

Calculs de puits thermométrique

Emerson propose un nouvel outil de calcul de puits thermométrique – Gratuit et en ligne
Fondé sur la norme ASME PTC 19.3 TW, cet outil en ligne gratuit est disponible à l'adresse
suivante : Rosemount.com/ThermowellCalc.

Essayez-le dès aujourd'hui et regardez une vidéo d'explication de cette nouvelle norme.



Dirk Bauschke
Responsable ingénierie

David Wiklund
Ingénieur général senior

Andrew Dierker
Ingénieur de projets mécaniques

Alex Cecchini
Ingénieur marketing senior

Sommaire

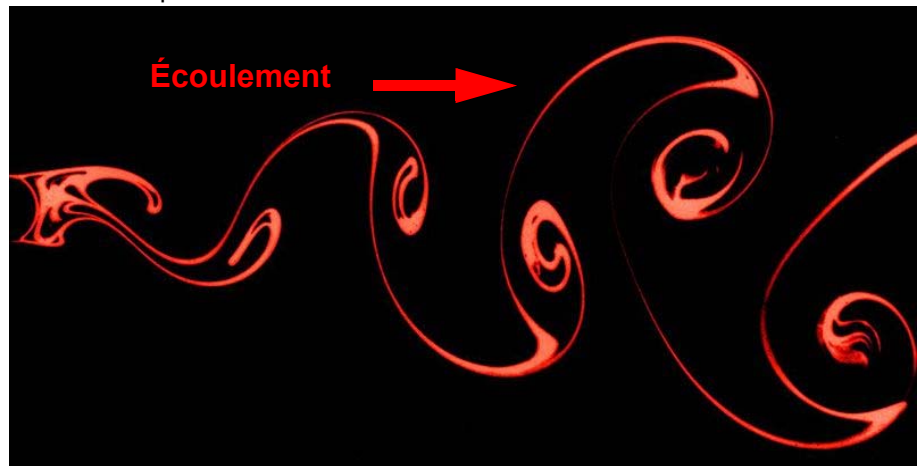
Calculs de puits thermométriques

Introduction	1-1
Bref historique de la norme ASME PTC 19.3	1-1
Méthodologie de la norme ASME PTC 19.3-1974	1-2
Théorie des tourbillons emportés par le courant	1-3
Contrainte de flexion et de pression	1-9
Variantes d'installation	1-16
Définition de la longueur libre	1-18
Colliers de vitesse	1-20
Vitesse moyenne / profil de vitesse	1-21
Exigences relatives à la construction des puits thermométriques . . .	1-21

Puits thermométriques

INTRODUCTION

Les puits thermométriques sont ni plus ni moins qu'un cylindre circulaire installé en porte-à-faux dans la tuyauterie procédé. Ils garantissent la protection des conditions du procédé et l'étanchéité du procédé pour les sondes de température. Quand le fluide procédé passe autour du puits thermométrique, des remous basse pression sont créés en aval dans le flux laminaire, turbulent et transitionnel. La combinaison des forces générées par les forces de résistance en ligne statiques de l'écoulement de fluide et les forces de sustentation transversales dynamiques provoquées par le tourbillon alternatif, peut être à l'origine de défaillances mécaniques dues à la fatigue du puits thermométrique. Les concepteurs de tuyauterie utilisent une grande variété d'outils pour prévoir et éviter les défaillances des puits thermométriques dans leurs systèmes, mais la norme ASME PTC 19.3-1974 est devenue la référence pour la conception de la plupart des puits thermométriques.



Fumée colorée montrant l'allée de tourbillons de Von Karman dans un écoulement laminaire⁽¹⁾

BREF HISTORIQUE DE LA NORME ASME PTC 19.3



Cette norme remonte à 1957, quand l'ASME (American Society of Mechanical Engineers) a déterminé que le supplément aux mesures de température des années 1930 était insatisfaisant, dans la mesure où il n'incluait pas les effets de la température et des contraintes. L'ASME a alors demandé au comité Boiler and Pressure Vessel Committee (Chaudière et appareils sous pression) de créer un document, mais l'initiative a été jugée hors du champ d'action de celui-ci. Un comité autonome a, par la suite, été constitué sous forme de section et chargé de toutes les mesures de température relatives à la conception d'un puits thermométrique. La norme ASME PTC 19.3-1974 se base sur un document signé par J.W. Murdock (1959).⁽²⁾

John Brock de la Naval Post Graduate School a réalisé quelques travaux ultérieurs en 1974, lesquels ont permis de découvrir quelques éléments que Murdock avait admis ou ignoré. Brock a notamment suggéré d'utiliser un nombre de Strouhal variable plutôt que fixe, d'appliquer des facteurs d'installation dans l'approximation de la fréquence naturelle du puits thermométrique et d'examiner la limite du rapport de fréquence de 0,8 pour tenir compte de l'incertitude dans les calculs de fréquence naturelle⁽³⁾. Ces suggestions ont démontré qu'il était alors possible d'apporter quelques améliorations à la norme ASME PTC 19.3-1974.

(1) Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_induced_vibration en date du 20/5/2011

(2) Murdock, J.W., « Power Test Code Thermometer Wells » (Code d'essai de puissance - puits thermométriques), Journal of Engineering for Power (1959).

(3) Brock, John E., « Stress Analysis of Thermowells » (Analyse des contraintes des puits thermométriques), Naval Postgraduate School, Monterey CA (1974).

Puits thermométriques

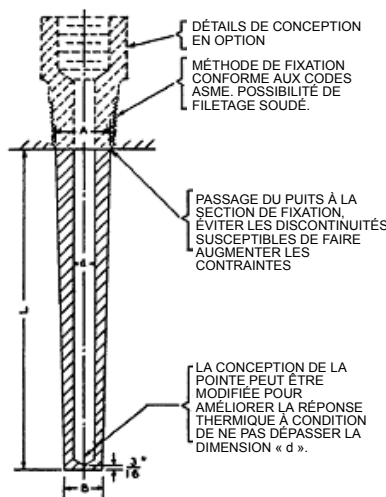
La norme ASME PTC 19.3-1974 ne semblait toutefois pas couvrir toutes les installations. Exemple de défaillance catastrophique de puits thermométrique due à la fatigue : la fermeture du réacteur surgénérateur à neutrons de Monju (Japon) suite à une fuite du système de refroidissement au sodium liquide en 1995. L'enquête a révélé que le puits thermométrique était conçu conformément à la norme ASME PTC 19.3-1974, mais le mode de défaillance était dû à la résonance en ligne qui n'est pas prise en compte dans la norme. C'est ainsi que fut développée la version japonaise de la norme, appelée JSME S012⁽¹⁾. Le réacteur a redémarré en mai 2010 après plusieurs années d'enquêtes et de batailles juridiques.

En général, toutefois, la norme ASME PTC 19.3-1974 a toujours été utilisée avec succès dans les applications avec et sans vapeur. Plusieurs facteurs décisifs ont cependant poussé l'ASME à rassembler à nouveau le comité en 1999 pour réécrire entièrement la norme ; les avancées dans le comportement des puits thermométriques, le nombre de catastrophes (Monju, entre autres) et l'utilisation de plus en plus fréquente de l'analyse des éléments finis pour la modélisation des contraintes. Tous combinés, ces facteurs ont conduit de nombreux acteurs du secteur à s'éloigner des méthodes rudimentaires et des tableaux simplifiés de la norme ASME PTC 19.3-1974, pour se tourner vers des méthodes plus élaborées pour prédire la fréquence naturelle des puits thermométriques et calculer la fréquence forcée.

Plutôt que de se contenter de mettre à jour la version existante de la norme ASME PTC 19.3-1974, le comité a décidé de publier une nouvelle norme en raison des importantes modifications associées à cet effort. La partie dédiée aux calculs des puits thermométriques de la norme ASME PTC 19.3-1974 comportait 4 pages. En comparaison, la nouvelle norme dénommée ASME PTC 19.3 TW-2010 (« TW » désignant puits thermométrique, ThermoWell en anglais), comporte plus de 40 pages, en raison des explications théoriques et de l'extrême complexité du procédé.

La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 a été publiée en juillet 2010.

MÉTHODOLOGIE DE LA NORME ASME PTC 19.3-1974



Comme déjà indiqué, la norme de 1974 est très brève. Elle étudie quelques profilés de tiges et utilise des équations simplifiées pour modéliser le puits thermométrique pour les calculs de fréquence naturelle. Même si elle accepte toute méthode de fixation approuvée par les Codes sur les chaudières et les appareils sous pression et les tuyauteries de l'ASME, les équations ne font pas la distinction entre les variations de montage classiques tels que à bride, filetés et soudés et ignore les effets des différents profilés de tiges, tels que droit, biseauté et étagé. Les dimensions de perçage ne figurant pas dans les tableaux ne sont pas prises en compte. Les capteurs de 6 mm et 1/4 po. de diamètre partagent donc les

mêmes constantes dans les équations et aucune constante n'est indiquée pour les perçages des capteurs de 3 mm de diamètre.

