

SYSTEMES DE VAPORISATION CRYOGENIQUE PREVENTION DE LA RUPTURE FRAGILE DES EQUIPEMENTS ET CANALISATIONS

IGC Doc 133/06/E

Révision du Doc 133/05/E

Document traduit par l'AFGC en 2012

EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION AISBL

AVENUE DES ARTS 3-5 • B-1210 BRUSSELS
Tel : +32 2 217 70 98 • Fax: +32 2 219 85 14
E-mail : info@eiga.eu • Internet : <http://www.eiga.eu>



SYSTEMES DE VAPORISATION CRYOGENIQUE PREVENTION DE LA RUPTURE FRAGILE DES EQUIPEMENTS ET CANALISATIONS

RÉVISÉ PAR :

José BALLESTER RICART	PRAXAIR España S.L.
Martin DENNEHY	AIR PRODUCTS Plc
Lennart FREDRIKSSON	LINDE AG
Grant HOLLAND	BOC
Wolfgang OTTE	AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
Pierre PETIT	AIR LIQUIDE
Herman PUYPE	EIGA

Déclaration

Toutes les publications techniques éditées par EIGA ou sous son égide, et notamment ses codes de bonne pratique, les guides de procédures en matière de sécurité et toutes autres informations techniques contenues dans ces publications ont été élaborées avec le plus grand soin et établies avec les connaissances acquises des membres de EIGA ou de tiers à la date de leur publication. Elles n'ont la valeur juridique que de simples recommandations que les membres de EIGA ou les tiers ne sont pas tenus contractuellement de respecter. Elles ne peuvent faire l'objet vis-à-vis de quiconque, d'aucune garantie de la part d'EIGA.

EIGA n'a ni le pouvoir, ni les moyens de vérifier que les codes de bonne pratique et les guides de procédures sont effectivement et correctement interprétés et appliqués par l'utilisateur qui engage seul sa responsabilité à cet égard.

En conséquence, EIGA ne saurait en aucun cas être tenu pour responsable vis-à-vis de quiconque, de l'application par ses membres ou par toute autre personne, de ses codes de bonne pratique et guides de procédure.

Les publications d'EIGA font l'objet de révisions périodiques et il appartient aux utilisateurs de se procurer la dernière édition.

Table of Contents

1.	Introduction	1
2.	Champ d'application et objectifs	1
3.	Définitions	2
3.1	Rupture fragile	2
3.2	Ductile	2
3.3	Systèmes à sécurité positive	2
3.4	Systèmes de réduction de débit	2
3.5	Systèmes de restriction de débit	2
3.6	Dureté	2
3.7	Systèmes de fourniture sans interruption	2
3.8	Utilité et utilités	3
3.9	Vaporiseur	3
3.10	Pression	3
4.	Causes et conséquences de températures basses	3
4.1	Causes de températures basses	3
4.2	Conséquences d'une température basse	4
5.	Types de vaporiseurs	6
5.1	Vaporiseurs à air ambiant	6
5.2	Vaporiseurs à Haute Réserve Thermique (HRT)	6
5.3	Vaporiseur à Basse Réserve Thermique (BRT)	7
6.	Philosophie de conception	7
6.1	Sécurité intrinsèque	7
6.2	Analyse des risques	7
6.3	Fiabilité de l'approvisionnement du client	8
7.	Classement des dangers	9
7.1	Energie pression volume (PV)	9
7.2	Dangers dus aux fluides	9
7.3	Probabilité de basse température	10
7.4	Mode de fonctionnement	10
8.	Critères de conception sûre	11
8.1	Matériaux à la sortie des vaporiseurs	11
8.2	Vaporiseurs à air ambiant	11
8.3	Trois couches indépendantes de protection	11
8.4	Dispositifs de coupure automatique et vannes	12
8.5	Vannes d'étranglement	12
8.6	Dispositifs de détection de température	12
8.7	Installations de pompes	12
8.8	Vaporiseur à Basse Réserve Thermique (BRT)	12
8.9	Réservoirs tampons et leur emplacement	13
8.9.1	Emplacement des réservoirs tampons en acier au carbone	13
8.10	Autre installation possible de tampon Différents vaporiseurs montés en parallèle	15
9.	Considérations pour la protection contre les températures basses	15
9.1	Système de fourniture en continu	15
9.1.1	Matériaux	16
9.1.2	Système redondant	16
9.1.3	Orifice de restriction	16
9.1.4	Vannes d'étranglement	16
9.2	Exigence pour les fournitures interruptibles	16
9.2.1	Systèmes automatisés de déclenchement	16

9.2.2.	Seuils de température	16
9.2.3	Le SPTB pour les Vaporiseurs à Haute Réserve Thermique (HRT).....	17
9.3	IEC 61511	17
10.	Solutions.....	17
10.1	Considérations générales pour les SPTB.....	18
10.2	Réponses aux alarmes	18
10.3	Solutions recommandées pour des situations spécifiques.....	18
11.	Opérations.....	21
11.1	Surveillance des consommations	21
11.2	Inspection périodique.....	22
12	Essais périodiques	22
13	Formation du personnel de la société de gaz	22
14	Sensibilisation des clients	23
14.1	Contrat client	23
14.2	Formation et information du client.....	23
15	Références	24

1. Introduction

Il peut arriver que des fluides cryogéniques (ou froids) entrent par inadvertance dans les tuyauteries et les équipements d'un processus à cause d'un mauvais fonctionnement des systèmes de vaporisation de liquide cryogénique, ce qui peut entraîner une défaillance catastrophique due à la rupture fragile. Lorsque certains métaux, tels que les aciers au carbone, deviennent froids, ils subissent des modifications de leur structure, qui les rendent moins malléables, autrement dit, ils deviennent fragiles. D'autres métaux comme l'acier inoxydable, l'aluminium, le laiton, le cuivre, etc., ne présentent pas de transition ductile-fragile et restent malléables à basses températures. Cette transition ductile-fragile peut transformer un défaut existant dans le matériau en une fissure et même déclencher une fissure sans augmentation supplémentaire de stress. Une rupture fragile d'un élément est plus destructrice car la fissure se propage rapidement et les morceaux du matériau peuvent se détacher, alors qu'en cas de rupture ductile le matériau se déforme et la pression est évacuée d'une manière plus contrôlée.

2. Champ d'application et objectifs

Ce document s'applique aux systèmes de fourniture de liquide cryogénique, localisés soit sur le site du client ou sur le site de production, lorsque le liquide cryogénique est vaporisé et est alors utilisé soit comme source primaire ou comme source secondaire de produit gazeux,

On utilise en général la source secondaire comme alimentation de secours dans une usine de production quand celle-ci se déclenche ou bien est arrêtée, ou pour être prêt à répondre à une demande supplémentaire du client qui excéderait la capacité de production de l'usine de production (technique de l'écrêtage des pics)

Les fluides cryogéniques traités ici sont

- L'azote liquide
- L'oxygène liquide
- L'argon liquide
- L'hydrogène liquide
- Le méthane liquide
- L'éthylène liquide

Les systèmes de fournitures fonctionnent par vaporisation du liquide cryogénique, généralement en réponse à une diminution de la pression dans les tuyauteries.

Les systèmes sont composés de :

- Une alimentation liquide à partir soit d'un réservoir basse pression et d'un dispositif de pompe soit directement d'un réservoir en haute pression,
- Un système d'évaporation qui peut être du type air ambiant ou qui utilise une source d'énergie externe comme la vapeur, l'eau chaude, l'électricité, la flamme directe d'un brûleur, etc.

Ce document ne couvre pas les situations suivantes:

- La séparation d'air et les autres processus cryogéniques avec des colonnes, des séparateurs ou des réservoirs dans lesquels un courant de gaz venant d'une capacité est normalement alimenté à travers un équipement échangeur de chaleur en aval.
- Les canalisations dans lesquelles un fluide est détendu par une vanne ou une restriction avec une température résultante inférieure la température de transition ductile-fragile (TTDF) de la canalisation.
- Les réservoirs qui sont décomprimés rapidement. En effet comme le travail se passe dans un réservoir, par un gaz qui est détendu par son écoulement dans la vanne, la température dans le réservoir et la paroi du réservoir peut être abaissée.

Ce document a été écrit pour identifier les risques liés aux systèmes de vaporisation de liquide cryogéniques et pour recommander les mesures de sauvegarde à mettre en place. Il recommande les pratiques de sécurité pour la conception des nouveaux systèmes de vaporisation. Pour les systèmes existants une analyse de risque doit être effectuée afin d'établir si des modifications sont requises.

3. Définitions

3.1 Rupture fragile

La rupture Fragile est le nom donné à une défaillance causée par une fissure qui s'étend rapidement dans le matériau. Un matériau fragile a peu de résistance à la rupture une fois que la limite d'élasticité a été atteinte. Ces défaillances libèrent beaucoup d'énergie et sont dangereuses car des fragments du matériau peuvent être rejetés à de grandes distances.

3.2 Ductile

La propriété d'un matériau qui lui permet de s'allonger, avec une augmentation rapide des contraintes locales, avant de se rompre.

3.3 Systèmes à sécurité positive

Un système est considéré comme étant « à sécurité positive » si dans toutes les prévisions raisonnables de dysfonctionnements en service, la réponse d'ensemble de l'installation ne crée pas de situation dangereuse et qu'une réponse sûre de la performance peut être raisonnablement attendue.

3.4 Systèmes de réduction de débit

Ce sont des systèmes employant des vaporiseurs où il est accepté, par le client ou le processus, que le débit puisse être réduit. On doit concevoir le Système de Protection de Température Basse (SPTB) pour qu'il réduise le débit pour correspondre à l'énergie disponible dans le vaporiseur.

3.5 Systèmes de restriction de débit

Un orifice de restriction ou autre appareil fixe, correctement conçu installé immédiatement en aval du vaporiseur pour limiter le débit à une valeur maximale.

3.6 Dureté

La capacité d'un métal à répartir intérieurement n'importe quelle contrainte causée par une charge soudainement appliquée; c'est l'opposé de la « fragilité », qui implique la sensibilité à une rupture soudaine.

3.7 Systèmes de fourniture sans interruption

Ce sont des installations utilisant des vaporiseurs dans lesquelles, pour des raisons de sécurité, le système est conçu de telle sorte que le débit dans le procédé ou vers l'utilisateur final ne puisse pas être interrompu p.ex.

- Inertage de gaz pour les atmosphères, ou procédés dangereux
- Alimentation en oxygène d'un établissement de santé.

Les normes ci-après sont applicables pour ces situations :

NFPA 50 - Standard for Bulk Oxygen Systems at Consumer Sites [1].

