

# La Référence.

Le magazine suisse de métrologie

N° 01 | 2025

[Page 12 →](#)

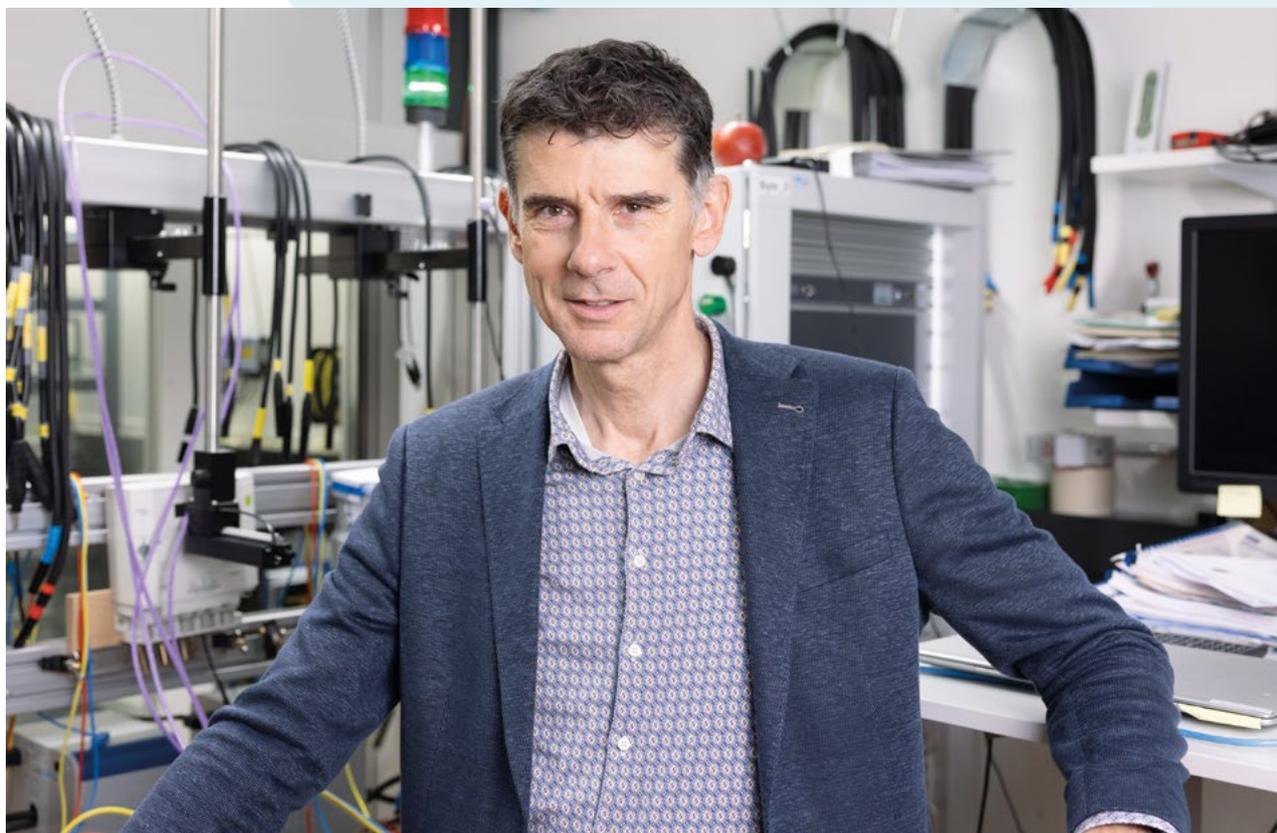
## Le pilier invisible du travail de précision

[Page 8 →](#)

La métrologie  
biologique, une  
alliée de taille  
pour la médecine  
personnalisée

[Page 18 →](#)

La candela ou  
l'humanité du Système  
international d'unités



#### Impressum

##### Éditeur

Institut fédéral de métrologie METAS  
Lindenweg 50, 3003 Berne Wabern, Suisse  
Tél. +41 58 387 01 11  
metas.ch

##### Rédacteur en chef

Xavier Rappo  
kommunikation@metas.ch

##### Membres du comité de rédaction

Sören Fricke  
Hugo Lehmann  
Lena Märki  
Jürg Niederhauser

##### Versions linguistiques

all., fr., ang. (en ligne)

##### Crédits photographiques

METAS, Adobe Stock (p. 8), IMEKO (p. 24 et p. 25)

##### Conception

Casalini Werbeagentur AG  
casalini.ch

##### Copyright

© 2025

Institut fédéral de métrologie METAS, Berne  
La reproduction d'articles avec mention de la source  
est autorisée. Veuillez envoyer un exemplaire  
à l'adresse de la rédaction.

##### Tirage

2700 exemplaires en allemand  
1100 exemplaires en français  
Anglais en ligne

##### Impression

Galledia AG, Flawil  
galledia.ch

##### Administration

ISSN 2813-9062 (français imprimé)  
ISSN 2813-9070 (français en ligne)

##### Page de titre

Système de remplissage pour le réservoir  
d'hélium liquide.

## Contenu

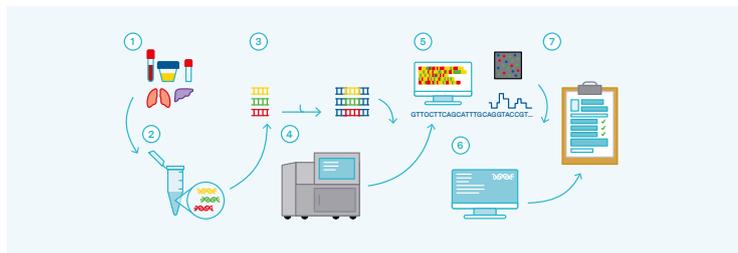
### 4 Une référence trois fois plus exacte



### 7 Objet



### 8 La métrologie biologique, une alliée de taille pour la médecine personnalisée



## Éditorial

Chère lectrice, cher lecteur,

L'été dernier, j'ai participé au congrès mondial IMEKO (p. 24). J'ai pu y observer les avancées de la métrologie au niveau mondial et l'évolution des nouvelles technologies de mesure, qui influencent notre travail au quotidien voire qui en sont l'objet.

L'exactitude de nos mesures ne dépend pas seulement de notre équipement ou des compétences de nos collaboratrices et collaborateurs, mais aussi de l'environnement dans lequel ces derniers procèdent aux mesures. À cet égard, notre service technique nous aide à maintenir des conditions stables dans nos laboratoires. Il œuvre assidûment en arrière-plan à assurer des conditions de travail optimales à nos métrologues (p. 12).

Le savoir-faire et l'expérience de nos métrologues leur permettent de procéder à des expériences électriques à des températures cryogéniques (p. 16/17). Dans ce contexte comme pour le séquençage de l'ADN en métrologie biologique dans le cadre de la recherche sur le cancer (p. 8), notre service technique assure un approvisionnement constant en électricité de nombreux instruments de mesure.

Je vous invite à vous plonger dans notre travail et à accompagner notre service technique dans les coulisses de notre Institut.

Fabiano Assi  
Directeur suppléant et chef de la division Physique

### 12 Le pilier invisible du travail de précision



### 18 Commentaire La candela ou l'humanité du Système international d'unités

### 16 Électricité Réalisation du volt Réalisation de l'ohm

### 22 En bref

### 24 La confédération internationale de métrologie IMEKO



### 26 Transfert de connaissance ouvert à tous



Actualité

## Ozone troposphérique : une référence trois fois plus exacte

Le laboratoire Analyse de gaz de METAS étalonne depuis 1993 des instruments servant à mesurer l’ozone. Il utilise pour cela un photomètre primaire mesureur d’ozone et applique une méthode uniformisée, qui sera adaptée aux nouvelles connaissances dans le cadre d’un processus international. Cette méthode permet de réduire les incertitudes de mesure.

Bernhard Niederhauser

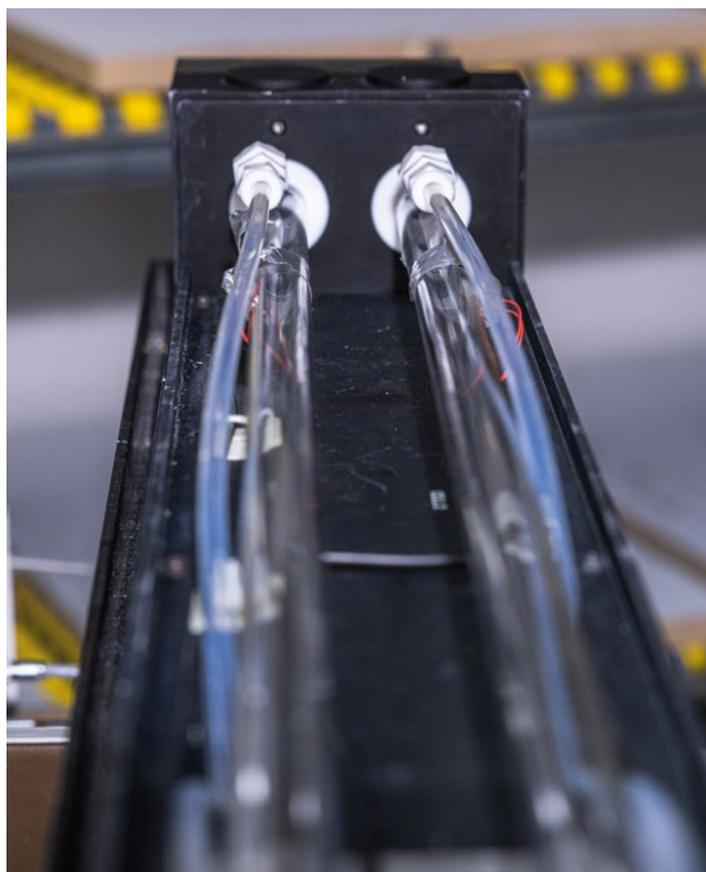
La mesure des fractions molaires d’ozone dans la troposphère et, par conséquent, l’étalonnage des instruments utilisés à cette fin ont une longue tradition en Suisse. Conformément à la méthode normalisée en vigueur, les instruments de mesure destinés à la surveillance de la qualité de l’air et à la recherche dans ce domaine sont étalonnés régulièrement et de la manière suivante: un générateur d’ozone constant produit une fraction molaire<sup>1</sup> d’ozone dans l’air, qui est mesurée au moyen d’un photomètre de

$$x_{O_3} = \frac{-1}{2 \cdot L_{opt} \cdot \sigma} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot \frac{T_{mes}}{p_{mes}} \cdot \ln(D)$$

Formule pour calculer la fraction molaire d’ozone:  $x_{O_3}$  est la fraction molaire d’ozone;  $L_{opt}$  est la longueur optique moyenne des cellules de mesure;  $\sigma$  est la section efficace d’absorption d’une molécule d’ozone;  $R$  est la constante universelle des gaz parfaits et  $N_A$  la constante d’Avogadro;  $T_{mes}$  et  $p_{mes}$  sont la température et la pression mesurées, et  $D$  est le produit de la transmission des deux cellules de mesure.



