

MINISTERE FEDERAL DE L'EMPLOI ET DU TRAVAIL
ADMINISTRATION DE LA SECURITE DU TRAVAIL
INSPECTION TECHNIQUE
DIRECTION DES RISQUES CHIMIQUES

NOTE D'INFORMATION



Regards et indicateurs de niveau en verre

référence: CRC/IN/011-F
version 1
date:septembre 2001

Contenu

1. RISQUES LIÉS AUX REGARDS ET AUX INDICATEURS DE NIVEAU EN VERRE.....	3
2. LITTÉRATURE SE RAPPORTANT À LA SÉCURITÉ.....	5
3. PROPRIÉTÉS DU VERRE.....	6
3.1 RÉSISTANCE CHIMIQUE	6
3.2 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	6
3.3 PRÉCONTRAINTÉ DU VERRE.....	7
3.4. TECHNIQUES DE TRAITEMENT DU VERRE.....	7
4. REGARDS EN VERRE.....	8
4.1. DÉFINITION	8
4.2. MODES DE RUPTURE ET MOYENS D'Y REMÉDIER	9
5. INDICATEURS DE NIVEAU EN VERRE.....	12
5.1. TYPES	12
5.2. MODES DE RUPTURE ET MOYENS D'Y REMÉDIER	14
6 CODES ET NORMES DE BONNE PRATIQUE.....	15
7. AUTRES UTILISATIONS DU VERRE DANS L'INDUSTRIE DE PROCÉDÉS.....	16
7.1. INSTRUMENTATION DE PROCÉDÉ	16
7.2. INSTALLATIONS DE PROCÉDÉ RÉALISÉES EN VERRE.....	16
8. RECOMMANDATIONS.....	18
8.1. REGARDS EN VERRE	19
8.2. INDICATEURS DE NIVEAU EN VERRE	19
9. RÉFÉRENCES.....	20

Cette note d'information a été rédigée par:

Direction des risques chimiques
Ministère Fédéral de L'emploi et du Travail
Rue Belliard 51
1040 Bruxelles

Rédaction finale: ir. Koen Loossens
Traduction française: ir. Alain Pluvinage

Cette note veut refléter la problématique de sécurité qui va de pair avec l'utilisation de regards et d'indicateurs de niveau en verre en particulier, ainsi que l'emploi du verre en général, dans l'industrie chimique des procédés.

Le point de départ sera la description des risques spécifiquement liés aux regards et indicateurs de niveau en verre. On s'étendra sur les propriétés spécifiques du verre et sur les différentes sortes de verre. S'ensuivra un aperçu des risques et des mesures envisageables en rapport avec les différents éléments en verre que l'on peut trouver dans une installation de procédé.

Cette note se terminera par des recommandations concrètes en rapport avec l'emploi de regards et d'indicateurs de niveau en verre.

1. Risques liés aux regards et aux indicateurs de niveau en verre

Pour illustrer les risques liés aux regards et aux indicateurs de niveau en verre, nous partirons d'un arbre de défaillances générique qui conduit à un accident majeur (figure 1)

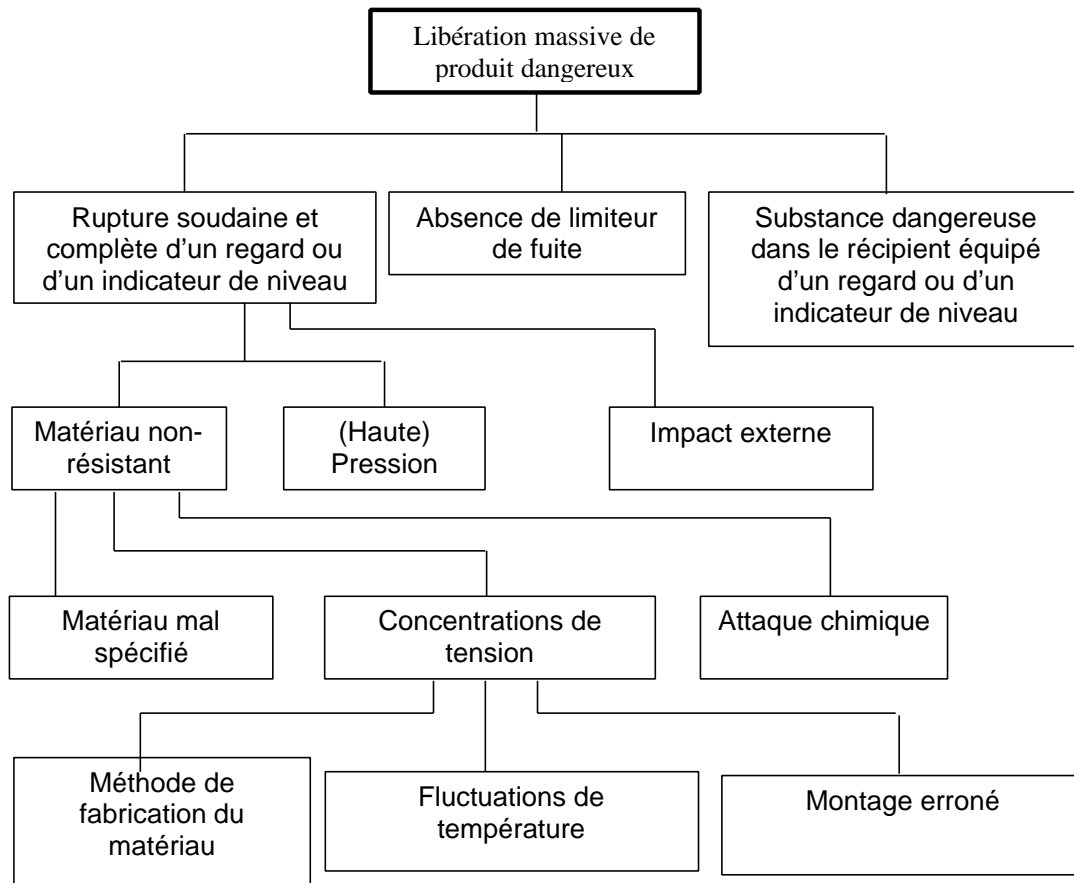


Figure 1

Les différents facteurs qui conduisent au développement d'un tel scénario et sur lesquels on peut jouer afin de prévenir l'accident majeur, sont décrits ci-après :

1. Présence d'une substance dangereuse

Cette note se concentre sur la circonstance où des substances potentiellement dommageables pour l'homme où l'environnement se libéreraient suite au bris d'un regard où d'un indicateur de niveau.

2. Absence de limiteur de fuite

Si rien n'est prévu pour contenir une fuite de substance dangereuse (c'est possible s'il s'agit d'un indicateur de niveau, mais rarement le cas s'il s'agit d'un regard), il en résulte la libération de la quantité totale contenue dans l'appareil sur lequel le verre était monté ou relié.