(1) Odahara, Sanoru, et al. « Fatigue Failure by In-line Flow-induced Vibration and Fatigue Life Evaluation, » JSME International Journal, Series A, Vol. 48, No. 2 (2005).

Malgré tous ces inconvénients, la norme ASME PTC 19.3-1974 propose effectivement un procédé simple pour évaluer les puits thermométriques qui ont contribué à la faire largement accepter dans l'industrie : rassembler les données procédé et les informations sur les matériaux du puits thermométrique, calculer la fréquence naturelle et de Strouhal, comparer le rapport à 0,8, calculer la contrainte de flexion, comparer la pression maximale à la pression du procédé et vérifier la longueur maximale à la longueur souhaitée.

La récolte des données procédé et des informations sur les matériaux est une étape simple, sauf si certaines données ne sont plus accessibles.

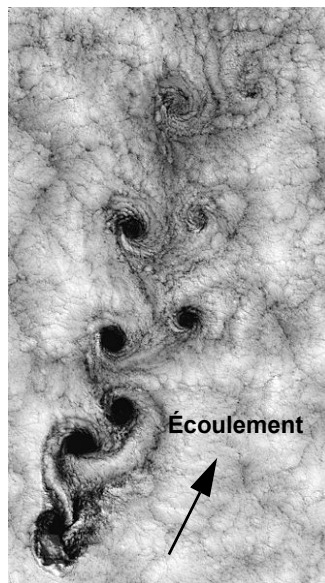
Le « rapport entre la fréquence à la température du procédé et la fréquence à 70 °F » n'est pas facile à déterminer.

La méthode de calcul de la fréquence naturelle du puits thermométrique se base sur une équation simple, mais certains de ses termes, tels que K_f , ne sont pas bien définis. Si la longueur du U du puits thermométrique ne correspond pas à celles énumérées dans le tableau, le concepteur devra utiliser les données correspondant à une longueur supérieure au puits thermométrique, pour plus de précaution. Pour une conception de puits thermométrique acceptable, le rapport entre la fréquence de Strouhal et la fréquence naturelle « ne doit pas dépasser » 0,8.

L'étape finale est une évaluation de la longueur du puits thermométrique en fonction des contraintes à l'état d'équilibre. Elle permet de déterminer la longueur maximale du puits thermométrique pour gérer la contrainte de flexion. Cette longueur est comparée à la longueur souhaitée pour déterminer si elle est acceptable ou si elle doit être raccourcie.

THÉORIE DES TOURBILLONS EMPORTÉS PAR LE COURANT

**(base de la norme
ASME PTC 19.3 TW-2010)**



Quand un liquide s'écoule autour d'un objet é moussé sur son parcours, des tourbillons se forment en aval de l'objet. On parle alors de tourbillons emportés par le courant, d'allée de tourbillons de Von Karman ou de tourbillons de courant. Les tourbillons sont des cellules basse pression créées et délestées en aval, en alternance. La pression différentielle due à l'alternance des tourbillons produit des forces alternatives sur l'objet. Cela entraîne une alternance de contraintes sur l'objet alors qu'il détourne l'écoulement. On observe ce phénomène dans la nature au niveau des tourbillons en aval des piles de pont, des tourbillons dans les nuages en aval des vents au sommet des montagnes ou des tons éoliens quand le vent passe autour des lignes électriques. Si les tourbillons sont utiles pour les mesures d'écoulement du procédé, les concepteurs de puits thermométriques doivent les éviter étant donné les risques de défaillances.

Image Landsat 7 d'une allée de tourbillons de Von Karman dans les nuages au large de la côte chilienne près des îles Juan Fernandez (15 septembre 1999).⁽¹⁾

(1) Site Web d'observation de la terre de la NASA

« http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=3328 »

Puits thermométriques

La principale cause de défaillance des puits thermométriques étant la fatigue due à la résonance, le concepteur doit comprendre la formation des tourbillons pour éviter leurs effets et en prévoir la fréquence. La génération des tourbillons se faisant à des fréquences comprises entre 50 Hz et 1 500 Hz, le puits thermométrique peut supporter un grand nombre de cycles en très peu de temps.



Exemple de défaillance de puits thermométrique due à des vibrations induites par des tourbillons⁽¹⁾

Quand la fréquence des tourbillons, ou fréquence de Strouhal, approche de la fréquence naturelle du puits thermométrique, le déplacement de la pointe et les contraintes sont amplifiés et le puits thermométrique peut être abîmé du fait de la grande quantité d'énergie qu'il doit absorber. Cela signifie que, outre les conditions du procédé telles que la pression, la température et la corrosion, le concepteur doit tenir compte de la résistance à la fatigue cyclique élevée pour adapter, en général, l'élément à l'application.

Vitesse minimale

Dans les liquides procédé à écoulement lent, l'énergie transférée du fluide procédé au puits thermométrique n'est pas suffisante pour provoquer des défaillances dues à la fatigue. Si les conditions suivantes sont réunies, nul besoin de procéder aux calculs de limite de fréquence dans la mesure où le risque de défaillance du puits thermométrique est négligeable.

1. Vitesse du fluide procédé, $V < 0,64 \text{ m/s}$ (2,1 pi/s)
2. Épaisseur paroi, $(A - d) \geq 9,55 \text{ mm}$ (0,376 po)
3. Longueur libre, $L \leq 0,61 \text{ m}$ (24 po)
4. Diamètre racine et pointe (A et B) $\geq 12,7 \text{ mm}$ (0,5 po)
5. Contrainte admissible maximale, $S \geq 69 \text{ Mpa}$ (10 ksi)
6. Limite d'endurance à la fatigue, $S_f \geq 21 \text{ Mpa}$ (3 ksi)

Même dans de telles conditions, ces faibles vitesses restent susceptibles d'exciter la résonance en ligne et de provoquer une défaillance du capteur du fait des fortes vibrations lors de la résonance. Si ces critères ne sont pas satisfaits ou s'il existe un risque de corrosion sous contrainte ou de fissure des matériaux du fait de l'interaction des liquides (qui pourrait entraîner un changement de l'endurance à la fatigue), le concepteur doit entièrement évaluer la conception du puits thermométrique.

Nombre de Strouhal

L'utilisation d'un nombre de Strouhal fixe ou variable a fait l'objet de nombreuses discussions. La norme ASME PTC 19.3-1974 utilisait un nombre de Strouhal fixe de 0,22 tandis que Brock recommandait un nombre de Strouhal variable, dépendant du nombre de Reynolds. Beaucoup d'experts du secteur ont alors commencé à intégrer le nombre de Strouhal variable aux équations de fréquence des tourbillons dans le cadre de la norme ASME PTC 19.3-1974, en l'appelant « méthode de Brock » ou de ce style.

(1) Energy Institute, « Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue in Process Pipework » 2nd Edition, (2008), N° de publication 978-0-85293-463-0.

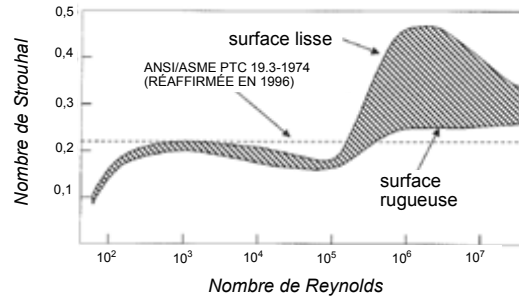
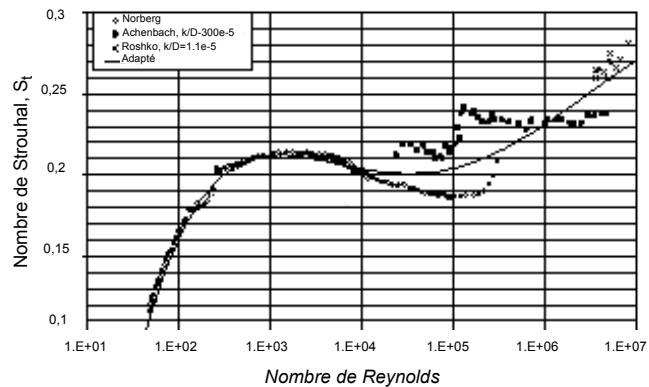


Tableau type montrant le nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds

Le comité de la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 a étudié les expériences suivantes avant de décider de la manière d'utiliser le nombre de Strouhal variable. Deux publications parues dans le JSME International Journal en 2001 ont fait part de résultats d'essais intéressants pour les cylindres droits et biseautés usinés qui ressemblaient, par leur forme, à des puits thermométriques. Les forces et les amplitudes vibratoires ont été mesurées tandis que les cylindres étaient immergés dans un écoulement liquide. La conclusion était que la présence d'un nombre de Strouhal élevé dans les expériences précédentes était fondée sur les mesures dans les tourbillons et pas sur les forces réelles exercées sur le puits thermométrique.⁽¹⁾⁽²⁾

Les surfaces « rugueuses », dans les expériences, désignent des surfaces supérieures à 128 Ra. Aucun puits thermométrique de l'industrie de procédé ne possède de finition supérieure à 32 Ra et les limites de contraintes et les calculs de la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 ne sont pas valides pour les finitions d'une rugosité supérieure à 32 Ra.



