

Ce que les constructeurs ne vous disent pas – Part I : les thermomètres à dilatation de liquide

AUTEUR : Edem Kossi AMEWUHO

Consultant métrologue et actuellement Responsable de Laboratoire chez PROCESS INSTRUMENTS (Laboratoire de métrologie accrédité ISO/CEI 17025 COFRAC et SEMAC, sis à Mohammedia – MAROC)

RELECTURE

Marc LIEFFROY - Expert et Consultant métrologue Chez CALETAL, Evalueur Technique du COFRAC (ISO/CEI 17025)

Mohammed BRAHMI - Ingénieur Expert en métrologie et qualité, Evalueur du TUNAC (ISO/CEI 17025)

Bernard CRETINON - Expert et Consultant métrologue en Température, Hygrométrie, Evalueur technique du COFRAC (ISO/CEI 17025)

I- PRELUDE :

Les thermomètres à dilatation de liquide sont parmi toutes les catégories de mesureurs de température, les plus accessibles car leurs coûts sont relativement à la portée de tous et sont souvent disponibles en stock. Ils sont même recommandés dans certaines normes pour utilisation au laboratoire notamment le domaine des hydrocarbures. Néanmoins ils sont les plus difficiles à utiliser que ce soit au niveau de leur manutention ou à l'utilisation. De surcroît les fournisseurs ne donnent aucun manuel d'utilisation à la livraison. Les utilisateurs n'étant pas des experts en instrumentation se confrontent souvent à des difficultés qui seront abordées dans cet article.

II- INTRODUCTION :

En tant que métrologue, nombreuses sont les fois où j'ai reçu des thermomètres à dilatation de liquide (TDL) pour étalonnage et nombreuses sont les fois où j'ai constaté des défauts de discontinuité du liquide le long du capillaire et l'absence de spécifications des points d'étalonnages. Je n'oublie pas les fois où j'ai reçu des réclamations des clients qui affirment que les corrections du certificat d'étalonnage ne donnent pas des mesures fiables. Après de longues discussions avec eux un terrain d'attente finit par s'ériger. Sous bien des rapports, il a été constaté que les utilisateurs de ces équipements ne sont pas toujours avisés des règles d'utilisation d'une part et qu'ils ne savent pas exploiter correctement les certificats d'étalonnage d'autre part.

L'objectif de cet article est de sensibiliser les utilisateurs sur le fonctionnement des thermomètres à dilatation de liquide et les précautions à prendre pour mieux maîtriser cet équipement afin d'effectuer des mesures correctes.

III- LES THERMOMETRES A DILATION DE LIQUIDE: FONCTIONNEMENT

Le thermomètre à dilatation est un instrument destiné à mesurer les températures. Le fonctionnement de ces thermomètres repose sur la dilatation d'un liquide contenu dans un récipient soudé à un tube capillaire dans lequel se répand le liquide. Il y a principalement deux normes qui régissent leur fabrication : l'ISO 386:1977 [2] et l'ASTM E1 05 [3]. Ceux qui sont fabriqués selon la [3] sont systématiquement identifiés « ASTM... ». On les rencontre plus souvent dans les secteurs d'hydrocarbures et pharmaceutiques.

D'un point de vue général, il existe plusieurs types de thermomètre à dilatation de liquide (TDL). Selon les normes citées plus haut ([2] et [3]), ces thermomètres sont catégorisés en 3 types selon leur immersion :

- **TDL à immersion spécifiée ou partielle** (TDL/IS pour la suite de l'article) : conçu pour indiquer la température correctement quand le réservoir et une partie spécifiée de la colonne sont soumis à la température mesurée. Le reste de la colonne (colonne émergente) est exposé à des températures variables et différentes du milieu mesuré.