3. Rupture soudaine et complète du regard ou de l'indicateur de niveau

A la base d'un scénario menant à un accident grave, se trouve le fait qu'un regard ou un indicateur de niveau se rompt de façon complète et tout à fait imprévisible. Imprévisible signifie qu'on ne dispose d'aucune indication (fêlure, éclat, changement de couleur, déformation) prévenant de l'imminence de la défaillance du regard ou de l'indicateur de niveau. Complet signifie que le verre se désintègre totalement et que la substance dangereuse peut s'échapper par l'ouverture béante couverte par le verre : on ne parle donc pas d'une petite cassure initiale qui s'agrandirait.

4. Impact externe

Le verre peut casser suite à l'impact d'un objet extérieur, par exemple, le choc accidentel d'un outil ou la chute d'un objet.

5. La pression

Si la pression atteint un certain seuil, le verre finira par se rompre. Des conditions opératoires sous pression atmosphérique sont donc moins critiques car les tensions exercées sur le verre sont plus faibles. On doit prendre en considération toutes les situations de pression possibles. On doit également tenir compte de ce facteur lors de la sélection du type de verre (et de sa résistance à la pression) que l'on envisage d'utiliser.

6. Matériau non résistant

Si la pression dépasse la pression pour laquelle le verre a été conçu, il va se rompre. Cela peut arriver si la pression dépasse les limites prévues. Cela peut également arriver même si la pression reste dans les limites imposées : cela signifie dans ce cas que le verre ne présente pas la résistance exigée dans les conditions de procédé. 3 facteurs peuvent être à l'origine de cela.

7. Matériau mal spécifié

Le verre peut être de bonne qualité mais, de par une spécification erronée, ne pas résister aux conditions d'utilisation visées. Il se peut que l'on ait surestimé la résistance à la pression du verre ou il se peut que l'on n'ait pas tenu compte d'une dérive de pression pouvant survenir dans l'installation.

8. Attaque chimique

Lorsqu'un verre, répondant correctement aux conditions opératoires a été choisi, il se peut qu'après un certain temps il perde ses propriétés d'origine (résistance à la pression) suite à une attaque chimique. Ce qui est tout à fait comparable avec un métal qui perd sa résistance d'origine du fait de la corrosion. Une contrainte à laquelle le verre devrait normalement résister va conduire à la rupture.

9. Concentrations de tension

Comme expliqué plus loin, le verre est un matériau particulièrement sensible aux concentrations de tension. Celles-ci peuvent avoir été introduites durant le procédé de fabrication du verre. Si c'est le cas, l'incidence sur la résistance mécanique devrait être connue. Des concentrations de tension peuvent également être initiées lors du montage ou par des fluctuations de température. Quelle qu'en soit la cause, les concentrations de tension influencent négativement la résistance mécanique du verre et peuvent conduire à une rupture prématurée.

2. Littérature se rapportant à la sécurité

Une recherche approfondie montre que les regards et les indicateurs de niveau en verre sont de façon diverses à la base d'accident chimiques majeurs. Dans le Loss Prevention Bulletin 134 [10], on évoque quelques cas typiques d'accidents dus à des regards. La caractéristique commune est la destruction totale des regards. Les leçons principales qu'il faut en tirer sont :

- ❖ une spécification correcte des verres (surtout concernant leur résistance à la pression) est essentielle ;
- ❖ il est recommandé de prévoir des mesures de protection complémentaires en cas de rupture
- ❖ les recommandations générales pour les éviter autant que peut

Une recherche effectuée dans The Accident Database [16] révèle pas moins de 17 accidents ou incidents mettant en cause des regards ou des indicateurs de niveau en verre.

La problématique de la sécurité des regards et des indicateurs de niveau en verre est reconnue dans la littérature spécialisée.

F.P. Lees [11] reconnaît que les regards, mais aussi, par exemple les rotamètres en verre, constituent des éléments fragiles qui peuvent conduire à des fuites massives et qu'il vaut mieux les éviter. Une solution intermédiaire est de prévoir un fourreau transparent autour du verre.

Trevor Kletz [1,18] affirme dans deux ouvrages que les regards et les indicateurs de niveau en verre ne peuvent pas être utilisés sur des récipients contenant des liquides inflammables ou toxiques au-delà de leur point d'ébullition. En outre, il faut s'inquiéter de prévoir pour les indicateurs de niveau, un système qui limite les fuites en cas de bris afin d'éviter toute décharge massive. Des indicateurs de niveau magnétiques ou en matériau autre que le verre peuvent aisément être autorisés.

La même recommandation est faite par le Centre for Chemical Process Safety [9].

Dans le Fire & Explosion Index de la Dow Chemical Company [7] (index sur lequel se base l'Arrêté ministériel du 7 août 1991 pour le calculs des indices de dangers), les regards en verre sont formellement pénalisés. On trouve cela dans la rubrique *Special Process Hazards: I. Leakage – Joints and Packing: 5. For any Process Unit that has sight glasses bellows assemblies or expansion joints, the penalty is 1.50*. Il est étonnant qu'il ne soit pas fait mention des indicateurs de niveau ou de tout autre accessoire de process réalisé en verre qui en principe constituent également un chaînon faible dans l'installation.

3. Propriétés du verre

La meilleure façon de décrire le verre est de parler d'un liquide hyperrefroidi : le mécanisme spécifique de refroidissement ne donne pas lieu à la formation de cristaux qui sont la base même de la transition vers l'état solide. Les atomes sont liés dans une configuration désordonnée plus ou moins semblable à celle de l'état liquide. De part sa structure unique, le verre possède la propriété remarquable d'isotropie : les propriétés physiques telles que la résistance à la traction, la conductibilité électrique et la dilatation thermique ont la même valeur dans toutes les directions.

3.1 Résistance chimique

Du point de vue composition, la plupart des verres sont constitués d'oxydes minéraux et principalement de silice (Si O_2).

Le verre est connu pour sa résistance particulière aux agents chimiques et à la corrosion. Cette résistance est essentiellement fonction de la composition du verre et du type d'agent agressif. L'attaque chimique est différente selon qu'il s'agit de solutions aqueuses acides ou basiques. Les acides vont dissoudre les alcalis du verre et laisser une structure de silice poreuse. La surface poreuse empêche une pénétration plus avancée de l'acide, ce qui explique la bonne tenue aux acides. L'eau a un comportement semblable vis à vis du verre, mais de façon beaucoup moins rapide : c'est uniquement lors de hautes températures (chaudières à vapeur par exemple) que l'agression devient significative.

Les bases vont dissoudre uniformément la surface de verre et donc conduire à une diminution régulière d'épaisseur. L'attaque du verre par les bases est d'autant plus importante que la température et le pH augmentent. Exemples : pour un pH de 10 et une température de 170°C , la vitesse d'attaque (diminution d'épaisseur) de la surface de verre est de 2mm/an ; pour un pH de 12, elle est de 38 mm/an [6].

