

MÉTROLOGIE DES TEMPÉRATURES : ÉVOLUTION DES BESOINS ET TENDANCES DU MARCHÉ

C. Beaulieu⁽¹⁾, D. Jouin⁽²⁾, M. Samaran⁽³⁾, P. Ridoux⁽⁴⁾ et J.-R. Filtz⁽⁴⁾

LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE ET D'ESSAIS

(1) Pôle Technologique Régional – 3, rue Raoul Follereau – 86000 POITIERS

(2) 1, rue Gaston Boissier – 75724 PARIS cedex 15

(3) 2, rue des Satellites – Parc du Canal – 31520 RAMONVILLE ST-AGNES

(4) 29, avenue Roger Hennequin – 78197 TRAPPES cedex

Résumé

En thermométrie, les principes de mesure, les échanges thermiques, l'environnement des mesures, les choix dans la diversité des instruments disponibles sur le marché sont autant de facteurs à maîtriser pour atteindre le niveau métrologique recherché. Cette nécessité de produire des mesures de température fiables et adaptées répond aux enjeux liés à l'évolution de la normalisation. Pour assurer la traçabilité, certains raccordements nécessitent des conditions spécifiques, de faibles incertitudes ou un traitement particulier. A travers l'expérience du LNE et les échanges avec ses clients, cet article propose une synthèse sur la diversité des moyens de mesure et des prestations d'étalonnage correspondantes, suivi d'une analyse de l'évolution des besoins et tendances dans le domaine de la métrologie des températures.

Abstract

In thermometry, measurement principles, thermal exchanges, the environment in which measurements are carried out, the diversity of instruments on offer are all factors to control in order to reach the desired metrological level. The need to provide reliable and adjusted temperature measurements is a consequence of stakes related to the evolution of standardisation. To ensure traceability, some calibrations require specific conditions, small uncertainties or special proceedings. Through LNE's experience and contacts with customers, this paper gives an insight into the diversity of measuring techniques and corresponding calibrations, followed by a review of the evolution of needs and trends in the field of temperature metrology.

Traçabilité des mesures de température

La traçabilité métrologique d'un résultat de mesure n'est prouvé que si les traçabilités documentaire et technique sont assurées. Ce rappel n'est pas inutile, surtout dans le domaine des températures où des connaissances techniques suffisantes sont indispensables pour que les résultats annoncés soient fiables. Les principes de mesure, les transferts thermiques, l'environnement des mesures, les choix dans la diversité des instruments disponibles sur le marché sont autant de facteurs à maîtriser.

La traçabilité technique passe donc par la maîtrise technique de la mesure (niveau n) et par l'étalonnage de l'instrument utilisé (niveau n-1). C'est ce que l'on appelle communément la chaîne de raccordement (figure 1).

Références de température (Laboratoire National de Métrologie)		(1)
7	} transfert vers les laboratoires d'étalonnage	\$
Etalon(s) de référence (laboratoire(s) d'étalonnage)		
7	} (étalonnage des références de l'entreprise)	⋮
(Etalon(s) de référence de l'entreprise, le cas échéant)		
7	} étalonnage de l'instrument de mesure de température	\$
Instrument de mesure de température étalonné		
7	} maîtrise des mesures de température	\$
Résultat de mesure		

Figure 1 : traçabilité en température

Étalonner un instrument de mesure de température revient à raccorder cet instrument jusqu'à la référence de température détenue par le Laboratoire National de Métrologie. La technique de raccordement dépend à la fois de la nature de l'instrument, du domaine de température et de l'incertitude souhaitée.

Références de température

Les références de température consistent en des matérialisations pratiques de l'Echelle Internationale de Température de 1990 –EIT-90– (et de l'Echelle Provisoire pour les Basses Températures –EPBT 2000–). L'EIT 90, qui couvre le domaine le plus couramment utilisé par les instruments de mesure, est fondée sur les valeurs des températures assignées à un certain nombre d'états d'équilibre reproductibles de matériaux purs (points fixes de définition : point de vapeur saturante, point triple, point de fusion ou point de congélation) et sur des instruments spécifiés, étalonnés à ces températures. L'interpolation entre les températures des points fixes est réalisée au moyen de formules servant à établir la relation entre les indications de ces instruments et les valeurs T_{90} des températures définies dans l'échelle [1]. Au niveau français, le LNE-INM réalise et maintient les références nationales.

