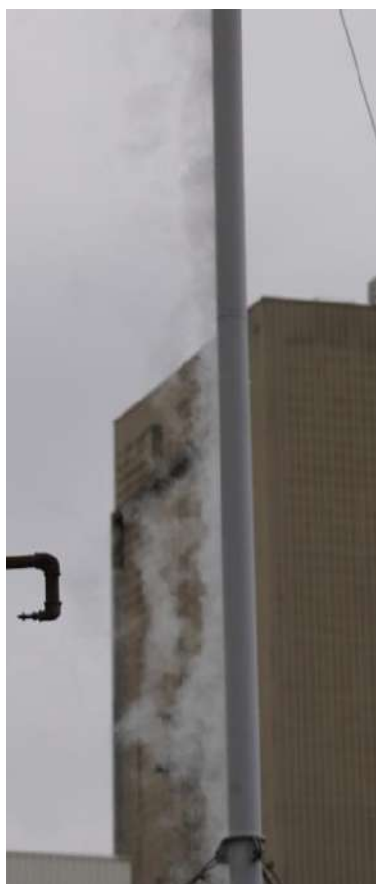
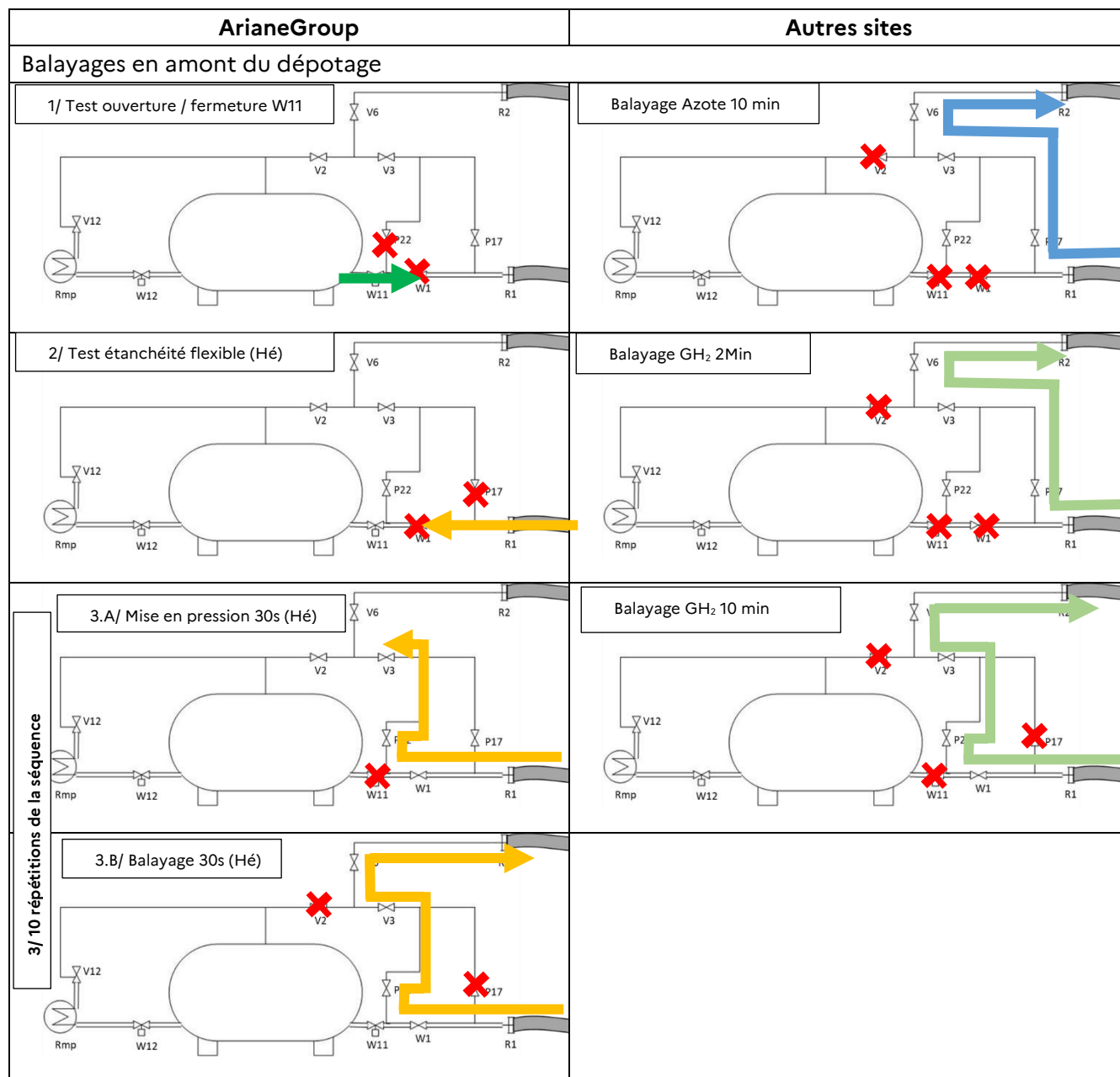