NFPA 86C - Standard for Industrial Furnaces Using a Special Processing Atmosphere [2].

EN 737-3 2000 Systèmes de distribution de gaz médicaux Partie 3 Système de distribution pour gaz comprimés et vide [3] (cette norme est remplacée par la suivante)

NF EN ISO 7396-1 Novembre 2007 - Systèmes de distribution de gaz médicaux - Partie 1 : systèmes de distribution de gaz médicaux comprimés et de vide [4]

NFPA 99 - Standard for Health Care Facilities [5].

3.8 Utilité et utilités

Les termes utilité et utilités lorsqu'ils sont utilisés dans ce document désignent le moyen utilisé pour fournir la chaleur à un vaporiseur conçu pour vaporiser des liquides cryogéniques et incluent toutes les applications suivantes :

- L'alimentation électrique pour actionner les ventilateurs à air chaud ou à air ambiant, les soufflantes, les pompes à fuel ou à eau, les réchauffeurs piscines ou radiants ou les blocs de réchauffeur électriques.
- La fourniture de combustibles fossiles, y compris le gaz naturel et le fioul, qui sont brûlés pour générer de la chaleur ou de la vapeur.
- La vapeur fournie par un client ou par une autre source.
- Les autres sources de fluides pompés ou en circulation tels que les piscines, les flux d'eau chaude, d'eau glycolée, de fluides caloporteurs, ou toute forme de chaleur récupérée dans les processus ou les rejets.

Les utilités ne comprennent pas les vaporiseurs à air à ventilation naturelle ni les vaporiseurs à tirage forcé.

3.9 Vaporiseur

Un échangeur de chaleur qui fait changer l'état d'un liquide cryogénique en une vapeur par transfert d'énergie thermique d'une source externe vers le fluide.

3.10 Pression

Dans ce document « bar » indique une pression manométrique à moins d'annotation différente – c'est à dire, (bar abs) pour des pressions absolues et (bar dif) pour des pressions différentielles.

4. Causes et conséquences de températures basses

4.1 Causes de températures basses

Quelques unes des causes de basses températures à la sortie d'un évaporateur sont mentionnées dans le tableau ci-après :

Tableau 1 – Causes de températures basses

Type de vaporiseur	Cause de température basse	Exemple
Tous types	Le soutirage du client excède la capacité calculée, particulièrement pendant une longue période	Le client ajoute des équipements supplémentaires qui exigent des capacités de débit supplémentaire sans en informer le fournisseur de gaz.
Tous types	Le débit excède la capacité nominale du vaporiseur.	Une soupape de sécurité s'ouvre et reste ouverte. Mise à l'air prolongée en aval du vaporiseur
Tous types	La vanne de régulation de débit ou de pression de la canalisation s'ouvre en grand.	Actionneur de vanne de régulation en panne Dysfonctionnement du positionneur de la vanne de régulation
Tous types	La régulation tombe en panne de telle sorte que cela crée une basse température dans le vaporiseur	Défaut de la régulation de base du débit ou de la température I
Vaporiseur ambiant ou à tirage forcé, ou vaporiseur ambiant à ventilateur	Vaporiseur lourdement gelé à cause de débits élevés, d'écrêtages, déclenchement de l'usine principale etc.,	Les vaporiseurs sont calculés pour un débit donné dans un temps donné. Si ceci est dépassé, la température du gaz en sortie peut se refroidir.
Vaporiseur ambiant	Vaporiseur lourdement gelé	Avec un système d'inversion de

ou à tirage forcé, ou vaporiseur ambiant à ventilateur		vaporiseur, une vanne d'inversion qui n'a pas fonctionné pour mettre dans la position correcte amène à cette situation.
Vaporiseur ambiant ou à tirage forcé, ou vaporiseur ambiant à ventilateur	Une température ambiante basse pendant une longue période ne permet d'assurer le dégivrage du vaporiseur.	Echec de l'inversion programme (si installée) Mauvais positionnement du vaporiseur qui l'empêche de dégivrer. Changements au voisinage de l'évaporateur qui affecte son efficacité (mur construit à proximité)
Tous les vaporiseurs piscines	Pas d'eau dans la piscine ou niveau bas.	Vanne de purge restée ouverte. Fuite dans le bain d'eau. Manque d'alimentation en eau/vapeur.
Vaporiseur à vapeur	La vanne de régulation de vapeur ne s'est pas ouverte. Défaut d'alimentation en vapeur de la chaudière	Défaut de l'actionneur de la vanne. Dysfonctionnement du positionneur. Dysfonctionnement du régulateur. La vapeur surchauffée évapore l'eau de la piscine
Vaporiseur à réchauffeur électrique	Défaut du chauffage électrique	Défaut d'alimentation électrique. Défaut dans l'armoire électrique. Éléments de réchauffage grillés
Piscine à eau réchauffée par un brûleur	Défaut de gaz combustible	Défaut du système de contrôle du brûleur. Perte dans l'alimentation en carburant
Vaporiseurs à tirage forcé	Arrêt du ventilateur Les réchauffeurs de dégivrage (s'ils existent) ne fonctionnent pas	Coupure de l'alimentation électrique. Défaut dans l'armoire électrique. Défaut mécanique du ventilateur.
Vaporiseurs avec éléments de réchauffage	Le réchauffeur n'arrive pas à maintenir la température du gaz au dessus de la température minimale exigée.	Coupure de l'alimentation électrique. Défaut dans l'armoire électrique. Éléments de réchauffage grillés Débit trop grand
Vaporiseurs avec pompage d'un fluide de réchauffage.	La source de chaleur est en défaut, faible débit ou pas de débit de fluide caloporteur	Coupure de l'alimentation électrique. Défaut dans l'armoire électrique. Défaut mécanique de la pompe.

4.2 Conséquences d'une température basse

Tout matériau qui est sensible à la rupture fragile a une « température de transition ductile-fragile » (TTDF). La température TTDF est la température en dessous de laquelle la valeur d'impact Charpy montre une diminution très rapide et la rupture se produit sans déformation plastique, p.ex. sans que se produise un étirement ou une déformation notable. La relation entre la ductilité et la température pour un acier à basse teneur en carbone typique est illustrée dans la Figure 1. L'acier à basse teneur en carbone montre une diminution dans l'énergie de fracture avec la diminution de la température. Des matériaux communs comme le carbone et les alliages d'acier en basse teneur ne sont pas appropriés pour les équipements à basse température et sont sensibles à la fracture fragile à ces températures inférieures.

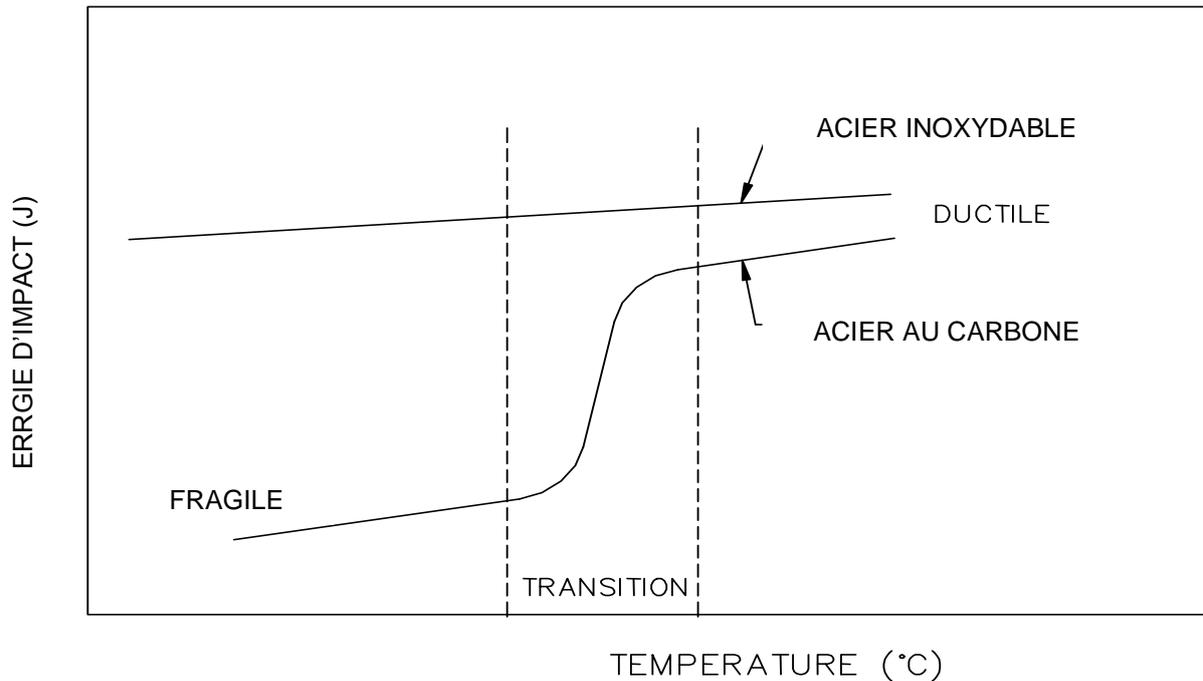


Figure 1: Relation entre l'énergie d'impact et la température pour les aciers au carbone et les aciers inoxydables austénitiques.

Les aciers inoxydables austénitiques sont résistants et restent ductiles aux basses températures.

Les matériaux tels que les aciers inoxydables, l'aluminium, le laiton et le cuivre ne montrent pas de transition ductile/fragile et peuvent être utilisés jusqu'aux températures cryogéniques.

Toutes les parties d'équipement (tuyauterie, réservoirs, vannes etc.) qui pourraient être soumises à des températures basses doivent être évaluées pour assurer qu'elles sont conformes pour supporter cette température.

Lorsqu'il est envisagé d'utiliser des matériaux non métalliques en aval de vaporiseurs, les propriétés à basse température du matériau doivent être évaluées avant la décision de son utilisation.

Une rupture fragile peut résulter des conséquences dangereuses ci-après :

Dégagement d'énergie par Pression Volume (PV) : Le dégagement de l'énergie de pression contenue dans l'équipement peut causer des dommages ou des blessures par la force du souffle sur les structures et le personnel. Les capacités tampons, et les canalisations associées aux vaporiseurs et construites en matériaux qui sont sensibles à la rupture fragile présente un risque particulier pour le personnel à cause de l'augmentation de l'énergie PV disponible et l'augmentation conséquente de la zone où peuvent se produire des blessures ou des blessures mortelles.

Fragmentation des équipements : La propulsion, loin du point d'origine et à grande vitesse, de fragments et de parties entières de l'équipement défaillant, est capable de causer des blessures au personnel ou des dommages aux installations adjacentes à l'équipement fragmenté.