Le « manifold » distribue le mélange d'air et d'ozone, dont la fraction molaire est stable, sur le photomètre de référence et, en même temps, sur un à trois instruments à étalonner.



Les deux cellules de mesure, de 90 cm chacune, reçoivent par intermittence un mélange contenant de l'ozone puis de l'air zéro.

référence étalon. Le mélange d'air et d'ozone est envoyé en même temps sur l'instrument à étalonner. Cette mesure et son incertitude sont principalement influencées par la section efficace d'absorption (voir formule). Or la valeur utilisée jusqu'à présent pour celle-ci datait de 1961.<sup>2</sup> Elle est, dès 2025, remplacée dans le monde entier par une nouvelle valeur consensuelle nommée CCQM.O3.2019, qui permettra d'obtenir des valeurs de référence – et donc des mesures – plus exactes.

#### Un groupe de travail international

Un groupe de travail international, dont la Suisse fait partie, a été créé pour définir des lignes directrices et coordonner le passage de l'ancienne à la nouvelle valeur de la section efficace d'absorption, le but étant d'assurer une transition fluide et surtout traçable. Il a à présent publié les lignes directrices pour une utilisation uniforme des métadonnées ainsi que divers rapports sur la transition. Ces informations, entre autres, sont disponibles sur le site Internet du

## Caractéristiques d'absorption

	Avant le changement	Facteur de conversion	Après le changement
Période	Jusqu'à déc. 2024		Dès janv. 2025
Nom de la référence	Hearn.1961		CCQM.O3.2019
Section efficace d'absorption par molécule $\sigma$	1,1476·10 <sup>-17</sup> cm <sup>2</sup>	1,01298	1,1329·10 <sup>-17</sup> cm <sup>2</sup> <sup>4</sup>
Incertitude de mesure rel. $\sigma$	1,06%		0,31%
Coefficient d'absorption linéique $\alpha_x$	308,32 cm <sup>-1</sup>	1,01293	304,39 cm <sup>-1</sup>
Incertitude de mesure rel. $\alpha_x$	1,06%		0,31%

La nouvelle valeur de la section efficace d'absorption est un peu plus petite et trois fois plus exacte que l'ancienne. Les valeurs relatives à l'absorption avant et après le changement de référence diffèrent les unes des autres. Les données calculées selon l'ancienne référence peuvent être exprimées selon la nouvelle au moyen du facteur de conversion. Étant donné que le coefficient d'absorption linéique est enregistré dans le photomètre de référence étalon, la ligne en bleu dans le tableau ci-dessus est essentielle.

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).<sup>3</sup>

Les personnes intéressées peuvent s'inscrire pour recevoir les actualités. Le groupe de travail s'est en outre penché sur l'adaptation des normes internationales, régionales et nationales et a défini un calendrier pour la mise en œuvre des modifications. Il prévoit également de publier une étude des conséquences qu'aura à long terme ce changement de valeur dans différents contextes.

### Le processus en Suisse

En Suisse, les deux prestataires en matière d'étalonnage, METAS et le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa), se sont accordés pour ne proposer plus que des étalonnages avec la nouvelle valeur, dès janvier 2025. L'année 2025 servira ainsi de transition et permettra de convertir les données fondées sur les certificats d'étalonnage délivrés en 2024 ou précédemment en fonction de la nouvelle section efficace d'absorption (voir tableau). Quant aux données des instruments de mesure étalonnés en 2025 avec la référence CCQM.O3.2019, elles pourront être corrigées selon la procédure établie à l'aide de la fonction d'étalonnage mentionnée sur le certificat. Le processus devrait pouvoir se terminer à la fin de l'année 2025. Par la suite, seules les métadonnées détaillées permettront d'identifier que les données relatives aux mesures d'ozone s'appuient sur la nouvelle référence.

### Incidences sur les taux d'émission

D'après la loi de Beer-Lambert (voir formule), puisque la valeur d'absorption diminue d'environ 1,3%, les valeurs de mesure augmentent d'autant. Or les valeurs limites d'émission définies dans l'ordonnance sur la protection de l'air<sup>5</sup> n'ont pas été adaptées et restent fondées sur les valeurs «arrondies» (p. ex. 120 µg/m<sup>3</sup> pour la moyenne horaire), ce qui peut entraîner dans de rares cas des dépassements en trop. Des études et publications complémentaires montreront à l'avenir si le changement de section efficace d'absorption a un effet significatif et s'il entraîne des conséquences différentes dans les autres pays. ●

<sup>1</sup> Dans le cas des gaz parfaits, la fraction molaire équivaut à la fraction volumique.

<sup>2</sup> Hearn, Proc. Phys. Soc., 78, 1961, DOI 10.1088/0370-1328/78/5/340; <https://doi.org/10.1088/0370-1328/78/5/340>

<sup>3</sup> <https://www.bipm.org/en/ozone>

<sup>4</sup> J T Hodges et al. 2019. Metrologia 56, 034001, <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab0bdd>

<sup>5</sup> Ordonnance sur la protection de l'air (OPair, RS 814.318.142.1), [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208\\_208\\_208/fr](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/fr)



Objet

# Balance à suspension magnétique et perméateur

Pour garantir la traçabilité des mesures de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, METAS recourt à une balance à suspension magnétique. Celle-ci permet de produire des mélanges de gaz de référence dont les fractions molaires correspondent à ce que l'on trouve dans l'air ambiant. La pièce maîtresse de l'appareil est une chambre où un perméateur est suspendu. Il s'agit d'un petit tuyau doté d'une membrane, qui laisse passer la substance que le tuyau contient, par exemple du dioxyde d'azote. La perte de masse du perméateur déterminée par pesée et le débit gazeux qui traverse la chambre permet de calculer la fraction molaire de dioxyde d'azote dans le gaz de référence. Le point crucial ici est que la perte de masse du perméateur doit être déterminée à des températures élevées, ce qui n'est pas possible avec une balance de précision normale. La solution : le perméateur dans la chambre chauffée et relié à la balance de précision à température ambiante par un couplage à sustentation magnétique.



Recherche et développement

## La métrologie biologique, une alliée de taille pour la médecine personnalisée

Bien que les avancées technologiques telles que le séquençage à haut débit aient révolutionné le diagnostic des tumeurs, permettant déjà d'élaborer des thérapies personnalisées, la comparabilité et la normalisation font toutefois défaut dans ce domaine. Ainsi, grâce au projet GenomeMET, METAS développe une infrastructure métrologique afin d'améliorer le profilage génomique du cancer dans le cadre de la médecine de précision, ce qui devrait permettre une application plus large de ces nouvelles technologies.

Sabrina Flütsch

Selon les dernières statistiques mondiales sur le cancer (rapport GLOBOCAN), en 2022, l'Europe a enregistré 4,5 millions de nouveaux cas de cette maladie et 2 millions de décès qui lui sont liés. Ces chiffres correspondent à 22% des cas de cancer dans le monde, bien que l'Europe représente moins de 10% de cette population<sup>1</sup> (voir ill. 1). Le cancer est ainsi la deuxième cause principale de mortalité en Europe et risque de prendre la tête de ce classement d'ici 2035 sans des mesures de lutte adéquates. Il est non seulement l'un des plus grands défis en matière de santé pour l'Europe, mais également un défi financier, les coûts estimés s'élevant à plus de 100 milliards d'euros par an.<sup>2</sup>

La lutte contre le cancer est une priorité en Europe et passe par un diagnostic précoce et des thérapies personnalisées. Ces progrès reposent sur de nouvelles technologies comme le séquençage à haut débit (séquençage de nouvelle génération; NGS), qui permet de déchiffrer en détails la structure génétique d'une tumeur. L'établissement d'un profil génomique du cancer par NGS se base sur une procédure

extrêmement complexe, réalisée en plusieurs étapes, qui permet la détection simultanée de milliers de variations génétiques (mutations). Les connaissances acquises sur les mutations existantes peuvent ensuite s'appliquer dans le cadre d'une thérapie personnalisée.

Toutefois, les différentes étapes de la procédure NGS sont sujettes à des incertitudes significatives difficilement explicables, ce qui donne lieu à une importante variabilité et à un manque de comparabilité des mesures. Cette situation a pour conséquence de ralentir, voire d'empêcher une vaste implémentation de ces nouvelles technologies dans les établissements hospitaliers. Il faut donc impérativement développer et établir des moyens métrologiques comme des étalons, des matériaux de référence, des procédures de mesure de référence présentant une faible incertitude de mesure pour appuyer l'assurance qualité ainsi que des lignes directrices pour définir l'incertitude de mesure. Un effort européen commun permettra de les élaborer dans le cadre du projet GenomeMET.

