



## ÉDITO

# Décarbonons la métrologie...

La crise de l'énergie est face à nous, puissante et marquée par une guerre à nos portes.

Le réchauffement de la planète est indéniable : nous le ressentons déjà sur nos corps.

Les modifications de notre environnement sont en route : il ne s'agit plus de savoir si nous serons impactés, mais à quel point nous le serons.

De jeunes ingénieurs « bifurquent », sortent d'une voie tracée et nous interrogent sur nos pratiques industrielles qu'ils jugent destructrices.

Inaudible jusque-là, un nouveau vocabulaire devient familier et fait son entrée dans notre monde industriel : empreinte carbone, décarbonation, sobriété, négawatt (« unité théorique de puissance mesurant une puissance



© VectorMine

économisée, résultat de la sobriété énergétique ou d'une efficacité énergétique améliorée » selon Wikipédia)...

Alors, allons-y franchement...

Il est largement temps de décarboner nos pratiques et nos usages : prenons notre part, dans nos métiers de la

mesure et de la métrologie, dans nos services, à notre niveau.

Mettons-nous des objectifs de réduction de notre empreinte carbone, soyons sobres, nous aussi...

Décarbonons la métrologie... Maintenant !



## À lire dans ce cahier

### Édito

Décarbonons la métrologie... **76**

### 3 questions à Sandrine Gazal et à Jérôme Lopez

Un nouveau directeur pour le CFM **77**

### Événement

Les Journées de la Mesure, J'M 2022 **79**

### Événement

Congrès international de métrologie 2023 **80**

### Compte rendu journée technique

Maîtriser l'estimation des incertitudes de mesure par la pratique **83**

### CREATIVE METROLOGY

#### Métrologie

La digitalisation est en marche **86**

### AVIS D'EXPERTS

#### Pièces imprimées en 3D

L'évaluation par numérisation est devenue la norme **88**

Dans ce contexte, le CFM déroulera son programme dans les semaines qui viennent, avec :

- **Les prochaines journées techniques**
  - optimiser les périodicités d'étalonnage, le 20 septembre ;
  - bonnes pratiques et métrologie des enceintes thermostatiques, le 18 octobre ;
  - premiers bilans après la transition de l'ISO/CEI 17025, le 8 novembre ;
  - les données au centre du processus de mesure, le 6 décembre.
- **les Journées de la Mesure 2022** du 5 au 6 octobre

à Lyon, en partenariat avec le Salon Mesures Solutions Expo

- **les conférences partenaires** dans le cadre de Forum Labo à Lyon et du salon BE 4.0 à Mulhouse
- **le Congrès international de métrologie**, déjà en route pour 2023.

Vous trouverez également dans ce numéro les compléments sur nos activités, journées techniques et autres. Ainsi que nos deux rubriques habituelles : la question de métrologie et *Creative Metrology*.

Bonne lecture ●

 **Sandrine GAZAL**, Directrice du CFM

### 3 QUESTIONS À SANDRINE GAZAL ET À JÉRÔME LOPEZ

## Un nouveau directeur pour le CFM

**Sandrine Gazal, voilà plus de 20 ans que vous incarnez et dirigez le CFM, c'est un chapitre qui se tourne ?**

**Sandrine Gazal :** Effectivement, le CFM est créé sous la forme d'une association loi 1901 en mai 2002, après 7 ans d'activités au sein du MFQ, et sous l'impulsion du Laboratoire national d'essais et de métrologie, du Cetiati et du Groupe automobile PSA.

Notre « portefeuille » compte alors déjà le CIM (Congrès international de métrologie), les journées techniques, des documents techniques et l'animation d'un réseau de 250 adhérents.

Vingt ans plus tard, le CFM a multiplié par 3 le nombre de ses adhérents, son effectif est passé de 1 à 6 personnes en intégrant les compétences nécessaires au développement de ses actions.

Les journées techniques rassemblent annuellement plus de 500 participants, un annuaire annuel présente les offreurs de solutions du réseau. La bibliothèque technique co-éditée avec l'Afnor est unique dans le secteur, la vidéothèque et les replays sont à disposition de tous. Le label *Trust Metrology* a été ouvert à la communauté industrielle ...

En complément de ces activités francophones, le Congrès international de métrologie s'est installé en Europe comme un point de référence incontournable pour la R&D et les perspectives de la mesure et de la métrologie.

Et nous venons d'intégrer un nouvel événement international, Gas Analysis, le symposium mondial de la communauté de l'analyse des gaz.

Aujourd'hui le CFM est reconnu par ses adhérents qui lui font confiance, par des partenaires nationaux et internationaux de premier rang et dans un large réseau de plus de 35 000 contacts en France et à l'étranger.

Tout va très bien... Et nous fourmillons tous les jours sur une foule d'idées nouvelles !

Nous sommes en excellente situation pour préparer la prochaine décennie et faire face aux défis actuels : la transition

industrielle et énergétique, l'évolution des métiers de l'information et de la rencontre, l'arrivée de nouvelles générations et de nouveaux modes de travail en entreprise... Ainsi, un nouveau chapitre pour le CFM est au ●●●



**PLUS DE MESURES.  
PLUS RAPIDEMENT.  
AUTOMATISEZ  
VOS INSPECTIONS.**

**VITESSE | EXACTITUDE | RÉPÉTIBILITÉ | POLYVALENCE**

Imaginée pour les applications de contrôle de la qualité automatisé, la solution de numérisation 3D clé en main R-Series permet aux fabricants de détecter les problèmes de qualité plus rapidement, ainsi que de baser leurs décisions sur de meilleures analyses statistiques. Vous souhaitez optimiser vos processus de fabrication et produire des pièces de meilleure qualité ? Contactez-nous dès aujourd'hui !