Perte d'étanchéité : L'échappement incontrôlé du fluide de procédé contenu a le potentiel d'augmenter les conséquences dangereuses au-delà de la zone affectée par la fragmentation de l'équipement et la surpression. Les fluides de procédé qui sont rejetés peuvent créer des risques pour le personnel et les équipements en fonction des propriétés physiques et chimiques du gaz.

Epanchements de liquides cryogéniques : Les liquides cryogéniques qui s'échappent de l'équipement peuvent provoquer de grands déversements liquides et des nuages denses de vapeurs (brouillards). Brûlures cryogéniques, manque de visibilité et dommages collatéraux aux équipements sont autant de possibilités.

Les fluides toxiques auront des effets défavorables sur la santé du personnel, la mort est possible s'il y a eu une exposition suffisante à une concentration toxique du fluide de procédé. Aucun fluide toxique cryogénique n'est traité dans ce document, mais les conséquences d'une rupture fragile, par exemple celle d'un vaporiseur d'azote cryogénique utilisé pour l'inertage d'une usine chimique, peuvent provoquer le dégagement de matières toxiques du processus de l'utilisateur.

Les fluides inflammables tels que l'hydrogène, l'éthylène et le méthane formeront un nuage ou un jet de vapeur combustible. L'inflammation du nuage provoquera une surpression s'ajoutant aux effets de la libération de l'énergie de pression. Des jets de flammes, feux éclairs, feux en nappes peuvent continuer après l'échappement du produit et provoquer des brûlures du personnel et/ou des dommages aux équipements.

Le dégagement d'oxygène créera une atmosphère suroxygénée qui peut favoriser la combustion rapide de beaucoup de matériaux.

Un dégagement asphyxiant (p.ex. azote, argon) causera la formation d'atmosphère sous-oxygénée avec le risque de décès ou de blessures des personnes dans l'atmosphère sous-oxygénée.

Brûlures par le froid : un risque secondaire est celui de brûlures par le contact de la peau avec des tuyauteries froides ou de gaz froid s'échappant des réservoirs.

Disponibilité de la fourniture de gaz : La fragilisation et la rupture du système conduira à une interruption de la fourniture du client, ce qui, dans certains cas, peut créer des risques supplémentaires pour le client. L'arrêt par déclenchement d'une alarme de basse température interrompra aussi la fourniture du client, mais dans ce cas l'interruption peut être rétablie beaucoup plus vite que dans le cas d'une rupture fragile.

5. Types de vaporiseurs

Ce document couvre les types d'évaporateurs suivants :

5.1 Vaporiseurs à air ambiant

Dans les vaporiseurs à air ambiant, les courants de convection de l'air atmosphérique, tout près des tubes à ailettes, utilisent la chaleur sensible de l'air ambiant pour fournir la chaleur de vaporisation et augmenter la température du gaz en sorte du vaporiseur à une valeur inférieure à celle de l'air ambiant.

5.2 Vaporiseurs à Haute Réserve Thermique (HRT)

Un vaporiseur HRT est celui qui a une réserve significative d'énergie stockée en cas de coupure de courant, de dysfonctionnement d'énergie d'entrée ou dans des conditions de surcharge. En cas de défaut des utilités, le temps pour la que la température tombe en dessous de la température de fragilisation est de plusieurs minutes ou plus. Un dysfonctionnement de l'arrivée d'énergie peut venir d'un manque de vapeur, ou de fioul du brûleur, ou du chauffage électrique d'un vaporiseur piscine ou encore de la glace et du givre accumulé dans un vaporiseur à tirage forcé ou à air ambiant.

Des exemples de vaporiseurs HRT sont :

- **Réchauffeurs piscine** - un bain d'eau est maintenu à la température désirée au moyen d'une circulation d'eau chaude ou d'injection de vapeur ou de réchauffeurs électriques ou encore de réchauffeurs à brûleur d'hydrocarbures. Un serpentin de réchauffage ou faisceau échangeur dans la piscine, utilise la chaleur de l'eau pour vaporiser le liquide cryogénique et pour fournir une surchauffe pour augmenter la température du gaz en sortie. La masse thermique de l'eau aide à réduire les variations de la température de la sortie du processus.
- **Echangeurs à bloc métallique à réchauffage électrique** – l'énergie électrique est utilisée pour chauffer le bloc, dans les réchauffeurs électriques enchâssés dans des blocs métalliques. Le serpentin de vaporisation est aussi enchâssé dans le bloc et de cette manière la chaleur est transmise du bloc au fluide cryogénique pour vaporisation et surchauffe.
- **Vaporiseurs à air ambiant à tirage forcé** : Un ventilateur sert à souffler de l'air à la surface des tubes à ailettes et ainsi utiliser la chaleur sensible de l'air ambiant pour fournir la chaleur latente de vaporisation et élever la température du gaz en sortie à une valeur inférieure à la

température de l'air. Le vaporiseur a une capacité de vaporisation réduite quand le ventilateur n'est pas en service.

- **Vaporiseurs à air ambiant avec réchauffeurs en sortie** : Des réchauffeurs électriques sont installés en aval du vaporiseur à air ambiant pour fournir la surchauffe et augmenter la température de sortie du vaporiseur au dessus de la température minimale permise en aval du système.
- **Vaporiseur à air ambiant avec un système d'inversion** : Deux vaporiseurs ou deux groupes de vaporiseurs, montés en parallèle où le débit est alterné, entre les vaporiseurs ou les groupes, pour permettre le dégivrage d'un vaporiseur ou d'un groupe.

5.3 Vaporiseur à Basse Réserve Thermique (BRT)

Un BRT est un vaporiseur qui a peu ou pas de réserve d'énergie restante au moment d'une coupure de courant, de dysfonctionnement de l'entrée d'énergie ou en cas de surcharge. En cas de défaut de l'utilité, la température peut tomber en-dessous de la température de fragilisation en moins d'une minute. Les matériaux de construction du vaporiseur et la quantité de chaleur contenue dans le média de transfert de chaleur (l'eau par exemple) définissent la réserve thermique.

Des exemples de vaporiseurs BRT sont :

- **Les vaporiseurs avec pompage du fluide de réchauffage sans réserve**, par exemple, la température ambiante, l'eau chaude ou froide, la chaleur sensible de l'eau étant utilisée pour fournir la chaleur de vaporisation et pour augmenter la température de sortie du gaz.
- Vaporiseurs chemisés à vapeur directe : La vapeur est injectée dans un échangeur de chaleur à un ratio contrôlé pour se condenser sur les tubes et ainsi la chaleur latente de la vapeur est utilisée pour vaporiser le liquide cryogénique et pour surchauffer le gaz jusqu'à la température ambiante ou au dessus. Si le débit de vapeur varie, il n'y a pas de réserve thermique significative pour aider à réduire la variation de la température à la sortie du processus.

6. Philosophie de conception

6.1 Sécurité intrinsèque

Pour la fragilisation à froid, un système intrinsèquement sûr est celui où la température du gaz en sortie n'a aucune possibilité de tomber en dessous de la température minimale des matériaux des tuyauteries et des équipements associés. Dans ce cas, aucune mesure de protection n'est requise et en conséquence, ceci devrait être l'option à préférer pour l'installation.

Un exemple serait un système de vaporisation dont tous les composants et tuyauteries en aval, y compris les points d'utilisation finaux, sont construits en matériaux appropriés pour les températures cryogéniques (p.ex. acier inoxydable, cuivre, laiton).

6.2 Analyse des risques

Dans tous les autres cas, le système complet doit être évalué dans une revue des risques et faire l'objet d'une analyse des risques (Cela comprend tous les systèmes de mesure du processus, le système de surveillance et de contrôle des débits et températures). Cette évaluation peut être faite de manière générique. Il est nécessaire d'évaluer quand des défaillances du système sous pression sont possibles et leurs conséquences doivent être réduites partout où c'est possible (par exemple en éliminant les capacités tampons si elles ne sont pas requises).

Cette analyse des risques doit prendre en compte :

- La probabilité de survenance d'une température basse, en prenant en compte le type de vaporiseur et le mode de fonctionnement existant ou prévu.
- Les conséquences d'une température basse, en prenant en compte la nature du fluide, l'énergie stockée, l'emplacement de l'équipement et la probabilité de la présence de personnel à proximité.
- La présence de toute couche de protection existant dans les domaines comme l'ingénierie générale des procédés les systèmes de base de conduite de processus.
- La présence d'alarmes auxquelles il peut être répondu de manière opportune et efficace.

- Toutes les autres mesures d'atténuation ou les facteurs qui réduisent la probabilité ou les conséquences des événements p.ex. la fréquence des inspections de contrôle de formation de glace ou du givrage des tuyauteries etc.

Ces facteurs devraient être pris en compte pour déterminer la probabilité de défaillance à la demande exigée pour tout de système protection contre les températures basses.

La norme internationale IEC 61511 [6] donne une méthodologie pour déterminer la probabilité de défaillance à la demande d'un système de protection contre les températures basses, en relation avec un objectif défini de ratio de risques.

Dans l'idéal, l'étude de dangers et l'analyse des risques doivent inclure l'installation du client. Lorsque ce n'est pas possible, à cause d'un manque d'information du système du client, alors des limites de fournitures claires doivent être établies avec les paramètres normaux et anormaux. La spécification du système de protection contre les températures basses peut utiliser, en combinaison avec toutes les sécurités énumérées dans les paragraphes qui suivent. Toutes les sécurités indiquées n'ont pas besoin d'être installées mais la conception du système doit incorporer des sécurités suffisantes de sorte que l'analyse du système de protection résulte en un risque bas acceptable.

Typiquement les sécurités sont des systèmes et composants conçus pour accomplir ce qui suit :

- Minimiser la probabilité de consommation inhabituelle qui pourrait causer l'entraînement ou le transport de vapeurs froides ou de liquides des vaporiseurs dans les installations en aval, par exemple en étranglant le débit jusqu'à une limite maximale ou en installant une restriction fixe de débit.
- Surveiller et détecter la basse température, les débits élevés de liquides froids ou la perte de fourniture de chaleur aux échangeurs.
- Des dispositifs de coupure automatiques pour arrêter le débit du processus.
- Installer un vaporiseur ou un système de fourniture de gaz de recharge.

Typiquement, l'équipement de surveillance avec ses alarmes et ses déclenchements, tels qu'exigés par l'analyse des risques, inclus ce que suit :

- Une détection de température basse dans les flux du processus sortant des vaporiseurs.
- Une détection de la perte des utilités aux unités de chauffage des vaporiseurs.
- Une détection de température basse ou de pression basse dans l'arrivée d'utilité d'un système de vaporisation.