Transfert des références

Le premier niveau de raccordement s'effectue au niveau du LNE, entre le LNE-INM et le LNE-CMSI par l'intermédiaire de cellules points fixes utilisées ensuite par ce dernier laboratoire pour étalonner les références des laboratoires d'étalonnage (cellules points fixes et/ou corps noirs et/ou thermomètres à résistance de platine et/ou couples thermoélectriques en métaux nobles).

Etalonnage par comparaison

Le raccordement s'effectue par comparaison aux thermomètres du laboratoire d'étalonnage. Dans la plupart des cas, des générateurs de température (bains liquides, fours, enceintes thermiques, corps noirs) sont utilisés pour réaliser le milieu de comparaison. Les moyens mis en œuvre et les procédures d'étalonnage dépendent de l'instrument à raccorder et du niveau métrologique recherché.

Diversité des instruments disponibles et des raccordements correspondants

Le point de départ est l'expression claire du besoin, à traduire en terme d'incertitudes :

- celle à atteindre pour les mesures à réaliser (exploitation du thermomètre) ;
- celle nécessaire pour l'étalonnage de l'instrument, qui se déduit de la précédente, déduction faite des autres composantes.

Vigilance dans le choix d'un instrument de mesure de température

Pour les utilisateurs, la frontière entre le thermomètre 'industriel ou de laboratoire' et le thermomètre 'grand public' est de plus en plus floue [2], ce qui implique d'être formé et informé avant tout achat de matériel ou de prestation d'étalonnage.

Les domaines de la thermométrie sont vastes et les instruments disponibles sur le marché répondent aux contraintes spécifiques des mesures à réaliser : échanges thermiques, encombrement des capteurs, temps de réponse, traitement des résultats...

Voici quelques exemples fréquents de méconnaissance des utilisateurs qui peuvent parfois conduire à des mesures erronées, voire aberrantes :

- confusion entre résolution, précision et exactitude, (même chez certains fournisseurs qui peuvent profiter du manque de connaissance de la part de clients peu avertis) ;
- facilité d'utilisation des thermomètres infrarouges sans contact masquant ainsi les contraintes physiques et techniques liées à ces instruments : la distance à laquelle la mesure peut être faite, la taille de la cible, l'aspect de la surface ou encore l'émissivité sont des notions souvent mal connues ;
- plus généralement, la méconnaissance de la nature des capteurs et des caractéristiques métrologiques correspondantes : thermomètre à résistance de platine, couple thermoélectrique en métaux nobles, couple thermoélectrique en métaux commun, thermistance, sonde immergeable, capteur de surface, collecteur de température, pyromètre, ... sont autant d'instruments répondant à des besoins différents ...

Rappels pour le raccordement d'un instrument de mesure de température

Les possibilités offertes pour l'étalonnage dépendent des besoins (exprimés par le demandeur) et surtout des caractéristiques métrologiques de l'instrument qui représentent souvent un facteur limitant mais mal connu par l'utilisateur lui-même.

Une discussion avec un laboratoire d'étalonnage permet de mieux identifier le besoin (si celui-ci n'était pas clairement exprimé) et ainsi de définir la prestation la mieux adaptée.

Dans le cas d'un laboratoire d'étalonnage répondant aux exigences de la norme NF EN ISO/CEI 17025 (09/2005) – cas des laboratoires accrédités par le COFRAC puisque cette norme sert de référentiel pour l'accréditation – cet échange a lieu dans le cadre de la revue de demande. C'est également l'occasion d'informer le client sur les performances métrologiques de son instrument, sans pour autant préjuger des résultats d'étalonnage.