Pour les mesurages de la plus grande exactitude, il convient que la température de la colonne émergente soit spécifiée (inscrite sur la colonne du thermomètre) par le constructeur. Ceci n'est pas le cas pour les ASTM dont les températures de la colonne émergente ne sont pas indiquées mais inscrites dans la table 4 de [3]. *Si la température réelle de la colonne émergente est différente de la température spécifiée, il est en général nécessaire d'appliquer une correction de la colonne émergente.*

Comment savoir si la température de la colonne émergente est différente de la température spécifiée ? Il faut tout bonnement la mesurer !! L'utilisateur devra se munir alors d'un autre



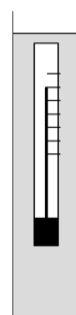
thermomètre (un thermomètre numérique à sonde ou d'un thermomètre type Faden).

- **TDL à immersion totale ou au degré lu** (TDL/IT pour la suite de l'article) : conçu pour indiquer la température correctement quand le réservoir et la partie de la colonne du thermomètre contenant le liquide thermométrique sont soumis à la température mesurée. Il est cependant nécessaire que le ménisque du liquide thermométrique dans la colonne du thermomètre soit au-dessus (en général de une ou deux divisions) du niveau du milieu mesuré afin de le lire correctement. Une erreur peut se produire quand le liquide thermométrique dans la colonne émergente est au-dessus du milieu mesuré et à une température différente. Ce genre d'erreur peut être compensé en appliquant une correction de colonne émergente.



Tout comme pour les TDL/IS, l'utilisateur devrait mesurer la température de la colonne émergente avec un autre thermomètre. Je pense que vous l'avez compris comme moi qu'un TDL/IS ou TDL/IT **ne doit pas s'utiliser seul** si l'on souhaite avoir une bonne exactitude de ses mesures.

- ✓ **TDL à immersion complète** : conçu pour indiquer la température correctement quand le thermomètre est entièrement exposé à la température mesurée. Cela exige que le thermomètre soit immergé dans un liquide transparent dans un récipient ayant un moyen pour observer l'échelle. La lecture du thermomètre peut être influencée par la pression hydrostatique exercée sur le réservoir, pression qui dépend du liquide dans lequel le thermomètre est immergé et de la profondeur d'immersion. Il peut en conséquence être nécessaire de tenir compte de ces paramètres.



Force est de constater qu'avec chacun de ces types de TDL, il y a des erreurs liées à leur utilisation dont la gravité est fonction des conditions dans lesquelles les mesures sont effectuées. Ces conditions doivent être maîtrisées afin d'apporter des corrections¹ nécessaires si l'on veut avoir une mesure correcte.

L'article présent s'intéressera particulièrement aux deux premiers types : TDL/IS et TDL/IT qui sont non seulement les plus répandus sur le marché mais aussi beaucoup plus assujettis aux risques d'erreur de lecture.



Photo 1 : TDL type ALLA FRANCE

IV- CLASSES D'EXACTITUDE DES TDL :

Les TDL quelque soit leur types d'immersions, ne sont pas connus pour leur exactitude. Ils ne sont pas très recommandés pour être utilisés comme thermomètre de référence. Leurs performances sont spécifiées dans une classe de précision basée sur leur erreur maximale tolérée décrit dans la table suivante et tiré du §5.2 de [1].

CLASSE	Erreur Maximale Tolérée
A	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

B	± 0,2°C
C	± 0,5°C
D	± 1,0°C
E	± 2,0°C
F	± 5,0°C

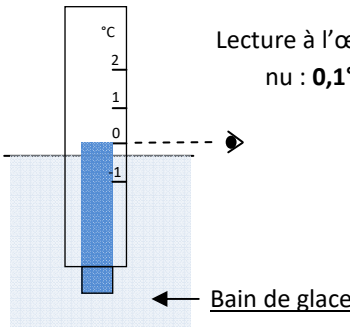
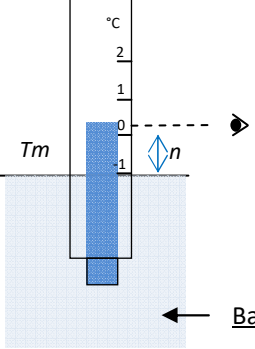
Table 1 : classification des TDL

Lorsque la classe d'exactitude n'est pas marquée sur le thermomètre ou est effacée, l'utilisateur peut le substituer par la valeur de l'échelon (pas de graduation) si elle comporte au plus 14 échelon sur 1 cm (voir §5.2.4 de [1]). Les thermomètres de classe A et B ont très souvent comme liquide le mercure, par contre à partir de la classe C, on rencontre plus les liquides organiques comme l'alcool, pentane etc. (on les reconnaît par leur couleur rouge ou bleu) à cause de leur coefficient de dilatation environ 10 fois plus grande que celui du mercure.

