

Mesurer la température



Éric GEORGIN
Cetiat



Jacques-Olivier FAVREAU
Cetiat



Jérôme LOPEZ
Directeur technique du Collège français
de métrologie

1. Quelles spécificités pour la mesure de température ?

Aujourd'hui les mesures de température font partie de nombreux procédés industriels, ceci dans des domaines très variés comme la chimie, l'agroalimentaire, l'industrie métallurgique, l'industrie verrière, la défense, l'automobile, l'aérospatial, etc. Les domaines de mesure et plus généralement les spécifications en termes de modalités de mise en œuvre, de dynamique de mesure, de contraintes d'environnement, de connectivité sont donc très variés. Même si les principes de base et les technologies mises en œuvre reposent sur des capteurs traditionnels bien connus tels que les sondes résistives et les couples thermoélectriques, pour les mesures de température par contact, les sondes de température ne cessent d'évoluer pour s'adapter à de nouveaux besoins, tout en assurant une maîtrise des coûts. De plus, le développement des mesures sans contact, basées sur la mesure du rayonnement thermique (pyrométrie optique, thermographie...), élargit le périmètre des applications et des solutions possibles. Enfin, le développement de l'IIoT (*Industrial Internet of Things*) dans la logique de l'Industrie 4.0 promeut le développement de sondes de mesure de température offrant une connectivité accrue, de plus en plus par voie hertzienne, une autonomie

des capteurs du point de vue de l'alimentation, mais aussi des capacités de traitement embarquées. Cela entraîne un grand dynamisme à tous les niveaux de la chaîne de valeur, depuis les concepteurs et fabricants de capteurs, en passant par les intégrateurs qui les emploient dans des machines de production, jusqu'aux utilisateurs finaux qui utilisent des données de mesure pour prendre des décisions relatives aux produits fabriqués et aux procédés mis en œuvre.

2. Comment s'assurer de la fiabilité des mesures ?

Mais avec ces évolutions, comment s'assure-t-on de la fiabilité des mesures ? Comment continuer d'avoir confiance dans les mesures que l'on réalise ? La réponse peut être apportée par la métrologie. En effet, au travers de considérations portant sur la mise en pratique des instruments, du respect de la traçabilité des mesurages au S.I., et de l'évaluation des incertitudes, celle-ci garantira la justesse d'un résultat pour un intervalle de confiance donné. Elle repose sur des principes, des méthodes et des techniques qui, lorsqu'ils sont correctement appliqués, fournissent les moyens de contrôler, de maîtriser la mesure, et les sources d'erreur, depuis le principe physique jusqu'à l'indication de température de la chaîne de mesure.

3. La température est-elle un concept facilement compréhensible ?

Rappelons ici que, la température est un concept dont l'élaboration a été longue et difficile et ce n'est que vers le milieu du XIX^e siècle que cette grandeur a émergé à la suite du rapprochement du concept de chaleur et de l'énergie associée à l'agitation moléculaire des corps étudiés. C'est une variable d'état, au même titre que la pression ou le volume, de nature intensive ce qui signifie que sa valeur ne dépend pas de la quantité de matière du système étudié. Elle s'exprime en kelvin, l'une des sept unités de base du système international d'unités (SI). La révision du SI au cours de la 26^e conférence générale des poids et mesures (CGPM) en novembre 2018 a conduit à un changement de paradigme pour la définition du SI qui est désormais fondé sur 7 constantes universelles de la physique. Ces



Représentation schématique des sept unités fondamentales du Système International suite à la dernière révision du 16 novembre 2018 (SI).

constantes, appelées constantes de définition du SI, reposent sur des phénomènes physiques de nature fondamentale, universelle ou bien sont dérivées de propriétés spécifiques. Pour la température, il s'agit de la constante de Boltzmann $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

La nouvelle définition du kelvin est la suivante : « Le kelvin, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k , égale à $1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en J K^{-1} , unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. »

4. Comment garantir la traçabilité métrologique ?

La traçabilité métrologique au SI permet de garantir la comparabilité des résultats obtenus à l'échelle des utilisateurs. Elle repose sur l'étalonnage, qui en laboratoire de niveau métrologique secondaire, consiste en une comparaison entre une sonde de référence et une sonde au sein d'un générateur de température, stable, homogène et parfaitement caractérisé en température.