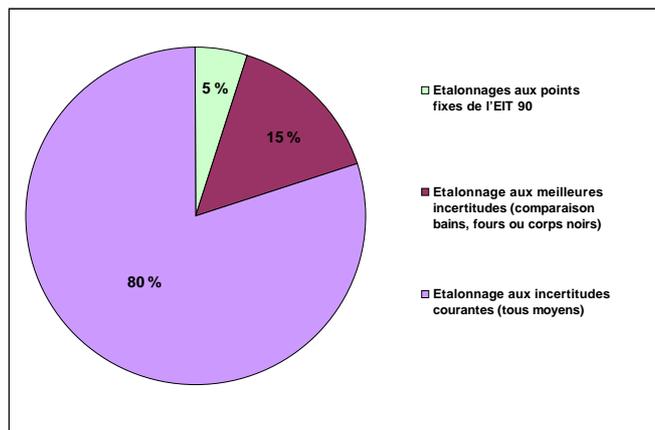
Prestations d'étalonnage : analyse et évolution du marché au travers des clients du LNE

Les principales prestations proposées par le LNE sont résumées dans le tableau ci-dessous, il s'agit de prestations réalisées en laboratoire (tableau 2) :

Prestations d'étalonnage	Instruments concernés	Incertitude minimale délivrée (2s)	Site du LNE
Etalonnages aux points fixes de l'EIT 90	Thermomètres à résistance de platine étalons – Couples thermoélectriques en métaux nobles étalons	0,7 mK à 1,1°C en fonction du point fixe	Paris
Etalonnages par comparaison dans des bains et/ou fours – meilleurs incertitudes	Chaînes de mesure de température (résolution effective 0,001°C ou 0,01°C) – Thermomètres à résistance de platine – Couples thermoélectriques	5 mK à 0°C 0,02°C à 500°C 1°C à 1200°C	Paris
Etalonnages par comparaison dans des bains et/ou fours – incertitudes courantes	Chaînes de mesure de température (résolution 0,01°C à 1°C) – Thermomètres à résistance de platine - Couples thermoélectriques – Thermomètres à dilatation de liquide – Autres instruments	0,04°C de -80°C à 0°C 0,02°C de 0°C à 90°C 0,03°C de 90°C à 250°C 0,05°C de 250°C à 500°C 1,6°C de 500°C à 900°C 2,2°C de 900°C à 1500°C	Paris Poitiers Toulouse
Etalonnages par comparaison à un corps noir	Thermomètres infrarouges – Pyromètres – Caméras thermiques	0,5°C à 2,1 °C en fonction de la température	Trappes
Etalonnages par comparaison dans des enceintes thermiques	Instruments dont le capteur n'est pas étanche	0,2°C de -40°C à 80°C	Paris Toulouse
Etalonnages par comparaison à des surfaces de référence	Instruments dont le capteur est un capteur de surface	0,8°C à la température ambiante jusqu'à 3°C à 300°C	Paris
Etalonnages par simulation de température	Indicateurs, calibrateurs, simulateurs de température pour capteurs normalisés (sans capteurs)	0,01°C à 0,2 °C en fonction de la configuration (réception / génération) et du type de capteur simulé	Paris Poitiers Toulouse

Tableau 2 : synthèse des prestations proposées par le LNE

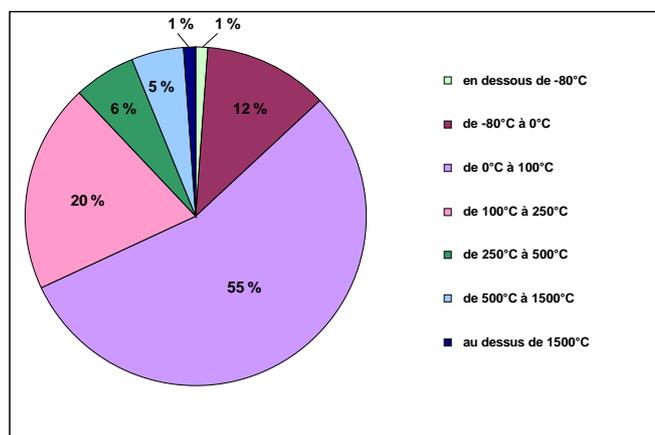
Les volumes représentés par ces prestations sont très différents. Tous sites d'intervention confondus (Paris, Trappes, Poitiers et Toulouse), la répartition par type de prestation est la suivante (graphe 3) :