On emploie largement dans l'industrie le verre borosilicate afin d'assurer une résistance valable contre l'attaque chimique. Ce type de verre a une teneur minimum de 5% d'oxyde de bore (B_2O_3). Ce type de verre peut toutefois être soumis à une attaque chimique sérieuse de la part de l'acide fluorhydrique, de l'acide phosphorique chaud ou de solutions alcalines chaudes.

Pour protéger le verre contre toute attaque chimique, on peut enduire le côté exposé d'un film synthétique. Un exemple est l'emploi dans les chaudières d'un film de mica (mica= minéral de la famille des silicates).

3.2 Propriétés mécaniques

La structure physique du verre lui donne la caractéristique d'une élasticité parfaite : si une force est appliquée sur le verre, celui-ci va se déformer. Si cette force disparaît, le verre reprend sa forme d'origine. Le verre n'a aucune ductilité : le fait de se déformer de façon irréversible lors de l'application d'une contrainte. Cette ductilité, que possèdent heureusement les métaux pour résister à la rupture, trouve un avantage dans le fait que la déformation reprend une partie des contraintes. L'absence de ductilité chez le verre a pour conséquence que toute contrainte exercée sur celui-ci ne peut être reprise par une déformation plastique. Si une contrainte de flexion ou de traction dépasse la résistance à la traction du verre (aux alentours de 700 kg/cm^2), le verre va se rompre entièrement.

3.3 Précontrainte du verre

Une façon de pallier cette faiblesse mécanique est d'introduire une précontrainte par le moyen d'une compression uniforme du verre. Toute charge devra en premier lieu compenser la contrainte de compression avant que le verre lui-même ne soit soumis à traction.

Une façon d'atteindre ce but est de faire usage de la dilatation thermique du verre. Le verre se rétracte en cas de chute de température et se dilate lors d'une montée en température. Si le verre n'est pas chauffé ou refroidi uniformément dans sa masse, des tensions peuvent apparaître au sein du matériau. Ce principe est appliqué lors du trempage du verre (anglais.: *thermal prestressing, thermal tempering, quench tempering*): la technique consiste à chauffer le verre jusqu'à son point de ramollissement et de le refroidir brutalement soit au jet d'air, soit dans un bain de sels ou de tout autre façon. Du fait de la faible conductivité thermique du verre, la partie extérieure va se solidifier rapidement et se rétracter, et donc engendrer une compression. La partie intérieure reste encore molle et se retrouvera finalement en état de contrainte de traction. Il s'ensuit que la contrainte n'est pas répartie uniformément dans le verre. Une charge va avoir pour effet d'induire en premier lieu une contrainte de traction sur la partie extérieure. Etant donné que cette partie a subi une pré-compression, elle va pouvoir accepter cette contrainte. Une fois que la charge est suffisante pour équilibrer la précontrainte, la partie intérieure est également sujette à contrainte avec la rupture pour conséquence.

Une autre façon d'introduire une contrainte de compression dans le verre est la précontrainte mécanique (en anglais: *mechanically prestressed, fused glass to metal*, en allemand: *Glas-Metal verschmolzen*). On sertit le verre dans un anneau métallique et on porte l'ensemble à la température de ramollissement du verre. Du fait de la différence des coefficients de dilatation du verre et du métal, une contrainte de compression uniforme est introduite dans le verre lors du refroidissement. Il en découle également que l'anneau métallique se retrouve soumis à une contrainte de traction. La différence d'avec la précontrainte thermique résulte dans le fait que la contrainte de compression est de cette manière répartie de façon uniforme et homogène dans tout le verre.

3.4. Techniques de traitement du verre

Pour améliorer, surtout les propriétés mécaniques du verre, d'autres techniques existent qui en fait se révèlent moins performantes que les précédentes.

- ❖ Recuit de détente (en anglais: *annealing*): du fait que durant le processus de refroidissement des tensions permanentes peuvent être introduites dans le matériau, les verres pour lesquels la stabilité dimensionnelle est primordiale sont soumis à un traitement d'adoucissement afin de relâcher ces tensions. Le verre est à nouveau chauffé et refroidi lentement afin d'effectuer cette opération de la façon la plus uniforme possible. Un verre dans lequel il est impossible de détecter la moindre tension résiduelle est appelé verre calmé ou adouci (en anglais. : *dead-annealed*).
- ❖ Polissage et décapage: ces opérations ont essentiellement pour but d'éliminer les imperfections microscopiques de surface, là où les concentrations de tension sont les plus importantes.
- ❖ Revêtement (en anglais: *overlay glazing*): on recouvre le verre d'une fine couche de verre dont le coefficient de dilatation thermique est plus faible.
- ❖ Echange d'ions (en anglais: *ion exchange*): le verre est immergé dans un bain alcalin. Le bain de sels contient des ions alcalins de dimensions plus grandes que dans le verre et l'on assiste à une diffusion de ces ions à la surface du verre prenant la place des ions plus petits

- composant initialement cette surface. Cela crée (comme lors de la trempe) un état de compression à la partie extérieure du verre et une contrainte de traction au sein du verre.
- ❖ Laminage : plusieurs couches de verre sont superposées avec chaque fois un laminat comme intercalaire. Comme laminats, on emploie des polymères rigides tels que le butyral de polyvinyle, le polyuréthane, l'éthylène terpolymère ou le polytétrafluoroéthane, qui sont plaqués au verre par traitement thermique. La propriété intrinsèque de ce type de verre réside dans le fait que lors d'un impact ou d'un bris, ou bien les éclats de verre restent attachés au film de polymère ou bien le verre se brise en petits morceaux non coupants plutôt qu'en morceaux dentelés et tranchants. Ce type de verre, employé pour les vitres de voitures et les vitres pare-balles, est connu sous l'appellation de verre de sécurité¹ (en anglais : *safety glass*, en néerlandais : *veiligheidsglas*).
 - ❖ Verre armé (anglais: *wire mesh, wire re-inforced*): un treillis métallique est intégré dans le verre dans le but de retenir les morceaux en cas de bris.

4. Regards en verre

4.1. Définition

Les regards sont des éléments rapportés qui ont pour but de visualiser un flux de liquide, des réactions chimiques des opérations de mélange ou autres. On peut les trouver sur des tuyauteries, des réacteurs ou tout autre appareil de procédé.