Figure 16 : Important panache émis par la cheminée (sur site témoin)

Figure 15 : Givrage de la cheminée de dégazage avec panache de condensation (sur site témoin)

- Les dépotages opérés chez ArianeGroup suivent une procédure spécifique qui diffère de la procédure suivie sur les autres sites. Les principales différences observables sont les suivantes :
 - o **Organisation** : chez ArianeGroup, deux opérateurs du site sont mobilisés (un opérateur sur le poste de dépotage et un en salle de commande). Ce sont eux qui déroulent la procédure, sur la base d'un formulaire papier dont chaque opérateur d'ArianeGroup a un exemplaire et qu'ils renseignent tout au long de l'opération. La procédure attribue clairement des rôles au personnel extérieur d'Air Liquide, à l'opérateur d'ArianeGroup sur le poste de dépotage et à celui qui est en salle de commande.

Sur les autres sites, le personnel d'Air Liquide (en binôme ou seul) travaille en général en autonomie pour réaliser le dépotage sur les installations de stockage de LH₂ qui sont sous-traitées à Air Liquide ;
 - o **Contrôle des mesures de maîtrise des risques** : des opérations supplémentaires sont réalisées chez ArianeGroup afin de vérifier l'efficacité de certaines mesures de maîtrise des risques définies pour le site (étapes 1/ et 2/ ci-dessous). Le contrôle du bon fonctionnement de la vanne W11, réalisé avant mise en pression de la citerne, conduit en particulier à permettre un début de déversement d'hydrogène liquide dans une section de canalisation non balayée au préalable (étape 1/ ci-dessous), sur la section W1 – W11.
 - o **Balayages** :
 - Sur les autres sites, les balayages de la ligne de dépotage sont en général réalisés à l'azote et hydrogène gazeux (GH₂) en aval de la vanne W1 et à l'hydrogène gazeux jusqu'à la W11. Chez ArianeGroup, ces balayages se font à l'hélium ;
 - Chez ArianeGroup, certains balayages de la ligne en amont et aval du dépotage (étapes 3 et 5 ci-dessous) sont réalisés par poussées successives d'hélium (compressions / détentes), alors que sur les autres sites, c'est un balayage continu qui est mis en place.
 - À la fin de l'opération de dépotage, un balayage est réalisé sur la ligne de dépotage en remontant par le flexible jusqu'à la vanne W11 qui a, au préalable, été fermée. Chez ArianeGroup, cette opération (étape 4 ci-dessous) est prévue pour durer 10min avec un balayage à l'hélium. Sur les autres sites, le balayage dure 20min avec utilisation d'hydrogène gazeux. C'est à la fin de cette étape, et avant le début de l'étape 5 que l'évènement du 9 janvier s'est produit.