Données réelles du nombre de Strouhal d'un cylindre rugueux en fonction du nombre de Reynolds.⁽³⁾

- (1) Sakai, T., Iwata, K., Morishita, M., and Kitamura, S., « Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder in Super-Critical Reynolds Number Flow and Its Suppression by Structure Damping, » JSME Int. J. Ser. B. 44, 712-720 (2001).
- (2) Iwata, K., Sakai, T., Morishita, M., and Kitamura, S., « Evaluation of Turbulence-Induced Vibration of a Circular Cylinder in Super-Critical Reynolds Number Flow and Its Suppression by Structure Damping, » JSME Int. J. Ser. B. 44, 721-728 (2001).
- (3) Norme ASME, codes des essais de performances 19.3TW (projet 7).

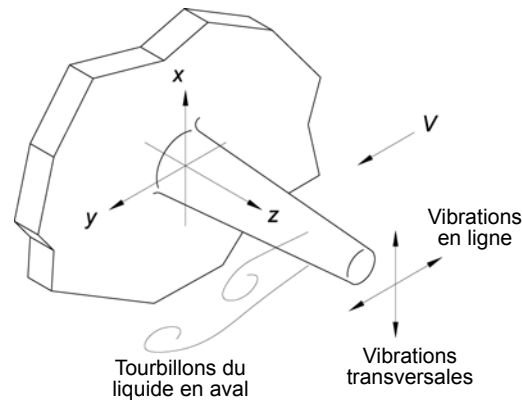
Puits thermométriques

À partir de ces données, le comité ASME PTC 19.3 TW-2010 a décidé d'intégrer un nombre de Strouhal variable défini par la courbe du cylindre rugueux. Pour simplifier les calculs, les concepteurs ont également été autorisés à estimer avec prudence et de façon approximative le nombre de Strouhal comme étant de 0,22. Cela est particulièrement utile si le concepteur ne peut pas déterminer la viscosité du liquide dynamique ou cinématique afin de déterminer le nombre de Reynolds.

Nombre de Reynolds

Dans tout écoulement entièrement immergé, le nombre de Reynolds constitue un paramètre fondamental. Le nombre de Reynolds est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses dans le champ d'écoulement. Pour les éléments qui produisent des tourbillons, la longueur saisie pour le nombre de Reynolds est la largeur de l'élément générant des tourbillons. Dans le cas des puits thermométriques, il s'agit du diamètre de la pointe.

Fréquence naturelle du puits thermométrique



Forces induites par le liquide et affectation des axes pour le calcul des contraintes des puits thermométriques⁽¹⁾

La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 modélise le puits thermométrique en tant que simple poutre en porte-à-faux. Elle applique une série de facteurs de correction pour tenir compte des différences par rapport à la poutre idéale en tenant compte de la masse de liquide ajouté, de la masse du capteur ajouté, de la poutre profilée non uniforme et de la conformité de montage. Pour les puits thermométriques à tige étagée, la plupart des corrélations et des calculs sont

plus complexes du fait de la géométrie et des points de concentration des contraintes.

De ce fait, la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 limite la variation des dimensions des puits thermométriques à tige étagée considérés comme relevant de la portée de la norme.

Une fois tous les facteurs de correction appliqués, la fréquence naturelle installée ou « in situ », f_n^c , est calculée et utilisée pendant le reste de l'analyse de fréquence.

Vitesses critiques

Une fois la fréquence naturelle du puits thermométrique déterminée, le concepteur doit définir la marge de sécurité entre la fréquence naturelle et la fréquence de Strouhal.

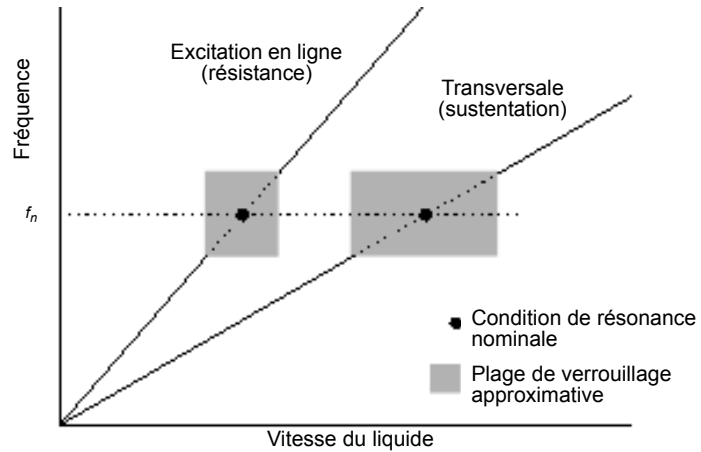


Schéma des excitations en ligne et transversale montrant la zone de « verrouillage ».(1)

Il existe en fait deux modes d'excitation de puits thermométrique. La force transversale (sustentation), qui fait vibrer le puits thermométrique perpendiculairement par rapport à l'écoulement, et la force en ligne (résistance), qui fait vibrer le puits thermométrique horizontalement par rapport à l'écoulement. Les vibrations en ligne sont environ deux fois plus importantes que la fréquence des vibrations transversales. La « vitesse critique » en ligne (quand la fréquence de Strouhal est égale à la fréquence naturelle) est environ inférieure de moitié par rapport à la vitesse de la transversale. La norme ASME PTC 19.3-1974 ne traite pas des vibrations en ligne, uniquement de la contrainte de flexion à l'état d'équilibre.(2)

Alors que la variation de la fréquence des tourbillons est proportionnelle à la vitesse du liquide, le puits thermométrique se verrouille très facilement sur la fréquence de résonance. Il peut également falloir une variation considérable de la vitesse pour que le puits thermométrique sorte des tourbillons générés à sa fréquence naturelle. Dans la mesure où l'amortissement des puits thermométriques typiques est très faible, il est vital de demeurer en dehors de la résonance. Quand il y a résonance, les forces et les déplacements sont grandement amplifiés.

$$f_s < 0,8 f_n^c$$

La bande de garde de 20 % sert à tenir compte de la variation significative due à :

- la non linéarité de la réponse élastique du puits thermométrique
- les tolérances libres de fabrication du puits thermométrique
- les informations relatives aux propriétés des matériaux déterminées uniquement à 3 décimales significatives
- les variations de routine mineures du débit, de la température, de la densité ou de la viscosité du procédé

(1) Norme ASME, codes des essais de performances 19.3TW-2010.

(2) Norme ASME, codes des essais de performances 19.3-1974 (réaffirmée en 1998).

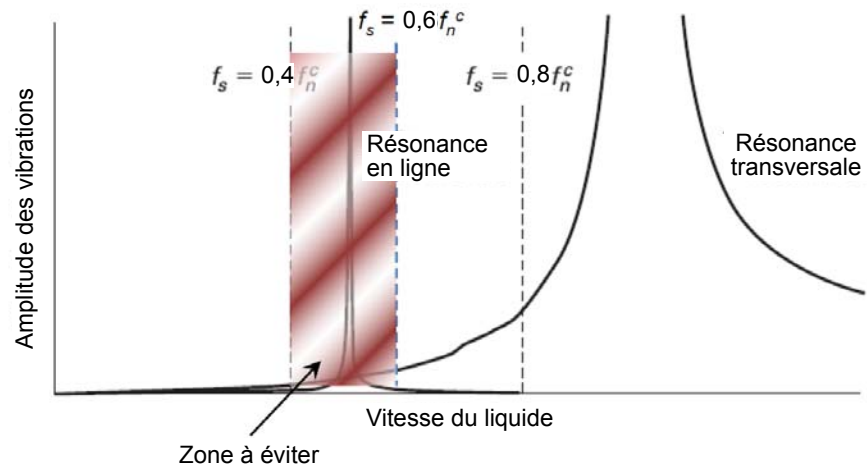
Puits thermométriques

Dans la mesure où les vibrations en ligne surviennent à environ la moitié de la vitesse des vibrations transversales (soit le double de la fréquence), les liquides rencontrent des limites supplémentaires.

$$2f_s < 0,8 f_n^c$$

Une perspective différente sur ce point permet d'obtenir une vue plus étendue des applications au sein desquelles le fonctionnement d'un puits thermométrique est possible.

$$f_s \text{ (état d'équilibre)} < 0,4 f_n^c \quad \text{ou} \quad 0,6 f_n^c < f_s \text{ (état d'équilibre)} < 0,8 f_n^c$$



Graphique illustrant la réponse à l'amplitude d'un puits thermométrique aux forces induites par un liquide.⁽¹⁾

La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 contient également une provision de fonctionnement « super critique », selon laquelle le puits thermométrique est utilisé au-delà de la fréquence naturelle du puits thermométrique. Emerson déconseille vivement d'utiliser les puits thermométriques dans cette zone.