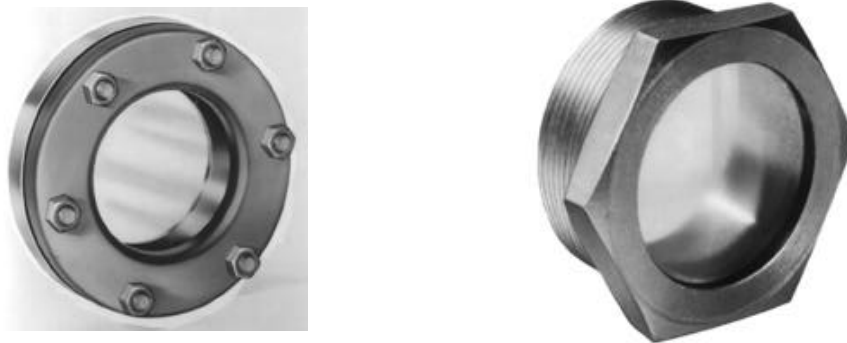


Figure 2 : modèles de regards

Les regards (figure 2) sont en général de forme circulaire et se présentent sous diverses variantes ; il peut s'agir d'un verre entre joints et brides installé sur l'appareillage. Il peut également s'agir d'un montage fileté. Comme il s'agit d'un morceau de verre plat, tout type de verre peut en principe être utilisé. Le verre et le métal ont aussi pu être rendus solidaires lors de la fabrication (Cfr ci-dessus : verre coulé dans un anneau en métal). En ce qui concerne le matériau constitutif de la bride ou de l'élément de liaison avec l'équipement de procédé, on peut choisir parmi différentes sortes de matériaux disponibles (acier au carbone, aciers inoxydables, bronze, etc...). En ce qui concerne l'étanchéité éventuelle, on dispose d'une gamme presque illimitée.

¹ Le terme 'verre de sécurité' est employé au sens large pour de nombreux types de verre : verre laminé, verre coulé dans une matrice en métal, verre pare-balles, etc ... Que ce soit dans la littérature ou dans l'industrie, le vocable 'verre de sécurité' n'est nulle part défini de façon univoque. Un complément d'informations concernant la spécification et le mode de fabrication est indispensable pour se faire une idée précise de ce dont on parle.

4.2. Modes de rupture et moyens d'y remédier

Si l'on se réfère à l'arbre de défaillances générique de la figure 1, on se souviendra de ce que la libération massive de produit dangereux est le résultat du bris soudain et total du regard suivi de la rupture du limiteur de fuite. Dans ce qui suit, nous allons examiner les facteurs successifs du scénario d'accident et la/les façon(s) d'intervenir positivement.

1. Présence d'une substance dangereuse

Lorsqu'un regard monté sur un récipient contenant des substances dangereuses se rompt, il s'ensuit une libération massive du produit. La quantité exacte dépendra des paramètres physiques qui règnent dans le récipient (pression, température), de la position du regard et de la nature de la substance (pression de vapeur). Dans le cas où le récipient ne contient aucune substance dangereuse, le regard ne constitue pas un élément critique menant à un accident grave. Dans le cas où des substances particulièrement dangereuses (toxiques, inflammables) sont en jeu, il est fortement conseillé d'éviter tout regard afin de ne pas arriver à ce type de scénario.

2. Absence de limiteur de fuite

Installer un limiteur de fuite sur un regard relève le plus souvent de l'impossible car celui-ci est dans la plupart des cas monté directement sur le récipient ou sur la tuyauterie. On prévoit de doubler le regard. Chaque regard est spécifié pour résister à la pression prévue. En cas de rupture du premier regard, le second sert de barrière. On peut en plus visualiser le fait que le premier regard est brisé et procéder à temps à son remplacement.

3. Rupture soudaine et totale du regard

La seule façon d'éviter ce scénario d'accident grave est de proscrire tout regard d'une installation.

Un regard se rompra toujours totalement et de manière imprévisible. Le verre ne présente ni déformation plastique ni autre indice qui puissent être constatés lors des inspections et qui permette de prévoir une défaillance prochaine.

Il y a quand même une exception en ce qui concerne la rupture soudaine d'un regard, il s'agit du verre coulé dans une matrice en métal (parfois appelé verre de sécurité). Comme nous l'annoncions plus haut, ce type de regard est soumis à une précontrainte uniforme qui évite que celui-ci ne se rompe brutalement lorsqu'il est soumis à des contraintes extérieures importantes. Des fissures vont apparaître qui affectent la transparence mais la contrainte se déplace le long de ces fissures jusqu'à ce qu'elle se retrouve dans une zone de précontrainte où elle peut être compensée. Il en résulte que le verre garde son étanchéité. On pourra donc constater de visu si le regard est ou a été soumis à des contraintes trop importantes.

L'emploi de ce type de regard est décrit dans la norme DIN 7079 ("*Runde, metallverschmolzene Schauglasplatten für Druckbeanspruchung*") [5]. Selon cette norme, ces regards peuvent être utilisés dans un domaine de température de -10 à 300 °C et des pressions jusqu'à 25 bar. Cette norme confirme formellement que ce type de verre offre un avantage pour la sécurité du fait que la rupture du verre peut être prévue par la diminution de transparence de la surface de contrôle sans perte d'étanchéité.

4. Impact externe

Un regard est toujours à la merci d'un impact provenant d'un objet extérieur. Etant donné qu'un regard est toujours monté sur un récipient et qu'il n'occupe qu'une faible partie de la surface, la probabilité de contact par chute ou choc d'un objet extérieur est très faible.

5. Pression

Un regard sera toujours soumis à une certaine pression et donc à une certaine contrainte. L'emploi de verre dans le cas de hautes pressions double le risque : d'une part, la contrainte d'où la probabilité de rupture augmentent, d'autre part, en cas de rupture, les conséquences n'en seront que plus graves (fuite plus importante, projection d'éclats de verre).

En plus de cela, il faut s'assurer qu'aucune déviation de pression n'est à craindre car, contrairement au métal, le verre ne permet aucune déformation plastique et ne peut donc encaisser des pics de contraintes. C'est pourquoi, il est indispensable lors de la spécification, de tenir compte non seulement des conditions de pression opératoires mais également des pics de pression éventuels.

6. Regard non résistant

Si un regard est utilisé pour une application et une pression déterminées, il doit pouvoir jouer ce rôle de façon fiable. Il existe trois cas de figure où il n'en est pas ainsi.

7. Regard erronément spécifié

Lorsque l'on monte un regard qui ne peut résister aux conditions régnant dans le récipient, un bris sera inéluctable. Lors de la spécification, il est indispensable de tenir compte des conditions maximum de pression et de température pouvant régner dans le récipient.

8. Attaque chimique

Un regard, même correctement spécifié, peut, après un certain temps, perdre ses propriétés d'origine à cause d'une attaque chimique. Ce processus est à comparer avec la corrosion d'un métal qui, de par ce fait, voit ses caractéristiques de résistance modifiées. La résistance chimique du verre est fonction de sa composition, du fluide avec lequel il est en contact, et de la température.

Le type de verre doit être spécifié en tenant compte des conditions d'utilisation. On peut opter pour le type de verre qui présente la meilleure résistance aux agents chimiques (p.e. : verre borosilicate). On peut également appliquer un film protecteur en matière synthétique. On peut également décider de changer le verre périodiquement. Dans ce cas, il est indispensable d'avoir une idée précise de la vitesse d'attaque du verre dans des conditions bien déterminées et du moment jusqu'où le verre conserve ses propriétés initiales. Insistons également sur le fait que les joints et le matériau constitutif des brides doivent également être inertes à l'action du fluide.