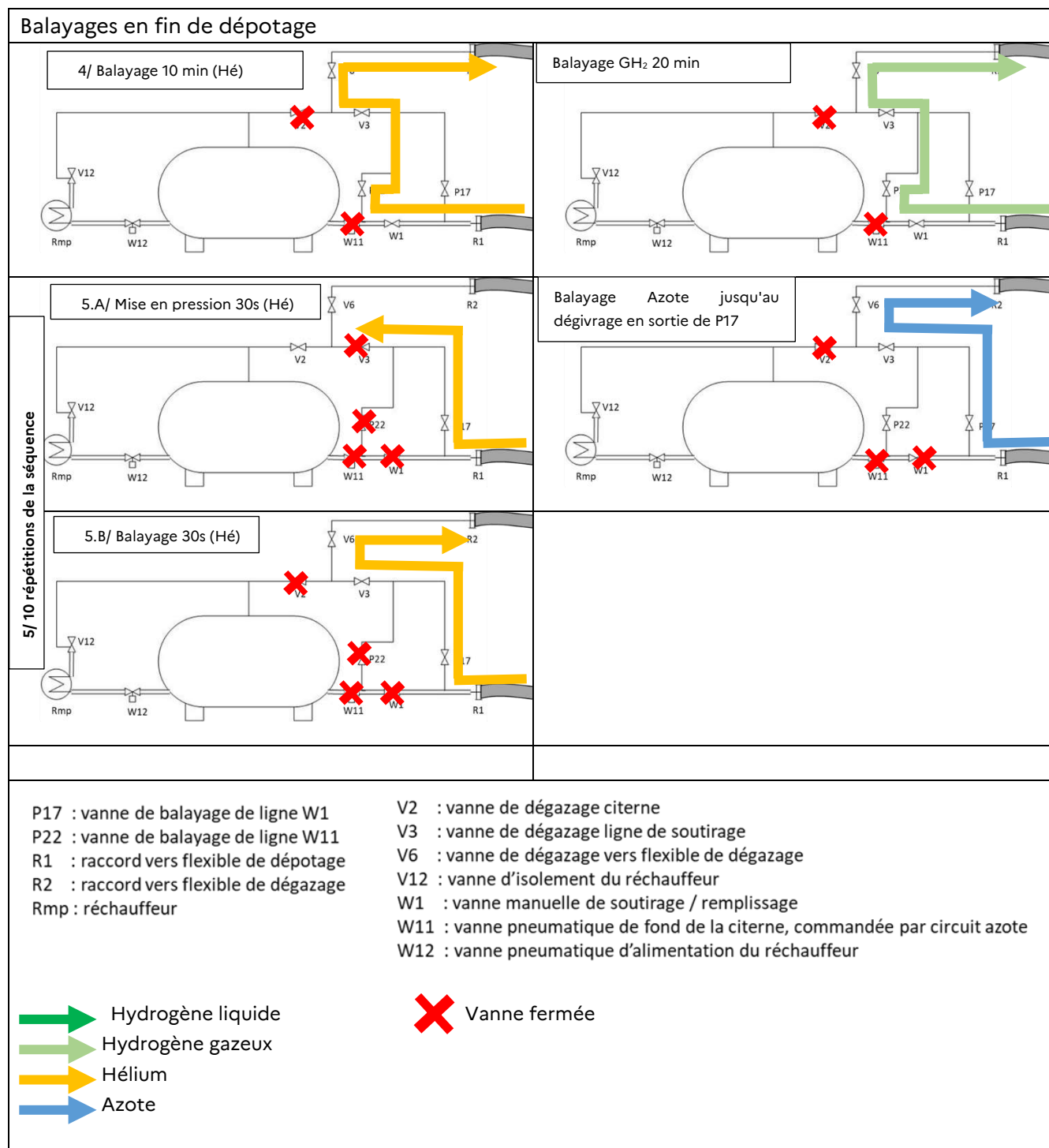


Figure 17 : Etapes en amont et aval du transfert de LH₂ chez ArianeGroup et sur d'autres sites

- **Différentiel de pression entre la citerne et le stockage** : la procédure générique d'Air Liquide prévoit que la pression du ciel gazeux de la citerne est ajustée à 1 bar au-dessus de celle du stockage du client pendant le dépotage. Chez ArianeGroup, ce différentiel de pression est de 2,5 bars (du fait notamment de la perte de charge liée à la longueur de la canalisation de transfert).

V.1.2 Inspection des vannes sur la citerne concernée

Le BEA-RI a assisté, dans le cadre d'une révision prévue de la citerne concernée, au démontage des différents éléments du circuit de commande. Notamment, il a été procédé au démontage de la vanne de fond de la citerne.