Nombre de Scruton

L'utilisation du nombre de Scruton est nouvelle dans cette théorie. Elle représente l'amortissement intrinsèque du puits thermométrique. La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 adopte une perspective très conservatrice et définit le facteur d'amortissement à 0,0005, sauf détermination contraire.

Un nombre de Scruton inférieur à 2,5 signifie qu'il n'y a pas d'amortissement naturel et que le puits thermométrique doit être évalué à la fréquence de résonance en ligne et rester à l'écart de la fréquence de résonance transversale. Quand le nombre de Scruton augmente, le niveau d'amortissement intrinsèque augmente, réduisant ainsi les déviations et donc les contraintes. Un niveau d'amortissement acceptable permettra de faire fonctionner le puits thermométrique à la fréquence de résonance en ligne et même peut-être à la fréquence de résonance transversale.

Si les conditions sont telles que le puits thermométrique fonctionne au-delà de la fréquence naturelle, des résonances plus importantes doivent être prises en compte, mais la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 ne prévoit aucun conseil dans ce domaine. Emerson déconseille vivement de faire fonctionner les puits thermométriques dans cette zone.

(1) Adapté à partir de la norme ASME, codes des essais de performances 19.3TW-2010.

CONTRAINTE DE FLEXION ET DE PRESSION

(telle qu'utilisée dans la norme ASME PTC 19.3 TW-2010)

S'il peut sembler que la théorie et l'application de la génération des tourbillons font l'objet d'une grande attention, les contraintes à l'intérieur du puits thermométrique et les forces appliquées sont également cruciales dans l'évaluation de ces applications de procédés spécifiques. Par rapport à la méthode simple de la version de 1974, la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 étudie bien plus en détails la fréquence et les contraintes au niveau du puits thermométrique. Cela permet une possibilité plus étendue de styles de montage, de profilés et de tailles de perçage qui reflètent les différentes offres du secteur aujourd'hui.

La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 compte, au total, 4 critères quantitatifs pour qu'un puits thermométrique soit considéré comme acceptable pour un ensemble particulier de conditions de procédé :

1. **Limite de fréquence** : la fréquence de résonance du puits thermométrique doit être suffisamment élevée pour que les oscillations destructrices ne soient pas excitées par l'écoulement du liquide.
2. **Limite de contrainte dynamique** : la contrainte dynamique principale maximale ne doit pas dépasser la limite de contrainte de fatigue admissible. Si la conception requiert que le puits thermométrique passe la résonance en ligne pour atteindre les conditions d'exploitation, il convient de prévoir une vérification supplémentaire de la fatigue en cas de résonance.
3. **Limite de pression statique** : la contrainte maximale en état d'équilibre sur le puits thermométrique ne doit pas dépasser la contrainte admissible, telle que déterminée par les critères de Von Mises.
4. **Limite de pression hydrostatique** : la pression externe ne doit pas dépasser les pressions nominales de la pointe du puits thermométrique, la queue et la bride (ou filetages).

De plus, l'adéquation du matériau du puits thermométrique à l'environnement du procédé doit également être prise en compte. Cela signifie que le concepteur doit évaluer la manière dont la corrosion et l'érosion influent sur le puits thermométrique, ainsi que la manière dont l'exposition aux conditions du procédé influe sur les propriétés des matériaux.

Limite de fréquence

La section sur la théorie de production de tourbillons présente la méthode de la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 pour le calcul de la fréquence de Strouhal. Si la fréquence de Strouhal est comprise entre la bande de verrouillage de la fréquence critique en ligne et la bande de verrouillage de la fréquence critique transversale et que l'évaluation du nombre de Scruton met en évidence un amortissement insuffisant, la conception du puits thermométrique doit être modifiée, à moins que toutes les conditions suivantes ne soient satisfaites :

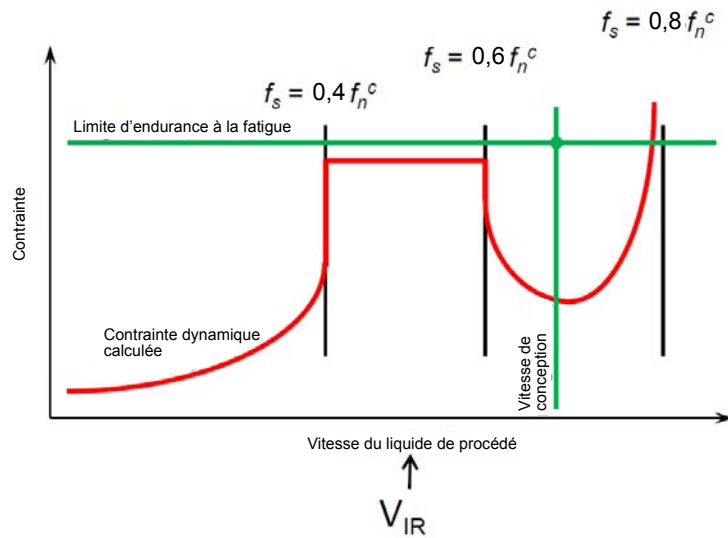
1. Le liquide du procédé est un gaz
2. Le puits thermométrique passe la résonance en ligne uniquement au démarrage, à l'arrêt ou, rarement, pendant le fonctionnement
3. Le pic de contrainte en cas de résonance est inférieur à la limite de fatigue du matériau.

Puits thermométriques

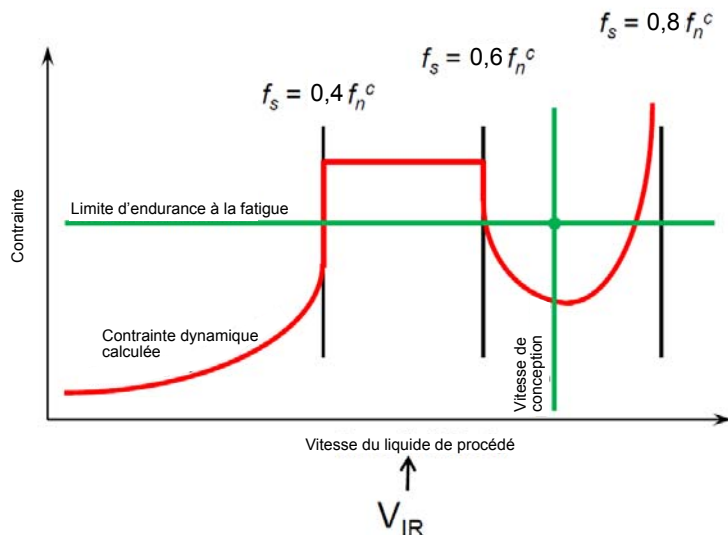
4. Le liquide du procédé ne provoque pas de changement des propriétés du matériau (notamment la résistance à la fatigue)
5. Les conséquences d'une défaillance du puits thermométrique constituent un risque acceptable.

Passage de la résonance en ligne

Si le pic de contrainte de flexion oscillatoire est inférieur à la limite d'endurance à la fatigue quand la vitesse en ligne est critique, le puits thermométrique peut passer à travers la région de verrouillage de la résonance en ligne pour atteindre la vitesse de conception à l'état d'équilibre. Les vitesses à l'état d'équilibre dans la région de verrouillage de la résonance en ligne ne sont pas autorisées du fait du nombre élevé de cycles de fatigue imposé sur le puits thermométrique, ainsi que de l'augmentation de la probabilité d'endommagement du capteur.

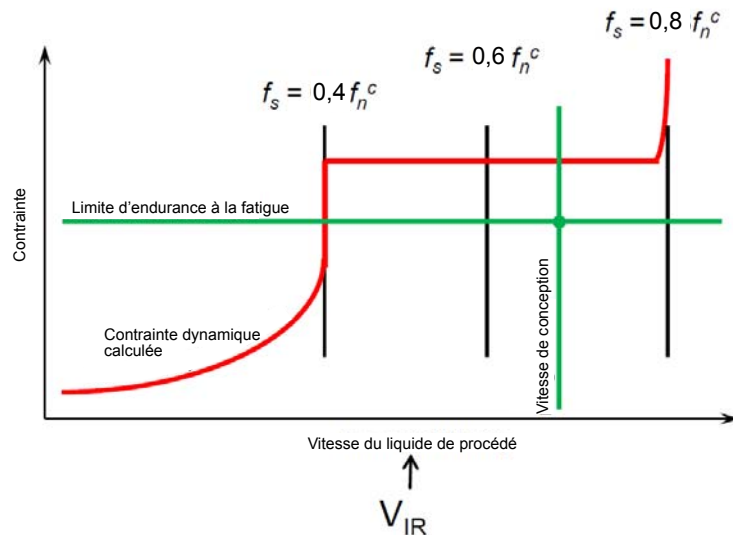


Exemple de graphique montrant une conception de puits thermométrique qui passe l'évaluation de la résonance en ligne.