Les dispositifs de déclenchement peuvent inclure ce qui suit :

- Des verrouillages pour arrêter le débit du gaz de processus sortant du vaporiseur ou du réchauffeur.
- Des verrouillages pour stopper les pompes.
- Des vannes d'arrêt en ligne pour n'importe lequel des équipements énumérés ci-dessus, y compris les réservoirs de stockage.

La probabilité de défaillance à la demande des sécurités doit être prise en compte dans l'analyse des risques. Ces données peuvent être disponibles auprès du fabricant de l'équipement, des données de la société de gaz ou de sources publiées reconnues.

Tout changement ultérieur dans la conception ou dans les opérations doit être sujet à une révision de l'étude de dangers et de l'analyse des risques.

6.3 Fiabilité de l'approvisionnement du client

L'impact des sécurités proposées sur la fiabilité de l'approvisionnement du client doit être pris en compte dans l'analyse de risque. Ceci est particulièrement important pour les systèmes de fourniture sans interruption. Là où c'est exigé, l'augmentation de la fiabilité du maintien en service du système peut être améliorée, par exemple par la redondance des composants ou des systèmes (p.ex. 2 sur 3 mesures des capteurs de température, vannes d'arrêt doublées, chaînes de vaporisation doublées) ou encore par l'amélioration du choix de matériaux pour avoir un système à sécurité intrinsèque.

7. Classement des dangers

Faisant partie du processus d'analyse des risques, la probabilité et les conséquences des événements de température basse doivent être pris en compte. La gravité relative des conséquences et la probabilité relative des événements déclencheurs peuvent être classées. Les paragraphes suivants donnent des indications générales sur le classement des risques.

7.1 Energie pression volume (PV)

Le dégagement de l'énergie de pression contenue dans l'équipement peut causer des dommages ou des blessures par la force du souffle sur les structures et le personnel. La propulsion loin du point d'origine et à grande vitesse, de fragments et de parties entières de l'équipement défailant, est capable de causer des blessures au personnel ou des dommages aux installations adjacentes à l'équipement fragmenté. Les capacités tampons et les canalisations de grands diamètres construites en matériaux sujets à la rupture fragile et qui sont associées à des vaporiseurs, représentent un danger particulier pour le personnel. En effet, l'énergie élevée de Pression Volume (PV) libérée en cas de rupture, augmente la zone dans laquelle peuvent se produire des blessures ou décès accidentels par le souffle de la vague de surpression. La gravité du danger peut être classée en échelle dégressive, comme ci-après, où P est la pression maximale en service en bar effectifs et où V est le volume du récipient en litres.

Table 1 - Classement de l'énergie PV

Niveau de gravité PV	Type	Exemple
P3	Vaporiseur où le produit de la pression maximale en service (bar) par le volume en eau de la capacité tampon (litres) est plus grand que 180 bar. litres Ou bien Le produit de la pression maximale en service (bar) par le diamètre intérieur de la tuyauterie de sortie (mm) est plus grand que 3500 bar.mm	Capacité Tampon en aval.
P2	Vaporiseur où le produit de la pression maximale en service (bar) par le diamètre intérieur de la tuyauterie de sortie (mm) est plus grand que 1000 bar.mm mais inférieur ou égal à 3500 bar.mm Ou bien : le produit de la pression maximale en service (bar) par le volume en eau de la capacité tampon (litres) est inférieur ou égal à 180 bar. litres	Tuyauterie aval de grand diamètre. Exemple : pression maximale en service 17,5 bars, tuyau de diamètre intérieur 200mm (DN 8 pouces)
P1	Vaporiseur où le produit de la pression maximale en service (bar) par le diamètre intérieur de la tuyauterie de sortie (mm) est inférieur ou égal à 1000 bar.mm	Petit diamètre de tuyauterie aval. Exemple : pression maximale en service 10 bar, tuyau diamètre intérieur 100mm (DN 4 pouces)

Note : Les valeurs indiquées ci-dessus sont basées sur une revue des groupes et catégories détaillées dans la Directive des Equipements sous Pression, PED 97/23/CE [7]

7.2 Dangers dus aux fluides

Un liquide cryogénique s'échappant d'un équipement peut avoir pour effet un grand épanchement de liquide et un nuage (brouillard) de vapeur. Des brûlures cryogéniques, le manque de visibilité, des dommages collatéraux aux équipements et des blessures au personnel, tout est possible dans ces conditions. La gravité de ce danger peut être classée dans une échelle dégressive comme indiqué ci-après :

Table 2 - Classement des dangers dus aux fluides

Niveau de gravité du danger	Type de danger en relation avec la gravité PV	Exemple
H3	Toxiques ou inflammables	La rupture de la canalisation en aval du vaporiseur peut résulter en un échappement de gaz combustible du système de l'utilisateur ou directement d'un vaporiseur d'hydrogène, de méthane ou d'éthylène liquides
H2	Oxygène pour les PV classés P3 et P2	Un échappement d'oxygène liquide causera la formation d'une atmosphère suroxygénée qui peut provoquer la combustion vive de beaucoup de matériaux. Les personnes à proximité qui fument, conduisent des véhicules ou font des travaux par point chauds sont particulièrement en danger.
H1	Inertes pour toutes les classes de PV et l'oxygène pour le PV classé 1	Un échappement de gaz asphyxiant (p.ex. de l'azote ou de l'argon) causera la formation d'une atmosphère sous-oxygénée

7.3 Probabilité de basse température

La probabilité d'occurrence d'un évènement de basse température est affectée par la conception du processus et le degré de réserve de chaleur du vaporiseur. La probabilité du danger peut être classée dans une échelle dégressive comme indiqué ci-après.

Table 3 - Classement de la probabilité d'une occurrence de basse température

Niveau de probabilité de basse température	Type
L2	Vaporiseurs à Haute Réserve Thermique (HRT) tels que des évaporateurs piscines chauffées par la vapeur, des brûleurs à fioul ou par des réchauffeurs électriques. Vaporiseurs avec tirage forcé ou vaporiseurs à air ambiant avec réchauffeur en sortie ou avec système d'inversion.
L1	Vaporiseurs à air ambiant sans système d'inversion.

Note : Les vaporiseurs à Basse Réserve thermiques sont spécifiquement exclus du tableau 4 et des tableaux 6.1, 6.2 et 6.3 pour les raisons développées au paragraphe 8.8.

7.4 Mode de fonctionnement

La probabilité d'occurrence d'une basse température est affectée par le mode de fonctionnement du vaporiseur. La probabilité du danger peut être classée dans une échelle dégressive comme indiqué ci-après.

Table 4 - Classification de type de service

Mode de fonctionnement	Type
S2	Alimentation en continu ou secours utilisé en écrêtage des pics.
S1	Alimentation de secours uniquement

8 Critères de conception sûre

8.1 Matériaux à la sortie des vaporiseurs

Un système de déclenchement n'est pas requis, lorsque la canalisation en aval d'un vaporiseur cryogénique, y compris les tuyauteries d'alimentation du client et l'équipement de processus associé, est fabriquée entièrement en matériau approprié aux températures cryogéniques.

Tout système de vaporisation requiert une longueur de tuyauterie conçue pour les conditions cryogéniques en sortie du vaporiseur. La longueur de tuyauterie cryogénique doit être suffisante pour que la température du gaz, dans des conditions perturbées qui mènent éventuellement à un déclenchement de l'installation, n'amène pas l'équipement en dessous de sa limite de transition ductile-fragile, avant que l'action corrective n'intervienne.

Toute instrumentation de détection de basse température, requise pour ce système, doit être installée au début de cette longueur de tuyauterie cryogénique pour donner à l'instrumentation le temps de réagir à un changement des conditions de sortie.

Toutes les tuyauteries et les équipements (p.ex. les détendeurs et les vannes manuelles) installés dans la longueur cryogénique de la tuyauterie doivent être spécifiées conforme au service cryogénique.

Pour les dispositifs de surpression, situés à la sortie d'un vaporiseur de liquide cryogénique, la tuyauterie d'entrée du dispositif de surpression et celle de sortie lorsque c'est approprié, doivent être spécifiées en matériau conforme au service cryogénique. Normalement les dispositifs de surpression doivent être dimensionnés pour les conditions de gaz chaud qui sont supposées arriver en conditions normales de service. Cependant ils doivent être capables de supporter les conditions cryogéniques dans le cas de surcharge du vaporiseur ou de sa perte de chaleur qui pourrait se passer dans une condition de blocage pendant laquelle le dispositif de surpression pourrait se mettre en fonction.

La flexibilité adéquate de la tuyauterie doit être maintenue pour tout le système en aval du vaporiseur y compris jusqu'à la limite de fourniture avec le client.

8.2 Vaporiseurs à air ambiant

Les vaporiseurs à air ambiant sont plus sûrs que ceux dont la conception exige une source de chaleur externe. Le dimensionnement de l'unité prend en compte les conditions ambiantes attendues, la durée de service continu prévue du vaporiseur, le débit et le mode de consommation déclarés par le client. Le vaporiseur à air ambiant qui a été correctement dimensionné va plus probablement empêcher une température basse dangereuse d'arriver dans les conditions données, que les vaporiseurs avec utilités. Cependant il y a toujours quelques risques d'apparition de conditions dangereuses de basse température (p.ex. le service continu, avec une formation de glace importante et pas de dégivrage).

Les systèmes d'approvisionnement en gaz les plus fiables utilisent les vaporiseurs à air ambiant chaque fois que possible.

8.3 Trois couches indépendantes de protection

Les systèmes de protection contre les températures basses comprennent typiquement trois composants :

- Dispositif(s) de détection de température.
- Contrôleur logique
- Dispositifs d'arrêt.

Un contrôleur logique peut être un système à relais ou un contrôleur logique programmable (PLC) ou un autre système de contrôle électronique.

Là ou deux SPTB, ou plus, sont fournis, les composants des SPTB devraient être indépendants l'un de l'autre afin de réduire le potentiel de défaut en mode commun, c'est-à-dire que les SPTB sont des couches indépendantes de protection.

8.4 Dispositifs de coupure automatique et vannes

N'importe lequel des moyens de coupure automatique suivants est acceptable :

- Vanne de sortie de vaporiseur à fermeture automatique
- Vanne d'entrée de vaporiseur à fermeture automatique
- Coupure du moteur de la (des) pompe(s) d'alimentation de liquide au vaporiseur.

Lorsque des vannes d'arrêt automatiques sont utilisées, elles doivent être de préférence conçues pour se fermer par défaut (NF) en cas de coupure de courant ou de manque de fluide d'instrumentation. Les vannes à ouverture par défaut (NO) ne doivent pas être utilisées sur les systèmes de vaporisation, à moins qu'une analyse détaillée des risques n'indique que cela est acceptable.