[creaform3d.com](http://creaform3d.com) | +04 84 88 54 95



**CREAFORM**  
AMETEK

travail depuis plusieurs mois et se concrétise par la prise de fonction de Jérôme Lopez à la direction du CFM à compter du 1<sup>er</sup> septembre.

**Jérôme Lopez, vous êtes le nouveau directeur, pouvez-vous nous en dire plus sur vous ?**

**Jérôme Lopez :** Je suis ingénieur des Mines en matériaux et titulaire d'un doctorat en optoélectronique. J'ai eu différentes expériences industrielles, en grand groupe chez Thales, dans une start-up dans le domaine médical et ensuite j'ai rejoint un pôle de compétitivité en photonique (Optitec). Fort d'un background technique et de cette dernière expérience d'animation d'un réseau industriel, j'ai fait le choix début 2019 de rentrer au CFM. Plusieurs choses m'intéressaient : un réseau mélangeant les offreurs de solutions et les utilisateurs, un modèle économique entièrement privé, une petite équipe et donc agile, et



le sujet de la métrologie qui est pour moi un des domaines d'excellences français, trop méconnu d'ailleurs. En arrivant au CFM comme directeur technique, j'ai pu m'inscrire dans la continuité des actions en cours, le CIM, les Journées techniques, les documents techniques, le réseau... Et j'ai pu aussi

rapidement amener des idées nouvelles et les concrétiser : tout d'abord avec le groupe de travail *Creative Metrology* qui avait été lancé par notre président Cosimi Corleto en 2018 et qui m'a tout de suite plu par rapport à son périmètre et ses ambitions. Et j'ai pu aussi innover dans le portefeuille de services proposés par le CFM en développant et lançant le label *Trust Metrology*, dont nous sommes convaincus qu'il sert pleinement la mission du CFM de diffusion de bonnes pratiques de métrologie auprès des industriels. Et je suis très fier de la confiance qui m'a été portée en me proposant de reprendre la direction du CFM. J'essaierai d'être à la hauteur des attentes et des missions qui me sont confiées.

**Quelles sont donc les perspectives du CFM ?**

**Jérôme Lopez :** Je vois beaucoup de possibilités devant le CFM. Les ●●●

LES JOURNÉES DE LA MESURE

J'M

5-6 OCT

LYON

2022

Tutoriel  
et Atelier

SPONSORS

ACOMESURES  
INSTRUMENTATION & METROLOGIE

amrikart  
ultraprecision

cetim

CETIAT  
ensemble, innover et valider

CREAFORM

CHAUVIN  
ARNOUX  
MANUMESURE

Jri

SARTORIUS

STIL  
MARPOSS

TH  
INDUSTRIE

Trescal

werth

04 67 06 20 36

info@cfmetrologie.com

www.cfmetrologie.com

CFM  
MESURE INDUSTRIELLE

cfm N°80 • SEPTEMBRE 2022

- 78 -

bases construites sont saines, les partenariats sont solides et l'équipe est motivée avec des personnes complémentaires et impliquées. Le conseil d'administration renouvelé en 2021 est enrichi de nouveaux profils qui apportent déjà des idées nouvelles et le bureau du CFM a la sagesse et le recul nécessaire pour prendre des décisions opportunes et réfléchies.

Au-delà des événements à court terme comme les J'M en octobre à Lyon ou le CIM2023 en mars prochain à Lyon aussi, nous construisons dès maintenant la suite : le prochain congrès *Gas Analysis*, le programme des Journées techniques 2023, un livret sur la digitalisation de la métrologie à travers les travaux du groupe de travail *Creative Metrology* et d'autres idées, notamment

sur l'évolution vers les formats numériques/hybrides. La métrologie joue un rôle dans notre vie de tous les jours, dans l'industrie, pour l'environnement, pour la santé... Tous ces domaines changent rapidement et la métrologie avec. Nous l'accompagnons dans ces changements et contribuerons à sa diffusion et son rayonnement ●

## ÉVÉNEMENT

# Les Journées de la Mesure, J'M 2022

Les Journées de la Mesure 2022 auront lieu à la Cité des Congrès à Lyon les 5 et 6 octobre prochain. Elles présentent une construction originale autour de tutoriels sur les bonnes pratiques de la mesure et sur leurs mises en application au travers d'ateliers de démonstration. Différentes sessions seront organisées au sujet de thématiques clés : fondamentaux, dimensionnel, laboratoire et température avec cette année un focus particulier sur la chaîne de mesure. Les ateliers sont sponsorisés par plusieurs organisations.

Ces sujets concernent de nombreux secteurs d'activités : la mécanique, l'environnement, la biologie, l'industrie plastique, l'agroalimentaire... Ainsi que tous les intervenants de la chaîne de mesure et de production : utilisateur de moyens de mesure, technicien, responsable métrologie, qualité ou production, ingénieur...