Pour les TDL du type ASTM, les erreurs maximales tolérées ne sont pas classifiées mais dépendent du modèle, de l'étendue et la résolution. Elles sont toutes répertoriées dans la table 1 de [3], qui en complément des EMT fournit des caractéristiques complémentaires.

V- COMMENT FAIRE DE BONNES MESURES AVEC DES TDL :

De tous les thermomètres existant, les TDL sont les plus difficiles à utiliser. Cela s'explique par le simple fait que les conditions d'utilisation ne sont pas toujours les mêmes telles que spécifiées par les constructeurs. Prenons quelques exemples d'un TDL/IT et un TDL/IS pour respectivement une mesure à 0°C et 60°C.

PRECONISATIONS DU CONSTRUCTEUR	COMMENT FAIRE UNE MESURE DANS LES BONNES CONDITIONS ?	COMMENT FAIRE UNE MESURE DANS DES CONDITIONS DIFFERENTES ?
<p>CAS 1 : Thermomètre à dilatation de liquide à immersion totale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nature du liquide : liquide organique (alcool) - Température à mesurer : 0°C - Correction lue sur le certificat d'étalonnage (CE) : -0,1°C 	<div style="text-align: center;">  <p>Bain de glace</p> </div> <p style="text-align: center; color: red;">CE MONTAGE NECESSITE UNIQUEMENT LA CORRECTION DU CE</p> <hr/> <p>Un TDL/IT doit être immergé dans le milieu à mesurer de sorte que le niveau du liquide soit d'une ou deux graduations de plus que la surface du milieu à mesurer.</p> $T_{mes} = T_{lue} + C_{(CE)}$ <p><i>T_{lue}</i> = lecture effectuée à l'œil nu sur le TDL/IT dans cette configuration <i>C_(CE)</i> : correction du certificat d'étalonnage du TDL/IT.</p> <p style="text-align: center;">Application numérique :</p> $T_{MES} = 0,1 + (-0,1) = 0,00°C$ <p>L'utilisateur doit être alors conscient de quel type de TDL il dispose afin de</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Bain de glace</p> </div> <p style="text-align: center; color: red;">CE MONTAGE NECESSITE LA CORRECTION DU CE ET UNE CORRECTION SUPPLEMENTAIRE</p> <hr/> <p>Lorsqu'un TDL/IT n'est pas immergé comme il se doit, une partie de la colonne émergente du liquide est soumise à une autre température (<i>T_m</i>). Cette température rajoute une dilatation supplémentaire au liquide, ce qui fausse la lecture de quelques graduations.</p> <p>Parfois la complication du montage, les difficultés d'immersion du TDL ou sa longueur empêchent l'utilisateur de l'immerger correctement. Il faudrait donc faire une correction supplémentaire sur la lecture effectuée pour retrouver la valeur mesurée (<i>T_{MES}</i>).</p> <p>Le [4] nous donne la formule suivante :</p> $T_{MES} = T_{LUE} + n * k * (T_{LUE} - T_m) + C_{(CE)}$

savoir comment l'immerger pour faire ses lectures.

Lorsqu'aucune indication sur l'immersion n'est pas spécifiée sur le TDL, il s'agit systématiquement d'un TDL/IT.

T_{lue} = lecture effectuée à l'œil nu sur le TDL/IT dans cette configuration
T_m : température moyenne de la colonne émergente (mesurée à l'aide d'un thermomètre numérique étalonné placé à côté de la colonne émergente du thermomètre)
n : valeur en température correspondant à la longueur de la colonne émergente (différence entre la valeur lue et la valeur de graduation située au niveau de la surface du milieu à mesurer)
k : coefficient de dilatation du liquide contenu dans le TDL/IT. Pour l'alcool *k*=0,001
C_(CE) : correction du certificat d'étalonnage du TDL/IT.