## Statistiques mondiales sur le cancer 2022 (20 millions)

- Asie (~ 9,8 millions, 49,2%)
- Europe (~ 4,5 millions, 22,4%)
- Amérique du Nord (~ 2,7 millions, 13,4%)
- Amérique latine et Caraïbes (~ 1,6 million, 7,7%)
- Afrique (~ 1,2 million, 5,2%)
- Océanie (~ 0,3 million, 1,4%)

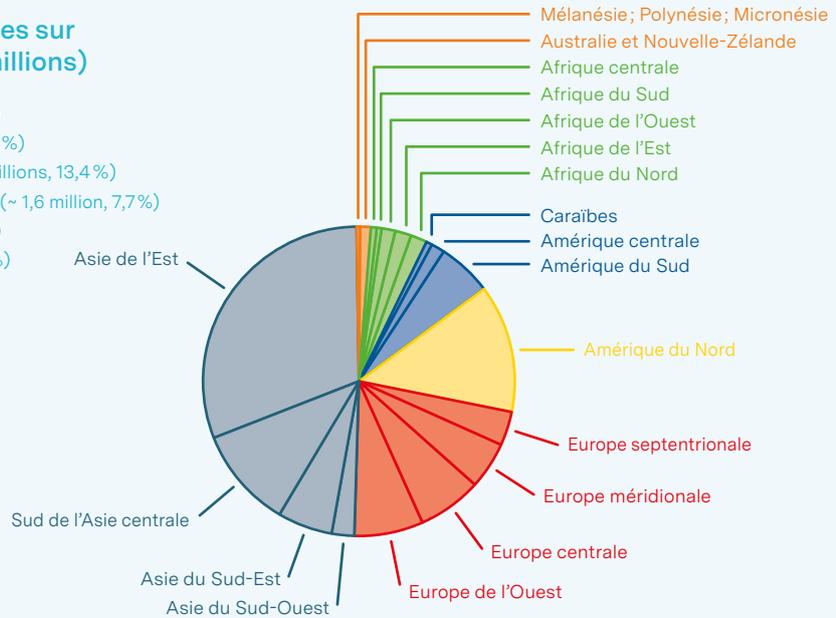


Illustration 1 : Statistiques mondiales sur le cancer en 2022. Les chiffres du graphique proviennent du rapport GLOBOCAN 2022.<sup>1</sup>

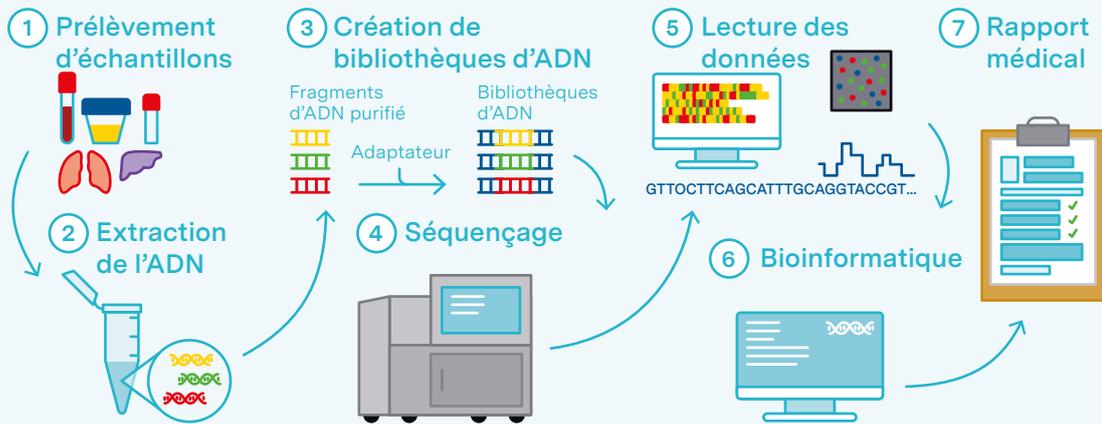


Illustration 2 : Déroulement d'un séquençage à haut débit : dans un premier temps, les scientifiques prélèvent des échantillons de la tumeur et de tissus sains ou de sang, d'où ils extraient de l'ADN pour générer ensuite des bibliothèques d'ADN, permettant ainsi son séquençage. S'ensuivent le séquençage à proprement parler de l'ADN et l'analyse bioinformatique des données de séquençage, qui consistent en des combinaisons des quatre bases d'ADN (A, T, G, C). La médecine de précision peut ensuite utiliser les résultats du séquençage.

### Le cancer, une maladie des gènes

Le cancer est une maladie du patrimoine génétique (génome), qui peut subir des altérations irréversibles au niveau des gènes au cours de l'existence. Ces mutations génétiques, comme elles se nomment, peuvent être héréditaires (mutations germinales), mais elles sont souvent le fruit du hasard et se produisent en raison d'erreurs dans la réplication de l'ADN ou d'altérations dans les mécanismes de réparation de celui-ci. Divers agents mutagènes, tels que le rayonnement ultraviolet, le tabac, l'alcool et les virus, peuvent, pour leur part, induire des mutations dites somatiques (mutations acquises).

Toutefois, les cancers ne sont pas tous les mêmes. Jusqu'à présent, les scientifiques ont identifié quelque 300 cancers différents, qui se distinguent tant par la génétique que par les possibilités de traitement. Ainsi, un cancer de la peau présente jusqu'à 100 000 mutations somatiques, alors qu'un cancer du côlon n'en présente en moyenne que 100 à 200.<sup>3</sup> Le même type de cancer peut présenter des mutations différentes chez le patient X que chez le patient Y, et, pour un même patient ayant développé des métastases, il peut de nouveau y avoir des signatures de mutation différentes.

## Partenaires du projet

### Instituts nationaux de métrologie



### Instituts de génomique



### Fournisseur de technologie



Illustration 3: Consortium du projet GenomeMET

Chaque cancer est donc unique et se caractérise par sa combinaison spécifique de mutations. Or des tests génomiques par NSG contribuent à déchiffrer les modifications individuelles de l'ADN d'une tumeur et à identifier les mutations dites « pilotes », qui sont à l'origine de sa croissance. De plus, les progrès en matière de profilage tumoral moléculaire permettent le développement de thérapies ciblées et personnalisées, qui entraînent moins d'effets secondaires et sont moins coûteuses que les thérapies traditionnelles utilisées à grande échelle.

### Diagnostic moléculaire des tumeurs

Le profilage moléculaire d'une tumeur consiste à prélever un échantillon de la tumeur et un échantillon de référence de tissus sains ou de sang et à en extraire l'ADN (voir ill. 2, étapes 1 et 2) pour ensuite générer des bibliothèques d'ADN à partir de l'ADN génomique, en le fragmentant, puis en lui ajoutant des adaptateurs universels de séquençage et des codes-barres spécifiques (index). Cette procédure rend l'ADN séquençable. Les index sont des séquences uniques permettant l'analyse simultanée de plusieurs échantillons, car ils peuvent, par la suite, servir à des fins bioinformatiques pour retracer l'origine de l'échantillon. Les adaptateurs de séquençage, pour leur part, sont nécessaires pour relier les bibliothèques d'ADN à analyser à la cellule d'écoulement, sur laquelle se produisent une forte amplification de l'ADN de départ et le séquençage propre-

ment dit (voir ill. 2, étapes 3 et 4). Les séquences obtenues, nommées reads, font ensuite l'objet d'une analyse bioinformatique. Au cours de celle-ci, les scientifiques comparent chacune de ces séquences, base d'ADN par base d'ADN, à un génome de référence approprié, afin d'identifier les différences entre l'ADN séquençé et cette référence (ill. 2, étapes 5 et 6). Ensuite, ils évaluent les modifications des séquences en fonction de leur pertinence clinique et en résumant les résultats dans un rapport médical (ill. 2, étape 7).

### Le projet GenomeMET

La complexité analytique du séquençage du génome entraîne des incertitudes considérables, qui ont une influence sur l'exactitude et la fiabilité des profils tumoraux. Or la métrologie, à savoir la science des mesures, peut permettre de surmonter ces défis en jouant un rôle déterminant dans la génération de données fiables, rendant ainsi possible l'accès nécessaire aux tests génétiques destinés au diagnostic et au traitement du cancer. Le laboratoire Analyses et références biologiques de METAS participe au projet européen GenomeMET, qui vise à relever ces défis.

Ce projet, d'une durée de trois ans, a démarré en septembre 2023 dans le cadre du programme européen de recherche et développement en métrologie (EMPIR), sous l'égide de l'Association européenne

des Instituts nationaux de métrologie (EURAMET). Le consortium du projet comprend 17 membres dont sept Instituts nationaux de métrologie (INM) ou instituts désignés, cinq instituts de recherche, trois institutions de référence en matière d'assurance qualité externe, un partenaire industriel et un fabricant de matériaux de référence (ill. 3). L'UE a financé le projet pour un montant total de 175 millions d'euros.

GenomeMET a pour objectif de développer une infrastructure métrologique robuste et fiable, qui contribuera à améliorer la qualité des profils génomiques des tumeurs. Pour ce faire, le consortium met en œuvre divers moyens métrologiques au sein de quatre lots de tâches expérimentaux :

1. méthodes traçables destinées à évaluer les critères de qualité déterminants des différentes étapes du NGS (p. ex. extraction de l'ADN, séquençage, bioinformatique) ;
2. procédures de mesure de référence présentant une faible incertitude de mesure afin de garantir des mesures reproductibles ;
3. étalons et matériaux de référence pour appuyer les processus de mesure ;
4. procédure statistique destinée à relever l'incertitude de mesure.

METAS dirige et met en œuvre le lot de tâches n° 4 et participe en outre aux trois autres.



Aperçu de l'un des laboratoires de biologie de METAS.