Cette année une démonstration inédite sera réalisée sur une miniligne de production de pièces obtenues par fabrication additive dans le cadre de la session "dimensionnel" des Journées de la mesure. Cet atelier aura pour objectif de présenter toute la chaîne de mesure dimensionnelle. Depuis la fabrication des pièces par impression 3D jusqu'à la caractérisation de leur état de surface par des techniques complémentaires. Les sponsors de la session sont : Amrikart, Creaform, Stil-Marposs, Werth, et le Cetim.



Un bras robotisé portant différents types de capteurs sans contact sera utilisé pour la numérisation 3D des pièces. Une station équipée de capteur sans contact confocal chromatique permettra de mesurer la topographie de surface. Enfin, une étude sera réalisée par tomographie RX, la démonstration portera sur l'analyse d'images des pièces fabriquées dont les acquisitions auront été réalisées au préalable.

En plus de la présentation des instruments présents sur l'atelier, des comparaisons entre différentes méthodes pourront être réalisées pour mettre en évidence les domaines d'application privilégiés selon les types de mesure. L'association des capteurs intelligents

et de technologies novatrices va permettre de répondre à de nombreux enjeux des nouvelles technologies de fabrication avancées.

La session "dimensionnel" présentera également les objectifs et les méthodes de la numérisation 3D au travers de trois interventions tutoriels par des experts, notamment sur les sujets spécifiques que sont la tomographie RX et l'imagerie chromatique confocale.

Par ailleurs, une session générique traitera des sujets clés que sont la déclaration de conformité et la détermination des incertitudes de mesures. Une démonstration aura lieu en complément sur le sujet « du capteur à la donnée de mesure » coordonnée par les sponsors TH Industrie & AcoMesures.

Une session "laboratoire" abordera des bonnes pratiques de mesures en pH-métrie et en volumétrie au travers de deux interventions et de deux ateliers en parallèle par les sponsors Sartorius et Manumessure. Des mises en pratique de réalisation d'étalonnage et d'utilisation de matériaux de référence seront réalisées.

Une dernière session sera consacrée à la mesure de température avec deux tutoriels traitant de la complémentarité des mesures en contact et sans contact. Des ateliers présenteront par la suite la chaîne de mesure de température, depuis l'étalonnage de sonde

type Pt jusqu'à la mesure de contact sur conduite en passant par la réalisation d'étalonnage de capteurs connectés. Le tout permettra de mettre en avant les paramètres d'influence liés à ces différentes manipulations. Les sociétés sponsors de cette session sont les suivants : JRI-MMS, Sfont et le Cetiat.

Cette 6<sup>e</sup> édition des Journées de la Mesure organisée par le Collège français de métrologie se déroulera en parallèle du salon Mesures Solutions Expo, piloté par le Réseau mesure. Ce salon vise à présenter l'offre de la mesure dans sa large diversité, du

monde de la recherche à celui de la production, et des solutions actuelles aux perspectives futures.

L'ensemble de ces interventions est voué à être interactif et à permettre au public d'échanger librement avec les experts présents sur l'événement ●

✉ **Lauryanne TEULON**  
(CFM)

---

Le programme détaillé des Journées de la Mesure est disponible sur le site du Collège français de métrologie :  
<https://www.cfmetrologie.com/fr/>

## ÉVÉNEMENT

# Congrès international de métrologie 2023

Le prochain Congrès international de métrologie (CIM2023) se tiendra comme l'édition précédente à Lyon du 7 au 10 mars 2023 en parallèle du salon Global Industrie.

L'édition précédente a été réussie dans un contexte complexe et incertain, dû à l'épidémie de Covid 19, en forçant les équipes à beaucoup de créativité par une formule hybride qui a vu des présentations orales et des posters préenregistrés et diffusés en live, d'autres, présentés par les intervenants, qui avaient pu faire le déplacement et des tables rondes où se sont mêlés les diffusions préenregistrées et les participants en salle. Le soutien logistique et technique de l'organisateur du salon GL Events a été pour beaucoup dans cette réussite.

En 2023, nous faisons le pari du présentiel et gageons que sur des événements importants par la taille et la renommée, les industriels, les métrologues voudront se déplacer pour se voir, échanger, réseauter et préparer ensemble l'avenir.

Car l'avenir de la métrologie touche tout le monde. Tout d'abord, l'industrie bien sûr dans sa version 4.0, où la digitalisation, les réseaux de capteurs, les algorithmes de traitement de signaux



et d'images à base d'intelligence artificielle vont jouer un rôle de plus en plus important. Depuis quelques années et plus intensément depuis quelques mois, des travaux se mettent en place, se coordonnent pour définir les bases d'une métrologie digitale. Nous en avons parlé à plusieurs reprises dans ces pages dans la

rubrique Creative Metrology. Il s'agit par exemple des certificats d'étalonnage digitaux : bien plus que la simple numérisation d'un document papier, l'enjeu réside d'une part dans la possibilité d'assurer une traçabilité métrologique en tout lieu et à tout instant et d'autre part dans les possibilités offertes d'exploiter les données d'éta-

lonnage pour une maîtrise plus fine du processus de mesure. Lors du CIM2023, une table ronde traitera de la digitalisation de la métrologie en réunissant des représentants des acteurs les plus importants ; elle sera menée par Sascha Eichtaedt de la PTB allemande. Une autre table ronde traitera plus spécifiquement de l'industrie 4.0 et des parallèles et synergies entre l'industrie manufacturière et l'industrie du process pour lesquelles on observe un même rapprochement des capteurs vers les machines. Elle sera quant à elle menée par W. Lubcke de E+H.