L'incertitude de mesure fournit un encadrement de la valeur mesurée tel que la probabilité d'encadrement du résultat corresponde approximativement à 95 %. L'estimation de l'incertitude repose sur l'identification de contributions pouvant altérer le résultat de mesure et contribuer à l'incertitude globale. Un diagramme des 5-M fournit une aide à l'identification des principaux paramètres d'influence. La méthodologie permettant la combinaison des composantes est présentée dans le GUM⁽¹⁾.

En termes de méthode de mesure, il est possible de distinguer la thermométrie dite de contact et la thermométrie dite sans contact, appelée également pyrométrie. La thermométrie de contact se définit en plaçant le

thermomètre au contact du milieu, du corps, dont la température est mesurée. Tandis que la thermométrie sans contact se définit au travers de la mesure du rayonnement thermique émis par un milieu, un corps, dont on souhaite mesurer la température. Les principes de mesure, exploités par les différentes technologies de thermomètres, reposent principalement sur la variation de la résistivité d'un conducteur, la thermo-électricité d'un circuit constitué de deux conducteurs différents, la modification géométrique d'un corps, la photoluminescence ou la thermosensibilité d'une substance ou l'émission d'un rayonnement infrarouge d'un corps.

En termes de mise en œuvre, l'utilisation d'un capteur conduit à son intégration dans une chaîne de mesure et d'acquisition. Le terme capteur regroupe l'élément sensible, captant la grandeur physique mesurée – ici la température, et de transducteur, permettant la conversion en une autre grandeur physique mesurable – le plus souvent une grandeur électrique. Les capteurs peuvent être regroupés selon deux catégories: les capteurs passifs, dont le principe de mesure repose la variation d'impédance électrique de l'élément sensible, à la suite de la variation du mesurande ; les capteurs actifs, dont le principe de mesure repose sur la génération d'un signal électrique exploitable, de l'élément sensible, à la suite de la variation du mesurande.

Appliqué à la description de la thermométrie de contact, l'étude des chaînes de mesure et d'acquisition se concentre souvent au capteur seul et à l'élément sensible dont il est composé. Les sondes résistives, capteurs passifs dont la variation de la résistance électrique est une fonction de la température, et les couples thermoélectriques, capteurs actifs générant une f.e.m. proportionnelle au gradient de température en présence, sont les instruments les plus courants. L'introduction d'une sonde de

température en thermométrie de contact engendre une perturbation au sein du système étudié. Pour que celle-ci soit la moins impactante possible une réflexion doit être menée sur la mise en œuvre de la sonde. Parmi les considérations à prendre en compte, il y a l'optimisation des échanges thermiques entre le milieu et la sonde, la limitation des résistances thermiques intermédiaires entre le milieu d'intérêt et l'élément sensible, la limitation de l'influence des flux de chaleur extérieurs au milieu d'intérêt, etc. Les mesures de température par pyrométrie quant à elles, font intervenir plusieurs facteurs : l'instrument – qui doit être étalonné et bien caractérisé, l'objet dont on souhaite mesurer la température – dont l'émissivité doit être connue – et l'environnement qui peut avoir un effet non négligeable.

Aujourd'hui, ce qu'on attend d'un métrologue, mais aussi de toute personne qui met en œuvre des mesures, c'est d'avoir une compréhension des mécanismes sous-jacents à la mesure, tant du point de vue de l'instrumentation que de la compréhension des phénomènes physiques, qui permettent d'avoir un regard critique sur les valeurs obtenues à l'issue de ces mesures. Dans un monde où nous sommes de plus en plus entourés de données, il est indispensable de disposer des outils et des méthodes pour s'assurer de la qualité de ces données, de leur pertinence. La métrologie apporte une garantie permettant d'avoir confiance dans les données de mesure. Et c'est une des clés pour prendre les bonnes décisions ●

Pour aller plus loin Guide technique CFM-AFNOR *Mesures de température - Bonnes pratiques et applications dans l'industrie*, à paraître décembre 2021. Une Journée Technique : « Mesures de température dans l'industrie » est disponible en replay sur le site du CFM.

