

Conception de tuyauteries pour écoulement gravitaire

Le gaz entraîné dans un liquide s'écoulant par gravité depuis un récipient peut réduire la capacité du tuyau de sortie et provoquer des fluctuations cycliques du débit. Ces problèmes peuvent être évités en concevant soigneusement le système pour un écoulement soit entièrement liquide, soit diphasique.

P. D. Hills, Imperial Chemical Industries PLC

L'entraînement limite l'écoulement gravitaire du liquide provenant des récipients en augmentant la chute de pression (au-delà de celle pour un écoulement monophasique) à travers la tuyauterie de sortie, et en réduisant la hauteur statique disponible pour surmonter cette chute de pression. Un problème similaire peut survenir lorsqu'un liquide est proche de son point d'ébullition, ou contient du gaz dissous, en particulier si la pression absolue en tout point de la tuyauterie tombe en dessous de la pression atmosphérique, comme c'est le cas dans un siphon.

Considérons le cas d'un liquide s'écoulant depuis le fond d'une colonne d'absorption à travers un tuyau dimensionné pour un écoulement liquide complet (Fig. 1).

Lorsque le niveau de liquide dans la colonne est suffisamment bas, le liquide entraîne du gaz (Fig. 1a). L'augmentation résultante de la chute de pression et la réduction de la hauteur limitent le débit, et le niveau de liquide augmente (Fig. 1b). Finalement, le niveau s'élève suffisamment pour arrêter l'entraînement (Fig. 1c). Cependant, le gaz encore présent dans le tuyau de sortie fait continuer l'élévation du niveau jusqu'à ce que tout le gaz soit évacué (Fig. 1d). Maintenant, le tuyau de sortie fonctionne à plein débit (comme supposé dans la conception), mais la hauteur statique, devenant plus élevée que prévu, crée un débit excessif, ce qui provoque la chute du niveau jusqu'à ce que l'entraînement se produise à nouveau et que le cycle se répète (Fig. 1e).

De telles oscillations peuvent être sévères, selon la géométrie du système. Dans un cas, le débit de pointe d'un réservoir a dépassé la capacité du casse-vide suffisamment pour le faire s'effondrer.

Expression générale pour les débits liquide

Dans cet article, les débits liquides sont généralement exprimés en termes de flux volumétrique superficiel adimensionnel, J_L^* , qui est défini par :

$$J_L^* = \frac{4Q_L}{\pi d^2 (g d)^{1/2}} \quad (1)$$

Où Q_L est le débit volumétrique ; d est le diamètre intérieur du tuyau ; et g est l'accélération gravitationnelle. Eq. (1) est similaire au nombre de Froude. Il est utilisé de préférence au nombre de Froude, car la définition de ce dernier varie selon les circonstances. Toutes les équations de cet article sont en unités cohérentes.

Concevoir pour l'écoulement par gravité

Trois approches de conception des systèmes de drainage par gravité sont possibles :

1. Pour un débit complet, avec la taille de la tuyauterie de sortie basée sur des critères monophasés.
2. Pour l'auto-ventilation, la vitesse du liquide dans le tuyau de sortie est maintenue suffisamment basse pour permettre au gaz de s'écouler à contre-courant du liquide.
3. Pour l'entraînement de gaz, mais avec le système conçu pour l'accueillir.

En général, on peut s'attendre à ce que la première approche aboutisse au plus petit diamètre de tuyau et qu'il soit privilégié. Cependant, dans de nombreux cas, il n'est pas possible d'assurer un débit complet de la conduite, auquel cas il peut être nécessaire d'adopter des solutions de rechange.

Conception pour un écoulement noyé

Pour éviter l'entraînement de gaz dans la conception à écoulement en conduite pleine, le niveau de liquide dans le récipient doit toujours être suffisamment élevé pour maintenir l'entrée de la conduite noyée. Pour y parvenir, une forme de contrôle sera nécessaire, comme par exemple une vanne de régulation (Fig. 2a) ou une boucle verticale dans la tuyauterie (Fig. 2b). Si cette dernière est utilisée, un brise-siphon sera nécessaire (illustré sur la Fig. 2b), et on ne peut supposer que la tuyauterie en aval du brise-siphon fonctionnera en écoulement noyé car le gaz est susceptible d'être entraîné au niveau du brise-siphon. Bien entendu, l'un ou l'autre de ces arrangements augmentera la perte de charge du système et réduira quelque peu les avantages de la conception à écoulement noyé.