Grphe 3 : répartition par type de prestation

Environ 5% concerne l'étalonnage des références des laboratoires, ce pourcentage ayant relativement peu varié ces dernières années. 15% des prestations d'étalonnage sont réalisées aux meilleures incertitudes. Ce chiffre, en augmentation, concerne spécifiquement des instruments présentant de bonnes caractéristiques métrologiques et traduit une nécessité de plus en plus forte d'avoir de faibles incertitudes au niveau du raccordement externe (par exemple dans le secteur de l'aéronautique où les exigences applicables sont très serrées). Enfin, 80% de l'activité concerne des étalonnages par comparaison aux incertitudes courantes. Ce chiffre regroupe les différents types d'étalonnage par comparaison : dans des bains et/ou fours, en enceinte thermique, sans contact, avec des surfaces de référence ou par simulation. Il témoigne du volume important d'instruments de mesure de température dans l'industrie et les laboratoires.

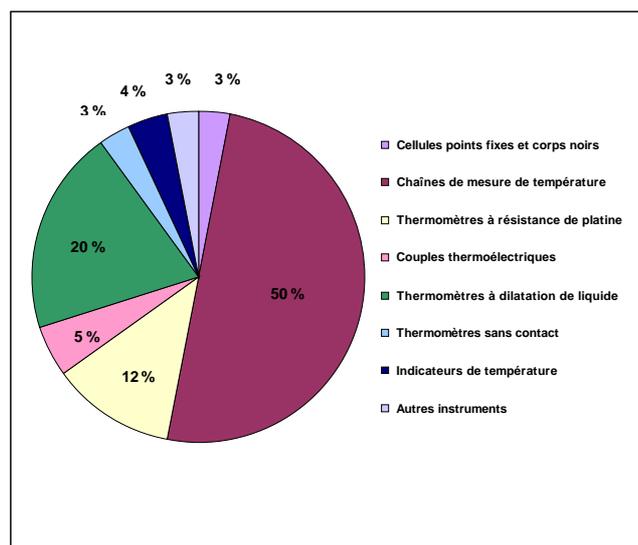
Les domaines de températures couverts vont de quelques K à près de 3000°C, avec des répartitions très variables qui représentent finalement le secteur d'activité du demandeur. Tous sites d'intervention du LNE confondus, la répartition par domaine de température est la suivante (graphe 4) :



Grphe 4 : répartition par domaines de température

Le domaine des températures le plus sollicité va de -80°C à 250°C et représente 90% des points d'étalonnage réalisés. Des températures particulières y sont fréquemment demandées et traduisent une exigence normative, une température critique, une température de fonctionnement ou encore une température physiologique : par exemple -18°C, 0°C, 4°C, 20°C, 37°C, 121°C, ... On observe une augmentation des raccordements aux températures négatives, représentant désormais plus de 10% des points d'étalonnage. Ce phénomène est lié à l'évolution de la normalisation, en particulier dans les domaines agro-alimentaire (maîtrise de la chaîne du froid, par exemple) ou en rapport avec la santé. Ces dernières années, les laboratoires d'essais et d'analyses intervenant dans ces mêmes secteurs ont mis en place des processus de mesure de température fiables et sont donc nécessairement passés par des opérations de raccordement. Au contraire, certains domaines de l'industrie, par exemple la mécanique ou la métallurgie vont vers une rationalisation des processus de mesure de température, ce qui se traduit par un volume de raccordements en stagnation, voire en baisse.

Enfin, la répartition par type d'instrument est très variable puisque certains instruments peuvent être raccordés à différents niveaux métrologiques, notamment les chaînes de mesure de température qui représentent 55% des instruments étalonnés (elles représentent un ensemble très vaste d'instruments qui peuvent être étalonnées aux meilleures incertitudes, aux incertitudes courantes, dans une enceinte, etc...). Tous sites d'intervention du LNE confondus, la répartition par type d'instrument est la suivante (graphe 5) :



Grphe 5 : répartition par type d'instrument

Contre toute attente, on trouve encore 20% de thermomètres à dilatation. Ce pourcentage décroît lentement d'année en année, mais ces instruments sont encore assez répandus, notamment dans les laboratoires et dans le domaine agro-alimentaire où les étendues de mesure sont bien adaptées et pour lequel l'utilisation demeure facile. Les thermomètres à résistance de platine représentent 12% et sont plus fréquemment étalonnés seuls que les couples thermoélectriques (5%).