Application numérique :

$$T_{mes} = 0,15 + 0,001*(0,15-(-1))*(0,15-32) + (-0,1) = 0,013^{\circ}\text{C}$$

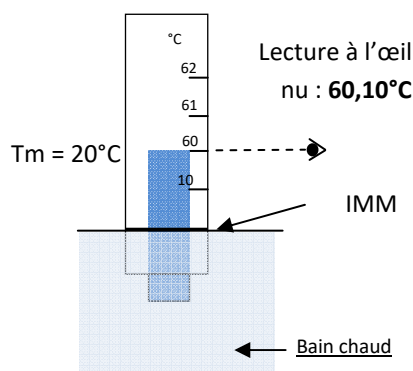
Avec une résolution de lecture de 0,05°C, *T_{MES}* s'arrondi par défaut à **0,00°C**

CAS 2 : Thermomètre à dilatation de liquide à immersion spécifiée :

- Température de la colonne émergente spécifiée : 20°C
- Nature du liquide : liquide organique (alcool)
- Température à mesurer : 60°C
- Correction du CE : -0.1°C

Pour ce type de TDL, la profondeur d'immersion est souvent spécifiée par un trait épais (IMM sur les figures ci-contre). Dans le cas contraire le constructeur inscrit par impression ou gravure une indication physique de la profondeur d'immersion (Exemple : 57mm).

NB : pour relever la valeur de « n », il faut noter que la partie de la colonne qui n'est pas graduée (longueur de la colonne depuis le trait d'immersion jusqu'au premier trait de graduation de l'échelle) est à évaluer et à prendre en compte. C'est ce que le [2] appelle, valeur extrapolée lue.



CE MONTAGE NECESSITE UNIQUEMENT LA CORRECTION DU CE

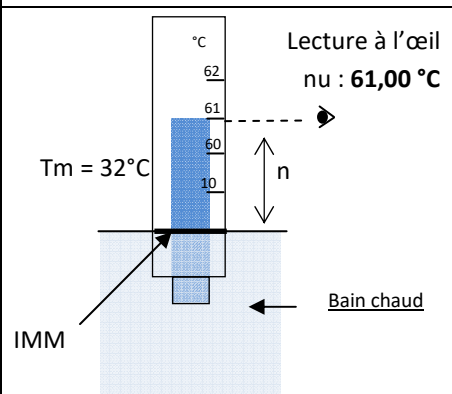
Tout comme pour le TDL/IT, lorsque les conditions de mesure (d'utilisation) sont identiques à celles spécifiées par le constructeur, les mesures sont quasi-rapides.

La seule correction à appliquer est celle issue du certificat d'étalonnage correspondant au point de mesure.

Pour trouver la température mesurée, nous avons donc comme formule :

$$T_{MES} = T_{LUE} + C_{(CE)}$$

T_{lue} = lecture effectuée à l'œil nu sur le TDL/IS dans cette configuration
C_(CE) : correction du certificat d'étalonnage



CE MONTAGE NECESSITE LA CORRECTION DU CE ET UNE CORRECTION SUPPLEMENTAIRE

Il est très difficile d'avoir une température de la colonne émergente égale à la température spécifiée par le constructeur.

L'utilisateur va devoir apporter une correction aux lectures effectuées par la formule suivante donnée par le document [4]:

$$T_{MES} = T_{LUE} + n*k*(T_s - T_m) + C_{(CE)}$$

T_{lue} = lecture effectuée à l'œil nu sur le TDL/IS dans cette configuration
T_m : température moyenne de la colonne émergente (mesurée à l'aide d'un thermomètre numérique étalonné)
n : est le nombre de degrés Celsius équivalent à la longueur de la colonne liquide émergente, et est la différence entre la