Mais la métrologie va toucher aussi l'enjeu sociétal majeur qu'est l'environnement. Déjà en 2021, une table ronde sur le sujet des émissions industrielles avait montré l'importance de la maîtrise du processus de mesure pour pouvoir mesurer des niveaux d'émissions abaissés par les directives inter-

nationales. Lors du CIM2023, le sujet de l'hydrogène et des enjeux autour de la mesure sera adressé. En effet, aujourd'hui la maîtrise de la technologie hydrogène passe par la maîtrise de la mesure de débit d'une part et d'autre part par la mesure des niveaux d'impuretés, et ce depuis la production jusqu'à l'utilisateur final. Les impuretés peuvent dégrader fortement les rendements en présentant pour certaines d'entre elles un caractère dangereux. Là encore, le CIM2023 proposera une table ronde avec des acteurs représentatifs du domaine. Elle sera menée par Annarita Baldan du VSL néerlandais. Un autre sujet d'importance liée à l'environnement est l'économie circulaire et là encore la métrologie a un rôle à jouer par exemple dans la maîtrise de la traçabilité des matériaux. On peut citer par exemple les nanomatériaux, sur lequel le LNE est particulièrement actif avec sa

plateforme Carmen (Plateforme de caractérisation métrologique des nanomatériaux).

De plus, la métrologie continuera de se préoccuper des enjeux autour de la santé. Le rôle de la mesure dans la gestion de la crise du Covid-19 n'est pas à démontrer. Nous reviendrons dans le cadre d'une table ronde sur les enjeux aujourd'hui et demain autour de la métrologie pour la santé humaine et animale.

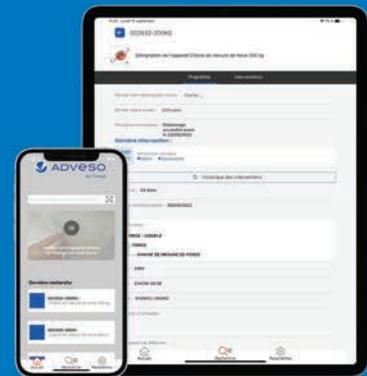
Enfin, il ne faut pas oublier que la métrologie est faite pour et par des êtres humains qui sont confrontés à une évolution très rapide des technologies. L'idée même qu'une formation initiale suffirait à acquérir les connaissances nécessaires pour une vie professionnelle entière est révolue. L'enjeu est de continuer à se former tout au long de sa vie, en bénéficiant des moyens digitaux d'accès au savoir. Le CIM2023 proposera donc une ●●●

## Trescal

LA MÉTROLOGIE AU SERVICE DE VOTRE PERFORMANCE

# DES SOLUTIONS UN PARTENAIRE

- Étalonnage
- Validation
- Qualification
- Réparation
- Maintenance
- Essais
- Gestion de parc
- Formation
- Conseil
- Ingénierie
- Automatisation



Découvrez notre nouvelle application mobile Adveso pour gérer votre parc d'instruments de mesure



Retrouvez-nous sur le stand B23 à Lyon

table ronde sur le thème de la formation, menée par Hugo Lehmann du Metas Suisse.

Ces tables rondes seront des rendez-vous privilégiés favorisant l'échange et la discussion et viendront compléter les présentations orales de grande qualité qui seront dispensées dans une quinzaine de sessions orales permettant de se tenir au courant des dernières

techniques de mesures, des dernières méthodologies, à l'état de l'art mondial. Elles seront complétées par des posters permettant la discussion en détail avec les chercheurs ou industriels en pointe sur leur sujet d'expertise. D'autres éléments et surprises viendront agrémenter ce programme en profitant notamment de la connexion croissante avec le Salon Global Indus-

trie, réunissant les acteurs majeurs de l'industrie et dans une partie du salon, ceux de la mesure.

Avec le CIM2023, nous faisons donc le pari de l'excellence, de la continuité, de l'innovation pour définir ensemble la métrologie de demain ●

📍 [www.cim2023.com](http://www.cim2023.com)

## COMPTE RENDU JOURNÉE TECHNIQUE

# Maîtriser l'estimation des incertitudes de mesure par la pratique

## Présentation d'Éric Georgin - Cetiat

Le Collège français de métrologie organisait le 14 juin dernier une journée technique sur les incertitudes de mesures et leurs mises en pratique. Celle-ci était le complément « expert » d'une première journée « premiers pas » organisée sur la même thématique en mars dernier.

Cette journée technique coorganisée avec François Hennebelle, enseignant-chercheur et spécialiste de la méthode Monte-Carlo à l'Université de Bourgogne, visait à rentrer dans le détail de la réalisation de calculs d'incertitudes de mesure. Les interventions avaient pour objectif de présenter les principes de calculs et de donner des exemples concrets de mises en pratique.

Plusieurs méthodes ont été détaillées, l'évaluation des incertitudes par utilisation du GUM (*Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*), JCGM 100 : 2008, la méthode Monte Carlo (Supplément 1 du GUM) avec deux exemples de mises en application et les méthodes alternatives utilisant les résultats de comparaisons interlaboratoires. L'utilisation du GUM a notamment fait l'objet d'une présentation très complète de la part d'Éric Georgin, responsable du pôle systèmes thermiques - chauffage et référent technique du laboratoire d'hygrométrie du Cetiat.