Des critères monophasiques peuvent être appliqués pour concevoir des sections de tuyauterie de sortie dans lesquelles on peut s'attendre à un écoulement noyé. Si une tuyauterie certaine d'être noyée est précédée d'une section auto-ventilée, la longueur minimale de la section auto-ventilée devrait être de 0,5 m, pour permettre le dégagement du gaz, avant que la tuyauterie ne soit réduite pour un écoulement monophasique (Fig. 2c).

Les critères pour les sorties noyées sont l'Eq. (2) pour les sorties à la base des récipients, et l'Eq. (3) pour les sorties sur le côté des récipients :

$$J_L^* < 1.6 \left(\frac{h}{d} \right)^2 : h > 0.892 \left(\frac{Q_L}{g d} \right)^{0.25} \quad (2)$$

Ici, h est la profondeur du liquide dans le récipient, loin de la région de la sortie.

$$J_L^* < \left(\frac{2h}{d}\right)^{1/2} : h > 0.811 \frac{(Q_L)^2}{gd^4} \quad (3)$$

Ici, h est la hauteur du liquide au-dessus du haut de la sortie, loin de la région de la sortie.

Conception de tuyauterie non noyée (auto-ventilée)

Tuyauterie à sortie latérale — Sortant du côté d'un récipient, la tuyauterie doit être dimensionnée de telle sorte que :

$$J_L^* < 0.3 : d > \left(\frac{4Q_L}{0.3\pi g^{1/2}}\right)^{0.4} \quad (4)$$

Cela garantit que la conduite fonctionnera à moins de moitié pleine à son entrée. Le niveau dans le réservoir, loin de la sortie,

sera inférieur à $0,8 d$ au-dessus de la base de la conduite. La capacité d'une telle conduite de trop-plein peut être déterminée à partir de la Courbe 1 de la Fig. 3.

Tuyauterie quasi-horizontale — Si une telle conduite ne fonctionne que partiellement pleine, elle doit être inclinée pour fournir la charge statique nécessaire pour surmonter les pertes par frottement. Une pente minimale de 1:40 est recommandée. Pour éviter que le liquide n'entraîne le gaz vers l'avant, une surface libre adéquate doit être laissée dans le tuyau pour permettre au gaz de circuler à contre-courant. Pour les tuyaux jusqu'à 200 mm de diamètre, les profondeurs de liquide ne doivent pas dépasser la moitié du diamètre du tuyau. Pour les tuyaux plus grands, des profondeurs allant jusqu'aux trois quarts du diamètre peuvent être possibles.

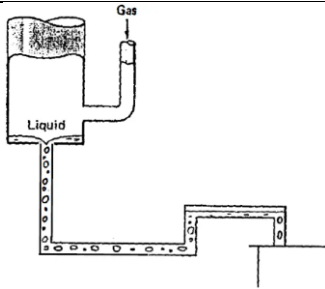


Fig. 1a - Le gaz est entraîné dans la sortie, limitant le débit. Le débit de liquide entrant dépasse le débit sortant, et le niveau monte.

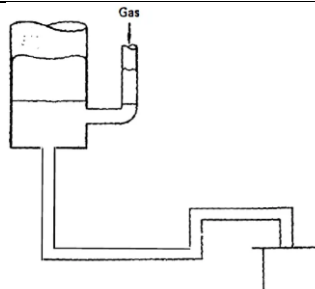


Fig. 1d - Le niveau de liquide empêche maintenant l'entrée de gaz. Tout le gaz a été évacué de la tuyauterie de sortie, et un siphon se forme. L'écoulement monophasique dans la tuyauterie de sortie est favorisé par une charge plus élevée. Maintenant, le débit de sortie dépasse le débit d'entrée, et le niveau baisse rapidement.

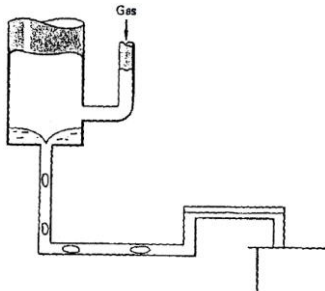


Fig. 1b - Un niveau de liquide plus élevé réduit l'entraînement, mais l'écoulement sortant reste limité. Le niveau continue de monter.

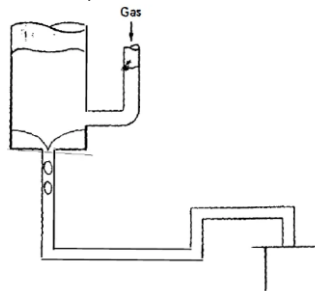


Fig. 1e - L'entraînement recommence. Le débit de liquide est encore élevé, aidé par le siphon. La pression de gaz accumulée dans le tuyau d'entrée est libérée en une soudaine poussée. Le système revient à son état initial.