Figure 18 : Joint de la vanne présentant des traces de piqures

L'examen du joint montre des traces de piqures qui ne semblent pas remettre en cause son étanchéité en elles-mêmes, mais peuvent avoir aidé à l'accrochage d'impuretés.

Il a été également procédé à l'inspection du circuit pneumatique et plus particulièrement à l'examen des différentes mises à l'air libre.

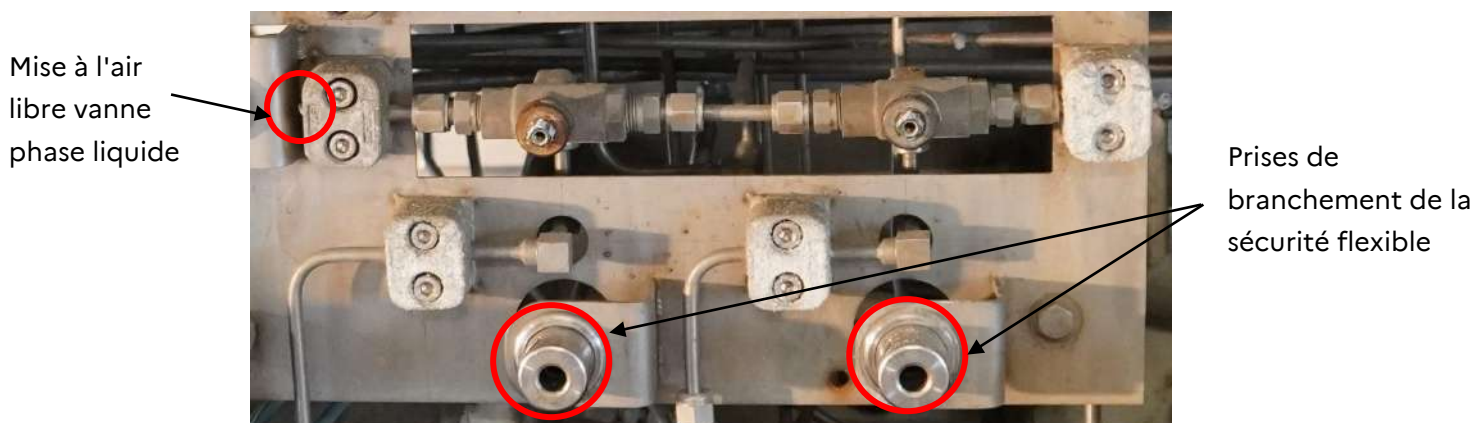


Figure 19 : Vue du circuit pneumatique

Il est à noter que les prises de branchement pneumatique de la sécurité du flexible sont munies d'un clapet anti-retour. De ce fait la portion de circuit situé en amont de la prise (cf figure 7 page 14) est isolé de la commande de la vanne et aucune mise à l'air libre n'est possible par ce biais-là. Seule l'action sur la commande de la vanne liquide permet à ce moment-là de la fermer.