### Présentation de la méthode GUM

Au début de sa présentation, Éric Georgin rappelle le cheminement de la réalisation de calculs d'incertitudes depuis la définition du mesurande jusqu'à l'expression du résultat final. Cheminement qui est semblable pour toutes les approches, qu'elles soient expérimentales, numériques ou analytiques : il est nécessaire d'analyser le processus de mesure, d'identifier les grandeurs d'entrées ainsi que le mesurande d'intérêt et, lorsque cela est possible, les relier au moyen d'un modèle mathématique. Il se concentre ensuite sur la démarche suivant l'approche analytique et le GUM en particulier. Le GUM a été élaboré par le JCGM (*Joint Committee for Guides in Metrology* - Comité commun pour les guides en métrologie) avec une première version publiée en 1993, puis des révisions en 1995 et en 2008. Selon Éric Georgin, la publication de ce document a permis d'harmoniser les pratiques sur l'estimation des incertitudes de mesure et le GUM fait aujourd'hui référence aussi bien dans les milieux

scientifiques universitaires que dans les milieux industriels. Le document est disponible gratuitement sur le site du BIPM (Bureau international des poids et mesures).

Plusieurs documents, suppléments ou compléments, ont été édités à la suite de la publication du GUM JCGM 100 : 2008 et permettent à l'utilisateur de progresser dans sa compréhension et dans son usage des incertitudes de mesure (supplément 1, 2, GUM-6 : 2020...).

Éric Georgin nous rappelle que, tel que cela est indiqué au §1.1 « [le GUM] établit les règles générales pour l'évaluation et l'expression de l'incertitude pour les mesurages qui peuvent être effectués à des niveaux variés d'exactitude et dans de nombreux domaines - de la boutique du commerçant à la recherche fondamentale ». En effet, la métrologie est présente partout dans notre quotidien, au travers de la métrologie légale le plus souvent, mais également dans les activités scientifiques et industrielles. Sa bonne mise en pratique permet d'assurer la comparabilité ●●●



Service full web de **consultation** et  
**d'analyse de données** et de  
**résultats des moyens de mesure**



Connexion via un **site web**,  
hors de l'application  
Split PMQ



Dédié au **management**,  
**utilisateurs**, **auditeurs**,  
**clients**, **partenaires**



Valorise les données de votre **logiciel de gestion de parcs** d'instruments de mesure



Mise à jour de vos données  
**selon vos besoins**, avec  
possibilité de **temps réel**



www.implex.fr

des résultats de mesure, en s'appuyant sur la traçabilité au S.I. des mesurages, de compenser les biais de mesure, en appliquant les corrections d'étalonnage, et d'évaluer les incertitudes de mesure, en appliquant le GUM.

### La démarche en différentes étapes

Éric Georjin nous décrit ensuite les différentes étapes à suivre, selon le GUM, pour aboutir à l'estimation de l'incertitude de mesure, dans le cas d'un mesurage simple, en suivant un calcul analytique. La première étape consiste à identifier le mesurande et à analyser le processus de mesure et les paramètres d'influence. La deuxième étape a pour objectif de quantifier et d'estimer chaque composante d'incertitude, dite incertitude type, notamment en ayant recours soit à l'évaluation de type A, soit à l'évaluation de type B. L'étape suivante est la combinaison des différentes compo-