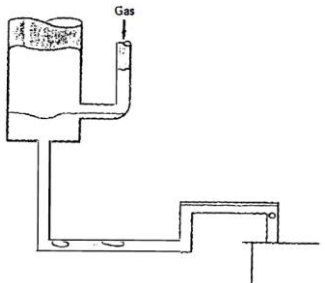


Fig. 1c - Le niveau du liquide est maintenant suffisamment élevé pour empêcher tout autre entraînement. Cependant, quelques bulles sont encore piégées dans la sortie, restreignant le débit. Le niveau continue de monter. Le débit d'entrée du gaz commence à être étranglé.

L'entraînement provoque des oscillations en augmentant la perte de charge dans la tuyauterie et en réduisant la hauteur de liquide dans le réservoir

Fig.1

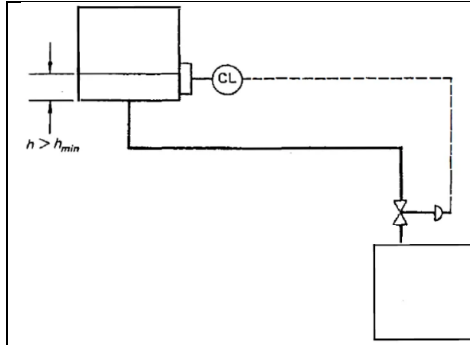


Fig. 2a - La vanne de régulation maintient le niveau dans le réservoir

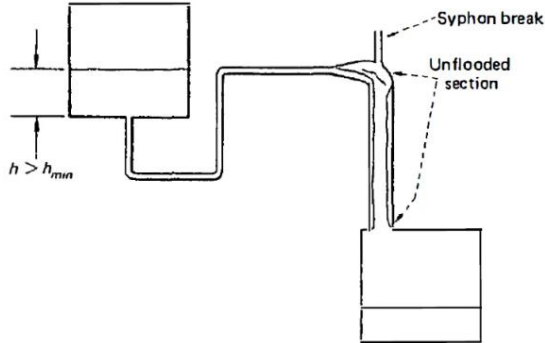


Fig. 2b - La boucle hydraulique assure un niveau minimum

Ces conceptions assurent un écoulement noyé dans les tuyauteries de sortie

Fig. 2

Lorsque l'écoulement dans un tuyau partiellement rempli est uniforme (c'est-à-dire que la profondeur est constante), l'énergie perdue par friction est équilibrée par le changement d'énergie potentielle dû à l'inclinaison du tuyau. Dans ce cas, la vitesse moyenne, \bar{V}_L , est liée à l'inclinaison et à la profondeur du liquide en écoulement par l'Eq. (5) [1] :

$$\bar{V}_L = (32gmi)^{1/2} \log \left\{ \frac{\varepsilon}{14.8m} + \left(\frac{0.22v}{m(g_n mi)^{1/2}} \right) \right\} \quad (5)$$

Ici, m est la profondeur hydraulique moyenne (surface d'écoulement/périmètre mouillé) ; i est l'inclinaison du tuyau par rapport à l'horizontale ; ε est la rugosité du tuyau ; et v est la viscosité cinématique.

La Fig. 3 donne la capacité volumétrique pour un écoulement établi dans des tuyaux rugueux et lisses à moitié et aux trois quarts pleins. Les courbes ont été calculées via l'Eq. (5) pour des tuyaux avec une pente de 1:40 et un fluide ayant une viscosité cinématique de $10^{-6} m^2/s$ (par exemple, l'eau à 20°C). La rugosité absolue utilisée pour les tuyaux rugueux était de 0,25 mm (acier doux modérément rouillé). Les résultats ne sont pas très sensibles à la viscosité du liquide. La capacité d'un tuyau rugueux est augmentée d'environ 1 % pour un liquide totalement non visqueux, et n'est réduite que d'environ 10 % pour un liquide ayant une viscosité cinématique de $10^{-5} m^2/s$. Ainsi, les courbes d'eau de la Fig. 3 peuvent être utilisées en toute sécurité pour la plupart des liquides.