	<p>du TDL/IS.</p> <p>Application numérique :</p> <hr/> <p>$T_{MES} = 0,1 + (-0,1) = 60,00^{\circ}\text{C}.$</p>	<p>lecture du thermomètre et la valeur extrapolée lue au niveau d'immersion. <i>k</i> : coefficient de dilatation du liquide contenu dans le TDL/IS. Pour l'alcool $k=0,001$ <i>T_S</i> : température de la colonne émergente spécifiée (généralement 20 °C) <i>C_(CE)</i> : correction du certificat d'étalonnage du TDL/IS.</p> <p>Application numérique</p> <p>$T_{MES} = 61 + 71 * 0,001 * (20 - 32) + (-0,1) = 60,048^{\circ}\text{C}$ Avec la résolution de lecture de 0,05°C, nous avons $T_{MES} = 60,05^{\circ}\text{C}$</p>
--	--	--

Table 2 : exemple type d'utilisation des TDL

Remarques :

- ✓ Lorsque les mesures sont effectuées dans des conditions différentes de celles spécifiées par le constructeur, des erreurs de mesures relativement grandes peuvent fausser le résultat de mesure. Les calculs ci-dessous nous montrent que pour le « cas 1 », un écart de **0,05°C** a été générée contre **1°C** (valeur avant correction) environ pour le « cas 2 » et cela peut augmenter.
- ✓ Pour un TDL/IT, une astuce pour la mesure de « T_m » consiste à retirer complètement le TDL du milieu à mesurer de sorte à placer le réservoir du liquide dans la zone où se trouvait la colonne émergente. La température lue sera pratiquement « T_m ». Il est porté toutefois à la connaissance du lecteur que l'exactitude de la correction dans ce cas précis n'est pas la meilleure.
- ✓ Les corrections d'étalonnages sont systématiquement à prendre en compte lors des mesures si elles ne sont pas négligeables par rapport aux EMT attendues des valeurs recherchées.

VI- PRECAUTIONS :

- Il est conseillé d'utiliser une loupe à poignée (x10 de préférence ou une lunette adaptée à cet usage) pour lire sur les TDL, cela évite les erreurs de parallaxe et améliore l'exactitude de la mesure. Les lectures doivent se faire obligatoirement dans l'axe perpendiculaire à la colonne du TDL.
- Dans la limite du possible il est souhaitable de placer le thermomètre dans les conditions spécifiées par le constructeur, dans le cas où ce n'est pas réalisable on procède à la mesure de T_m pour appliquer des corrections comme présentées dans l'exemple ci-dessus. L'application de correction dégrade systématiquement l'incertitude de mesure.
- Des instructions pratiques sur le choix des TDL en fonction des besoins d'utilisation sont données dans le chapitre 7 de [1].
- Dans le cas où les prestations métrologiques d'étalonnage et/ou de vérification sont sous traitées dans un laboratoire externe, l'utilisateur doit prendre soin de confectionner emballage adapté (antichoc) dans le but de garantir l'intégrité du TDL durant son transport (voir un exemple dans la Photo 2). Il est vrai qu'en cas d'accident, on peut toujours acheter du nouveau matériel mais ce n'est pas une décision qui n'est pas sans conséquence déplaisante. On peut citer par exemple une perte de traçabilité métrologique, une difficulté de suivi de dérive de l'équipement etc.
- Dans le cadre de la préservation des instruments, le document [4] recommande de conserver les TDL en position verticale afin d'éviter le phénomène de discontinuité du liquide pendant les transports. Ce même phénomène apparaît aussi quand on refroidit rapidement le TDL après avoir mesuré une température élevée. Des méthodes sont proposées dans l'annexe B de [1] pour remédier au problème de discontinuité du liquide. De part mon expérience, elles sont efficaces 2 fois sur 3.
- Pour les TDL/IS, il est à noter que parfois la température spécifiée de la colonne émergente est aussi appelée « colonne émergente », « température de faden » ou « faden temperature ».