9. Concentrations de tensions

Le manque de résistance du regard peut trouver son origine dans l'existence ou l'apparition de tensions dans le verre. De par l'absence de plasticité du verre, ces tensions ne disparaissent pas et des tensions externes (de par la pression dans le récipient) vont s'y superposer. Des concentrations de tensions influenceront toujours négativement les propriétés de résistance du verre. Il est donc indispensable d'être conscient de la façon suivant laquelle celles-ci peuvent être introduites dans le verre.

10. Concentrations de tensions lors du processus de fabrication du verre

L'existence de concentrations de tensions est inhérent au processus de fabrication (vitesses différentes de refroidissement dans le matériau) et différentes techniques de traitement ont pour but de diminuer ces tensions (p.e.: recuit de détente). D'un autre côté, on peut rendre le verre plus résistant aux contraintes de traction et cela, en introduisant des contraintes de compression dans celui-ci (échange d'ions, trempe, précontrainte mécanique).

Suivant le type de verre choisi, on peut se faire une idée de la densité de concentrations de tensions qu'il présente. Cela se traduit par des limites déterminées de résistance à la pression du dit verre.

11. Concentrations de tensions dues à des fluctuations de température

Des concentrations de tensions peuvent être introduites dans le regard déjà monté de par l'influence de chocs thermiques. Ces tensions peuvent trouver leur origine dans un phénomène de dilatation différentielle dans le verre même ou du fait de contraintes entre le verre et son logement.

La résistance aux chocs thermiques (en anglais : *thermal endurance*) est inversement proportionnelle au coefficient de dilatation thermique et à l'épaisseur du verre. La résistance aux chocs thermiques est testée en le refroidissant brutalement et en observant s'il finit par se fissurer [5,6].

Lors de la spécification du verre, il est nécessaire de communiquer l'amplitude maximum des chocs thermiques ainsi que la différence maximum de température (entre l'intérieur et l'extérieur) afin d'être certain de ne pas perdre la résistance d'origine. C'est surtout dans des conditions climatiques extrêmes et lors des opérations de démarrage qu'il faut tenir compte de ces paramètres bien que ceux-ci ne soient pas atteints durant le déroulement du procédé.

12. Concentrations de tensions dues à un montage incorrect

Des concentrations de tensions peuvent découler de la façon dont le regard a été installé. Des tensions peuvent être introduites dans le verre si les brides ou le matériau d'étanchéité ne sont pas d'épaisseur régulière ou / et si le couple de serrage des boulons n'est pas uniforme. Les surfaces de contact doivent être parfaitement planes et parallèles. C'est la seule façon d'éviter l'apparition de concentrations de tensions lors du serrage, le verre pouvant même se briser lors du montage. Etant donné la différence de coefficient de dilatation thermique entre le verre et son logement, un nouveau serrage peut se révéler nécessaire lorsque l'appareil est à sa température de fonctionnement. Dans les deux normes auxquelles nous avons fait référence ci-dessus (normes DIN [5,6] , il est explicitement indiqué que seul un montage correct (p.e.: suivant DIN 28120) peut garantir les propriétés mécaniques du verre. Ces normes exigent également que les regards ne puissent être montés que par du personnel ayant reçu les instructions ad hoc concernant la manipulation, le nettoyage et le serrage régulier . D'une façon générale, il faut toujours veiller à ce que les regards soient toujours montés suivant les instructions du fabricant.

Un certain type de regard prévoit de parer à l'apparition de concentrations de tensions lors de l'installation en insérant un anneau de compression par dessus l'étanchéité. Cet anneau de compression est fixé par des vis de réglage et permet ainsi une compression uniforme à comparer avec la précontrainte mécanique du verre (figure 3). Il n'en reste pas moins qu'il s'agit toujours de monter le regard suivant les règles de l'art.

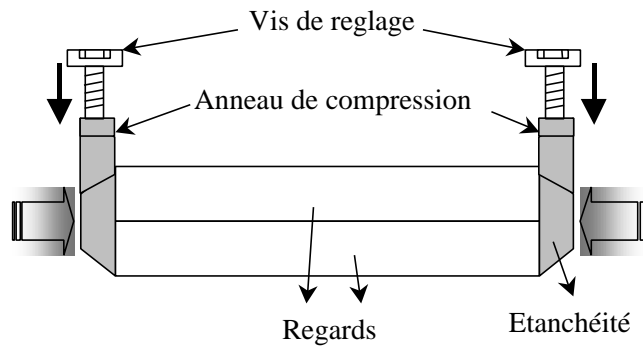


Figure 3 : principe de fonctionnement d'un anneau de compression

5. Indicateurs de niveau en verre

5.1. Types

Les indicateurs de niveau (en anglais : *level gauge glasses*) servent à donner localement une mesure externe d'un niveau. La mesure se base sur le principe des vases communicants (figure 4) : via une connexion externe, le niveau du liquide sera identique dans le tube de mesure et dans le conteneur.

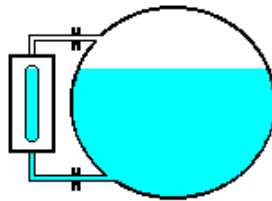


Figure 4 : vases communicants

On peut distinguer grossièrement trois types d'indicateurs de niveau (figure 5)



Figure 5 : Types d'indicateurs

Les **indicateurs ordinaires** sont des tubes en verre où l'on peut lire le niveau du liquide ou un interface entre deux liquides.

Dans le cas d'**indicateurs blindés**, le verre est protégé par une enveloppe métallique contre les impacts externes. On distingue ici deux types. Les indicateurs transparents sont constitués de deux plaques de verre entre lesquelles on peut lire le niveau sous l'incidence de la lumière naturelle ou artificielle. Les indicateurs à réflexion sont constitués d'une seule plaque de verre dont la face interne est rainurée suivant un angle de 45° . Comme les indices de réfraction d'un gaz ou d'un liquide diffèrent (figure 6), la lumière incidente sur le liquide n'est pas réfléchi (aspect sombre) alors que la lumière incidente sur la phase gazeuse l'est parfaitement (aspect argenté).