Les objectifs principaux de ce lot de tâches comprennent :

- une évaluation détaillée de l'analyse bioinformatique des données de séquençage, afin d'identifier les éventuelles sources d'incertitude pertinentes ;
- l'élaboration d'approches statistiques destinées à relever l'incertitude de mesure des profils génomiques des tumeurs ;
- le développement de nouvelles données de référence pour détecter les mutations somatiques ;
- l'élaboration de lignes directrices pour relever l'incertitude de mesure des données génomiques.

GenomeMET doit constituer le point de départ d'une série de projets similaires visant à améliorer l'utilisation des protocoles NGS dans le domaine du diagnostic clinique, le but étant d'accroître l'exactitude et la fiabilité de ces procédures et d'exploiter ainsi pleinement l'énorme potentiel de cette technologie.

Grâce à l'intégration de la métrologie dans le profilage génomique, ce projet contribuera à un diagnostic plus précoce et plus précis du cancer ainsi qu'à des stratégies de traitement adaptées à chaque individu, marquant ainsi une avancée significative vers un avenir où le traitement du cancer ne se résu-mera pas seulement à une procédure standard, mais sera un voyage personnalisé vers la guérison. ●



Genome  
MET

Vous trouverez de plus amples informations sur le site Internet de GenomeMET.

- 1 F. Bray et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin* 74, 229-263 (2024).
- 2 EU, E. C. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council – Europe's Beating Cancer Plan. COM (2021) 44 final (2021).
- 3 [https://www.wissensschau.de/krebs\\_tumor/tumor\\_genmutation\\_umwelt\\_vererbung.php](https://www.wissensschau.de/krebs_tumor/tumor_genmutation_umwelt_vererbung.php)



À propos de METAS

## Notre service technique: le pilier invisible du travail de précision

Les laboratoires ultramodernes de l'Institut fédéral de métrologie METAS procèdent chaque jour à des mesures parmi les plus exactes du monde. Ils s'appuient pour cela sur l'aide précieuse d'une équipe qui œuvre en coulisses à garantir des conditions de mesure optimales: le service technique du domaine Infrastructure et logistique.

Dmitry Beer

### L'exactitude et ses défis

Les exigences relatives aux bâtiments et aux installations techniques de METAS sont particulièrement complexes. Dans certains laboratoires, la température doit être maintenue constante au centième de kelvin près; dans la plupart, l'humidité de l'air ne doit pas varier de plus de quelques pourcents. Quant aux vibrations, mêmes les plus infimes, imperceptibles pour l'humain, peuvent fausser les mesures des instruments les plus sensibles.

Par exemple, le laboratoire Longueur, nano- et micro-technologie réalise des étalons de longueur qui servent de référence à toute l'industrie suisse. Une variation de la température ambiante de seulement 0,1K pourrait engendrer des erreurs de mesure intolérables pour une entreprise de technologie qui fabrique des pièces de précision. Le service technique assure dans ce cas une température constante à  $\pm 0,01K$  près, nuit et jour, été comme hiver.



L'équipe du service technique compte quatre membres: Heinz Strässler, Rolf Zwahlen, Roland Rüfenacht et Dmitry Beer.

### L'équipe du service technique

L'équipe du service technique se démarque d'une équipe de conciergerie par ses diverses spécialisations et son interdisciplinarité. Ensemble, ses membres couvrent un large spectre de compétences:

- les électrotechniciens spécialisés en technique du bâtiment s'occupent des installations électriques et garantissent une alimentation fiable des laboratoires en électricité;
- les spécialistes des installations sanitaires, du chauffage et de la climatisation se chargent de maintenir des conditions ambiantes précises, indispensables aux mesures;
- les spécialistes des systèmes de sécurité et de contrôle des accès assurent la protection des endroits à risque.

Cette pluridisciplinarité permet à METAS d'entretenir ses systèmes techniques à l'interne, souvent trop complexes et exigeants pour un prestataire externe.

### Garants des conditions de mesure optimales

La journée commence par le contrôle du chauffage, de l'aération et de la climatisation. La filtration de l'air dans la salle blanche d'un des laboratoires fait l'objet d'une inspection particulièrement méticuleuse, puisque les particules dans l'air pourraient y fausser les mesures. Pendant ce temps, un autre membre de l'équipe vérifie le système de gestion du bâtiment, qui sert au pilotage central de toute la technique du bâtiment.

Dans la matinée, un système signale une légère variation de température dans un des laboratoires. Roland Rüfenacht, qui après trente ans d'expérience à METAS en connaît tous les recoins, s'empresse de se rendre sur place et d'identifier la cause de l'alerte: en l'occurrence, un capteur légèrement décalé. Grâce à sa réactivité, il peut régler le problème avant que celui-ci n'affecte les mesures en cours.

Peu après, Roland Rüfenacht procède à la maintenance mensuelle du groupe électrogène de secours. Ce générateur diesel permet d'assurer une alimentation continue des systèmes les plus importants en cas de coupure d'électricité, un risque que le service technique s'applique à réduire. En effet, il contrôle régulièrement la constance de l'alimentation en électricité pour éviter qu'une interruption, même de quelques millisecondes, n'affecte les instruments de mesure les plus sensibles.

### De l'eau pure, pour les laboratoires comme pour l'environnement

Au programme de l'après-midi: vérifier les installations de traitement des eaux. Cette tâche est cruciale pour garantir une eau toujours pure, nécessaire à bon nombre d'expériences.

À l'autre extrémité de la chaîne, Rolf Zwahlen s'occupe des systèmes de traitement des eaux usées. Celles qui proviennent des laboratoires de chimie doivent souvent être neutralisées avant d'être rejetées dans les canalisations publiques. La surveillance et l'entretien de l'installation de neutralisation sont essentiels, non seulement pour METAS, mais aussi pour la protection de l'environnement.

### Un fil conducteur: la sécurité

La sécurité est au cœur de toutes les activités du service technique. Durant la journée, celui-ci contrôle également les détecteurs de gaz dans les laboratoires, afin de prévenir tout accident lors du manquement de gaz potentiellement dangereux.

De son côté, Heinz Strässler forme les nouvelles collaboratrices et les nouveaux collaborateurs à l'utilisation du système de contrôle des accès. Celui-ci garantit que seules les personnes autorisées aient accès à certaines zones. Il est complexe et doit régulièrement être mis à jour pour rester conforme aux nouvelles normes de sécurité.

### Production d'hélium liquide

Arrive l'apogée de la journée: produire de l'hélium liquide avec le liquéfacteur d'hélium de METAS. Ce liquéfacteur sert aux expériences quantiques en électricité. Il liquéfie l'hélium à  $-269\text{ °C}$ , c'est-à-dire quelques degrés seulement au-dessus du zéro absolu. Son entretien et son utilisation ainsi que le traitement de l'hélium recyclé requièrent une grande précision ainsi que les compétences de Roland Rüfenacht et de Rolf Zwahlen. À l'instar d'autres membres de l'équipe, ils ont acquis au fil des années les connaissances spécialisées nécessaires à l'emploi de l'appareil.

Le liquéfacteur a récemment été amélioré pour des raisons techniques, mais aussi environnementales. Sans les nombreuses indications du service technique, un prestataire externe aurait mis plusieurs semaines à se familiariser avec les diverses spécificités.

### Innovation et efficacité énergétique

Dans le contexte du changement climatique et de la hausse des prix de l'énergie, l'efficacité énergétique joue un rôle crucial. Ainsi, le service technique redouble d'innovation pour optimiser la consommation énergétique de l'Institut sans compromettre l'exactitude, en équipant notamment les bâtiments de systèmes intelligents (*smart building*).



L'hélium liquide est précautionneusement transporté dans le laboratoire Courant continu et basse fréquence.

Par exemple, l'installation d'un système d'ombrage intelligent, qui s'adapte automatiquement à la lumière du jour, a permis de réduire les coûts énergétiques de 15%. Il sert aussi à améliorer la luminosité dans les laboratoires pour garantir la qualité du travail et renforcer la sécurité.

### Relever les défis 24/7

L'un des plus grands défis que relèvent Roland Rüfenacht, Heinz Strässler, Rolf Zwahlen et Dmitry Beer, le chef du service technique, c'est de pouvoir intervenir à tout moment. L'équipe assure un service de piquet pour l'infrastructure technique, afin que METAS ait à disposition en tout temps, même en dehors des heures de travail, un expert qui puisse réagir en cas d'imprévu.

En effet, beaucoup de mesures et d'expériences s'effectuent sur un long laps de temps et seraient compromises si une panne venait à se produire. Le laboratoire Photonique, temps et fréquence possède des horloges atomiques si exactes, qu'elles n'auront qu'une seule seconde d'écart dans un million d'années. La moindre panne de climatisation ou variation dans l'alimentation électrique pourrait compromettre l'exactitude de ces horloges et anéantir des semaines voire des mois de travail.

En plus de leurs compétences spécialisées, les collaborateurs du service technique doivent pouvoir travailler calmement et efficacement, malgré la pression. Ils suivent des formations et s'exercent régulièrement pour être prêts à toute éventualité.



Roland Rüfenacht remplit un réservoir avec 450 litres d'hélium liquide.



Le service technique contrôle chaque mois le bon fonctionnement du groupe électrogène de secours.

### Aménager l'avenir

Cependant, l'expertise du service technique ne s'arrête pas à l'inspection ni à la maintenance des installations. Les spécialistes de l'équipe apportent également leur savoir-faire lors des transformations et des nouvelles constructions, assurant ainsi que les laboratoires restent à la pointe de la technologie et de l'exactitude dans les années à venir.

Actuellement, METAS planifie un nouveau laboratoire de métrologie quantique. Dans ce cadre, le service technique travaille en étroite collaboration avec les scientifiques pour créer un environnement adapté aux exigences considérables de cette technologie d'avenir. L'absence de vibrations et la stabilité de la température, entre autres, doivent être étudiées à un niveau de détail considéré impossible il y a encore quelques années.