Photo 2 : TDL/IT + Etui de protection @crédit : site le-thermomètre.com

VII- CONSIGNES D'ETALONNAGE :

L'importance des étalonnages ou des vérifications des équipements (périodique ou initial) avant leur mise en service n'est plus un secret pour toute personne souhaitant garantir la qualité des mesures de son parc d'instrument. Ceci est d'ailleurs décrit comme une exigence au § 6.3.1 de [5]. Quelques consignes liées à ces opérations métrologiques sont à considérer :

- Définition des points d'étalonnage ou de vérification : l'utilisateur devra définir des points d'étalonnage qui doivent être les mêmes points d'utilisation. A la fabrication des TDL, le capillaire n'a pas un diamètre constant sur toute la longueur, ce qui fait que les corrections d'étalonnage ne sont pas constantes, ni proportionnelle. Interpoler les résultats entre deux points pour les TDL est une option à éviter. Par contre pour les TDL type « ASTM », la norme ASTM [3] recommande des programmes d'étalonnage prédéfinis qu'on retrouve dans la table 4 (de la même norme). La conformité à ces points garantit l'exactitude sur toute l'étendue.
- L'utilisateur devrait s'assurer que l'étalonnage sera fait dans un bain liquide afin de rester dans les limites des exactitudes définies dans la table 1. (voir §4.3 de l'annexe C de [1]). Un four n'a pas les qualités métrologiques suffisantes pour réaliser une mesure conforme.
- Pour les TDL/IS (hormis les ASTM), il arrive parfois que certains constructeurs omettent d'indiquer la valeur de la température de la colonne émergente (température Faden). Dans ce cas, tout va se jouer au niveau de leur étalonnage. L'utilisateur doit s'assurer que sur le certificat d'étalonnage il est mentionné la température de la colonne émergente mesurée au moment de l'étalonnage « T_m ». Ces valeurs servent à l'utilisateur comme nouvelles conditions d'utilisation (« T_m » devient alors pour l'utilisateur « température faden » spécifiée).

VIII- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES TDL

Comme mentionné au début de l'article, les TDL sont des instruments peu chers et accessibles à tous car ils possèdent une technologie simple. Ils fonctionnent sans énergie auxiliaire et grâce à leur constitution, ils sont très stables dans le temps. Quant aux inconvénients la liste n'est pas aussi courte. Les TDL sont fabriqués en verre ce qui fait qu'ils sont très fragiles et cela implique une manutention délicate. Leur longueur complique un peu l'utilisation. Pour s'assurer des bonnes mesures un TDL doit être utilisé accompagné d'un thermomètre secondaire pour la mesure de la température de la colonne émergente.

IX- CONCLUSION

L'objectif de ce document est de sensibiliser les utilisateurs, cependant les points développés peuvent également intéresser les prestataires d'étalonnage et/ou de vérification. Pour des raisons de difficultés de mise en œuvre des recommandations décrites ci-dessus auxquelles certaines personnes peuvent se heurter, des corrections peuvent ne pas s'appliquer mais en contrepartie, les incertitudes associées aux mesures (paramètres non développés dans cet article) doivent être dégradées en prenant en compte les variations des conditions ambiantes mesurées ou estimées.

Pour ceux qui appliquent des corrections sur les lectures, il faut noter que pour un montage bien réalisé ces corrections sont estimées comme sûre à $\pm 10\%$ (référence [2]). Ce n'est peut-être pas négligeable, mais si l'utilisateur prend en compte l'EMT selon classe du TDL comme incertitude de mesure, ces 10% deviennent alors insignifiants.

Bien que les TDL sont de plus en plus remplacés par les thermomètres électroniques, ils restent les seuls instruments recommandés par certaines normes en vigueur. S'ils sont bien utilisés ils peuvent être des instruments fiables car de tous

les mesureurs de températures ce sont les seuls qui ont la réputation d'être stable dans le temps.

X- REFERENCES :

[1] OIML R133 :2002 *Liquid-in-glass thermometers*

[2] ISO 386:1977 : *Liquid-in-glass laboratory thermometers – Principles of design, construction and use*

[3] ASTM E1 05 : *Liquid-in-glass thermometers*

[4] FD X07-029-3 : 2015 *Procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres - Partie 3 : procédure d'étalonnage et de vérification des thermomètres à dilatation de liquide*

[5] NF EN ISO 10012 :2003 : *Systèmes de management de la mesure - Exigences pour les processus et les équipements de mesure*

Prochain article : Ce que les constructeurs ne vous disent pas, part II : les thermomètres infrarouges.