Exemple de graphique montrant une conception de puits thermométrique qui ne passe pas l'évaluation de la résonance en ligne. Cette conception peut être acceptable selon la norme ASME PTC 19.3 TW-2010.

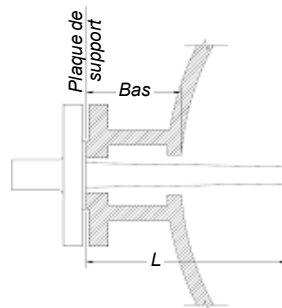
Une contrainte de flexion oscillatoire de pointe supérieure à la limite d'endurance à la fatigue quand la vitesse en ligne est critique suscite une plus grande ambiguïté quant à savoir si le puits thermométrique est en mesure de fonctionner au-delà de la vitesse en ligne critique. En théorie, si le puits thermométrique passe rapidement à travers la zone de verrouillage de la résonance en ligne, il peut fonctionner entre $0,6 f_n^c$ et $0,8 f_n^c$. Le nombre de cycles de fatigue étant cumulatif pendant la durée de vie du puits thermométrique, il est donc essentiel de connaître la durée de la période pendant laquelle le puits thermométrique est en résonance. Dans la mesure où la durée de vie en fatigue dépend de nombreux facteurs, plus le puits thermométrique fonctionne en résonance, moins sa durée de vie est certaine.



Exemple de graphique montrant comment Emerson interprète l'évaluation de la résonance en ligne. Emerson estimerait cette conception inacceptable.

Les détails de conception relatifs à la vitesse de montée en puissance n'étant pas connus des fournisseurs des instruments, les puits thermométriques qui ne passent pas l'évaluation de la contrainte de flexion oscillatoire de pointe et qui fonctionnent au-delà de la vitesse critique en ligne seront considérés comme inacceptables par Emerson.

Puits thermométriques partiellement protégés de l'écoulement

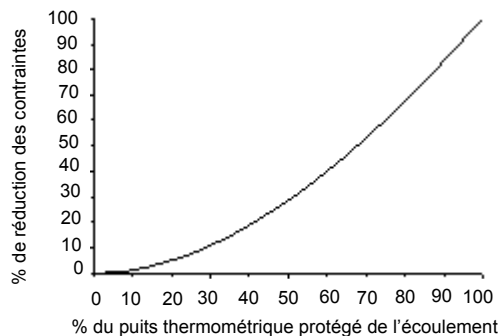


Puits thermométrique biseauté partiellement protégé de l'écoulement

La plupart des installations de puits thermométriques sont partiellement protégées de l'écoulement. La longueur du puits thermométrique exposée à l'écoulement ne correspond pas la longueur libre totale ; les équations du moment de flexion et de la contrainte de flexion doivent alors être ajustées.

Puits thermométriques

L'effet de la protection sur un puits thermométrique biseauté est facile à démontrer, mais l'effet de la protection sur les puits thermométriques à tige étagée est bien plus difficile à prédire ou à modéliser dans la mesure où la surface exposée n'est pas une forme qui change uniformément et en raison d'une grande discontinuité des données. Par conséquent, deux ensembles d'évaluations sont utilisés pour les puits thermométriques protégés à tige étagée, en fonction de la position de l'étage par rapport à l'écoulement du liquide. Les calculs de contrainte doivent également être réalisés deux fois pour déterminer les contraintes à la racine du puits thermométrique et à l'étage.



Effet de la protection sur un puits thermométrique biseauté

Une fois les conditions d'installation et du procédé comprises et après avoir identifié la fréquence de Strouhal dans la plage de fréquence, il est possible de procéder à l'analyse des contraintes réelles appliquées au niveau du puits thermométrique. Comme mentionné précédemment, si le puits thermométrique doit être utilisé au-delà de la vitesse en ligne critique, il convient de tenir compte des contraintes cycliques en termes de résonance en ligne dans la mesure où il transite par cette région avant d'atteindre sa vitesse de conception. Les contraintes à l'état d'équilibre et dynamiques à la vitesse de conception doivent également être évaluées.

Évaluation de la contrainte cyclique en ligne

Les contraintes cycliques, qui résultent des forces en ligne et transversales à la surface du puits thermométrique, sont concentrées à la racine. Pour tenir compte des conditions de résonance, les calculs doivent être réalisés à la vitesse de résonance en ligne critique pour voir si la contrainte de flexion de pointe à la résonance est inférieure à la limite d'endurance à la fatigue du matériau. Cette analyse étant réalisée au point critique en ligne, l'amplification due à la résonance en ligne éclipse les forces de sustentation, si bien que ces dernières peuvent être ignorées pour simplifier les calculs. Cette évaluation ne doit être réalisée que si l'évaluation du nombre de Scruton indique que les conditions du procédé l'exigent.

La vitesse en ligne critique permet de calculer la force par surface unitaire appliquée sur le puits thermométrique. Dans la mesure où la vitesse du fluide procédé est donnée en tant que moyenne plutôt que profil de vitesse, les calculs partent aussi du principe que la surface unitaire correspond à la longueur totale exposée du puits thermométrique. Si une partie du puits thermométrique est protégée de l'écoulement (comme dans le cas d'un tube espaceur), cela doit également être pris en compte. Pour les puits thermométriques à tige étagée, cette analyse doit être réalisée aux deux endroits de contrainte de pointe (racine et base de la tige étagée).

Pour s'assurer que les calculs sont prudents, le facteur d'amortissement intrinsèque est fixé à 0,0005. Les puits thermométriques à queue étagée doivent être évalués en deux endroits pour identifier la plus grande des deux contraintes.

L'une des principales modifications de la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 est l'utilisation d'un tableau permettant de préciser les limites de contrainte à la fatigue admissibles. Le tableau regroupe les matériaux par classes et procède à des références croisées entre les matériaux et la méthode d'installation afin de déterminer la limite de contrainte.

Il est important de noter que des soudures à pénétration partielle sont considérées comme ayant une résistance à la fatigue moindre par rapport aux soudures à pénétration complète et obtiennent donc des valeurs inférieures dans ce tableau. Reportez-vous au tableau des exigences de construction des puits thermométriques suivant pour plus d'informations.

Évaluation de la contrainte à l'état d'équilibre à la vitesse de conception

Les puits thermométriques doivent également faire l'objet d'une évaluation à leur vitesse de conception pour s'assurer qu'ils répondent aux exigences de l'environnement du procédé. La contrainte à l'état d'équilibre est une combinaison de la pression externe du procédé et de la force de résistance. Là encore, ces dernières sont calculées à l'emplacement où la contrainte est maximale, si bien que si le puits thermométrique est partiellement protégé ou s'il s'agit d'une tige étagée, les calculs doivent être réalisés en tenant compte de ces conditions d'installation.

Une fois la contrainte maximale calculée, elle peut être utilisée pour déterminer si les critères de Von Mises sont satisfaits. Les critères de Von Mises sont utilisés pour évaluer les conditions de contrainte de cisaillement et de pression dans les sphères et les cylindres circulaires. Ils servent à déterminer les conditions de déformation des matériaux.⁽¹⁾ Si cette évaluation est réussie, cela signifie que les contraintes à l'état d'équilibre ne sont pas supérieures à la contrainte à la fatigue des matériaux et que le puits thermométrique peut être utilisé à la vitesse de conception souhaitée.

Évaluation de la contrainte dynamique à la vitesse de conception

Les contraintes dynamiques sur le puits thermométrique sont attribuées aux forces de sustentation oscillante (transversales) et de résistance (en ligne). Le facteur d'amplification représente la nature exponentielle de l'augmentation des forces quand la fréquence de Strouhal approche de la fréquence naturelle du puits thermométrique, comme à proximité de la vitesse en ligne critique. Si la fréquence de Strouhal ne tombe pas dans les bandes de verrouillage des fréquences naturelles en ligne ou transversale, alors les facteurs d'amplification sont calculés et appliqués aux équations des contraintes cycliques. Les forces cycliques de résistance et de sustentation doivent être calculées à la vitesse de conception, de la même manière que l'évaluation des contraintes cycliques en ligne a été réalisée. Contrairement à l'évaluation des contraintes cycliques en ligne réalisée précédemment, les forces de sustentation ne sont pas ignorées.