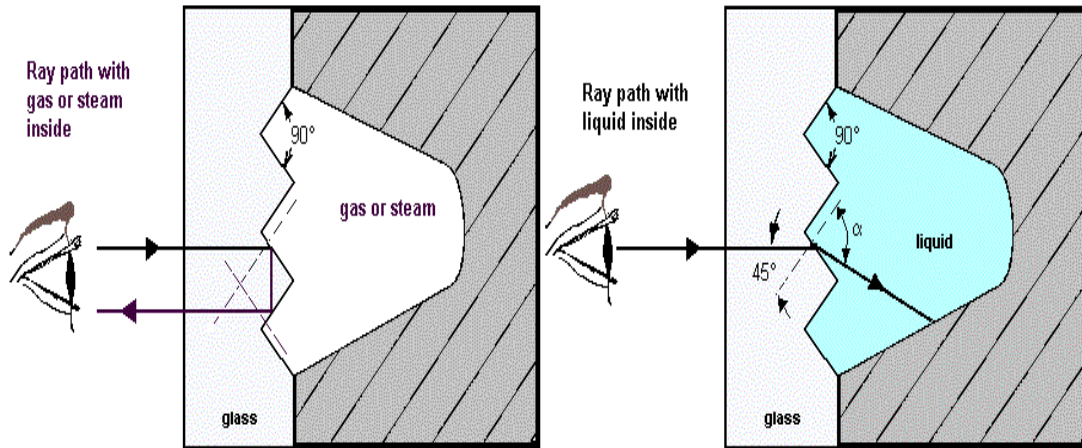


Figure 6: principe d'un indicateur à réflexion

Ce type d'indicateur ne convient pas s'il faut repérer un interface liquide ou si le verre doit être recouvert à l'intérieur d'une feuille de mica ou de polytrifluorochloroéthylène pour le protéger contre l'attaque chimique.

Dans le cas d'**indicateurs magnétiques**, le liquide de procédé n'entre pas en contact avec le verre. Un tube vertical (qui peut être réalisé dans le matériau de fabrication de l'appareil) contient un aimant permanent de forme cylindrique, monté sur un flotteur non magnétique, qui se positionne au niveau du liquide. Un tube extérieur est monté parallèlement. Ce tube contient une série d'aimants permanents peints d'une couleur différente sur chacune de leur moitié. Lorsque l'aimant principal s'approche des petits aimants, il leur fait accomplir une rotation découvrant une autre couleur (figure7).

- A: aimant permanent monté sur le flotteur
- B: axe de rotation de l'aimant A
- C: petit aimant cylindrique dans l'indicateur
- D: axe de rotation des petits aimants
- S: pôle magnétique sud
- N: pôle magnétique nord

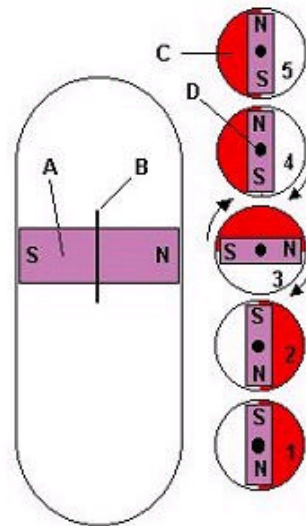


Figure 7 : principe d'un indicateur magnétique

5.2. Modes de rupture et moyens d'y remédier

L'arbre des défaillances de la figure 1 s'applique semblablement aux indicateurs de niveau et aux regards. Les considérations se rapportant aux divers facteurs qui peuvent conduire à un accident majeur dans le cas des regards s'appliquent également aux indicateurs de niveau. Nous allons nous polariser ici sur les facettes spécifiques des indicateurs de niveau.

1. Présence d'une substance dangereuse

Pour tout autre type d'indicateur de niveau ou pour un indicateur magnétique, le risque du verre comme élément fragile est entièrement écarté. Le fluide de procédé n'est plus en contact avec l'indicateur, tout danger de libérer le produit dangereux est donc écarté.

2. Absence de limiteur de fuite

Pour les indicateurs, on trouve plus facilement que pour les regards une solution technique pour limiter toute émission massive. Un exemple typique est le limiteur de débit de fuite (en anglais: *excess flow ball valves*, *ball check cocks*, cfr figure 8). Insistons sur le fait qu'il faut que ce limiteur soit à même d'exercer correctement sa fonction (ne pas avoir oublié par inadvertance de placer les billes, par exemple). De même, il faut que la vanne qui permet au liquide de pénétrer dans le tube soit entièrement ouverte pour que la bille puisse se bloquer dans son logement en cas de bris [18].

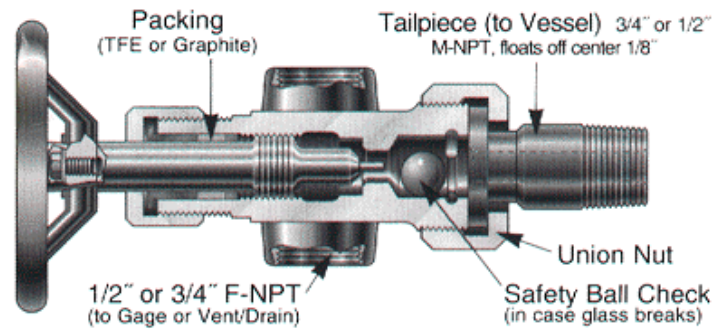


Figure 8 : limiteur de fuite

3. Rupture soudaine et totale de l'indicateur de niveau

Si c'est le cas pour les regards en verre précontraint, on ne peut malheureusement pas compter sur la formation de fissures comme avertissement d'une rupture imminente.

4. Impact externe

Comme les indicateurs de niveau en verre débordent de l'appareil, ils sont particulièrement exposés aux impacts externes. Les indicateurs blindés ont l'avantage de présenter une meilleure résistance aux heurts (travailleurs, outils).

En ce qui concerne la rupture totale du verre de l'indicateur, c'est encore une fois la non résistance du verre à la pression qui doit être mise en cause. Le verre doit être spécifié en fonction de la contrainte prévue et résister au fluide. Afin d'éviter toute concentration de tensions, on doit prendre en compte les chocs thermiques et procéder au montage de l'indicateur en verre en suivant les instructions du constructeur.

6 Codes et normes de bonne pratique

Quoique les risques inhérents aux regards et niveaux en verre soient clairement cernés dans la littérature, on trouve sur le terrain diverses pratiques et façons d'aborder le problème.

Les "Technische Regeln Druckbehälter TRB 003" [15] autorisent l'emploi des indicateurs et regards en verre à condition qu'ils soient spécifiés en fonction des conditions opératoires et qu'ils soient protégés contre les agressions externes et contre toute fuite massive de produit (sans spécifier toutefois le type de protection).

"API Standard 2510: Design and construction of LPG Installations" [2] interdit l'emploi d'indicateurs ordinaires en verre. Les indicateurs blindés doivent être protégés contre toute fuite.

"API Recommended Practice 551: Process Measurement Instrumentation" [13] interdit l'emploi d'indicateurs ordinaires en verre, laisse aux entreprises le soin de sélectionner des indicateurs blindés et protégés suivant leur pratique interne, mais recommande l'emploi d'indicateurs magnétiques dans le cas de matières dangereuses.

La norme Norvégienne NORSOK [12] spécifie que seuls des indicateurs magnétiques peuvent être utilisés lorsqu'il s'agit d'hydrocarbures sauf dans le cas de lecture d'interfaces liquides (*safety ball check valves*).