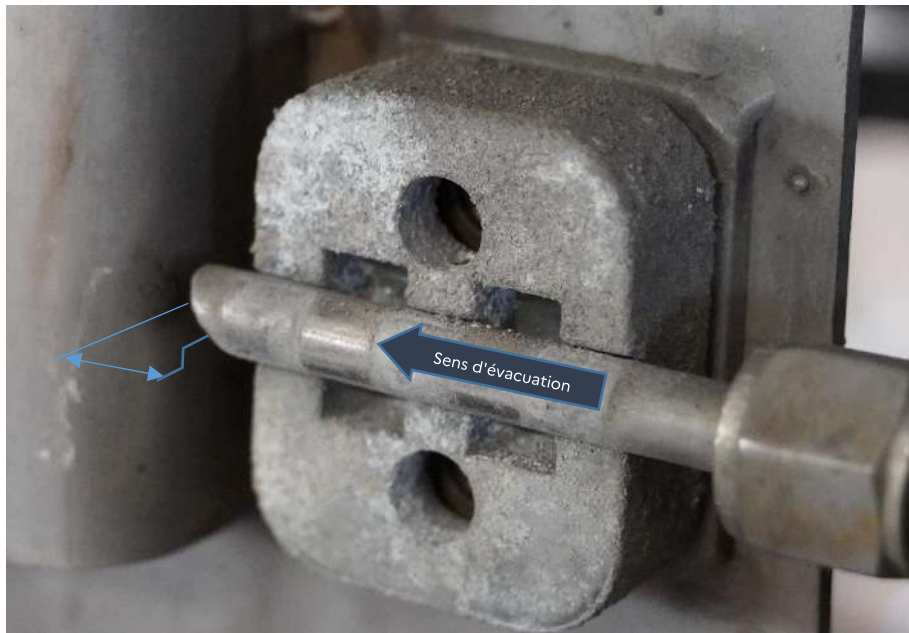


Figure 20 : Vue de la mise à l'air libre de la vanne de commande liquide

L'examen révèle le peu d'espace entre la mise à l'air libre de la vanne de commande liquide et le plus proche obstacle (cf. figure 20).

V.2 Analyses documentaires et entretiens

V.2.1 Analyse a postériori de l'évènement

L'analyse à postériori des données et événements rencontrés montre que :

- Les concentrations de gaz mesurées sur les détecteurs n'ont jamais atteint la limite inférieure d'explosivité⁵. La détection gaz fixe a affiché jusqu'à 9% de la LIE (valeur relevée à 12h16), et les détecteurs portatifs des opérateurs ont relevé jusqu'à 30% de la LIE.
- Des opérations visant à réaliser un balayage à l'hélium de 10 min remontant de l'installation client vers la vanne de fond de la citerne et s'évacuant par la vanne de dégazage n°1 sont prévues à la fin de l'opération de dépotage. L'heure de début de cette opération devrait être notée sur la fiche d'intervention du dépotage. Elle n'est en fait reportée ni sur la fiche renseignée au niveau du banc, ni sur celle renseignée au niveau du pupitre. L'analyse des enregistrements des mouvements montre que ce balayage a duré 6min et 22s au lieu des 10 min prévues.
- Une quinzaine d'actions de la check-list sont enregistrées sur les fiches d'intervention renseignées au niveau du pupitre de commande et au niveau du banc après cette opération de balayage.
- Les enregistrements et les entretiens réalisés ne permettent pas de situer exactement le moment où les capteurs de détection de gaz se sont déclenchés par rapport aux dernières opérations enregistrées sur les fiches d'intervention.

⁵ La Limite Inférieure d'Explosivité (ou LIE) est la concentration minimale d'un gaz ou d'une vapeur inflammable dans l'air (exprimée en % en volume) en dessous de laquelle il n'y a pas de combustion possible, même en présence d'une source d'allumage.

V.2.2 Conditions climatiques

Le 9 janvier 2025 à 11h50, en raison d'un vent quasi nul, d'une température extérieure basse (4°C), d'un taux d'humidité élevé et d'une atmosphère stable, le panache de vapeur d'hydrogène ne disposait pas de conditions de dilution efficace. Sa densité initiale plus élevée que l'air a pu provoquer une stagnation temporaire au niveau du sol, augmentant la concentration en H₂ autour du poste de dépotage. L'humidité ambiante élevée a pu également rendre le panache plus visible sous forme de condensation, sans dissipation rapide.

La procédure de dépotage du site ArianeGroup prévoit une limitation liée à la neige (interdiction de dépoter s'il neige compte tenu des risques liés à l'électricité statique que peuvent générer les flocons), mais rien n'est précisé concernant d'autres conditions atmosphériques. Le jour de l'évènement, le début du dépotage a été retardé à cause de la neige.

V.2.3 Retour d'expérience existant sur la difficulté rencontrée lors du dépotage

Air Liquide a réalisé des entretiens auprès de l'ensemble des chauffeurs habilités à la livraison d'hydrogène liquide chez ses clients afin de consolider un **retour d'expérience (RETEX) sur le problème rencontré**. Il a été possible de récupérer 6 questionnaires sur les 8 initialement attendus. Il en ressort que les réponses se révèlent être homogènes entre elles et mettent en avant que la majorité des chauffeurs interrogés ont déjà rencontré des problèmes d'étanchéité de la vanne W11, qu'ils qualifient de "rare" ou "très rare" (d'une fréquence estimée à 1 fois tous les 6 mois), mais jamais "fréquent".