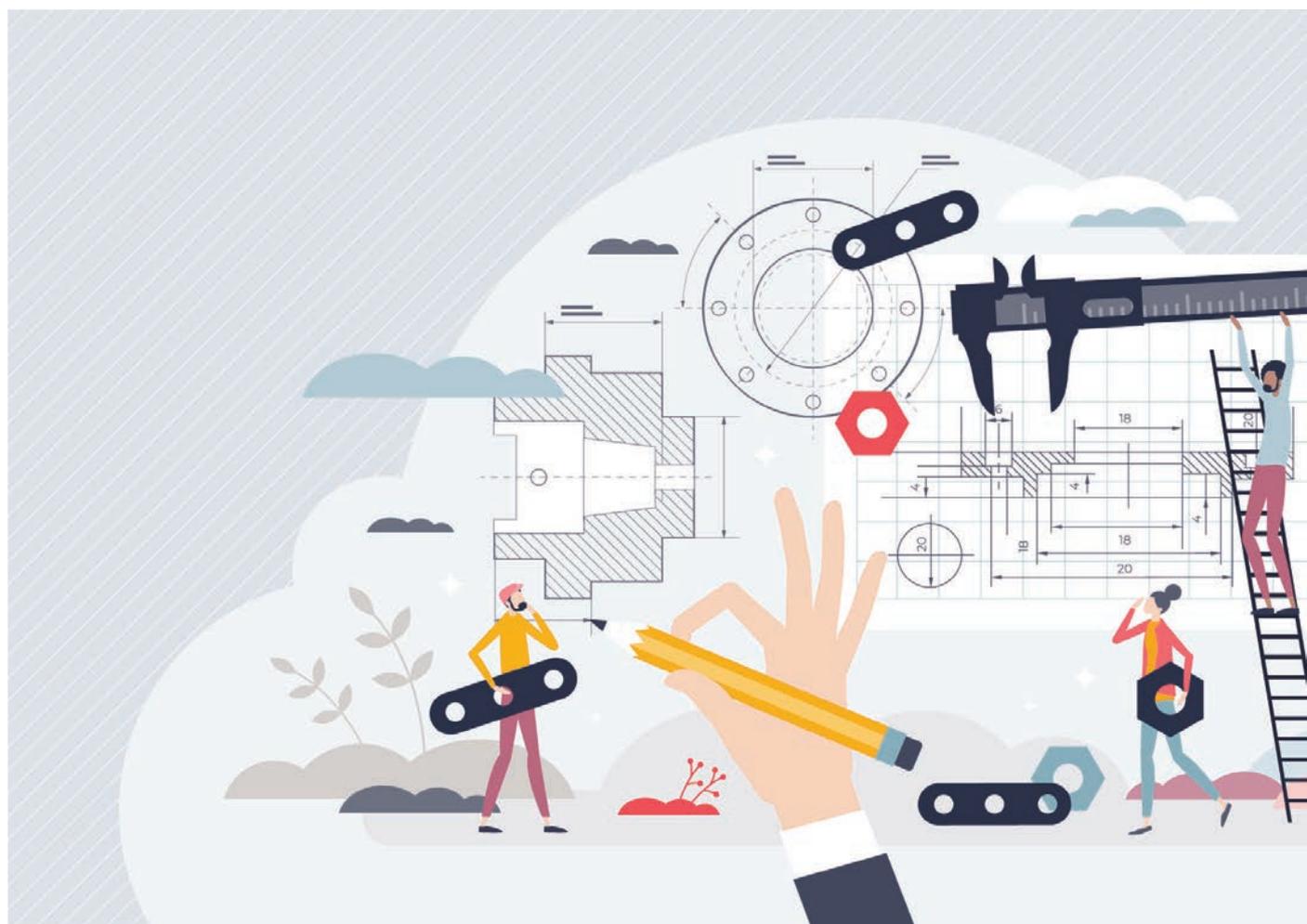
santes, en utilisant la loi de propagation des variances, pour évaluer l'incertitude composée. Enfin, la dernière étape consiste à exprimer le résultat de mesure associé à son incertitude élargie, en veillant à respecter que l'arrondissement du résultat soit en adéquation avec le nombre de chiffres significatifs de l'incertitude.

Dans le détail, l'étape une d'identification du mesurande peut se faire en utilisant la méthode des 5M, aussi appelée méthode d'Ishikawa. Elle permet d'avoir une démarche la plus exhaustive possible de sorte à lister toutes les composantes qui peuvent affecter le résultat de mesure ; ceci au travers de cinq catégories : matière, moyens, méthode, main-d'œuvre et milieu. En terme mathématique, le résultat de mesure sera une fonction  $y$  dépendante des résultats expérimentaux  $x_i$  et des composantes identifiées. Dans le cas d'un mesurage simple, le

processus de mesure est décrit au travers d'un modèle, additionnant le terme lié aux valeurs expérimentales et les valeurs de correction  $C_i$  permettant d'isoler chaque composante d'erreur identifiée.

La seconde étape a pour objectif de quantifier tous les termes du modèle, en déterminant leurs valeurs numériques, ainsi que leurs incertitudes types associées. Plus spécifiquement, pour estimer les incertitudes, il existe deux types d'évaluation :

- soit l'évaluation de type A, reposant sur l'utilisation de résultats de mesure dont, par exemple, l'écart-type expérimental sera exploité ;
- soit l'évaluation de type B, permettant d'affecter une loi de probabilité *a priori*, telle que la loi normale, la loi uniforme, la loi triangle... reposant sur des informations disponibles et du degré de connaissance de la composante considérée.



La finalité de cette seconde étape sera d'avoir une évaluation de chacune des composantes d'incertitudes types qui constituent le modèle associé au processus de mesure.

La troisième étape doit permettre de combiner toutes les incertitudes types, qui ne peuvent pas être simplement additionnées. Dans le cas d'un mesurage simple, le GUM propose l'utilisation de la loi de propagation des variances qui combine les incertitudes types, déterminées à l'étape 2, élevées au carré, c'est-à-dire les variances, et leurs coefficients de sensibilité, élevés également au carré, pour chaque composante et associe également des termes de corrélation, entre les variables du modèle, qui peuvent être négligés. Les coefficients de sensibilité étant les dérivées partielles de la variable de sortie du modèle par rapport chacun des termes du modèle.

Le résultat final, dans le cas d'un mesurage simple, correspond à la somme de chacun des termes constitutifs du modèle, auquel est associée une incertitude élargie qui est la racine carrée de la variance composée de toutes les incertitudes types multipliées d'un facteur d'élargissement  $k = 2$ . Ce dernier permet d'encadrer le résultat final avec une probabilité de 95 % ; en effet ceci repose sur l'hypothèse que le résultat de la combinaison des variances correspond à une loi de distribution gaussienne. Enfin, le résultat de mesure est arrondi en fonction de l'incertitude élargie qui est, elle, toujours donnée avec deux chiffres significatifs.

Une fois cette démarche appliquée, il est ensuite intéressant de réitérer les différentes étapes, pour compléter la liste des composantes d'incertitude ou lorsqu'on identifie une composante d'incertitude prépondérante que l'on peut vouloir chercher à diminuer.