Il peut être acceptable d'incorporer la fonction de coupure d'urgence dans une vanne automatique existante (p.ex. en installant une électrovanne NF sur l'arrivée d'air de commande d'une vanne automatique fermée par défaut). Un tel système doit être conçu de manière adéquate dans ce but et configuré pour permettre des essais périodiques de la fonction de coupure et aussi rétablir le débit sur la sonde de température après qu'une coupure ait eu lieu.

Cependant, comme indiqué dans le tableau 1 (Causes de températures basses), la défaillance d'une boucle de régulation de base peut aussi être la cause d'une basse température, donc ceci doit être pris en compte lors du choix de la solution de SPTB.

Du gaz liquéfié ne doit pas être piégé entre des vannes de fermeture à opération automatique ou manuelle ou des clapets anti-retour, sans que cette partie de l'installation ne soit équipée de soupapes de sécurité thermiques.

8.5 Vannes d'étranglement

Les vannes d'étranglement et les circuits de contrôle doivent être conçus pour réduire le débit vers l'utilisateur final pour correspondre à une baisse de l'énergie disponible au vaporiseur

Une fonction de contrôle de la température est souvent utilisée pour agir sur la vanne de contrôle de la canalisation. Elle réduit le débit de produit lorsque la température commence à baisser empêchant ainsi une situation de basse température et un déclenchement potentiel par la suite.

Si le résultat de la fonction de réduction de débit ne suffit pas à contrôler efficacement la température du gaz en sortie de l'évaporateur, une coupure du débit doit se produire, à moins qu'une analyse détaillée des risques n'indique que ce n'est pas acceptable ou pas nécessaire.

8.6 Dispositifs de détection de température

Les capteurs de température utilisés dans les systèmes de protection des températures basses doivent être installés dans le flux de gaz près de la sortie du vaporiseur. Des capteurs simples ou des systèmes à choix entre deux capteurs peuvent être requis en fonction de l'exigence de probabilité de défaillance à la demande. Pour des raisons de fiabilité, un système à deux choix sur trois peut être nécessaire pour activer un déclenchement.

Les exigences de maintenance et d'essais devraient être prises en considération pour le choix d'un dispositif et en concevant son installation. Par exemple, le problème est bien connu des dispositifs à capillaires qui sont montés sans puits thermométrique et ne peuvent donc être testés qu'à l'arrêt.

8.7 Installations de pompes

Lorsque des pompes cryogéniques sont utilisées pour alimenter un vaporiseur en gaz liquéfié, c'est la capacité de la pompe qui détermine le débit maximum disponible pour le client et pour cette raison, la capacité du système de vaporisation doit être adaptée à la capacité de la pompe. Un signal de température basse peut être utilisé pour stopper le moteur de la pompe, assurant ainsi un dispositif de déclenchement en température basse.

8.8 Vaporiseur à Basse Réserve Thermique (BRT)

Les vaporiseurs à vapeur à faisceau tubulaire et les vaporiseurs à fluide de réchauffage pompé, sans réserve thermique, ne sont pas recommandés pour les nouvelles installations à cause de la baisse de

température extrêmement rapide constatée en sortie. Lorsque leur utilisation est envisagée par manque de place disponible une analyse détaillée des risques est requise pour justifier leur utilisation.

8.9 Réservoirs tampons et leur emplacement

8.9.1 Emplacement des réservoirs tampons en acier au carbone.

Les réservoirs tampons installés en aval des systèmes de vaporisation ne doivent être utilisés que s'ils sont essentiels parce qu'ils présentent un risque particulier pour le personnel à cause de l'augmentation de l'énergie pression-volume (PV) libérée en cas de rupture à température basse et à cause de l'élargissement de la zone où les blessures ou accidents mortels peuvent arriver par la vague de surpression.

Lorsqu'ils sont utilisés, les réservoirs tampons doivent se situer dans un endroit où le risque que du liquide froid s'introduise à l'intérieur soit minimum. En fonction du type d'installation, différents endroits de fourniture sont possible :

8.9.1. a Installation type 1 Alimentation en continu

Installations avec un réservoir de liquide, un système de vaporisation, une capacité tampon : Si possible la capacité ne devrait pas être raccordée sur la ligne principale mais sur une ligne dérivée.

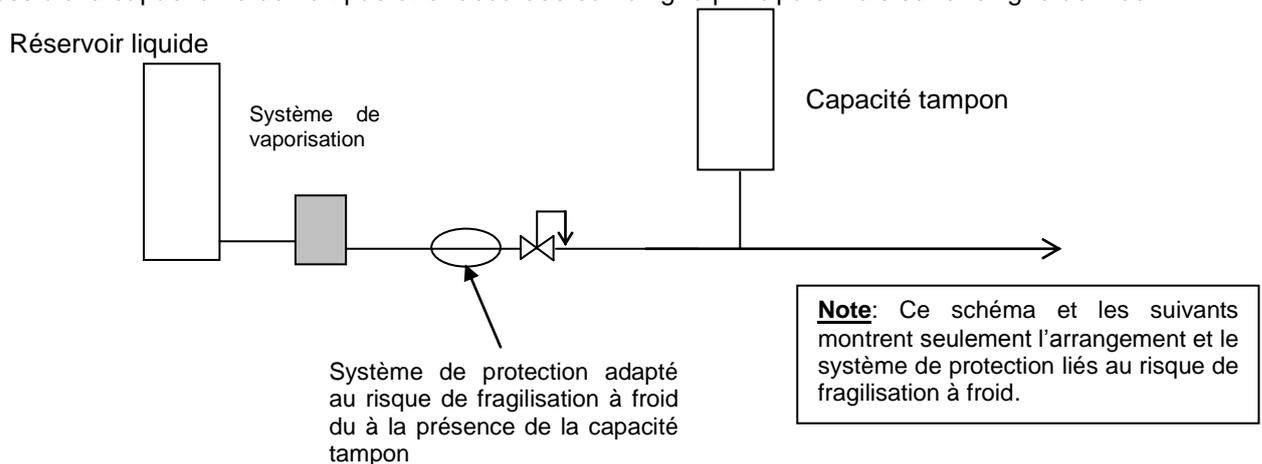


Figure 2 : Schéma 1 – Installation de tampon préférée pour le service en continu

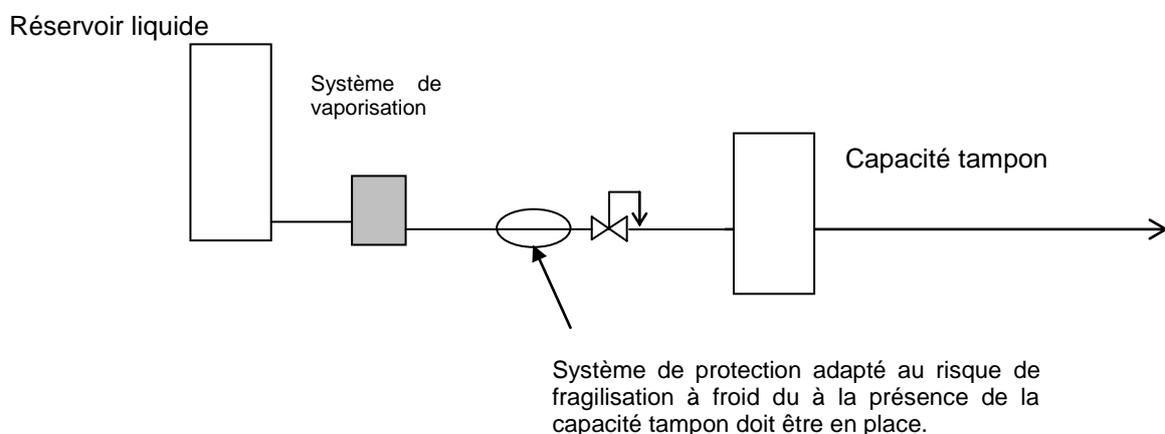


Figure 3: Schéma 2 – Autre installation possible de tampon pour service continu

Dans les deux cas (tampon installé sur un ligne dérivée ou tampon installé sur la ligne principale) un système de protection adapté au risque de fragilisation à froid du tampon doit être installé en amont de ce réservoir tampon.

8.9.1. b Installation type 2: Alimentation en secours avec écrêtage des pics.

Installations avec un réservoir de liquide, un système de vaporisation, un générateur de gaz sur site et une capacité tampon.

Il y a deux positionnements possibles du réservoir tampon :

1. Lorsque c'est possible il doit être installé sur la ligne du générateur de gaz sur site, en amont du raccordement du système de vaporisation sur la ligne principale ou sur une dérivation et protégé par un clapet anti-retour. Voir le schéma 3 ci-dessous. Dans cette configuration, avec le tampon installé sur la ligne de sortie de unité sur site, le buffer n'entre pas en ligne de compte pour décider si oui ou non il faut installer un système de protection en aval du vaporisateur et quand il faut le concevoir. Le réservoir tampon est protégé de par sa position.

2. Il peut aussi être installé en aval du système de vaporisation (sur la ligne principale ou sur une dérivation) mais dans ce cas un système de protection adapté à la protection du réservoir tampon contre le risque de fragilisation à froid doit être installé en aval.