Pour planifier et développer à long terme l'infrastructure de l'Institut, son propriétaire, l'Office fédéral des constructions et de la logistique (OFCL), communique avec le service technique. Celui-ci tient pour le compte de l'OFCL une comptabilité énergétique détaillée, qui constitue un outil important pour l'instauration d'une consommation d'énergie durable à METAS. Cette comptabilité aide à identifier les économies potentielles et à quantifier l'efficacité des mesures appliquées.

Le service technique et le chef du domaine Infrastructure et logistique apportent en outre leur soutien à l'OFCL, aux architectes et aux différents ingénieurs pour la construction d'une annexe qui réponde aux besoins des laboratoires. Cette annexe ainsi que d'autres projets plus ou moins directement

liés devront voir le jour dans quelques années pour que METAS mette en œuvre la stratégie de la Confédération en matière de laboratoires et puisse satisfaire aux exigences induites par sa croissance des dernières décennies.

### Un service essentiel à METAS

Les exigences envers le service technique continueront de croître à l'avenir: la numérisation galopante, l'aspiration à plus d'exactitude dans les mesures, l'importance grandissante de l'efficacité énergétique et du développement durable, sans oublier l'extension de METAS confronteront le service technique à de nouveaux défis.

### Le service technique en chiffres

Quelques chiffres pour illustrer l'importance et la portée du travail accompli par le service technique:

- Superficie du campus: 35485 m<sup>2</sup>
- Surface bâtie: 15400 m<sup>2</sup>, dont 4900 m<sup>2</sup> de laboratoires
- 1000 mandats de réparation et de maintenance par an
- 15% de consommation d'énergie en moins au cours des 5 dernières années
- 50 interventions en dehors des heures de travail par an

Par leur travail en arrière-plan, les discrets spécialistes du service technique comme Roland Rüfenacht, Rolf Zwahlen ou Heinz Strässler permettent aux scientifiques et aux ingénieurs de se concentrer sur leurs activités métrologiques et d'effectuer des mesures qui rivalisent d'exactitude au niveau mondial, sans douter de la fiabilité de l'infrastructure ni des conditions ambiantes que celle-ci induit. Dans une société qui a pour maîtres-mots exactitude et fiabilité, le service technique de METAS s'assure que l'Institut réponde aux attentes et conserve sa place parmi les meilleurs instituts métrologiques du monde. ●

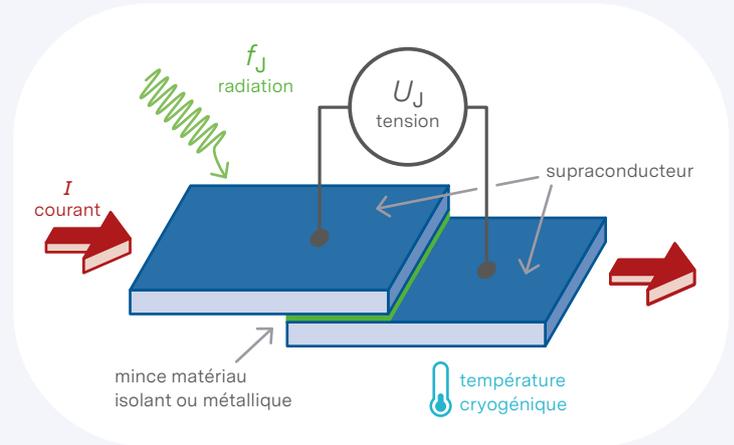
## Principe

L'effet Josephson est un phénomène physique qui se produit à basse température lorsque deux supraconducteurs sont placés à proximité, avec une barrière ou une restriction entre eux, formant ainsi une jonction Josephson.

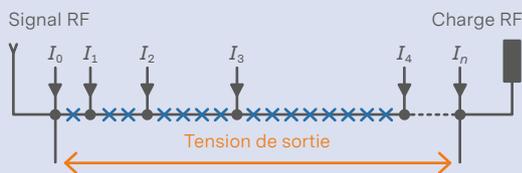
Dans l'effet Josephson AC, une radiation micro-onde peut induire une tension DC quantifiée aux bornes d'une jonction Josephson parcourue par un courant. Ainsi, une jonction Josephson se comporte comme un parfait convertisseur fréquence-tension, donnant lieu ainsi à un étalon de tension Josephson. Cette tension ne dépend que de la fréquence de la radiation et de deux constantes de la nature: la constante de Planck et la charge élémentaire.

# Électricité

## Réalisation du volt



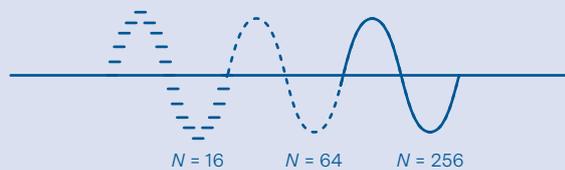
### Réseaux Josephson : étalons de tension et réseaux programmables



Vue schématique d'un réseau Josephson divisé en une séquence binaire avec des sources de courant indépendantes ( $I_x$ )

Une jonction Josephson soumise à une radiation micro-onde de fréquence 70 GHz produit un premier palier de tension ( $n = 1$ ) de 145  $\mu\text{V}$ . Il faut donc disposer plusieurs dizaines de milliers de jonctions en série pour obtenir des réseaux Josephson permettant d'effectuer des étalonnages entre 1 V et 10 V.

On parle d'étalon programmable de tension Josephson (PJVS) lorsqu'on groupe les jonctions selon les puissances de 2 en une séquence binaire avec chaque segment contrôlé individuellement.



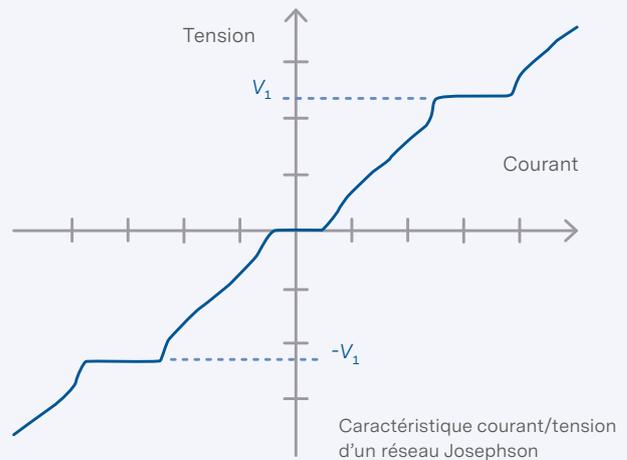
Formes d'ondes sinusoïdales générées par des séquences binaires de réseaux avec  $N$  jonctions

On peut aussi réaliser des tensions variables au moyen de réseaux pilotés par pulse de radiation à fréquence de répétition variable, aussi dénommés synthétiseurs Josephson de forme d'onde arbitraire (JAWS).

### Tension Josephson

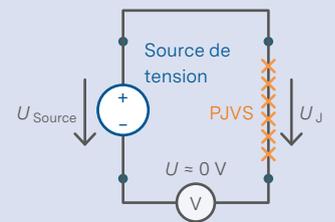
$$U_J = \frac{h}{2e} n \times f_J = \frac{n}{K_J} \times f_J$$

Constante de Planck  $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$   
 Charge élémentaire  $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$   
 Indice du palier (nombre entier)  
 Fréquence d'une radiation micro-onde  
 $K_J = 483\,597,848\,416\,984 \text{ GHz/V}$



### Schéma d'étalonnage

L'étalonnage d'une source de tension est effectué par comparaison avec un étalon de même niveau de tension, p. ex. un réseau Josephson. La différence de tension mesurée est aussi proche de 0 V que possible.



1911

Découverte du phénomène de supraconductivité par Heike K. Onnes.



1962

Découverte théorique de l'effet Josephson par Brian D. Josephson.



1973

Prix Nobel de physique pour Brian D. Josephson.



2019

Fixation de la valeur de la constante de Planck  $h$  et de la charge élémentaire  $e$ . Redéfinition de l'ampère.

## Principe

L'effet Hall quantique se produit dans certains types de couches minces dont la dynamique des électrons correspond à un gaz bidimensionnel, à savoir que le gaz d'électrons est libre de se mouvoir dans deux dimensions, mais est fortement confiné dans la troisième. On trouve de telles configurations dans les semiconducteurs, en particulier les transistors à effet de champ à grille isolée (MOSFET), où la résistance de Hall, transverse à la direction du courant, est quantifiée et présente des plateaux.

L'effet Hall quantique se produit à très basse température et fort champ magnétique. Il ne dépend que de deux constantes de la nature: la constante de Planck et la charge élémentaire.

## Résistance de Hall

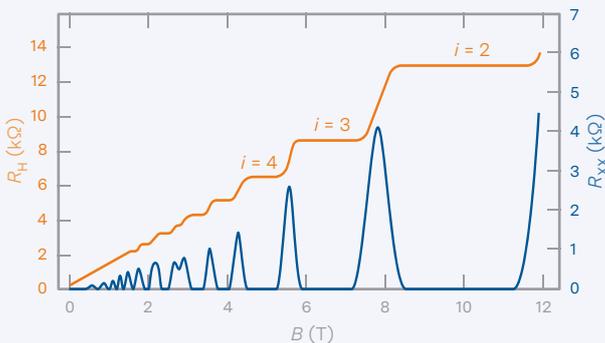
Constante de Planck  
 $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$  J s

$R_K = 25\ 812,870\ 459$  ohm

$$R_H = \frac{1}{i} \times \frac{h}{e^2} = \frac{R_K}{i} = \frac{V_H}{I}$$

Indice du plateau  
 (nombre entier)

Charge élémentaire  
 $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  C

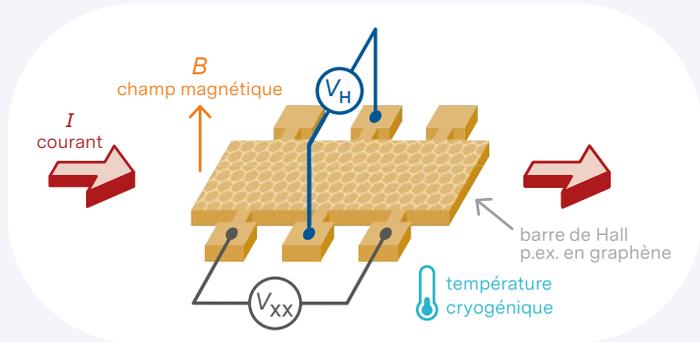


## Effet Hall quantique dans le graphène

Le graphène est un matériau bidimensionnel cristallin constitué de carbone. Il constitue l'élément structural de base d'arrangements de carbone, comme le graphite, les nanotubes de carbone, les fullerènes.