Les chauffeurs ont indiqué que les solutions apportées pour résoudre le désordre lorsqu'il se présente sont le balayage de la vanne, le dégazage de la pression de la citerne, ou une combinaison de balayage et compressions détentes.

Cependant, lorsqu'on évoque des fuites liquides, les conducteurs sont moins nombreux à en avoir rencontré et ces fuites sont toujours considérées comme "faibles" ; elles se situaient aussi bien côté de la citerne, que du côté de l'installation du client, et étaient localisées au niveau des joints de dépotage ou à la borne client. L'arrêt du dépotage, le remplacement des joints et/ou un balayage prolongé ont permis de résoudre systématiquement le désordre observé.

V.2.4 Fiche d'intervention dépotage

La procédure de dépotage sur le site ArianeGroup précise (lignes n°213, 214) pour un arrêt de dépotage alors que la citerne n'est pas vide :

"sinon, cas où la citerne n'est pas vide :

Dérouler le paragraphe suivant :

Evacuation culot liquide entre [la vanne de fond de la citerne] W11 et [la vanne manuelle] W1

Important : cette opération doit se faire avec la citerne encore pressurisée pour éviter de remonter des éventuelles pollutions dans la citerne (dans le cas où [la vanne de fond de la citerne] serait fuyarde)".

La fiche d'intervention ne précise pas de marche à suivre dans le cas où la vanne W11 serait effectivement fuyarde.

VI. Conclusions sur le scénario de l'évènement

VI.1 Scénario

La mise en froid de la ligne de transfert débute à 10h18, avec près d'une heure de retard sur le planning initialement prévu compte tenu des conditions météorologiques (neige).

Les opérations se déroulent nominalement pour le raccordement de la citerne et l'opération de dépotage en elle-même.

Compte tenu des conditions météorologiques au moment de l'évènement, des enregistrements disponibles et de l'absence de défaut constaté sur la citerne postérieurement à l'évènement, le BEA-RI retient comme probable l'enchaînement suivant :

A la fin du dépotage, la vanne de fond de la citerne est actionnée en fermeture. Le mouvement de fermeture est visible mais l'étanchéité de la fermeture n'est pas totale soit du fait d'une impureté coincée sur le siège soit d'une pression résiduelle dans le circuit de commande liée à l'obturation partielle ou totale de la mise à l'air libre. Un léger débit de fuite persiste, la citerne étant toujours maintenue sous pression. Ce défaut n'est pas visible des opérateurs présents sur le banc de dépotage.

Le balayage à l'hélium de la ligne de dépotage en remontant par le flexible jusqu'à la vanne W11 est initié. Ce balayage évacue l'hydrogène liquide présent dans la ligne de transfert vers la cheminée de l'installation. La présence de liquide observée au niveau d'un des flexibles s'explique par la température très basse autour des lignes non calorifugées qui ont conduit à la liquéfaction de l'air ambiant au moment de cette évacuation (phénomène d'air liquide décrit au chapitre III.4.4). Compte tenu des conditions atmosphériques (décrites au chapitre V.2.2) et de la configuration de l'installation, le panache d'hydrogène qui s'est vaporisé est rabattu vers le poste de dépotage et entraîne le déclenchement des détecteurs.

Concomitamment, le temps de balayage à l'hélium est écourté à 6min et 22s au lieu des 10 min prévues, selon ArianeGroup, du fait des alarmes des détecteurs afin de mettre en sécurité les personnels. Cette durée n'a pas suffi à réchauffer assez la vanne W11 pour évacuer l'impureté et permettre sa fermeture complète. Le léger débit de fuite persiste. Il n'est pas possible de déterminer avec exactitude si le raccourcissement de la durée de balayage à l'hélium est lié au déclenchement des capteurs ou à un défaut dans le suivi de la durée de cette étape. La procédure de dépotage est interrompue.

Après analyse de la situation en salle, les actions définies puis mises en œuvre sur le banc de dépotage permettent de réchauffer la vanne W11 avec une reprise du balayage et de faire baisser la pression qui avait été maintenue dans la citerne. L'une de ces actions ou leur combinaison a permis la fermeture complète de la vanne W11.