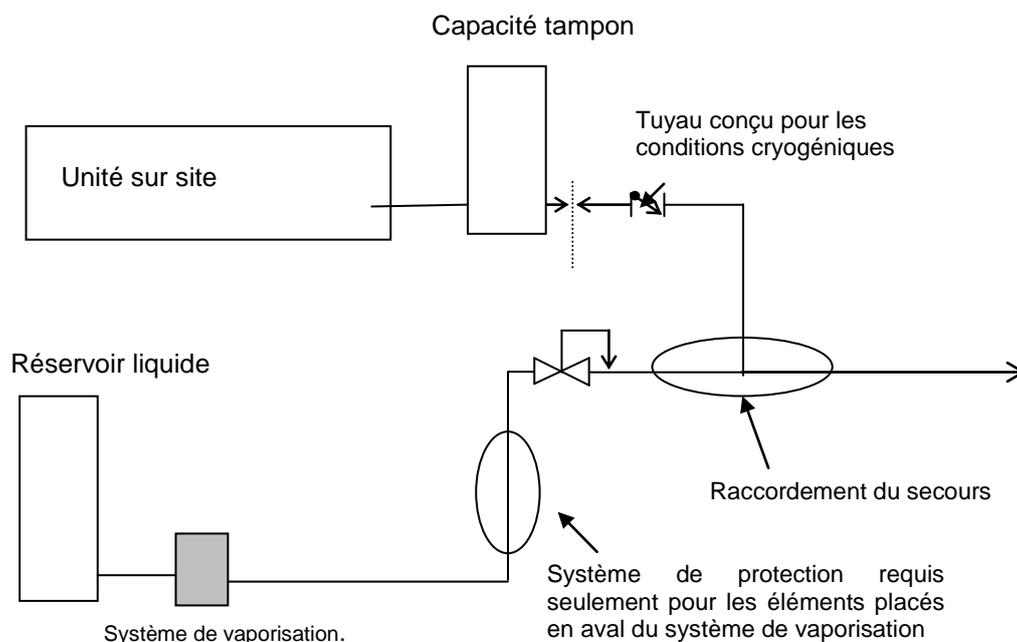


Figure 4: Schéma 3 – Installation du tampon préférée pour le service en secours

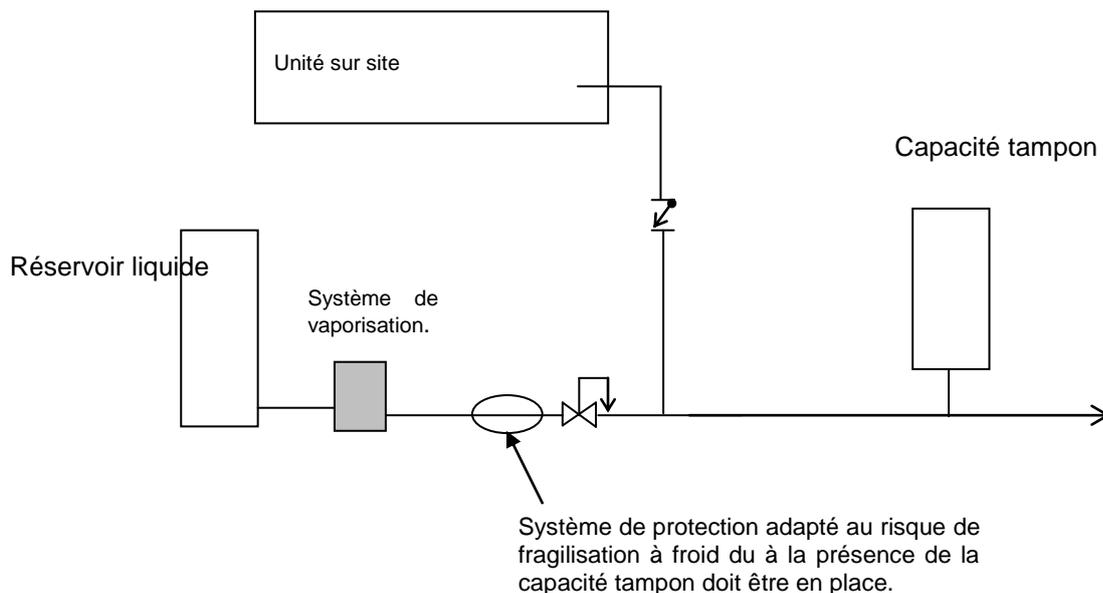


Figure 5 : Schéma 4 - Autre installation possible de tampon pour service de secours

8.10 Autre installation possible de tampon Différents vaporiseurs montés en parallèle

Différents vaporiseurs montés en parallèle peuvent créer des situations à risque (p.ex. vaporiseur(s) à air ambiant en secours d'un vaporiseur piscine chauffée à la vapeur, ou addition d'un second vaporiseur d'un fabricant différent avec des performances différentes etc.).

Si les paramètres hydrauliques et thermiques des deux systèmes de vaporisation ne sont pas identiques les débits liquides passeront préférentiellement dans le plus petit des vaporiseurs qui généralement a une chute de pression inférieure. Comme le plus petit vaporiseur devient plus froid sa capacité est réduite et la chute de pression se réduit encore (car plus de liquide est présent dans les tubes).

Si cela continue, tout le liquide passera dans le plus petit vaporiseur et l'autre sera complètement inutilisé.

La température de sortie peut ensuite tomber en dessous de la température de calcul, créant un danger. Pour cela il est important d'équilibrer le flux entre les vaporiseurs, pendant la mise en service de réception, en ajustant les vannes d'entrée ou de sortie pour éviter ce danger potentiel.

9 Considérations pour la protection contre les températures basses

9.1 Système de fourniture en continu

Ce type de système est utilisé pour un client ou pour un processus utilisateur final, lorsque :

- Un arrêt qui interrompt complètement le débit de processus vers le client ne peut être toléré pour des questions de sécurité.
- Lorsque la limitation du débit est utilisée, ceci doit être accepté par le client.

Les exigences pour les débits sans interruption au point d'utilisation peuvent être remplies de quatre manières, voir les alinéas 9.1.1 à 9.1.4.

A cause de l'importance de la continuité de fourniture, l'installation d'une alarme de débit élevé et/ou d'une alarme de température basse peut, dans certains cas, augmenter la fiabilité de la fourniture. Le paragraphe 10.2 décrit les exigences pour la réponse aux alarmes.

9.1.1 Matériaux

Utilisation de matériaux compatibles à l'usage cryogénique (c'est-à-dire l'acier inoxydable, les alliages à haute teneur en nickel, le cuivre, les joints compatibles, etc.) dans tout le système et jusqu'à la limite de fourniture. Le client doit être dûment informé que l'installation, jusqu'à l'utilisation finale, doit aussi être compatible avec l'utilisation cryogénique. La flexibilité adéquate de la tuyauterie dans toute la gamme de température est inhérente à cette approche.

9.1.2 Système redondant

Utilisation d'un système de fourniture redondant, indépendant, fournissant le débit aux mêmes points d'utilisation. Chaque fourniture cryogénique indépendante doit être équipée avec un système SPTB.

9.1.3 Orifice de restriction

Un orifice de restriction peut être utilisé dans le système de fourniture. L'orifice est dimensionné pour limiter le débit du fluide pendant une période de telle sorte que le vaporiseur n'est jamais en surcharge, mais cela nécessite des calculs prudents. Cette solution n'est applicable que pour les vaporiseurs à air ambiant comme définis dans le chapitre 5.1 et il est recommandé qu'il soit restreint seulement aux installations ayant un PV de gravité de niveau P1 ou P2 (table 2) et présentant un danger du aux fluides de gravité H1 (table 3). Pour cette solution, il n'est pas nécessaire d'installer un SPTB.

9.1.4 Vannes d'étranglement

Pour limiter le débit du fluide de manière à ce que qu'il ne dépasse jamais la capacité des vaporiseurs, il est possible d'utiliser une vanne d'étranglement, telle que décrite au paragraphe 8.5. Cependant elle doit être conçue de manière à ce qu'elle ne soit jamais complètement en position complètement fermée (p.ex. en utilisant un blocage mécanique). Ce débit minimum doit être suffisamment faible de manière à ce que la température de sortie du vaporiseur ne chute pas en dessous de la température minimale acceptable pendant un temps maximum défini. Cette solution n'est applicable que pour les vaporiseurs à air ambiant comme définis au paragraphe 5 et il est recommandé de la restreindre seulement aux installations ayant un PV de gravité de niveau P1 ou P2 (tableau 2) et présentant un danger du au fluide de gravité H1 (table 3). Pour cette solution, il n'est pas nécessaire d'installer un SPTB.

9.2 Exigence pour les fournitures interruptibles

Toute méthode de protection contre les températures basses, énumérée ci-dessus sous le titre « Fournitures en continu » peut être aussi utilisée dans les cas où le débit peut être interrompu.

9.2.1 Systèmes automatisés de déclenchement

Deux types de réponses sont typiquement rencontrés pour les fournitures interruptibles :

- Arrêt immédiat (c.-à-d. pas de réduction de débit avant le déclenchement)
- Etranglement suivi par l'arrêt.

Le seuil de déclenchement de l'arrêt choisi est fonction du matériau utilisé pour la canalisation et l'exigence de conception appliquée telle que décrite ci-après.

9.2.2. Seuils de température

9.2.2. a Seuil de déclenchement

L'acier au carbone ou les autres matériaux non classés pour les températures de fluides cryogéniques ou froids doivent être protégés du contact des fluides cryogéniques. Il faut faire référence à la réglementation des équipements sous pression et des canalisations et aux normes, pour établir la compatibilité des matériaux à utiliser dans les installations de vaporiseurs.

Par exemple, le code international ASME 31.3 « Process Piping » définit à -29°C la température minimale de certains grades d'acier au carbone, sans effectuer de test d'impact Charpy. Il permet aussi à d'autres grades d'être utilisés à des températures plus basses si des critères plus rigoureux sont atteints.

Le test d'impact des aciers au carbone (spécialement ceux des aciers au carbone testés qui ne sont conformes qu'au minimum des codes ASTM, ASME ou API), ne garantit pas la résistance à la fracture fragile mais le grain fin de ces aciers dits « basse température » apporte un peu de résistance à l'initiation de la rupture fragile.

La sélection des matériaux et donc le seuil de température auquel le dispositif de température basse fonctionne, devrait être déterminé par les conditions ambiantes et toute tolérance ou écart dans le système de mesure afin d'assurer que la température minimale permise n'est pas dépassée. Ce critère doit, au minimum, être utilisé jusqu'à la tuyauterie incluant la limite de fourniture du client. Le client doit être dûment informé de sa responsabilité du maintien de l'adéquation de la conception de son côté de la limite de fourniture.

La où d'autres codes sont applicables, le seuil de déclenchement du SPTB doit suivre des pratiques similaires.

Il n'est pas acceptable de régler le seuil de température de déclenchement plus bas que la température de calcul en aval. La température sera normalement réglée à une température plus haute.

Lorsque c'est nécessaire un dispositif inviolable devrait être installé pour s'assurer que le seuil de température de déclenchement n'est pas modifié manuellement entre les essais périodiques.

9.2.2. b Seuil d'étranglement

Lorsqu'un débit d'étranglement est utilisé, il est initié à une température définie qui est plus élevée que seuil de déclenchement choisi pour le SPTB. Le seuil de la température d'étranglement est influencé par :

- Les limitations d'échelle de température du système d'instrumentation.
- Les influences de la température ambiante.
- Le rapport auquel la température varie en fonction du débit.

9.2.3 Le SPTB pour les Vaporiseurs à Haute Réserve Thermique (HRT)

La réponse « lente » des contrôles des SPTB est acceptable pour cette application car elle correspond de manière appropriée aux caractéristiques de dégradation de la température de sortie des vaporiseurs (tous les dysfonctionnements prévisibles étant considérés).