(1) JCGM 100:2008(F), Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure

CFM | Métrologie du futur

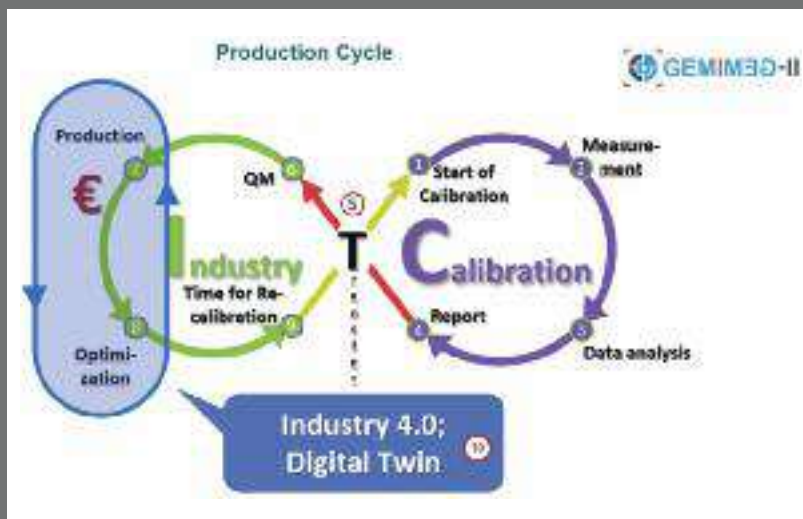
Une révolution en marche

Dans cette édition, nous proposons de revenir sur la présentation plénière du dernier Congrès international de métrologie (CIM2021) qui s'est tenu à Lyon et en distanciel, du 7 au 9 septembre dernier. En effet, deux présentations étaient en lien direct avec la place de la métrologie dans l'industrie 4.0 et les opportunités offertes par l'arrivée des nouvelles technologies, dont nous avons parlé depuis près de deux ans maintenant dans cette rubrique Creative Metrology, qui relate les travaux réalisés dans le cadre du groupe de travail du même nom animé par le CFM.

Une présentation de Dietrich Imkamp de Zeiss Métrologie industrielle présente les enjeux à relever par la métrologie pour la fabrication avancée dans les dix ans à venir et Thomas Engel de Siemens a présenté les opportunités et défis autour de la métrologie pour la production du futur.

La métrologie pour la fabrication avancée dans la prochaine décennie

Dans la prochaine décennie, la production industrielle et son environnement vont changer rapidement, du fait en particulier de la réduction de la fabrication des moteurs thermiques et de leurs composants. De l'autre côté, dans de nombreux domaines comme les moteurs électriques, les produits médicaux et les semi-conducteurs, la demande est croissante. Ce changement de la demande va de pair avec le développement technologique dans les domaines de la fabrication avancée pour la production en série et la possibilité de fabriquer à des échelles de plus en plus réduites dans l'industrie du semi-conducteur.



Dans ce contexte, la métrologie doit faire face d'un côté à de nouvelles demandes visant à déterminer les caractéristiques des produits fabriqués de manière plus complète et plus rapide. Il ne s'agit pas seulement de nouveaux composants par exemple constituant les moteurs électriques ou encore des composants présentant des géométries "free forms" complexes, mais aussi de nouveaux processus de fabrication avancés qui nécessitent de nouvelles approches métrologiques adaptées. Dans ce contexte, les techniques de mesure optiques dans le domaine de longueurs d'ondes visibles et invisibles se sont fortement développées du fait de la forte réduction des composants électro-optiques et de la forte augmentation de la puissance de calcul pour réaliser le traitement des données.

D'un autre côté, l'environnement des technologies de mesure associées à la fabrication évolue aussi du fait de la numérisation de la fabrication. Cela fait naître des

opportunités pour l'intégration et l'automatisation des technologies de mesure. Ce mouvement est favorisé par la standardisation des interfaces.