Le gaz d'électrons du graphène est bidimensionnel et il s'y développe un effet Hall quantique, à plus haute température, plus bas champ magnétique et plus hauts courants que dans les matériaux semiconducteurs.

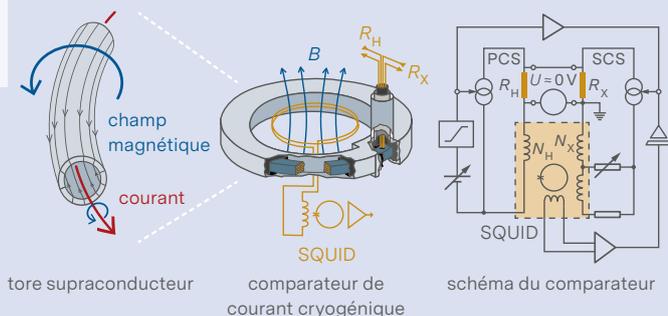
# Réalisation de l'ohm



## Comparateur de courant cryogénique

Le comparateur de courant cryogénique (CCC) permet d'étalonner une résistance contre un standard QHR (Quantum Hall Resistance). À l'équilibre, les deux courants qui traversent les deux résistances comparées sont exactement dans le rapport inverse de ces résistances:  $I_H \times R_H = I_X \times R_X$ . Les nombres de spires de deux enroulements en série sont choisis de telle sorte que la condition supplémentaire  $I_H \times N_H = I_X \times N_X$  soit réalisée.

Pour ce faire, les enroulements sont logés dans un tore supraconducteur sur la périphérie duquel circule un courant opposé au courant résiduel net circulant dans les enroulements (effet Meissner). Le champ induit par ce courant peut être détecté par un capteur très sensible (SQUID) et rendu nul par une source de courant asservie au signal du SQUID (SCS). La condition d'équilibre peut être réalisée avec une exactitude de l'ordre de  $10^{-9}$ .



## Historique

Les unités électriques sont réalisées au moyen de l'ohm et du volt. La loi d'Ohm relie directement les grandeurs électriques tension (unité Volt), résistance (unité Ohm) et intensité du courant électrique (unité Ampère). Depuis les années 1990, les unités de résistance et de tension sont réalisées à l'aide des effets de physique quantique Hall et Josephson.



1980

Découverte de l'effet Hall quantique par Klaus von Klitzing.



1985

Prix Nobel de physique pour Klaus von Klitzing.



2005

Découverte de l'effet Hall quantique dans le graphène par Andre Geim et Konstantin Novoselov.



2010

Prix Nobel de physique pour Andre Geim et Konstantin Novoselov.



2019

Fixation de la valeur de la constante de Planck  $h$  et de la charge élémentaire  $e$ . Redéfinition de l'ampère.

# La candela ou l'humanité du Système international d'unités



Toutes les unités ont été créées par l'humain. La nature n'a besoin ni de la seconde, ni du mètre, ni du kilogramme. En fin de compte, la définition des unités est arbitraire. Alors que la plupart des Européens – et cette fois, nous pouvons même inclure les Suisses – mesurent une distance en mètres, l'Empire britannique (le choix de l'appellation est volontaire) et ses anciennes colonies nord-américaines l'expriment en *inches*, en *yards* ou en *feet*. Même la distance entre la Terre et Mars est parfois calculée en pieds, ce qui peut manifestement partir en vrille ou, en l'occurrence, en fumée.<sup>1</sup> Le mètre ou à la rigueur le nombre de battements d'ailes de l'aigle impérial auraient-ils constitué ici un choix plus judicieux? Quoi qu'il en soit, parcourir une distance donne soif; et qui veut étancher sa soif de l'autre côté de la Manche ne boit pas non plus une chope d'un litre comme à l'Oktoberfest en Bavière, mais une pinte. Cela signifierait-il paradoxalement que les Bavarois se pintent plus que les Britanniques? Je ne m'attarderai pas sur la question. Cependant, nous ne nous déferons pas de l'impression que les Britanniques et les Américains seraient capables d'oublier de temps en temps l'existence du Système international d'unités voire, qui sait, de le reléguer au rang de *fake news*.

Il faut toutefois le leur laisser, ces anciennes unités impériales conservent quelque chose de profondément humain. Elles sont pour ainsi dire les vestiges d'une vision du monde anthropocentrée. Le pied n'est-il pas par excellence une dimension humaine? Une pinte – ou peut-être parfois deux – ne constitue-t-elle pas la quantité parfaite de bière pour désaltérer une personne lambda? Quoiqu'un automobiliste suisse dépasserait fort probablement la limite légale de 0,5 pour mille dans le sang s'il venait à souffler dans le ballon après deux pintes. Il devrait alors prendre son mal en patience, quitter la pinte et en revenir au pied, pardon, méditer la contrainte et s'en revenir à pied, mais comme on le dit si bien, tout vient à point à qui sait attendre...

Tout scientifique cartésien saluera le fait que le Système international d'unités ait renoncé aux définitions intersubjectives et qu'il se fonde depuis 2019<sup>2</sup> sur des constantes naturelles, plus rigoureuses et plus objectives.

Fini de cette sentimentalité sur nos pieds malodorants! Adieu, lords britanniques vivant en grande pompe! Que les pharaons et leur royale coudée reposent en paix! Les unités revêtent aussi une dimension politique. Depuis les Lumières et la Révolution française, le mètre s'est émancipé de l'hégémonie de la monarchie absolue et s'est démocratisé en tant qu'unité de mesure de la longueur, faisant de la métrologie moderne l'enfant de l'ordre mondial postrévolutionnaire.

Notre société technocratique relègue de plus en plus la dimension humaine au second plan. L'ultra-petit et le virtuel régissent nos vies à travers nos smartphones; la rapidité de notre temps ne se mesure plus en heures ou en minutes, mais depuis 2022<sup>3</sup> en rontosecondes<sup>4</sup> et les innombrables données que génère l'intelligence artificielle en quettaoctets<sup>4</sup>.

Cependant, nous nous devons, en tant qu'héritiers critiques des Lumières, d'étudier le Système international d'unités plus en détail. Les composantes humaines ont-elles complètement disparu de la logique aride qui sous-tend le système ou subsiste-t-il un dernier bastion d'humanisme? Je ne sais pas laquelle de ces situations serait la plus souhaitable d'un point de vue philosophique. Tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien...

La seconde est fondée sur une transition électronique, le mètre sur la vitesse de la lumière. Ces dimensions n'ont plus rien d'humain. Quant au kilogramme, il est relié depuis 2018 à la constante de Planck  $h$ . Aha! Monsieur Planck a donc mis du sien dans la définition du kilogramme. Comment, littéralement? A-t-il posé ses quelques kilos en trop sur la balance? Loin de là! Monsieur Planck n'a donné à cette constante naturelle, qui décrit le rapport de proportionnalité entre la fréquence d'une oscillation et l'énergie quantique correspondante, que son nom. C'est tout de même lui qui a postulé l'existence des quanta. Pour l'ampère (nommé d'après Monsieur Ampère) et la mole, nous comptons tout simplement le nombre d'électrons ou de particules. Une méthode bien objective, en somme, et toujours aucune trace de propriété humaine. Nous pouvons déjà éliminer une, deux, trois, quatre, cinq unités...

Il nous reste donc les unités kelvin et candela. Pour le kelvin, l'unité de température, deux éminents physiciens qui ont travaillé sur la matière ont été appelés à l'aide: Lord Kelvin a donné son nom à l'unité tandis que Ludwig Boltzmann a nommé la constante naturelle correspondante. Or celle-ci n'a rien à voir avec les poussées de fièvre du pauvre Ludwig dont la santé était en effet fragile; elle décrit le rapport universel entre la température et l'énergie thermique. Même à haute température, nous ne trouverons ici aucune note humaine et chaleureuse. Le Système international d'unités, froid et cartésien, se situe encore et toujours au zéro absolu.

Qu'en est-il de la candela? Le nom intrigue, son étymologie renvoie à la bougie, rappelle Noël, la religion ou un éventuel futur black-out... Quoi qu'il en soit, en voici la définition:

«La candela, symbole  $cd$ , est l'unité du SI d'intensité lumineuse dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , égale à 683 [...]»<sup>5</sup>

À part une formulation compliquée, nous ne trouvons là rien d'humain non plus. La candela est définie à partir de la constante fixée  $K_{cd}$ ; mais quelle constante physique fondamentale se cache derrière le terme quelque peu obscur d'«efficacité lumineuse d'un rayonnement»? Tentons à la lueur d'une bougie d'y voir plus clair.

En fait, pour déterminer l'intensité de la lumière (ou d'ondes électromagnétiques en général), nous pourrions tout simplement utiliser en tant qu'unité la puissance par surface unitaire et n'aurions pas besoin d'unité de base. Or la candela représente plus que cela: il s'agit de l'intensité lumineuse d'une fréquence donnée, dans une certaine direction. Pourquoi? L'intensité lumineuse est rapportée par  $K_{cd}$  à un observateur humain et exprime l'efficacité lumineuse d'un rayonnement d'une certaine fréquence sur l'œil humain. De plus, par soucis de compatibilité historique, la candela fait référence à la lumière d'une bougie, utilisée autrefois pour mesurer l'intensité lumineuse. Les latinistes comprennent à présent le nom. Or cela signifie surtout que la candela est définie par le biais de  $K_{cd}$  en fonction d'un œil humain typique. Le voilà le dernier bastion d'humanité dans le Système international d'unités! La question de définir ce qu'est un œil humain typique demeure cependant en suspens.