VI.2 Facteurs contributifs

VI.2.1 Les conditions météorologiques

Lors de la fin de l'opération de dépotage d'hydrogène liquide, les conditions météorologiques locales étaient favorables à l'accumulation au sol de gaz froids issus des purges rejetées à la cheminée. Cette configuration a pu conduire à un déclenchement des détecteurs d'hydrogène, entraînant ainsi le déclenchement du POI et l'interruption avant son terme des opérations de fin de dépotage.

VI.2.2 L'absence de prise en compte d'une possible difficulté de fermeture de la vanne de fond dans la procédure de dépotage

Chez ArianeGroup, le dépotage est piloté par les personnels du site sur la base d'une procédure très détaillée. Le chauffeur de la citerne se limite à un rôle d'exécutant.

La possibilité d'un débit de fuite résiduel sur la vanne W11 est mentionnée sur la procédure ArianeGroup, mais ne fait pas l'objet d'un développement pour le cas où le phénomène serait effectivement rencontré, alors qu'elle détaille la marche à suivre pour d'autres anomalies possibles.

Le retour d'expérience empirique développé par les chauffeurs de citerne qui ont déjà été confrontés à un défaut de fermeture et qui ont identifié la manière de le résoudre (poursuivre le balayage et jouer sur la pression dans la citerne) mériterait d'être intégré à cette procédure.

VI.2.3 Une durée de balayage hélium insuffisante

Il n'est pas possible de déterminer avec exactitude si le raccourcissement de la durée de balayage à l'hélium est lié au déclenchement des capteurs ou à un défaut dans le suivi de la durée, mais cette durée s'est révélée insuffisante pour assurer le réchauffement efficace de la ligne de transfert.

VI.2.4 Difficulté de mise à l'air libre de la vanne de sécurité

Au regard des conditions météorologiques et du peu d'espace entre la mise à l'air libre de la vanne de commande liquide et le plus proche obstacle, une obturation partielle ou totale de la mise à l'air libre reste possible. Même si cette problématique n'a pas été remontée dans le retour d'expérience formalisé par Air Liquide, cette possibilité subsiste notamment en cas de débranchement anticipé de la sécurité de dépotage (position de P30 fermée à ce moment-là, cf. figure 7).

VII. Enseignements de sécurité

VII.1 La sensibilité de la manipulation de liquides cryogéniques

La manipulation de liquides cryogéniques s'opère à des températures très basses. A ces températures, la moindre présence d'impureté, qui peut être un simple gaz de l'air en petite quantité peut causer une perturbation dans les écoulements, voire une obstruction de tuyauterie ou gêner la fermeture d'une vanne de contrôle.

Les opérations d'entretien des systèmes pour supprimer toutes les impuretés ainsi que la mise en œuvre de balayages de durées suffisantes sont essentielles à la bonne marche des installations.

VIII. Recommandations de sécurité à destination de l'exploitant et du sous-traitant

Le BEA-RI émet les recommandations suivantes à la société ArianeGroup :

- Réviser la fiche d'intervention utilisée pour le dépotage de la citerne impliquée le jour de l'évènement pour intégrer la marche à suivre en cas de difficulté de fermeture de la vanne de fond de la citerne (W11) ;
- Examiner l'opportunité de définir de nouveaux paramètres météorologiques à suivre et respecter pour permettre la réalisation d'un dépotage.

Le BEA-RI émet les recommandations suivantes à la société Air Liquide :

- Capitaliser le retour d'expérience des chauffeurs de camion-citerne concernant la situation de difficulté de fermeture de la vanne de fond de la citerne (W11) et l'intégrer dans la procédure de dépotage générique ;
- Assurer la complète mise à l'air libre de la commande de la vanne de sécurité y compris en cas de retrait du rilsan.



Bureau d'enquêtes et d'Analyses
sur les Risques Industriels

MATTE / IGEDD / BEA-RI
Tour Séquoïa
92055 La Défense Cedex

+33 1 40 81 21 22
bea-ri.igedd@developpement-durable.gouv.fr

<https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/bea-ri-r549.html>