Le "NFPA 58: Standard for the Storage and handling of Liquefied Petroleum gases" [14] autorise l'emploi de regards en verre.

Le "Centre for Chemical Process Safety" déconseille l'emploi d'indicateurs en verre dans le cas de substances toxiques ou facilement inflammables à moins qu'ils ne soient blindés ou conçus pour des pressions élevées[8]. On renvoie aux recommandations du Industrial Risk Insurers Information Manual (1990) où sont données des informations complémentaires concernant l'emploi des regards et des indicateurs en verre en présence de liquides dangereux.

7. Autres utilisations du verre dans l'industrie de procédés

7.1. Instrumentation de procédé

En plus des regards et des indicateurs, il existe d'autres éléments et instruments de procédé en verre qui forment une barrière entre une substance dangereuse et l'environnement. L'emploi d'éléments en verre trouve le plus souvent son origine dans le fait qu'il est nécessaire de pouvoir visualiser ce qui se passe effectivement dans l'installation. Citons comme exemples les rotamètres (pour mesurer un débit) et les indicateurs de débit (pour visualiser s'il y a un débit ou non). Dans la littérature se rapportant à la sécurité (cfr 2), tous les éléments imaginables n'entrent pas explicitement en ligne de compte. On peut toutefois affirmer que lorsque un tel élément est monté sur une installation contenant des substances dangereuses, on doit tenir compte des mêmes risques que pour les regards et les indicateurs de niveau en verre.

Etant donné le nombre de variantes possibles d'éléments et de configurations, il est illusoire d'en faire ici une description précise. Lorsque l'on veut insérer un tel élément dans une installation, il faut, au cas par cas, analyser à l'aide d'une évaluation de risque, quels risques sont présents et de là quelles mesures prendre. L'arbre de défaillances générique de la figure 1 peut servir de support à cette analyse.

7.2. Installations de procédé réalisées en verre

Le verre est un matériau de construction aux multiples facettes et est bien maîtrisé. Il est possible de concevoir, de construire et de gérer une installation de procédé entièrement réalisée en verre. Le verre offre une large palette d'avantages vis à vis des matériaux « classiques » tels que le métal, la pierre ou les matières synthétiques. De part sa transparence, le verre est très employé dans des applications où il est nécessaire (ou agréable) de visualiser la situation dans l'installation. Le verre possède une très grande résistance contre l'influence de nombreuses substances. Si le verre est utilisé avec des substances qui ne génèrent aucune diminution d'épaisseur, il aura pratiquement une durée de vie illimitée à condition que sa surface ne soit pas endommagée. Les éléments en verre échappent aux phénomènes de vieillissement et de fatigue. En plus, le verre n'a aucun effet catalytique et n'influence ni le goût ni l'odeur d'autres produits.

Lorsque l'on construit une partie où la totalité d'une installation en verre, on fera appel à une firme spécialisée qui maîtrise parfaitement la technologie et les propriétés du verre. Plusieurs

normes sont consacrées aux éléments de procédé en verre, celles-ci sont bien connues des fabricants de telles installations. Parmi les normes principales, il y a :

- ❖ AD-Merkblatt N4 "Pressure vessels made of glass"
- ❖ Dans la série des DIN/ISO : ISO 3585, ISO 3586, ISO 3587 en ISO 4704.

Il n'est pas dans l'esprit de cette note d'information de décrire la façon suivant laquelle une installation en verre doit être conçue et fabriquée. Nous nous attacherons cependant à quelques points auxquels il faut porter attention et aux risques possibles qui sont d'importance pour l'exploitant d'une telle installation.

Protection contre les impacts externes

De par sa fragilité, le verre doit être protégé contre les impacts externes. Non seulement cela empêchera que le verre ne casse par le contact avec un objet et que le contenu de l'installation ne soit libéré, mais cela protégera également la surface du verre contre toute détérioration.

Il est généralement reconnu que le verre ne garde ses propriétés de solidité, de résistance à la pression et une durée de vie illimitée qu'à condition que sa surface ne soit pas endommagée. Même de petits éclats ou rayures sur la surface vont influencer négativement ces propriétés.

Les détériorations de la surface peuvent entre autres provenir de :

- ❖ Grenaille volante due au trafic autour de l'installation
- ❖ Travailleurs occupés à l'installation ou à proximité
- ❖ Le heurt ou l'érafflement d'autres parties de l'installation qui entrent en contact avec le verre
- ❖ Des travaux de soudure à proximité
- ❖ Marques laissées par des produits chimiques ou les agitateurs utilisés dans l'installation

Il est essentiel de protéger le verre contre les impacts externe durant toute la période de vie de l'installation ce qui signifie : lors du stockage, du transport, de l'érection, de l'opération et des travaux de remise en état.

Une façon simple de protéger le verre contre les impacts externes et d'éviter toute détérioration de la surface, consiste à placer des écrans transparents. Une analyse de risque doit permettre de déterminer l'endroit exact où ceux-ci doivent être prévus. Une autre possibilité est de prévoir un revêtement protecteur (voir plus loin).

Protection contre les projections de verre

Dans le cas improbable où un élément de l'installation en verre viendrait à lâcher, les opérateurs seraient exposés à des projections de morceaux de verre. Les mesures de sécurité énoncées ci-dessus préviennent ce risque.

Revêtements protecteurs

Pour assurer une protection plus efficace des éléments en verre d'une installation contre les détériorations de surface et pour parer au danger de projection de verre, on peut revêtir la surface du verre (en anglais : *coating*) d'un film transparent en matière synthétique. Les exemples les plus courants de tels revêtements sont :

- ❖ Une poudre de revêtement thermoplastique à base d'un copolymère éthylène-alcool vinylique (EVOH) qui offre une excellente résistance aux produits chimiques ainsi qu'aux rayures.
- ❖ Une couche de polyester renforcé de fibres de verre, connu sous le nom de *Corwrap*.

En plus de la protection contre la détérioration de la surface et l'éclatement, ces revêtements limitent également les fuites dans une certaine mesure.

Il est à noter que ces *coatings* n'améliorent aucunement les propriétés mécaniques (résistance à la pression) ou thermiques (chocs thermiques).

Chocs thermiques

Une attention toute particulière doit être consacrée aux maxima de différences de température qui peuvent survenir dans l'installation.

Charges électrostatiques

Le verre constitue un isolant électrique excellent. Lorsque l'on manipule des substances inflammables, il faut veiller au risque de charges électrostatiques. Un fluide de faible conductivité (résistance spécifique $> 10^{10}$ Ohm) peut être chargé électrostatiquement de par l'agitation, un remplissage en aspersion ou un débit à haute vitesse dans une tuyauterie. Les précautions suivantes peuvent limiter la formation de charges électrostatiques :

- ❖ Basse vitesse d'agitation
- ❖ Limitation des vitesses d'écoulement dans les tuyauteries (< 1 m/s)
- ❖ Éviter le remplissage par aspersion et employer des tubes plongeurs
- ❖ Mise à la terre correcte de l'installation. Il faut ici veiller à ce que les brides et vannes métalliques implantés dans la tuyauterie en verre soient reliés à la structure métallique afin d'assurer l'équipotentialité de l'installation. La résistance à la terre doit être contrôlée périodiquement et ne doit pas dépasser 10^8 Ohm [4].