La distance entre le capteur de température du SPTB et le dispositif de coupure doit être définie en tenant compte du temps de réponse de l'instrumentation du SPTB et la vitesse du fluide.

9.3 IEC 61511

La norme CEI 61511 pour la Sécurité Fonctionnelle - Systèmes instrumentés de sécurité pour le domaine de la production par processus, a été publiée en 2003 de même que La norme CEI 61508 qui s'applique aux Systèmes de sécurité électriques, électroniques ou électroniques programmables destinés à exécuter des fonctions de sécurité. Les solutions présentées au chapitre 10 sont basées sur l'approche du classement des risques en utilisant les bonnes pratiques de conception industrielle et les années d'expérience dans l'industrie des gaz plutôt que l'approche décrite dans la norme CEI 61511. Cependant la norme CEI 61511 peut être utilisée comme une méthode pour supporter l'évaluation des risques et les processus de conception du système décrits dans ce document.

10. Solutions

Les exigences de protection de températures basses pour les vaporiseurs sont indiquées dans les tables 6.1, 6.2 et 6.3.

10.1 Considérations générales pour les SPTB

Les analyses de risques précédentes ont montré que les Systèmes de Protection de Températures Basses doivent être fournis lorsqu'un danger de fragilisation à froid existe. La probabilité de défaillance à la demande du SPTB doit être d'un niveau approprié par rapport à la probabilité d'occurrence de l'événement de température basse, aux conséquences de la fragilisation et à la présence de toute autre sécurité. En règle générale le système doit être protégé en empêchant la canalisation et les équipements en aval de devenir trop froids par la détection de température basse en sortie du vaporisateur et soit :

- arrêter automatiquement le système de vaporisation au moyen d'un ou plusieurs dispositifs de fermeture et d'un ou plusieurs dispositifs de détection de température,
- ou, comme décrit dans les tableaux, fournir une alarme de température basse comme protection dans certaines situations, comme suite aux exigences de réponse aux alarmes indiquées au paragraphe 10.2.

Un ou plusieurs capteurs sur l'arrivée des utilités (p.ex. contact de débit d'eau faible, contact de basse pression de vapeur, etc.) peuvent être utilisés comme suite aux exigences de réponses aux alarmes du paragraphe 10.2.

10.2 Réponses aux alarmes

Comme les tableaux 6.1, 6.2 et 6.3 indiquent que le SPTB peut être assuré par des alarmes, il est essentiel que le site puisse être rejoint par un opérateur de l'unité, un technicien de maintenance ou un représentant formé du client dans un temps assez court pour répondre aux conditions de l'alarme de température basse. L'alarme doit être transmise à un endroit avec du personnel posté 24h sur 24. Un plan d'urgence et des procédures administratives doivent être en place, pour prévenir une rupture fragile en cas d'alarme.

Cela peut inclure une commutation entre des vaporisateurs à air ambiant en parallèle, une limitation du taux de débit du client, une augmentation de la fourniture d'utilités, une mise en marche d'un système de vaporisateurs redondants, etc.

Quand l'emplacement ne peut être atteint dans un temps suffisant ou qu'une réponse adaptée ne peut pas être fournie sur le site, un déclenchement basse température est nécessaire.

10.3 Solutions recommandées pour des situations spécifiques

Les tableaux 6.1, 6.2 et 6.3 sont des classements qualitatifs des Systèmes de Protection de Température Basse (SPTB), par rapport au risque perçu d'occurrence d'un événement de température basse. Basés sur l'expérience des membres de l'EIGA, ils prennent en compte les effets secondaires du dégagement de gaz et de l'énergie du souffle, la probabilité d'occurrence de l'événement et aussi le mode de fonctionnement et le type des vaporisateurs.

Une analyse des risques documentée doit être effectuée dans tous les cas. Des analyses de risques génériques peuvent être développées pour des installations et des sites standards. Les tableaux ci-après énumèrent les systèmes de protection minimum recommandés pour des situations définies.

Des alarmes additionnelles peuvent être recommandées par l'analyse spécifique et le nombre et le type d'alarmes dépendra du type de vaporisateurs. Pour les vaporisateurs utilisant des utilités, il faudrait prendre en compte des alarmes pour la perte de toute utilité.

Il peut être nécessaire d'effectuer, avec le client, des revues périodiques de consommation passant par le système de vaporisation et il peut être nécessaire de modifier le SPTB ou d'ajouter de la capacité de vaporisation, pour refléter les changements de consommation.

Toutes les options ne sont pas énumérées dans tableaux 6.1, 6.2 et 6.3. D'autres options figurent dans le chapitre 9, telles que l'utilisation de vannes et orifices de restriction, etc. Ces options peuvent aussi être prises en compte dans l'analyse des risques de l'installation.

Tableau 5.1 –SELECTION DU SPTB – PV niveau de gravité P1

Niveau de Gravité PV Tableau 3	Niveau de probabilité de température basses Tableau 4	Mode de fonctionnement Tableau 5	Solution SPTB
H1	L1	S1 et S2	If Si l'analyse spécifique des risques montre que c'est nécessaire, une alarme de basse température ou un capteur de température basse associé un dispositif de déclenchement, doit être installé. Lorsque le risque est jugé faible alors une alarme et/ou un dispositif de déclenchement peut ne pas être nécessaire.
H1	L2	S1	Les vaporiseurs piscines de cette catégorie devraient être installés au minimum avec un capteur de température basse et un dispositif de déclenchement. Les vaporiseurs de cette catégories utilisés en secours à air ambiant avec réchauffeur en sortie ou avec système d'inversion ou ceux assistés par ventilateur doivent être équipés au minimum avec un alarme de basse température.
H1	L2	S2	Dans cette catégorie, les vaporiseurs piscines, les vaporiseurs à air ambiant assistés par ventilateur ou avec un réchauffeur en sortie en service continu ou en écrêtage de pics devraient être équipés au minimum d'un capteur de température basse avec un dispositif de déclenchement.
H3	L1	S1 et S2	Cette catégorie de vaporiseurs à air ambiant devrait être équipée au minimum d'un capteur de température basse avec un dispositif de déclenchement
H3	L2	S1 et S2	Ces vaporiseurs HRT, devraient être équipés au minimum de deux capteurs de température basse et deux dispositifs indépendants de déclenchement.

Note – Les définitions de P1 à P3, H1 à H3, L1 et L2 et S1 et S2 sont données dans les tableaux 2, 3, 4 and 5

Tableau 6.2 - SELECTION DU SPTB – PV niveau de gravité P2

Niveau de Gravité PV Tableau 3	Niveau de probabilité de température basses Tableau 4	Mode de fonctionnement Tableau 5	Solution SPTB
H1	L1	S1	Pour les vaporiseurs à air ambiant en service de secours de cette catégorie, au minimum une alarme de température devrait être installée. Si l'analyse des risques spécifiques le montre, un capteur de température basse avec un dispositif de déclenchement devraient être ajouté.
H1	L1	S2	Pour les vaporiseurs à air ambiant en service continu ou en écrêtage de pics de cette catégorie un capteur de température basse avec un dispositif de déclenchement devrait être installé au minimum. Des alarmes additionnelles de température basse

			pourraient être recommandées par l'analyse spécifique des risques.
H1	L2	S1 et S2	Dans cette catégorie, les vaporiseurs piscines les vaporiseurs à air ambiant assistés par ventilateur ou avec un réchauffeur en sortie ou avec un système d'inversion, devraient être équipés au minimum d'un capteur de température basse avec un dispositif de déclenchement. Un capteur sur l'alimentation des utilités devrait donner une alarme.
H2	L1	S1 et S2	Cette catégorie de vaporiseurs à air ambiant devrait être équipée au minimum d'un capteur de température basse avec un dispositif de déclenchement
H2	L2	S1	Dans cette catégorie, les vaporiseurs piscines de secours, les vaporiseurs de secours à air ambiant assistés par ventilateur ou avec un réchauffeur en sortie ou avec système d'inversion devraient être équipés au minimum d'un capteur de température basse avec un dispositif de déclenchement. Un capteur sur l'alimentation des utilités devrait donner une alarme
H2	L2	S2	Les vaporiseurs piscines, les vaporiseurs à air ambiant assistés par ventilateur ou avec un réchauffeur en sortie ou avec système d'inversion en service continu ou en écrêtage de pics de cette catégorie devraient être équipés avec 2 (ou plus) capteurs de température basse, dont n'importe lequel des deux ferme un seul dispositif de déclenchement au minimum.
H3	L1	S1 et S2	Cette catégorie de vaporiseurs à air ambiant devrait être équipée au moins avec 2 capteurs de température basse dont n'importe lequel ferme un seul dispositif de déclenchement.
H3	L2	S1 et S2	Ces vaporiseurs HRT, devraient être équipés au moins de deux capteurs de température basse dont n'importe lequel des deux fermera deux vannes automatiques indépendantes de déclenchement.

NOTE – Les définitions de P1 à P3, H1 à H3, L1 et L2 et S1 et S2 sont données dans les tableaux 2, 3, 4 et 5

Tableau 6.3 - SELECTION DU SPTB – PV niveau de gravité P3

Niveau de Gravité PV Tableau 3	Niveau de probabilité de température basses Tableau 4	Mode de fonctionnement Tableau 5	Solution SPTB
H1	L1	S1 et S2	Les vaporiseurs ambiants de cette catégorie devraient être équipés au minimum d'un capteur de température basse et d'un dispositif de déclenchement. Le capteur doit donner une alarme en basse température.
H1	L2	S1	Ces vaporiseurs HRT devraient être équipés au moins de deux capteurs de température basse dont n'importe lequel des deux fermera un dispositif de déclenchement.
H1	L2	S2	Ces vaporiseurs HRT devraient être équipés au moins de deux capteurs de température basse dont n'importe lequel des deux fermera un dispositif de déclenchement. Un capteur sur les utilités devrait donner une alarme.
H2	L1	S1 et S2	Cette catégorie de vaporiseurs à air ambiant devrait

			être équipée au minimum d'un capteur de température basse avec un dispositif de déclenchement. Le capteur devrait donner une alarme en basse température.
H2	L2	S1	Ces vaporiseurs HRT devraient être équipés au moins de deux capteurs de température basse dont n'importe lequel des deux fermera un dispositif de déclenchement. Un capteur sur les utilités devrait donner une alarme.
H2	L2	S2	Ces vaporiseurs HRT devraient être équipés au moins de deux capteurs de température basse dont n'importe lequel des deux fermera deux vannes automatiques indépendantes de déclenchement.
H3	L1	S1 et S2	Cette catégorie de vaporiseurs à air ambiant devrait être équipée au moins avec 2 capteurs de température basse dont n'importe lequel des deux fermera deux vannes automatiques indépendantes de déclenchement
H3	L2	S1 et S2	Ces vaporiseurs HRT devraient être équipés au moins de deux capteurs de température basse dont n'importe lequel des deux fermera deux systèmes indépendants de déclenchement. Un capteur sur la fourniture d'utilités (p.ex. capteur de débit ou de pression) devrait donner une alarme.