Ouf, grâce à la candela, les métrologues, aussi carrés et pointilleux soient-ils, ont laissé entrer un filet d'humanité dans leur système international. Mon côté humaniste s'en réjouit, tandis que le scientifique cartésien en moi s'en voit navré et quelque peu déboussolé. Enfin, deux âmes, hélas! se partagent mon sein<sup>6</sup>, comme le disait Goethe dans Faust.

Pourquoi, cependant, cet honneur revient-il à l'œil et pas à l'oreille, par exemple? En tant qu'amateur de musique, je ne vois pas pourquoi, puisque le volume perçu dépend aussi de la fréquence du son, de sa direction et donc de l'oreille. Est-ce parce que nous formons une société centrée sur la vision? Peut-être les gardiens des unités du système international à Paris n'ont-ils pas voulu s'opposer à la volonté divine, car il est écrit dans la Genèse:

*«Au commencement, Dieu créa les cieux et la terre. La terre était informe et vide: il y avait des ténèbres à la surface de l'abîme, et l'esprit de Dieu se mouvait au-dessus des eaux. Dieu dit: que la lumière soit! Et la lumière fut. Dieu vit que la lumière était bonne.»<sup>7</sup>*

À l'extérieur du cercle, les sept unités de base et, à l'intérieur, les constantes naturelles à l'origine de leurs définitions respectives.

Bref, malgré toutes les lubies cartésiennes, l'humain a réussi, aujourd'hui encore, à s'infiltrer dans la définition objective du Système international d'unités.

Peut-être est-ce là la raison pour laquelle nous allumons volontiers une bougie à l'approche de Noël, alors que les nuits s'allongent; sa douce lueur nous apporte chaleur et réconfort. Alors, en ce qui concerne le fait de définir l'unité de l'intensité lumineuse à partir d'une «constante naturelle» humaine, je dirais que le jeu en vaut la chandelle.

Jean-Sébastien Bach l'avait prédit il y a déjà bien longtemps dans une magnifique aria de sa Passion selon Saint Jean. Il a composé une musique divinement belle pour le texte suivant:

*«Je te suis pareillement d'un pas joyeux, et ne t'abandonne pas, ma Vie, ma Lumière.»*

Je vous conseille, chères lectrices, chers lecteurs, d'écouter ce chef d'œuvre de Bach<sup>8</sup>, car le voir seulement ne fait pas tout... ●

### Étymologie du mot «candela»

Emprunté au latin, le mot «candela» signifie en français «chandelle» ou «cierge». Le nom de l'unité fait référence aux premières techniques de mesure de la lumière: pour déterminer l'intensité lumineuse d'une source, on comparait celle-ci avec une bougie.

Une intensité lumineuse de 1 candela correspond à une intensité de rayonnement de 1/683 watt par stéradian à une fréquence de  $540 \times 10^{12}$  Hz.



1 <https://science.nasa.gov/mission/mars-climate-orbiter/>  
 2 <https://www.bipm.org/en/measurement-units>  
 3 <https://www.bipm.org/en/cgpm-2022/resolution-3>  
 4 Du très petit au très grand: les préfixes «ronto» et «quetta» signifient respectivement  $10^{-27}$  et  $10^{30}$ .  
 5 <https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-FR.pdf/bb7be5ff-4b2f-3834-f46a-5b4af3669870?version=4.0&t=1725283833644&download=true>  
 6 Johann Wolfgang von Goethe, Faust, Première partie de la tragédie  
 7 Genèse, 1.1-1.5  
 8 <https://youtu.be/nhqIOI-WSxU?si=TeX8FAYyu2WVZ8tn>

## En bref

### La contribution de METAS aux observations climatiques et océaniques

Au cours des cinq dernières années, **Céline Pascale**, cheffe de domaine à METAS, a participé activement, en tant que vice-présidente, à la mise en place du Réseau européen de métrologie pour les observations climatiques et océaniques (REM for Climate and Ocean Observations). Le REM encourage les partenariats entre les spécialistes de la mesure et les communautés qui effectuent des observations du climat et des océans. Ainsi, la métrologie joue un rôle clé dans la surveillance précise et fiable des variables essentielles du climat et de l'océan. METAS – notamment son laboratoire de référence pour les gaz et les particules – bénéficie directement de cette collaboration.



### Cédric Blaser a reçu le IEC 1906 Award

La Commission électrotechnique internationale (CEI) a décerné le IEC 1906 Award à **Cédric Blaser**, le chef du laboratoire Énergie et puissance électriques de METAS, pour son engagement pour la normalisation des compteurs électriques. Ces dernières années, Cédric Blaser a participé activement à la rédaction et à la révision de plus de dix normes au niveau européen et international. Il est membre du comité technique Mesure et contrôle de l'énergie électrique (IEC TC 13).

Sur ces 228 prix décernés en 2024, la CEI en a attribué cinq à des experts suisses.

### Nouveau chef pour le domaine Métrologie en physique

**Ulrich Schlapbach** a repris la direction du domaine Métrologie en physique II au début de janvier 2025. Il a poursuivi des études d'électronique à l'École polytechnique fédérale de Zurich et dispose d'une longue carrière chez ABB, où il a occupé différentes positions dans plusieurs domaines. Il y a notamment dirigé divers gros projets et plusieurs groupes de développement et d'innovation.

Saviez-vous que  
METAS en tant  
qu'institut fédéral de  
métrologie dispose  
de plus de  
**6400**  
instruments  
de mesure ?

Ces instruments ainsi que les connaissances approfondies et expertes de nos collaboratrices et collaborateurs permettent des mesures exactes et traçables pour de nombreuses applications. Grâce à l'entretien, au renouvellement, au développement des instruments de mesure ainsi qu'à la mise au point de nouvelles méthodes, METAS reste à la pointe de la métrologie internationale et garantit des prestations de première qualité.

## Recommandation de film The Last Artifact – ReDefining the Universe



Le film est disponible en anglais sur PBS.org.



En 2018, le kilogramme a été redéfini: le cylindre métallique, qui était l'étalon international de poids depuis la Révolution française, a été déclassé. Cet événement a été et reste une étape importante dans l'histoire de la métrologie. Le film «The Last Artifact – ReDefining the Universe» documente l'importance historique du cylindre jusqu'à cette date et son influence sur la vie quotidienne.

## Le prix Max Lüthi revient à une étudiante de METAS



Le prix Max Lüthi récompense des jeunes chercheuses et chercheurs des hautes écoles spécialisées suisses pour leur travail de bachelor exceptionnel en chimie. Cette année, il a été décerné à **Céline Spack**, qui a rédigé son mémoire à METAS, en collaboration avec la Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR). Céline Spack a travaillé sur une méthode d'identification de la tourbe au moyen d'alcanes à longue chaîne. Elle a testé dans les laboratoires de METAS si ces biomarqueurs pouvaient indiquer la présence de tourbe dans le terrain.



## Le prix METAS de physique revient à Simon Scheidegger

**Simon Scheidegger** a reçu le prix METAS de physique 2024, à l'occasion de la réunion annuelle de la Société suisse de physique, en septembre, à l'École polytechnique fédérale de Zurich. Simon Scheidegger a utilisé le réseau de distribution de fréquence appartenant à METAS et traçable au Système international d'unités pour déterminer la fréquence des transitions électroniques dans l'atome d'hydrogène vers les niveaux de nombre quantique  $n$  élevé. Les résultats qu'il a obtenus dans le cadre de sa thèse récompensée lui ont permis de définir une valeur exacte pour la constante de Rydberg et de déterminer la taille du proton.

## Andrea Rösch remporte le prix METAS pour la chimie et la biologie

Le prix METAS récompense des jeunes chercheuses et chercheurs pour leur contribution majeure dans le domaine de la métrologie chimique ou biologique. L'Institut l'a décerné cette année à **Andrea Rösch** pour son travail remarquable chez Agroscope. Andrea Rösch a développé une méthode détaillée pour mesurer le taux de près de 150 pesticides différents dans le sol au moyen de 95 étalons internes marqués par des isotopes. Ceux-ci compensent l'effet de matrice des échantillons de sols. Cette nouvelle méthode de mesure permet de surveiller rigoureusement les résidus de pesticides dans les sols agricoles.



A. Rösch et al. A multi-residue method for trace analysis of pesticides in soils with special emphasis on rigorous quality control, Analytical and Bioanalytical Chemistry, Volume 415, p. 6009-6025, 2023, <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04872-8>





International

# La confédération internationale de métrologie IMEKO

Fin août 2024, plusieurs collaborateurs de METAS ont activement participé au congrès mondial de la confédération internationale de métrologie IMEKO à Hambourg. IMEKO ? Qui connaît cette organisation et surtout, quel est son but ? Des interrogations qui justifient une présentation détaillée.

Hugo Lehmann

Que seraient les avancées technologiques et la mondialisation sans l'harmonisation des unités de mesure et les méthodes de mesure y afférentes? En effet, celles-ci sont le moteur des normes et des standards internationaux, comme celui de la compatibilité mondiale de la technologie. C'est ici qu'intervient l'IMEKO, dont le but est d'encourager l'échange international des connaissances dans le domaine de la métrologie. Aujourd'hui, elle compte des membres dans plus de 40 pays, notamment en Suisse, dont l'organisation membre est l'Association Suisse pour l'Automatique (ASSPA), tandis que METAS, en tant qu'institut national de métrologie, assume la responsabilité de délégué national au nom de l'ASSPA.<sup>1</sup>

Le siège de l'IMEKO se trouve en Hongrie depuis sa fondation en tant qu'association en 1958, ce qui peut sembler étonnant du fait que l'Union soviétique avait réprimé la révolution hongroise deux ans auparavant. La création de cette organisation internationale s'engageant pour l'échange entre l'Est et l'Ouest dans un tel contexte historique témoigne donc du courage, de la conviction et de la clairvoyance de ses fondateurs.<sup>2</sup>

### Comités techniques

Vingt-cinq comités techniques (Technical Committees; TC) se chargent du travail technico-scientifique de l'IMEKO.<sup>3</sup> Pour ce faire, ils bénéficient d'une grande autonomie et organisent des conférences thématiques, des symposiums et des ateliers afin de promouvoir les échanges scientifiques. Au fil du temps, de nouveaux thèmes sont apparus. Ainsi, le TC25 «Quantum Measurement and Quantum Information» n'a vu le jour qu'en 2021. Remarquons que les représentants suisses font partie de plus de la moitié des comités. METAS se distingue en particulier par sa participation active au TC9 «Flow Measurement».