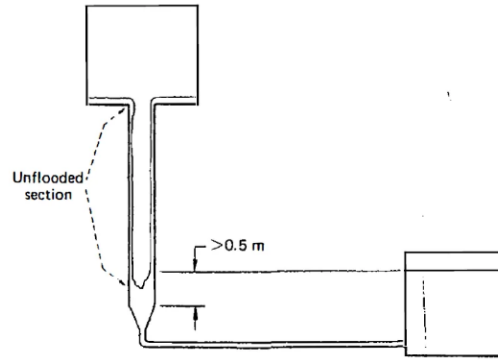
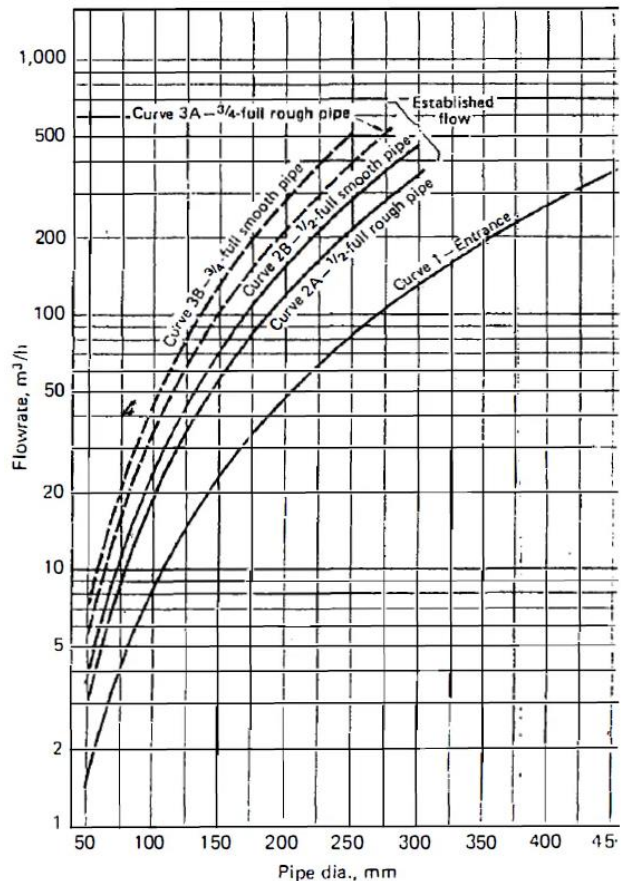


Fig. 2c - Une section auto-ventilée précède la tuyauterie noyée



Capacités pour les écoulements établis dans les conduites non noyées

Fig. 3

La vitesse initiale dans une conduite de sortie conçue pour fonctionner à moitié pleine est inférieure à la vitesse d'équilibre dans un tuyau ayant une pente de 1:40. À mesure que le liquide accélère dans le tuyau, la profondeur du liquide diminue avec la distance jusqu'à atteindre celle correspondant au débit établi pour un débit donné. Pour maintenir une profondeur relative constante, un tuyau conique serait nécessaire. Comme cela n'est pas pratique, il est recommandé de réduire le diamètre du tuyau par paliers. Des réducteurs coniques devraient être installés pour éviter des perturbations soudaines dans l'écoulement.

Pour de longues longueurs de tuyaux, l'approche de conception suivante est suggérée :

1. Dimensionner la conduite de sortie sur le côté d'un récipient pour $J_L^* = 0.3$ (Courbe 1 de la Fig. 3). Si la taille de conduite résultante n'est pas standard, choisir la taille standard supérieure à la taille calculée. Continuer avec la taille ainsi choisie sur au moins dix diamètres de conduite.
2. Déterminer le diamètre de conduite correspondant à un écoulement établi à mi-hauteur pour le débit requis (en utilisant la Courbe 2A ou 2B de la Fig. 3). Là encore, sélectionner la taille de conduite standard la plus proche supérieure à la taille calculée.
3. Réduire le diamètre de la conduite de la taille de sortie à la taille d'écoulement établi, en utilisant un réducteur excentrique qui ne modifiera pas la pente du fond de la conduite. De préférence, la longueur minimale du réducteur devrait être deux fois celle du diamètre de la conduite en amont.

Si la procédure précédente est suivie pour des tuyaux avec une pente de 1:40, la profondeur du liquide après le réducteur ne dépassera pas 75% du diamètre du tuyau.

Pour les tuyaux inclinés longs et de grand diamètre (>200 mm), il peut être intéressant d'envisager une seconde réduction jusqu'à la taille correspondant à une profondeur d'écoulement établi relative de 75%. Cette réduction peut être effectuée après 50 diamètres de tuyau (voir Courbe 3A ou 3B de la Fig. 3).