Cependant, la digitalisation provoque l'obsolescence des technologies de mesures en post-processing du fait qu'elle incite à mesurer pendant le processus de production et ensuite à simuler le processus de production avec ces paramètres. Ce changement de paradigme soulève néanmoins la question de la détermination de l'incertitude et la validation de ce type de procédure.

Aller vers une "Production et consommation responsable" est l'un des objectifs affichés par les Nations Unies dans le cadre des SDG (*Sustainable Development Goals*) pour atteindre un futur meilleur et durable. De ce fait, l'efficacité de l'utilisation des ressources dans la fabrication se trouve contrainte plus uniquement par des raisons économiques. Les indicateurs utilisés pour la quantifier sont basés le plus

souvent sur des mesures (par exemple la consommation énergétique). Avec la possibilité de connecter les informations de mesure à travers les réseaux digitaux, de nouvelles opportunités pour l'évaluation de la fabrication émergent.

✉ **Dietrich Imkamp,**

Zeiss Allemagne

✉ **Mustapha El Bouchouafi,**

Zeiss France

Métrieologie et production : opportunités et défis dans l'industrie du futur

Le projet GEMIGEG-II est financé par le ministère allemand de l'Économie et de l'Énergie. L'objectif du projet est de définir un système métrologique sûr et robuste dans le cadre de la transformation numérique. Il compte 13 partenaires dont 9 industriels, la PTB et 3 partenaires académiques. Il a débuté il y a un an, dure trois ans et le budget total atteint presque 18 millions d'euros.



L'idée de départ part du constat de la numérisation du monde, de l'industrie en particulier et de la question de savoir comment le monde de la métrologie, depuis les instituts nationaux jusqu'aux laboratoires d'étalonnage et les industriels utilisateurs des instruments de mesure vont être affectés. Il s'agit d'une transformation dans ce cadre qui doit être transparente, c'est-à-dire que les machines, les ordinateurs peuvent comprendre et sur laquelle ils puissent agir.

En considérant qu'un produit fabriqué par une entreprise est caractérisé par des mesures fournies par des instruments de mesure. Ces instruments sont raccordés au SI via la chaîne ininterrompue d'étalonnage, qui se formalisent par des certificats d'étalonnages. Dans cette approche numérique, on va donc prendre en considération les certificats d'étalonnage numériques

(DCC pour *Digital Calibration Certificates*).

Ces certificats d'étalonnage numériques sont au cœur de l'architecture définie dans le cadre du projet. De plus, on considère un réseau massif de capteurs pour mesurer les paramètres d'intérêts. L'architecture doit être ouverte, les données doivent être orchestrées et enfin leur qualité doit pouvoir être assurée.

Si l'on considère maintenant les données, le projet s'attache à définir trois niveaux : la mesure et la qualité de mesure associée (QoS pour *Quality of Sensing*), la donnée et la qualité de donnée associée (QoD pour *Quality of Data*) et enfin l'information que l'on en tire et la qualité de cette information (QoI pour *Quality of Information*). Ces indicateurs de qualité des différents facteurs dans la chaîne de mesure sont définis dans le cadre du projet et peuvent être intégrés dans

l'architecture globale.

Le projet s'attache à illustrer ces concepts sur des cas d'usage réels. La présence des industriels dans le projet permet cela. De plus, les données de mesure dans ce cadre doivent suivre les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interpretable, Reusable*) auxquelles s'ajoute la traçabilité.

Le projet a la volonté de développer une solution dont une partie pourrait être sous la forme d'un logiciel libre. Le projet GEMIMEG-II souhaite associer d'autres partenaires pour élargir sa légitimité.

✉ **Par Thomas Engel,** Siemens

pour aller plus loin GEMIMEG-II Project

EURAMET's European Metrology Network for Advanced Manufacturing :

<https://www.euramet.org/european-metrology-networks/advanced-manufacturing/>

Zeiss Métrologie industrielle :

<https://www.zeiss.fr/metrologie/home.html>