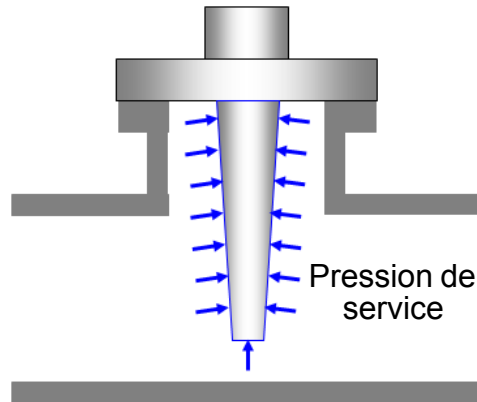
Si la vitesse de conception est supérieure à la vitesse en ligne critique, le puits thermométrique devra peut-être être traité comme s'il devait fonctionner à des niveaux de contrainte de résonance en ligne, indéfiniment. Voir la section ci-dessus concernant le passage de la résonance en ligne.

(1) Brock, John E., « *Stress Analysis of Thermowells*, » Naval Postgraduate School, Monterey CA (1974).

Puits thermométriques

Il est évident que de nombreuses évaluations sont réalisées concernant la conception du puits thermométrique, mais avec des informations telles que les évaluations de la vitesse en ligne critique, de l'état d'équilibre et des contraintes dynamiques, le concepteur peut bénéficier d'une image détaillée des endroits dans lesquels le puits thermométrique fonctionne dans la plage de fréquences, ainsi que de la distance par rapport à sa limite de fatigue. Ces informations permettront au concepteur de décider des facteurs de sécurité à conserver dans son procédé.

Évaluation de la contrainte de pression



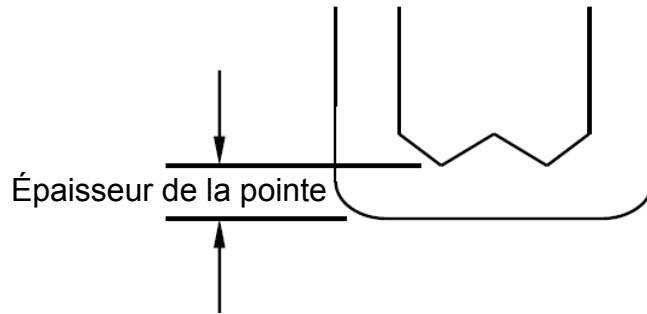
La dernière vérification nécessaire pour déterminer si la conception du puits thermométrique est acceptable pour l'application est l'évaluation de la contrainte de pression. Elle est souvent ignorée dans la mesure où elle n'est généralement pas la cause de l'incompatibilité de la conception, mais elle en reste pour autant critique. La vérification de la contrainte de pression doit être réalisée au niveau de la queue et de la pointe, séparément.

Pour calculer la pression sur la queue afin de vérifier l'adéquation, deux méthodes sont proposées, selon la pression du procédé. Pour les pressions de procédé inférieures à 103 MPa (15 ksi), la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 recommande d'utiliser ASME Boiler Pressure Vessel Code (BPVC) Section VIII Paragraphe UG-28 pour calculer la pression externe admissible. Les restrictions de température indiquées dans cette section du BPVC ne s'appliquent pas dans la mesure où la plupart des puits thermométriques sont conçus selon les normes ASME B31.1 ou ASME B31.3. Les valeurs de contrainte maximales admissibles doivent alors être tirées de l'une de ces deux normes. La raison pour laquelle le calcul du BPVC est référencé dans la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 est que l'équation a été souvent utilisée avec succès par le passé et qu'elle est relativement connue dans le secteur.

Dans le cas où le matériau du puits thermométrique souhaité ne serait pas référencé dans le BPVC ou pour adopter une méthode plus simple, la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 propose une autre relation simplifiée. L'inconvénient d'avoir recours à la méthode simplifiée est que la pression de la queue déterminée par cette méthode peut être jusqu'à 17 % inférieure à la valeur calculée par la méthode UG-28 pour certains matériaux, à certaines températures. Avantage : un calcul moins complexe et une marge de sécurité supplémentaire.

Pour les applications haute pression (> 103 MPa (15 ksi)), la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 fait référence à la norme ASME BPVC Section VIII Division 3 ou ASME B31.3, chapitre IX pour le calcul. Les pressions d'une telle amplitude (qui dépassent les limites de pression des brides 2500# de la norme ASME B16.5) devront être évaluées avec précaution et pas au moyen d'un outil automatisé.

L'épaisseur de la pointe correspond à la dimension la plus fine depuis l'extérieur de la pointe jusqu'au point le plus éloigné de la mèche. Dans la mesure où la plupart des puits thermométriques sont fabriqués avec des mèches demi-rondes, il est essentiel que l'épaisseur de la pointe utilisée soit la mesure réelle du point le plus fin. La dimension de pointe sert à calculer la longueur du capteur dans la mesure où c'est la pointe qui sera en contact avec le capteur et pas le « creux ». Quand la mèche demi-ronde est affûtée, le creux peut être jusqu'à 1,5 mm (0,060 in.) plus profond (plus fin) et s'épaissit au fur et à mesure que la mèche s'use.



Détail de l'épaisseur de la pointe du puits thermométrique.

La pression maximale à laquelle le puits thermométrique peut résister est inférieure à la limite de pression de la queue ou de la pointe.



REMARQUE IMPORTANTE :

Qu'il soit question de la norme ASME PTC 19.3 ou ASME PTC 19.3 TW-2010, l'évaluation de la contrainte de pression ne fait référence qu'à la contrainte à laquelle la tige (ou la queue) et la pointe du puits thermométrique peut résister, pas celle à laquelle le filetage ou la bride peut résister. La sélection des raccords de procédé et l'évaluation de la pression nominale doivent être réalisées avant l'évaluation de la conception du puits thermométrique, pour ce qui concerne les vibrations induites par les tourbillons.

Informations sur les matériaux

La meilleure pratique en termes d'ingénierie, en ce qui concerne les informations sur les matériaux, consiste à utiliser des informations fiables et normalisées, autant que faire se peut. Pour les informations sur les matériaux, Emerson n'utilise que des informations provenant de normes de source ouverte telles que les normes ASME Boiler and Pressure Vessel Code et ASME B31.1/B31.3. Ces informations sont généralement prudentes et acceptées par le secteur. En théorie, Emerson pourrait utiliser les informations de ses fournisseurs pour renseigner sa base de données de matériaux. Cette pratique est, en revanche, déconseillée dans la mesure où Emerson ne peut garantir qu'un lot particulier de matériaux est utilisé pour un puits thermométrique particulier et pour correspondre à un rapport particulier. Il ne s'agit pas d'une méthode pratique ou fiable pour optimiser les performances des puits thermométriques.

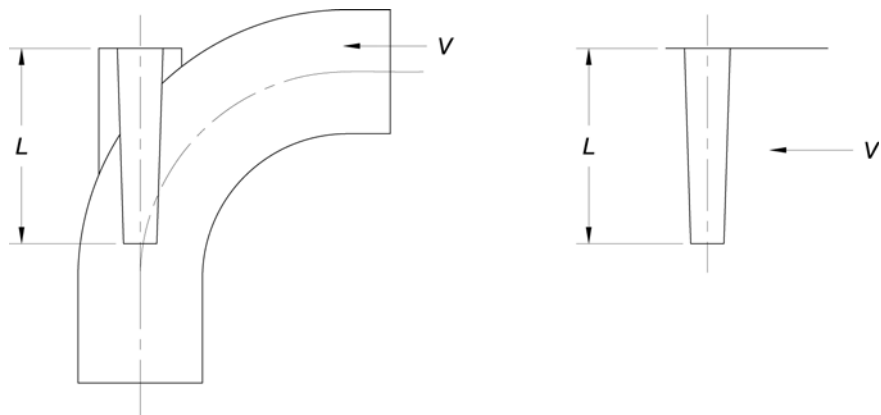
Puits thermométriques

VARIANTES D'INSTALLATION

La manière selon laquelle les puits thermométriques sont installés dans un procédé peut avoir un effet significatif sur les calculs des contraintes des puits thermométriques et la génération de tourbillons. Les variantes évoquées ici vont au-delà des installations « standard » telles que les puits thermométriques à bride, filetés et soudés, ou une protection partielle du puits thermométrique.