Pour les courtes longueurs de tuyaux, le coût supplémentaire des réducteurs coniques, surtout s'ils ont un angle doux comme recommandé (ce qui peut ne pas être standard), ou des tuyaux revêtus, peut dépasser les économies réalisées en passant à des tuyaux de plus petit diamètre. Dans ces cas, toute la longueur du tuyau devrait être de grande taille.

Écoulement auto-ventilé dans les tuyaux verticaux

Le liquide s'écoulant verticalement vers le bas le fait sous forme d'un film annulaire. Dans de tels cas, de faibles vitesses superficielles sont nécessaires pour éviter que le gaz ne soit aspiré avec le liquide. La suggestion de Simpson de baser les diamètres des sorties de tuyaux sur un nombre de Froude limite de 0,3 est recommandée [2] :

$$J_L^* < 0.3 \quad (6)$$

L'Eq. (6) étant identique à l'Eq. (4), les diamètres des tuyaux peuvent être déterminés à partir de la Courbe 1 de la Fig. 3.

Cette approche devrait être adoptée lorsqu'il faut éviter l'entraînement de gaz, comme dans le cas où un tuyau vertical s'étend dans un récipient en dessous de la surface du liquide, ou lorsque la tuyauterie en aval doit être conçue pour un écoulement noyé. On peut s'attendre à ce que des tuyaux plus petits que ceux dictés par l'Eq. (6) provoquent des oscillations.

Écoulement auto-ventilé dans les systèmes complexes

Il existe peu d'informations sur l'écoulement non noyé dans les systèmes comprenant des coudes, en particulier pour les changements d'écoulement de vertical à presque horizontal, et vice versa. Des preuves limitées suggèrent que même si le diamètre du tuyau est choisi pour un écoulement auto-ventilé (comme dans la section précédente sur la conception de tuyauterie non noyée), l'entraînement et les fluctuations peuvent encore se produire en raison des effets des coudes. Les

recommandations de conception données maintenant ne sont donc proposées qu'à titre provisoire.

Les coudes dans le plan horizontal (ou presque horizontal) ne causeront pas nécessairement de problèmes si la pente de 1:40 est maintenue avec le coude et que celui-ci est doux (de préférence, le rayon égalant cinq diamètres).

Dans le plan vertical, le nombre de coudes doit être limité autant que possible. Une tuyauterie en pente douce est préférable aux tronçons verticaux. Le rayon des coudes doit être d'au moins cinq diamètres.

Les coudes provenant de, ou allant vers, des sections verticales doivent être dimensionnés comme pour la tuyauterie verticale. La tuyauterie inclinée suivant une section verticale peut être dimensionnée pour un écoulement établi à moitié plein via les critères pour la tuyauterie presque horizontale dans la discussion précédente sur la conception de tuyauterie non noyée (auto-ventilée). Les changements de diamètre doivent être effectués au moyen de réducteurs coniques asymétriques dont la longueur est égale à deux fois le plus grand diamètre, et qui sont installés de sorte que le fond du réducteur ait une pente égale à celle de la tuyauterie à chaque extrémité.

Si l'entraînement est acceptable

Il existe de nombreuses situations où il n'est pas nécessaire d'empêcher l'entraînement. Parfois, des fluctuations modérées ne poseront pas de problème. Dans ces cas, la tuyauterie peut être dimensionnée pour des diamètres plus petits, permettant des économies considérables.

Parfois, les fluctuations causées par l'entraînement de gaz peuvent être réduites en prévoyant un moyen pour le gaz de s'échapper à un point en aval dans le tuyau de sortie, comme par exemple via un type de séparateur gaz-liquide. Si cela est réalisable, la tuyauterie peut être de plus petit diamètre. Cependant, comme il n'est pas possible de prédire l'étendue de l'entraînement — et, par conséquent, de calculer la perte de charge avec certitude — une telle approche doit être adoptée avec prudence.

Remerciements

L'auteur tient à remercier Imperial Chemical Industries pour son autorisation de publier cet article.

J. Matley, Editor

Références

1. Ackers. P., Tables for the hydraulic design of storm drains, sewer lines. Her Majesty's Stationery Office, 1969
2. Simpson. L. L., Sizing piping for process plants. Chem. Eng., June 17, 1968.

L'auteur

P.D. Hills est un spécialiste du transfert de chaleur et de l'écoulement des fluides au sein du département d'ingénierie d'Imperial Chemical Industries. Auparavant, il avait été ingénieur de procédés impliqué dans le développement de procédés, le dépannage d'installations et la conception de procédés. Il



est titulaire d'un B.Sc. (Ing.) et d'un doctorat de l'Imperial College de Londres.