Diminution d'épaisseur

Dès que le verre entre en contact avec une substance qui lui est agressive, cela rend nécessaire le contrôle de son épaisseur aux endroits critiques. Les propriétés mécaniques du verre ne sont garanties que pour l'épaisseur d'origine.

8. Recommandations

Pour résumer, nous donnerons ci-après quelques recommandations concernant l'emploi des regards et des indicateurs de niveau en verre dans l'industrie chimique de procédé.

Nous en profitons pour rappeler ici qu'il incombe à l'exploitant de dépister et d'évaluer les risques inhérents à son installation². Si une installation comporte (ou comportera) des éléments en verre, l'exploitant devra réaliser une analyse de risques afin de déterminer si les risques spécifiques liés à ces éléments de l'installation sont suffisamment sous contrôle. L'arbre des défaillances de la figure 1 peut ici servir de support.

Si le risque est évalué comme étant trop important, l'exploitant devra en tirer les mesures qui s'imposent. Les mesures de prévention devront être prise dans l'ordre de priorité décroissant suivant³:

1. Prévenir les risques
2. Prévenir les dommages
3. Limiter les dommages

² Art. 7 et 8 de l'Arrêté Royal du 27 mars 1998 concernant la politique en matière de bien-être des travailleurs dans l'accomplissement de leur travail

³ Art. 9 de l'Arrêté Royal

En plus de cela, on doit de par la prise des mesures qui s'imposent, se conformer aux principes de prévention de base suivants⁴:

- a) Prévention des risques
- b) Evaluation des risques qui ne peuvent être prévus
- c) Eradication des risques à la source
- d) Le remplacement de ce qui est dangereux par ce qui ne l'est pas ou moins
- e) Limiter les risques autant que possible en tenant compte des développements de la technique
- f) Limiter les risques de blessure grave en prenant des mesures matérielles en priorité sur toute autre mesure

Les principes ci-dessus doivent être appliqué à n'importe quelle installation, que l'on soit confronté à un problème de regards, d'indicateurs de niveau, d'autres instruments ou éléments en verre ou encore à une installation complètement en verre. Les risques spécifiques liés au matériau verre doivent être pris en considération dans une analyse de risque dont doivent découler les mesures qui s'imposent.

Dans ce cadre, nous pouvons donner les recommandations suivantes en ce qui concerne les regards et les indicateurs de niveau en verre :

8.1. Regards en verre

- ❖ A éviter si possible
- ❖ Spécifier les conditions opératoires (pression, température) et le type de fluide
 - ✓ Tenir compte des pics de pression et des différences importantes de température
- ❖ Eviter les concentrations de tensions :
 - ✓ Eviter les chocs thermiques en service
 - ✓ Faire exécuter le montage suivant les instructions du fournisseur par du personnel qui a reçu la formation ad hoc
- ❖ Les verres coulés dans une matrice en métal signalent le risque de rupture imminent en se fissurant
- ❖ Si possible et nécessaire prévoir un limiteur de débit de fuite

8.2. Indicateurs de niveau en verre

- ❖ Remplacer le mesure de niveau locale via un indicateur en verre par un autre type d'indicateur : mesure interne ou indicateur de niveau magnétique
- ❖ Spécifier les conditions opératoires (pression, température) et le type de fluide
 - ✓ Tenir compte des pics de pression et des différences importantes de température
- ❖ Eviter les concentrations de tensions :
 - ✓ Eviter les chocs thermiques en service
 - ✓ Effectuer le montage correctement
- ❖ Les indicateurs de niveau blindés (*armoured*) ont la préférence vis à vis des indicateurs ordinaires (*tubular*)
- ❖ Où cela se révèle nécessaire, équiper les indicateurs de niveau en verre d'un système empêchant qu'une quantité massive de fluide ne puisse s'échapper lors de l'endommagement ou de la rupture de ceux-ci. Le fonctionnement de ce limiteur de fuite doit être efficace et fiable.

⁴ Art. 5 § 1 de la loi du 4 août 1996 concernant le bien-être des travailleurs dans l'accomplissement de leur travail

9. Références

- [1]. Critical aspects of safety and loss prevention, Trevor A. Kletz, 1990.
- [2]. Design and Construction of LPG installations, American Petroleum Institute, 1995.
- [3]. Design Considerations for Toxic Chemical and Explosive Facilities, America Chemical Society Symposium Series 345, 1987.
- [4]. DIN/ISO 3586: Apparate, Rohrleitungen und Fittings aus Glas: Allgemeine Grundsätze für Prüfung, Umgang und Gebrauch, Juli 1976.
- [5]. DIN 7079: Runde, metallverschmolzene Schauglasplatten für Druckbeanspruchung, mai 1999
- [6]. DIN 7080: Runde Schauglasplatten aus Borosilicatglas für Druckbeanspruchung ohne Begrenzung im Tieftemperaturbereich, 1996.
- [7]. Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide (seventh edition), The Dow Chemical Company, 1994.
- [8]. Guidelines for Engineering Design for Process Safety, Centre for Chemical Process Safety, 1993.
- [9]. Guidelines for Safe Storage and Handling of High Toxic Hazard Materials, Centre for Chemical Process Safety, 1988.
- [10]. Loss Prevention Bulletin, 134, april 1997.
- [11]. Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control, Frank P. Lees, 1996.
- [12]. Norsok Standard: Field Instrumentation, Norwegian Oil Industry Association, December 1997
- [13]. Process Measurement Instrumentation, American Petroleum Institute, 1993.
- [14]. Standard for the Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases (NFPA 58), National Fire Protection Agency, 1989.
- [15]. Technische Regeln Druckbehälter, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 1982.
- [16]. The Accident Database CD-ROM, The Institution of Chemical Engineers, 1991.
- [17]. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, 1997.
- [18]. What went wrong? Case histories of process plants disasters, Trevor A. Kletz, 1986

Pages de référence sur internet:

Encyclopedia Britannica: *www.brittanica.com*
The Corning Museum of Glass: *www.cmog.org*
www.glasswebsite.com
news.chemicalonline.com, 12/22/1998.
www.nts.no/norsok
Industrial Risk Insurers: *www.industrialrisk.com*

Info commerciale:

www.cesari-bonetti.it
www.infernomfg.com
www.nciweb.net
www.papailias.com
www.prelco.qc.ca
www.qvf.co.uk
www.isemagtech.com
archonind.com
www.johnernst.com
www.eep.thomasregister.com
www.yarway.com
www.proprocess.co.uk
www.qvf.co.uk

* * *