Installations coudées

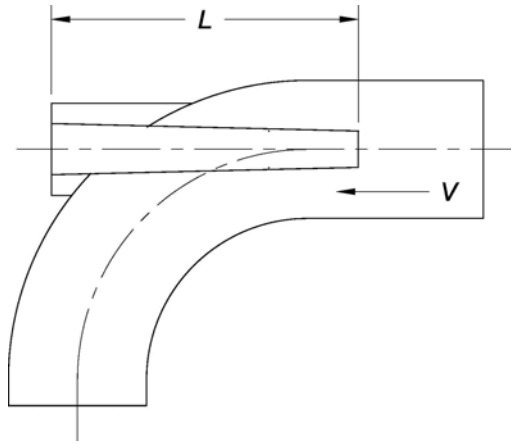
La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 ne donne aucun conseil significatif relatif à l'installation de puits thermométriques dans des coudes. La modélisation de l'écoulement dans un coude est extrêmement difficile du fait des remous et de la complexité. La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 suggère que, pour être prudent, il convient de tenir compte de la longueur totale non protégée et non supportée qui sera exposée à l'écoulement avec les forces agissant perpendiculairement (c.-à-d. « normales ») à l'axe du puits thermométrique. Pour de nombreuses personnes, cette réponse n'est pas acceptable. Certains commentaires formulés dans le cadre des discussions autour de la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 et au sein du comité ont permis d'aboutir à une alternative à ce point de vue trop prudent. Si la pointe se situe suffisamment en amont ou en aval du coude, de sorte que l'écoulement de liquide est parallèle à l'axe du puits thermométrique au niveau de la pointe, alors le nombre de Strouhal est très petit dans la mesure où l'écoulement au niveau de la pointe est négligeable. La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 indique que cela va au-delà du champ d'application de la norme, tandis que d'autres dans le secteur indiquent que ce type d'installation serait une solution simple pour les conceptions de puits thermométriques trop proches de la fréquence naturelle.



Puits thermométrique installé avec la pointe tournée vers l'aval, dans un coude.⁽¹⁾

La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 suggère qu'un puits thermométrique pointé vers l'amont représente l'installation à préférer dans la mesure où l'importance et l'emplacement de l'écoulement appliquent un bras de levier et une force inférieures sur le puits thermométrique et que l'écoulement au niveau de la pointe est plus laminaire. Si la pointe est dirigée vers l'aval, le tourbillon du liquide qui passe autour du puits thermométrique pourrait avoir des composants en croix, mais cela est extrêmement difficile à modéliser. Comme pour dans les installations à angles ci-dessous, le calcul du bras de levier est compliqué ; les variations des forces, de bras de levier et des contraintes sont difficilement prévisibles.

(1) Norme ASME, codes des essais de performances 19.3TW-2010.



Puits thermométrique installé avec la pointe tournée vers l'amont, dans un coude.⁽¹⁾

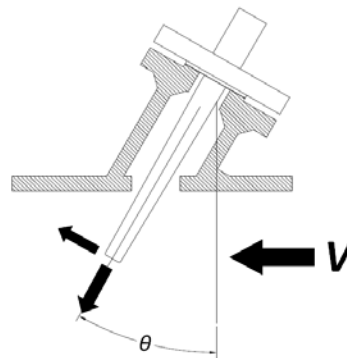
Emerson envisage d'étudier plus en détails ces méthodes d'installation pour fournir des justifications quant aux avantages apportés par ces solutions.

Installations coudées

Les clients installent fréquemment des puits thermométriques selon des angles particuliers par rapport à l'écoulement pour des questions d'accessibilité, pour réduire les forces qui agissent sur le puits thermométrique ou pour augmenter l'exposition à l'écoulement dans les conduites plus petites, afin d'obtenir des mesures de température plus précises. L'effet de l'angle de lacet sur la vitesse au niveau de la pointe n'est pas qu'une simple question de trigonométrie. Il complique également la prédiction des contraintes et des forces qui agissent sur le puits thermométrique.

Quand l'angle d'installation varie, la vitesse au niveau de la pointe diminue.

$$V_{\text{axiale}} = V_{\text{écoulement}} \cdot \cos(\theta) \text{ pour } \theta \text{ jusqu'à } 30^\circ \text{ }^{(2)}$$



Vecteurs de vitesse dans les installations coudées

Quand l'angle se rapproche de 0°, le composant de vitesse au niveau de la pointe se rapproche de l'unité, soit 100 % de la vitesse de l'écoulement. Cela peut être utile pour réduire la fréquence de Strouhal dans les installations au sein desquelles les contraintes ne constituent pas le facteur limitatif.

La même logique n'est pas vraie pour les forces qui agissent sur le puits thermométrique. Quand l'angle varie, la surface augmente, ainsi que la longueur du puits thermométrique, ce qui a pour effet d'augmenter les forces de friction.

L'écoulement de liquide autour du puits

thermométrique est de plus en plus complexe à modéliser et donc, les variations des forces, des bras de levier et des contraintes sont difficilement

(1) Norme ASME, codes des essais de performances 19.3TW-2010.

(2) S. E. Ramberg, « The Effects of Yaw and Finite Length upon the Vortex Wakes of Stationary and Vibrating Cylinders, » Journal of Fluid Mechanics 128, 81-107 (1983).

Puits thermométriques

prévisibles. La norme ASME PTC 19.3 TW-2010 indique que cela va au-delà de la portée de la norme, cependant, Emerson envisage une étude plus étendue de cette méthode d'installation afin de pouvoir fournir des justifications des avantages apportés par cette solution. Il existe certaines applications client difficiles dans lesquelles cette méthode pourrait constituer la seule méthode d'installation viable.

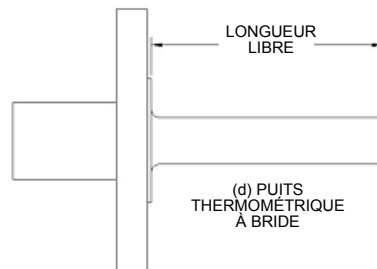
Conduites carrées / conduites rondes

Dans la mesure où la nouvelle norme utilise la vitesse moyenne, il n'est pas nécessaire de connaître ou de modéliser le profil d'écoulement des conduites carrées et la manière dont il peut être différent de celui des conduites rondes. Le concepteur doit simplement connaître le débit massique, la masse volumique et la section pour calculer la vitesse moyenne. Voir la section Vitesse moyenne pour plus de détails à ce sujet.

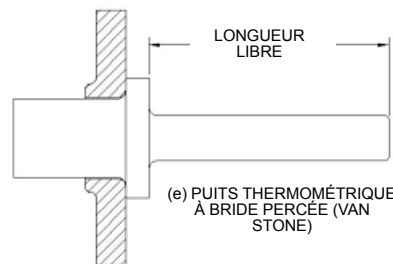
DÉFINITION DE LA LONGUEUR LIBRE

La définition de la longueur libre a changé dans la norme ASME PTC 19.3 TW-2010. Le modèle de la théorie de la poutre utilisé dans la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 est très sensible aux variations de la longueur libre, il est donc nécessaire que la définition soit claire et cohérente.

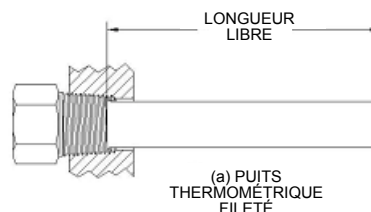
Pour les puits thermométriques (y compris à bride percée/Van Stone), la longueur d'immersion est identique à la longueur libre.



Puits thermométrique à bride⁽¹⁾



Puits thermométrique à bride percée / Van Stone⁽¹⁾

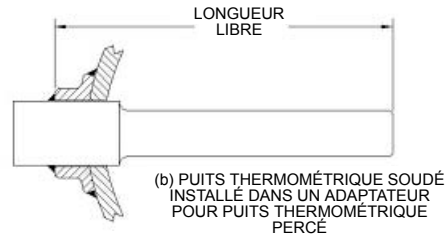


Puits thermométrique fileté⁽¹⁾

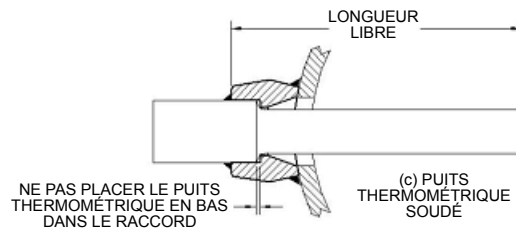
(1) Norme ASME, codes des essais de performances 19.3TW-2010.

Pour les puits thermométriques filetés, la longueur d'immersion est identique à la longueur libre, mais les résultats d'expériences ont montré que la longueur libre démarre à peu près au niveau de 2 ou 3 filetages dans la section filetée. La norme ASME PTC TW-2010 en tient compte lorsqu'elle applique un facteur de correction pour les puits thermométriques filetés.

Le plus grand changement est visible dans les puits thermométriques soudés. L'utilisation de la longueur d'immersion raccourci, de manière incorrecte, la longueur libre et fait augmenter la fréquence naturelle du puits thermométrique.

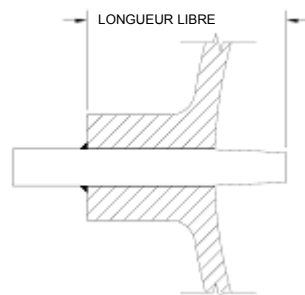


Puits thermométrique soudé à orifice⁽¹⁾.



Puits thermométrique soudé.⁽¹⁾

L'endroit à partir duquel calculer la longueur libre est le point de soudure, mais dans la mesure où Emerson ne connaît pas exactement le point de soudure, ce dernier doit être estimé pour le calcul ou il convient d'utiliser la longueur globale du puits thermométrique. Cela permet de garantir que, quelle que soit l'installation du puits thermométrique, le calcul réalisé est sûr et prudent.