Globalement, on estime que le volume d'étalonnages, tous types d'instruments de mesure de température confondus, a plus que triplé en vingt ans et il a doublé ces dix dernières années. La première raison de cet essor est directement lié à la normalisation, l'impulsion la plus visible ayant été l'arrivée des normes ISO 9000 version 1994. Certains développements sont plutôt liés à des besoins industriels, c'est par exemple le cas de la thermométrie optique qui s'est développée grâce aux besoins des entreprises dans le secteur de la défense ou bien les raccordements par comparaison aux meilleures incertitudes. Ces dernières prestations, qui n'existaient pas il y a une quinzaine d'années, constituaient l'alternative entre les étalonnages courants et les étalonnages des références car les incertitudes associées étaient, pour certaines applications, inappropriées ou conduisant à des incertitudes trop faibles ou trop élevées.

Modélisations, vérifications, étalonnages sous atmosphère contrôlée, étude des fuites thermiques, étude de l'auto-échauffement des sondes, ... sont autant de prestations complémentaires aux étalonnages. Ces demandes ne sont plus isolées et représentent une véritable nécessité pour certains demandeurs.

Métrologie des températures : au delà des prestations d'étalonnage, tendances du marché au travers des clients du LNE

Conseils aux utilisateurs

Face aux difficultés dans le choix des instruments, dans la mise en œuvre de ceux-ci ou encore pour déterminer les incertitudes associées aux résultats de mesure de température, le LNE est quotidiennement sollicité pour répondre aux questions les plus élémentaires mais aussi pour guider les utilisateurs qui ont des problématiques particulières, des interrogations sur les principes de mesure ou encore sur la mise en place de raccordements internes. Le conseil aux utilisateurs fait donc partie de la vie d'un laboratoire d'étalonnage. Il est indispensable pour le client et contribue à fiabiliser les mesures de température. Il permet enfin au laboratoire d'être à l'écoute des besoins émergents du marché.

Formation, audit et assistance métrologique

Le contact du LNE avec ses clients a, bien sûr, permis de développer les prestations correspondants aux besoins des industriels et des laboratoires mais il a également débouché sur des prestations de formation, d'audit ou encore d'assistance métrologique en France ou à l'étranger.

Les formations techniques à la métrologie des températures restent très demandées. Elles se développent et se multiplient, qu'elles soient générales dans le domaine de la thermométrie ou sur des besoins bien spécifiques. Elles sont parfois associées à des demandes pluri-sectorielles intégrant des besoins en métrologie des masses, en volumétrie ou en chimie, c'est typiquement le cas des demandes émanant des laboratoires de

microbiologie ou de biologie. Des formations par métier, bien adaptées et efficaces, sont certainement la réponse pour les années à venir.

Les audits et l'assistance métrologique se développent de plus en plus. Ce sont parfois des audits généraux liés à la fonction métrologie, mais il y a également des demandes par grandeur et, dans ce cas, c'est dans le domaine des températures que les demandes sont les plus importantes. La mise en place de laboratoires d'étalonnage en France et dans le pourtour du bassin Méditerranéen, l'aide à la rédaction de procédures, la mise en œuvre des exigences normatives, le conseil aux choix stratégiques dans la hiérarchie des niveaux métrologiques ou encore l'assistance dans la mise en œuvre d'un processus complet sont des thèmes d'intervention en pleine croissance.

La métrologie des températures a donc encore un bel avenir... les prestations d'étalonnage s'adaptent aux demandes, les demandes font évoluer l'offre, mais il est indispensable que les laboratoires d'étalonnage jouent un rôle de régulation, préservant ainsi la pertinence métrologique des raccordements. Dans ce contexte, les mesures de température continueront d'aller vers une plus grande fiabilité dans l'industrie et les laboratoires.

Références

[1] Techniques de l'Ingénieur, R 2 511.

[2] Mesures 793 – mars 2007