Note: les définitions de P1 à P3, H1 à H3, L1 et L2, S1 et S2 sont données dans les tableaux 2, 3, 4 et 5.

11. Opérations

11.1 Surveillance des consommations

La surveillance des consommations peut contribuer significativement à l'exploitation en sécurité d'un système de vaporisation. En partant du contrat d'origine et de l'ingénierie de l'installation, la consommation du client augmentera souvent au fur et à mesure de l'augmentation de son activité.

Deux variables devraient être surveillées :

- Premièrement le débit, qui est l'un des paramètres clés de conception lorsque l'on dimensionne un système de vaporisation. Toute augmentation de l'utilisation du client peut créer une situation dangereuse.
- Deuxièmement le mode d'utilisation, qui a aussi un impact significatif sur la capacité du vaporiseur et ceci doit être pris en compte pendant la conception, mais aussi surveillé pour s'assurer qu'aucun changement de mode d'utilisation n'est observé et faire des investigations lorsque c'est nécessaire.

L'effet des augmentations de consommation peut souvent être masqué, particulièrement sur les systèmes de vaporiseurs ambiants, quand les conditions favorables de température ambiante compensent l'augmentation de demande et le problème peut ne devenir évident que lorsque les conditions ambiantes deviennent plus froides.

La surveillance des consommations peut être effectuée de plusieurs manières différentes y compris par une mesure locale du débit et sa totalisation ou en surveillant les consommations de liquide.

La mesure de débit permettra de bien meilleures analyses que la consommation de liquide. La mesure de débit peut fournir des alarmes de débits élevés instantanés ou moyens ou fournir l'entrée d'une fonction de limiteur de débit.

La surveillance de la consommation de liquide est communément effectuée comme méthode de programmation des livraisons de liquide dans le réservoir de stockage du client. La surveillance à distance peut être effectuée par des systèmes de télémétrie qui enregistre le niveau et peut calculer le taux de changement du niveau de liquide. La surveillance peut aussi être effectuée par l'enregistrement manuel du niveau de liquide dans le réservoir de stockage ou en contrôlant la

fréquence des livraisons de liquide. Des alarmes automatiques générées par le logiciel de surveillance ou des revues périodiques de l'utilisation de liquide peuvent être entreprises pour s'assurer que la demande du client n'excède pas les paramètres de calcul du système.

Lorsque les consommations sont surveillées, il faut prendre en compte les paramètres ci-après :

- La capacité du système de vaporisation.
- La conformité des niveaux d'alarmes de consommation haute.
- La période pour laquelle les alarmes hautes de taux de consommation devraient être réglées (instantané, horaires, journalières, hebdomadaires etc.), ce qui dépendra de la demande du client et de son mode de consommation.
- Les actions à entreprendre si une utilisation élevée est détectée si cela doit déclencher une revue de conception ou une action plus urgente si l'augmentation est très au dessus des valeurs de calcul.

Lorsque l'exploitation en sécurité d'une installation de vaporisation dépend seulement de l'opération dans les limites de calcul de son système de vaporisation (tels que des systèmes de vaporisation à l'air ambiant lorsqu'il n'y a pas de système de déclenchement en basse température, ni d'alarme de basse température installées et lorsqu'il n'y a pas dispositif limiteur de débit) alors une méthode de surveillance de la consommation devait être en place.

11.2 Inspection périodique

Une inspection visuelle du système de vaporisation devrait être effectuée à une fréquence définie. L'inspection devrait inclure :

- La formation excessive de glace
- Les tuyauteries givrées.
- Les dommages physiques au matériel
- La fuite des fluides de procédé ou d'utilités
- Les changements d'environnement autour du vaporiseur tels que des murs ou bâtiments installés autour des vaporiseurs ambiants.
- Le changement de degré d'exposition du personnel, l'entourage du système et autres facteurs d'évaluation du risque.
- Ajout d'un réservoir tampon par le client.

La fréquence de l'inspection devrait être influencée par les facteurs ci-après :

- Le type de vaporiseur.
- Les débits et le mode d'utilisation
- La fréquence d'alarmes de température ou des déclenchements depuis la mise en service.
- Les installations qui n'ont pas d'alarme de température basse ou de système de déclenchement ont une plus haute priorité pour une inspection.

12 Essais périodiques

L'essai périodique des systèmes de protection est important pour maintenir la fiabilité de la fonction de protection contre les basses températures. Des intervalles d'essais appropriés doivent être développés pour chaque système et dépendront de la conception du système, du type d'équipement et de la disponibilité du système pour les essais.

Lorsque la fréquence d'arrêt planifié de l'installation est inférieure à l'intervalle requis d'essai du SPTB, le système doit être conçu pour permettre l'essai de la protection de température basse sans interruption de la fourniture au client.

La procédure d'essais devrait prendre en considération les mesures pour empêcher les coupures imprévues de la fourniture du client et pour contrôler toute les dérogations faites aux fonctions de déclenchement des dispositifs si le test est effectué en service. Les tests de chacune des installations devraient être documentés. Les enregistrements de l'essai doivent être conservés pour la durée de vie de l'installation d'évaporation.

13 Formation du personnel de la société de gaz

Les personnes suivantes devraient recevoir une formation de sensibilisation aux causes possibles et aux conséquences des dangers de la fragilisation à froid :

- Les ingénieurs de projet responsables de l'installation de systèmes et de SPTB.
- Les chefs de services maintenance et les techniciens responsables de la maintenance des systèmes de vaporisation et des essais fonctionnels périodiques des SPTB.
- Les ingénieurs de projet. Les opérateurs et superviseurs responsables de la conduite des usines et des systèmes de secours associés.
- Les ingénieurs de conception responsables de l'élaboration des schémas synoptiques de processus et des spécifications de systèmes de vaporisation et de SPTB doivent aussi recevoir cette formation de sensibilisation et en plus ils doivent être bien documentés sur les standards de conception pertinents pour les systèmes de protection contre les températures basses.

14 Sensibilisation des clients

14.1 Contrat client

Le contrat client devrait inclure l'agrément sur :

- Des débits estimés et un mode d'utilisation.
- La performance calculée du système de vaporisation et les températures extrêmes que l'installation du client peut s'attendre à rencontrer.
- La réponse d'urgence quand une augmentation accidentelle soudaine de débit se produit chez le client.
- La procédure à mettre en place, y compris le temps de préchauffage, lorsque le besoin en gaz du client augmente.
- Les personnes à contacter et le numéro d'urgence de la société de gaz.
- La responsabilité de la maintenance, de l'inspection, etc. de l'installation du vaporiseur.

En plus, le contrat devrait spécifier la méthode de contrôle de température basse qui est utilisée soit :

- L'interruption du débit.
- La réduction du débit avant son interruption.
- La réduction du débit seulement.
- Le débit continu sans aucune protection de température.

Il faut informer le client de la méthode choisie et de ses conséquences sur la fiabilité de l'approvisionnement et sur la conception de l'installation du côté du client après la limite de fourniture. Il faudrait aussi que le client soit bien informé des exigences d'essai périodique de tout dispositif de protection installé, ce qui peut nécessiter l'interruption de la fourniture si nécessaire.

Le fournisseur de gaz doit toujours informer son client, par écrit, si le contrat d'une fourniture de gaz en vrac spécifie que la protection de température basse n'est pas incluse dans la limite de fourniture du projet et qu'il y a un risque de rupture des équipements ou canalisations en aval, si le client dépasse la capacité calculée du vaporiseur. Les enregistrements du projet contiendront les copies des documentations soutenant le choix accepté des systèmes de protection de température basse.

14.2 Formation et information du client

Le fournisseur de gaz doit donner au client l'information et les supports de formation et d'information, y compris les fiches de données de sécurité (FDS) appropriées. Il est chaudement recommandé au fournisseur de gaz de former aussi tout le personnel du client impliqué dans la surveillance ou la maintenance de l'installation de vaporisation. La formation devrait comprendre :

- L'information sur les propriétés du gaz y compris les risques cryogéniques.
- Les risques et les précautions avec les matériaux exposés aux températures basses.
- Les conséquences des relâchements accidentels de gaz ou épandages de liquides.
- Les procédures d'urgence appropriées, y compris l'évacuation immédiate de la zone.
- Toutes activités de maintenance et d'inspection définies contractuellement.

15 Références

1. NFPA 50 - Standard for Bulk Oxygen Systems at Consumer Sites, 2001 Edition, National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, P.O. Box 9101, Quincy, MA 02269-9101, USA
2. NFPA 86C - Standard for Industrial Furnaces Using a Special Processing Atmosphere, National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, P.O. Box 9101, Quincy, MA 02269-9101, USA
3. EN 737-3 2000 Systèmes de distribution de gaz médicaux Partie 3 Système de distribution pour gaz comprimés et vide (cette norme est remplacée par la suivante)
, CEN European Committee for Standardization 36, rue de Stassart, B - 1050 Brussels, Belgium
4. NF EN ISO 7396-1 Novembre 2007 - Systèmes de distribution de gaz médicaux - Partie 1 : systèmes de distribution de gaz médicaux comprimés et de vide (remplace EN 737-3)
Pren , CEN European Committee for Standardization 36, rue de Stassart, B - 1050 Brussels, Belgium
5. NFPA 99 - Standard for Health Care Facilities, 2002 Edition, National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, P.O. Box 9101, Quincy, MA 02269-9101, USA
6. CEI 61511- 2004 - Sécurité fonctionnelle - Systèmes instrumentés de sécurité pour le domaine de la production par processus – toutes les parties, International Electrotechnical Commission (IEC) 3, rue de Varembe, P.O. Box 131, CH - 1211 Geneva 20, Switzerland.
7. Directive 97/23/CE du Parlement Européen et du Conseil du 29 mai 1997 relative au rapprochement des législations des États membres concernant les équipements sous pression, European Commission, DG Enterprise - G.4.
8. B31.3 - 2002 Process Piping, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Three, Park Avenue, New York, NY 10016-5990, USA.
9. ANSI/ISA-84.01-1996 Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries, 67 Alexander Drive, Research Triangle Park, NC 27709 USA.
10. Tuyauteries industrielles métalliques – Partie 2 matériaux, *particulièrement Annexe B*, CEN European Committee for Standardization 36, rue de Stassart, B - 1050 Brussels, Belgium