### Les limitations

Dans le détail de l'utilisation du GUM, lorsque l'on applique la loi de propagation des incertitudes, on réalise un développement de Taylor au 1<sup>er</sup> ordre. Celui-ci peut être insuffisant, surtout dans le cas d'un mesurage simple. Ceci implique par conséquent que les incertitudes types sur les grandeurs d'entrée soient suffisamment faibles pour ne pas provoquer d'effets sensibles. Ensuite, il est nécessaire, dans cette approche analytique, que les calculs de dérivées partielles soient réalisables. Lorsque cela n'est pas le cas, il faudra alors faire appel à d'autres méthodes de calculs pour évaluer les incertitudes, telle que la méthode Monte Carlo.

### Mise en pratique : exemple d'une mesure de température

Éric GeorGIN a ensuite mis en pratique la méthode de calcul présentée sur un exemple de mesure de température dans une conduite. Le relevé de température est fait par piquage avec une sonde Pt100 sur une conduite dans laquelle il y a un écoulement d'eau. Différents relevés de mesure sont réalisés au cours du temps et renvoient

une valeur moyenne de 12,45 °C. En application de la méthode des 5M, de nombreuses composantes peuvent être retenues pour réaliser une estimation des incertitudes de mesures telles que : les mesures expérimentales, l'étalonnage, la modélisation, la dérive, la résolution, l'homogénéité du milieu...

Dans le cas des incertitudes associées aux mesures expérimentales, il s'agit d'une incertitude de type A qui correspond à l'écart-type sur les valeurs expérimentales. Pour les incertitudes associées à l'étalonnage, elles sont directement issues du certificat d'étalonnage tout comme le terme de correction, dont la valeur vaut ici 0,04 °C. L'incertitude associée à la dérive est de type B et peut être associée à une loi de distribution uniforme. Chaque composante est ainsi discutée, analysée, et évaluée afin d'arriver à l'étape de combinaison des incertitudes.

Du fait de la simplicité du modèle choisi, les coefficients de sensibilité sont simplifiés et sont tous égaux à 1 dans cet exemple. Un résultat final de  $12,41 \pm 0,12$  °C à  $k = 2$  est ainsi déterminé avec une quantification méthodique de toutes les contributions d'incertitudes. Dans cet exemple la contribution prépondérante est celle de l'inhomogénéité du milieu qui représente 51 % de la contribution totale des incertitudes. Si l'incertitude obtenue est trop grande par rapport au besoin, il peut être intéressant de chercher à abaisser cette composante d'incertitudes en essayant d'homogénéiser le milieu ●

✍ **Éric GEORGIN** (Cetiat)  
et **Laurianne TEULON** (CFM)

**pour aller plus loin** GUM : Guide pour

*l'expression de l'incertitude de mesure*, JCGM 100 : 2008 disponible sur le site du BIPM Journée technique « Maîtriser l'estimation des incertitudes de mesure par la pratique », le 14/06/2022 disponible en replay sur le site du CFM : [www.cfm metrologie.com](http://www.cfm metrologie.com) Journées de la Mesure les 5 et 6 octobre 2022 à la Cité des Congrès à Lyon avec une session « Incertitudes »



© VectorMine / Adobe Stock

## Métrologie

# La digitalisation est en marche

Le dernier Congrès international de métrologie (CIM2021) qui s'est tenu à Lyon pour la première fois en parallèle du salon Global Industrie en septembre 2021 s'est ouvert avec trois présentations keynote plénières alignées sur les thèmes du congrès : green deal, la santé et l'industrie 4.0.

Sur le thème industrie 4.0, nous avons eu la chance d'entendre Thomas Engel de Siemens sur le thème « Métrologie et production : opportunités et enjeux dans l'industrie 4.0 ». À cette occasion, il a notamment présenté le projet Gemimeg-2, rassemblant un consortium de laboratoires et industriels principalement allemands, mais comptant aussi des industriels français comme Valeo dans leurs rangs. Ce projet a pour but d'établir les bases d'une métrologie digitale avec notamment l'architecture à mettre en place pour accueillir les DCC (*Digital Calibration Certificates*) et

les partager entre tous les acteurs (industriel, laboratoire d'étalonnage, fabricant de capteurs, laboratoire national de métrologie..).

À travers cette tribune dans *CEM*, nous nous étions fait l'écho de cette présentation et en avons présenté les grandes lignes dans le numéro de décembre 2021, répondant ainsi à la mission première du CFM de diffusion de bonnes pratiques de métrologie.

En parallèle de cela, le CFM avait relancé en 2021 les travaux du groupe de travail Creative Metrology. Après une première phase dédiée à l'identification de technologies émergentes qui étaient en train ou avaient le potentiel de changer la métrologie (IoT, IA, Block chain,...) et qui avait abouti à la publication d'un livret en collaboration avec *CEM*, nous avons initié une deuxième phase dédiée à l'expression de besoin des industriels et utilisateurs de la

métrologie. Au début de cette phase, une identification des différents sujets clés, le choix de la digitalisation comme premier sujet de réflexion a été validé.