Puits thermométrique soudé selon DIN 43772

Une méthode alternative consisterait à faire une marque sur le puits thermométrique pour montrer où il doit être soudé pour que le calcul soit précis ou prudent. Cela signifierait d'être plus impliqué et de connaître les dimensions de la douille.

Il existe un cas particulier dans lequel la longueur libre doit être connue : celui des puits thermométriques soudés, installés selon la norme DIN 43772. Ces derniers sont conçus avec un orifice de tolérance serrée percé dans un tuyau et un puits

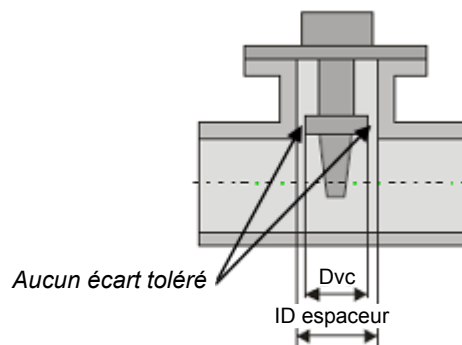
thermométrique à barre usinée de tolérance serrée. Dans la mesure où il existe une tolérance pour l'installation, il est impossible de garantir un ajustement serré qui serait nécessaire pour déplacer la longueur libre (voir section Colliers de vitesse). En l'absence d'informations complémentaires, la longueur libre pour cette installation sera définie selon les détails à gauche.

(1) Norme ASME, codes des essais de performances 19.3TW-2010.

Puits thermométriques

COLLIERS DE VITESSE

L'utilisation de colliers de vitesse (ou de fréquence) est également traitée dans la norme ASME PTC 19.3 TW-2010. La norme indique que les colliers sont déconseillés en tant que support rigide visant à raccourcir la longueur libre. La seule solution pour y parvenir est de recourir à un ajustement serré. Cela est dû au fait que les déplacements des pointes de puits thermométriques sont généralement très petits (inférieurs à 0,5 mm)⁽¹⁾⁽²⁾ et que tout écart entre le collier et le diamètre intérieur du tube espaceur rendra le collier inefficace pour réduire la longueur libre effective. De même, à l'instar d'un marteau frappant sur une surface métallique à répétition, le puits thermométrique ou le tube continueraient de se déformer et l'écart s'élargirait jusqu'à ce qu'il n'y ait plus aucun contact. Cela pourrait faire augmenter les contraintes dans le puits thermométriques du fait des indentations ou pourrait même rompre les soudures susceptibles de se trouver à proximité du collier. Le collier doit faire l'objet d'un ajustement serré pour être efficace et, dans la mesure où Emerson ne peut pas garantir l'ajustement final, nous vous recommandons de procéder à des adaptations de géométrie ou d'installation pour vous adapter aux conditions du procédé plutôt que d'avoir recours à des colliers.



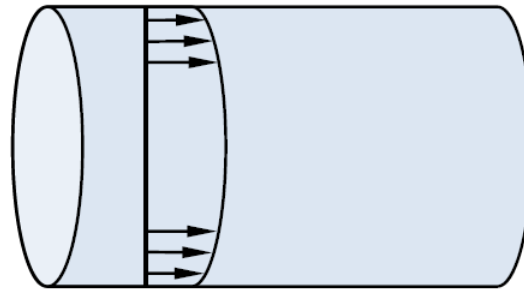
Aucun écart n'est toléré entre le collier et l'ID de l'espaceur de tube.

Emerson continuera à fournir des puits thermométriques dotés de colliers de vitesse construits selon les spécifications des clients, mais refusera de donner des conseils relatifs au dimensionnement des colliers de vitesse et ne fournira aucun rapport de calcul pour les installations qui utilisent des colliers de vitesse. Toute autre politique serait en effet, en apparence, une reconnaissance de cette méthode. Les puits thermométriques soudés selon la norme DIN 43772 seront également traités comme les colliers de vitesse, de même que les autres installations utilisées à des fins similaires.

- (1) Finch, P., Hamblin, M., and Constable, D., « In-situ Measurement of Thermowell Vibration during Production Train Pressurisation, » Rapport Woodside Energy Ltd. (Date inconnue entre 2001 et 2010).
- (2) Haslinger, K.H., Westinghouse Electric Company, « Flow-induced vibration testing of replacement thermowell designs, » Journal of Fluids and Structures (2003).

**VITESSE MOYENNE /
PROFIL DE VITESSE**

On pourrait penser que la meilleure méthode pour calculer les forces sur un puits thermométrique consisterait à utiliser la méthode de l'analyse par éléments finis (FEA) pour obtenir de nombreux détails et précisions. La difficulté de l'utilisation de cette méthode FEA réside dans le fait que les paramètres en entrée varient continuellement, si bien que la précision générée est bien trop importante par rapport à son utilité à un moment ou à un autre. Les deux normes ASME PTC 19.3-1974 et ASME PTC 19.3 TW-2010 utilisent une vitesse moyenne pour leurs calculs. La logique derrière tout cela est que le concepteur connaît généralement le débit massique et n'en sait généralement pas beaucoup au sujet du profil d'écoulement dans le tuyau. Le concepteur utilise simplement le débit massique, la masse volumique et la section pour calculer la vitesse moyenne. L'utilisation de la vitesse moyenne permet également de réaliser des calculs qui restent simples et donc peuvent être plus facilement acceptés par les utilisateurs.



Exemple de profil d'écoulement turbulent naissant dans un tube.

**EXIGENCES RELATIVES
À LA CONSTRUCTION
DES PUIITS
THERMOMÉTRIQUES**

Lors du calcul de la fréquence naturelle in situ, la norme ASME PTC 19.3 TW-2010 part du principe que le puits thermométrique est fabriqué à partir d'une barre solide pour pouvoir utiliser le modèle de faisceau simple. Les tiges de puits thermométriques peuvent être fabriquées avec des matériaux forgés ou roulés, mais pas de tuyaux ou de tubes. Cette restriction implique que les puits thermométriques qui sont constitués de 3 pièces soudées ou ceux qui sont fabriqués en perçant la pointe avec un bouchon soudé ne sont pas couverts par la norme ASME PTC 19.3 TW-2010.

Il est recommandé d'utiliser des soudures à pénétration complète pour les puits thermométriques à bride afin d'obtenir la meilleure résistance à la fatigue possible (voir Limites de contrainte à la fatigue admissibles dans la norme ASME PTC 19.3 TW-2010). Les puits thermométriques forgés permettent d'atteindre le même objectif, sans soudure, mais pour un coût considérablement plus élevé. Les puits thermométriques de type Van Stone permettent d'atteindre cet objectif, sans le coût, mais nombre de clients n'utilisent pas ce modèle de puits thermométrique.

Les tolérances de fabrication des puits thermométriques sont une autre préoccupation de construction. Des tolérances trop lâches peuvent entraîner l'inexactitude des équations de poutre et peuvent venir à bout de toutes les marges de sécurité intégrées dans les équations. Mais le resserrement des tolérances peut aussi faire augmenter les coûts de fabrication des puits thermométriques. La tolérance à la corrosion doit également être prise en compte dans les dimensions.

Puits thermométriques

*Rosemount et le logo Rosemount sont des marques déposées de Rosemount Inc.
PlantWeb est une marque déposée de l'une des sociétés du groupe Emerson Process Management.
Toutes les autres marques sont la propriété de leurs détenteurs respectifs.*

**Emerson Process Management
Rosemount Measurement**
8200 Market Boulevard
Chanhassen, MN 55317 États-Unis
Tél. (USA) : +1 800 999 9307
Tél. : (Int.) (952) 906-8888
Fax : +1 952 906 8889

Emerson Process Management
14, rue Edison
B. P. 21
F - 69671 Bron Cedex
France
Tél. : (33) 4 72 15 98 00
Fax : (33) 4 72 15 98 99
www.emersonprocess.fr

**Emerson Process Management
Shared Services Ltd.**
Heath Place
Bognor Regis
West Sussex PO22 9SH
Angleterre
Tél. : 44 (1243) 863 121
Fax : 44 (1243) 867 554

Emerson Process Management AG
Blegistrasse 21
CH-6341 Baar
Suisse
Tél. : (41) 41 768 61 11
Fax : (41) 41 761 87 40
E-mail : info.ch@EmersonProcess.com
www.emersonprocess.ch

Emerson Process Management Asia Pacific Pte Ltd
1 Pandan Crescent
Singapour 128461
Tél. : (+65) 6777 8211
Fax : +65 6777 0947
N° du service après-vente : +65 6770 8711
Adresse e-mail : Enquiries@AP.EmersonProcess.com

Emerson Process Management nv/sa
De Kleetlaan, 4
B-1831 Diegem
Belgique
Tél. : (32) 2 716 7711
Fax : (32) 2 725 83 00
www.emersonprocess.be