Aujourd'hui le groupe de travail se réunit régulièrement en marge des conseils d'administration du CFM et lors de la prochaine réunion, nous aurons la chance d'avoir Thomas Engel de Siemens en personne nous expliquer les dernières avancées en matière de digitalisation, ainsi que d'autres experts, spécialistes des DCC et autres certificats de conformité digitaux.

Cet engouement autour de la digitalisation de la métrologie est partagé par d'autres acteurs du domaine. C'est le cas par exemple de l'OIML (Organisation internationale de métrologie légale) et le BIPM (Bureau international des poids et mesures) qui ont lancé leur propre groupe de travail (*Joint task group*) fin 2021.



Car il est vrai que les enjeux sont multiples et importants. En ce qui concerne par exemple les certificats d'étalonnage digitaux, qui sont au centre de la réflexion, il s'agit d'aller au-delà de la simple numérisation d'un document, mais bien sûr de disposer facilement dans un format reconnu et partagé des résultats d'étalonnage afin de les exploiter efficacement. Il y a aussi la mise en place d'une architecture permettant d'assurer la traçabilité métrologique à tous les niveaux, c'est-à-dire depuis l'utilisateur final, l'industriel utilisant un instrument de mesure pour déclarer une conformité produit par exemple, jusqu'au laboratoire national de métrologie devant assurer le raccordement des étalons au plus haut niveau de la chaîne. Il y a des questions clés autour de cette architecture : comment la mettre en place ? Doit-elle être publique, privée ou dans un modèle hybride ? Qui doivent être les acteurs impliqués pour assurer la conception, la mise en place, l'opération, la maintenance ? On comprend que ces questions ne sont pas simples et qu'il va falloir du temps à tous les acteurs potentiellement impliqués pour se mettre d'accord et trouver les financements nécessaires.

Le CFM prendra sa part dans cet effort et grâce au groupe de travail *Creative Metrology*, il pourra synthétiser et faire remonter des besoins d'industriels français sur le sujet.

Mais ces enjeux vont au-delà de ces questions. À la fin, c'est véritablement la question de la maîtrise des mesures qui sont faites et donc du niveau de confiance qu'on leur porte. Et cela implique de savoir comment on déclare la conformité d'un produit, quelle est la capacité du processus mesure, donc quelle est l'incertitude de mesure des mesures critiques et cela en temps

réel, en fonction de conditions d'environnements, d'utilisateurs ou d'autres paramètres susceptibles de varier et d'influer sur le résultat mesuré.

Il faudra des outils numériques (logiciels, mais aussi matériels comme des capteurs d'environnement) adaptés et qui sauront s'interfacer facilement avec l'ensemble des outils digitaux de l'entreprise. Et il y aura donc aussi bien sûr un effort à fournir au niveau de l'entreprise pour intégrer ces outils. Mais c'est aussi une belle opportunité qui va s'ouvrir et que l'on pourrait résumer par la phrase suivante : « *Trust your measurements anywhere anytime* ».

Nous allons donc continuer le travail de veille, de réflexion et de communication engagé, à travers le groupe de travail *Creative Metrology*, mais aussi lors du projet Congrès international de métrologie (CIM2023) qui se tiendra du 7 au 10 mars 2023 à Lyon à nouveau en parallèle du salon Global Industrie.

Le congrès verra notamment deux tables rondes adresser le sujet : la première directement sous le titre « *The impact of metrology in the digital transformation: challenges and opportunities* ». Elle sera menée par Sascha Eichstaedt de la PTB, spécialiste du thème de la digitalisation de la métrologie. Elle comptera divers acteurs, de laboratoires d'étalonnage, des industriels, des experts du logiciel, et des représentants des instances de métrologie au niveau national et international. Les points clés de la discussion seront : quels sont les bénéfices d'une métrologie digitale ? Quel est le rôle des NMI (*national metrology institutes*) dans la transformation digitale ? Comment implémenter l'infrastructure nécessaire ? Quelles sont les technologies clés

qui seront impliquées ? Quels sont les freins à lever ?

La deuxième table ronde concernera l'industrie 4.0, sous le titre « *Industry 4.0: how metrology can underpin manufacturing and process industry ?* ». Elle sera menée par Wolfgang Lubcke d'Endress+Hauser et verra intervenir des représentants de NMI européens très impliqués sur le sujet, mais aussi des représentants industriels manufacturiers et du process industriel. Cette table ronde sera l'occasion de partager des expériences entre représentants de ces deux mondes avec leurs différences, mais aussi des points de convergence : par exemple le rapprochement des instruments de mesure du lieu de production ou de fabrication, afin de fournir des données en temps réel les plus fidèles et représentatives possibles. On traduit cela dans le process par : « *from off line to in line measurements* ». D'autres questions clés seront adressées comme la multiplication des capteurs (notamment IoT) et leur gestion, les standardisations et leur interopérabilité.

Le sujet de la digitalisation de la métrologie est riche, varié, multiforme avec des enjeux importants et de belles opportunités pour aller vers un processus de mesure plus fiable. Nous n'avons donc pas fini de parler de digitalisation dans ces lignes ●

✉ Jérôme LOPEZ, CFM

**pour aller plus loin**

Journée Technique du CFM, « Les données au centre du processus de mesure », 6 décembre 2022  
Congrès international de métrologie, CIM2023, du 7 au 10 mars 2023 : programme détaillé à paraître en octobre 2022 sur le site : [www.cim2023.com](http://www.cim2023.com)