### Congrès mondial 2024 à Hambourg

Le congrès mondial de l'IMEKO, auquel tous les comités techniques participent, a lieu tous les trois ans. Celui de l'année passée<sup>4</sup> s'étant donc déroulé du 25 au 29 août à Hambourg, son président, le professeur Frank Härtig (également vice-président de l'institut national de métrologie allemand, le Physikalisch-Technische Bundesanstalt; PTB) a souhaité la bienvenue à la communauté IMEKO en Allemagne par un «Moin», le «bonjour» local. Plus de 1100 participants se sont réunis dans le centre des congrès rénové de



Les participants à la conférence IMEKO 2024 dans la salle plénière du centre de congrès de Hambourg.

Hambourg, un endroit propice à une semaine de conférences, de présentations de posters et surtout d'échanges. Ils ont également eu la possibilité de visiter diverses entreprises de la région ainsi que le PTB à Braunschweig. Ceux qui n'ont pas pu assister à ce congrès très enrichissant peuvent dès à présent noter les dates du prochain congrès mondial de l'IMEKO 2027<sup>5</sup>, qui se déroulera cette fois-ci à Rimini.

### Organes de publication de l'IMEKO

Outre l'organisation de congrès et de rencontres techniques, l'IMEKO dispose de ses propres organes de publication. D'une part, la revue «Acta IMEKO»,<sup>6</sup> en libre accès en ligne, permet de consulter directement les publications des comités techniques de l'IMEKO. D'autre part, la revue «Measurement»<sup>7</sup> est une référence pour les publications dans le domaine de la métrologie.

### En conclusion

Comment ne pas mentionner Karl Ruhm dans un article suisse sur l'IMEKO? En effet, en plus de son activité à l'EPFZ, il a représenté notre pays en qualité de délégué auprès de cette organisation durant 25 ans.<sup>8</sup> Nous le remercions sincèrement pour son engagement sans faille envers l'IMEKO, mais aussi pour son travail dans le domaine de la métrologie en général. L'échange au-delà des frontières physiques, mais surtout de toutes les frontières politiques, était déjà important à l'époque de la fondation de l'IMEKO et reste tout aussi pertinent dans le contexte géopolitique actuel. Ainsi, les institutions telles que l'IMEKO constituent des plateformes essentielles. Engageons-nous donc à maintenir de telles possibilités d'échange et souhaitons à l'IMEKO plein succès pour l'avenir! ●

1 <https://www.sga-asspa.ch/verein/fachdelegierte>

2 <https://sztaki.hun-ren.hu/en/current/news/2018/nobel-prize-holders-aircraft-turbines-and-new-hungarian-members-success-imeko>

3 <https://www.imeko.org/index.php/technical-committees>

4 <https://www.imeko2024.org/home>

5 <https://imeko2027.org/>

6 <https://acta.imeko.org/>

7 <https://www.sciencedirect.com/journal/measurement>

8 <https://www.imeko.org/images/imeko/Newsletternovember2022.pdf>

## Cours

# Transfert de connaissance ouvert à tous

La loi sur l'Institut fédéral de métrologie stipule que la Confédération suisse doit mettre à la disposition du secteur économique, de la recherche et de l'administration suisses l'infrastructure et les compétences requises en matière de métrologie. METAS accomplit ces tâches, qui lui sont déléguées, en offrant à tout un chacun de nombreuses formations en métrologie.

Est-il vraiment possible de garantir une précision approchant le centième de milliardième de seconde pour qu'un système de navigation de type GPS affiche une résolution de 1 m ?

Par quels moyens un fabricant de capsules de café est-il en mesure de garantir la stabilité de la palette de goûts offerte ?

Peut-on avoir confiance dans le fait qu'une convention pour excès de vitesse n'est pas le fruit d'une décision arbitraire ?

La différence de température moyenne mondiale à la surface de la Terre a augmenté de 0,7 °C au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Comment arrive-t-on à mesurer de si faibles variations à si grande échelle ?

Ces dernières années, les ventes annuelles de smartphones ont dépassé les 1,3 milliard d'unités. Comment les fabricants arrivent-ils à assurer la qualité de modèles dont certains se sont vendus à plus de 100 millions d'exemplaires ?

Pour atteindre de telles performances, il faut pouvoir les objectiver d'une manière précise, juste, répétitive et reproductible. En un mot: il faut mesurer!

**« Vous avez très bien couvert les attentes et les besoins des participants. »**

Helena L., Suisse

### Des mesures antiques à la métrologie

Dès les premières civilisations, les mesures (poids, longueurs) ont été nécessaires, par exemple pour les échanges entre tiers ou pour les impôts. Pour éviter les contestations entre parties prenantes, des « mesures de référence », aujourd'hui appelées « étalons », sont très rapidement apparues. Toutefois, chaque pays et province a disposé pendant des millénaires de ses propres unités de mesure. Ce n'est que l'avènement de l'esprit des Lumières et de la Révolution française qui a amené les scientifiques français à concevoir un système de référence basé sur des références naturelles ayant la même valeur pour tous. La métrologie, à savoir la science des mesures, était née et a connu un développement continu jusqu'à nos jours.

**« Sans aucun doute le meilleur cours auquel j'ai participé jusqu'à présent. VNA Tools est très puissant et bien conçu. »**

Thecla C., USA

### Formation en entreprise et approche flexible

METAS propose également des cours en entreprise ou à l'étranger. Notre programme dure de un à trois jours et s'articule autour des modules des cours de base, avec un approfondissement de thématiques, selon vos besoins.

Sur demande, METAS peut mettre sur pied de nouveaux cours ou offrir un partage de connaissances ciblé sur des sujets très spécifiques.



METAS offre une palette de cours spécifiques et d'approfondissement dans certains secteurs d'activité ou couvrant des sujets techniques hautement spécialisés.

- **le cours de base en incertitude de mesure** s'adresse à qui veut approfondir la réalisation et l'estimation de l'incertitude, paramètre qui doit nécessairement accompagner tout résultat de mesure. Les aspects théoriques du cours sont agrémentés d'une détermination expérimentale de la valeur et de l'incertitude de la constante de gravitation terrestre.

### L'infrastructure de la qualité

Aujourd'hui, l'infrastructure de la qualité d'un État moderne comme la Suisse forme un système comprenant des organisations publiques et privées et définissant les politiques, le cadre juridique et réglementaire pertinent ainsi que les pratiques nécessaires pour soutenir et renforcer la qualité, la sécurité et l'innocuité environnementale des biens, des services et des processus. On admet généralement que cette infrastructure de la qualité repose sur trois piliers principaux: la métrologie, la normalisation et l'accréditation.

Une solide compréhension des principes élémentaires et essentiels de la métrologie est donc capitale. La loi sur l'Institut fédéral de métrologie (LIFM) stipule, dans l'article 2, que la Confédération poursuit, à travers l'Institut, un certain nombre d'objectifs, dont celui de « mettre à la disposition du secteur économique, de la recherche et de l'administration suisses les compétences requises en matière de métrologie ». En plus de ses prestations commerciales et de recherche, METAS répond à cette nécessité de transférer les bases du savoir métrologique via une vaste offre de cours, dont la palette s'adresse à toutes les parties prenantes mentionnées dans l'article de loi: expertes et experts techniques, collaboratrices et collaborateurs scientifiques ainsi que cadres.



Aperçu  
de l'offre  
de cours

### Les connaissances de base

Deux cours de base permettent d'acquérir et de connaître les fondamentaux de la métrologie et forment la colonne vertébrale de l'offre de formations de METAS:

- **le cours de base en métrologie** s'adresse à toute personne désireuse de consacrer une journée à l'obtention d'une vue d'ensemble des aspects essentiels, de l'historique du Système international d'unités aux bases de l'évaluation de la conformité, en passant par la traçabilité et les régulations publiques et privées, pour ne citer que quelques thématiques;

### Approfondissement thématique ciblé

METAS offre une palette de cours spécifiques et d'approfondissement dans certains secteurs d'activité ou couvrant des sujets techniques hautement spécialisés. Ces cours sont organisés à intervalles réguliers ou si la demande est suffisante, pour des sujets tels que:

- **l'incertitude de mesure et l'évaluation de la conformité:** évaluation fiable de la conformité d'un produit ou d'un résultat de mesure, notamment par l'estimation de la probabilité de conformité, la définition d'intervalles d'acceptation et la réalisation d'analyses de risques;
- **VNA Tools Course:** introduction à un logiciel gratuit de METAS utilisé à l'échelle mondiale pour l'analyse et la quantification métrologique de mesures de signaux haute fréquence avec un analyseur vectoriel de réseau. La librairie gratuite METAS UncLib, un calculateur d'incertitude de mesure générique pour toutes disciplines, fait également l'objet d'une présentation;
- **analyse trajet-temps à partir d'enregistrements vidéo:** détermination de la vitesse d'un véhicule à partir d'un enregistrement vidéo et de mesures de distances;
- **instruments mesureurs de nanoparticules:** survol des aspects légaux et des défis liés aux mesures de particules fines des gaz d'échappement de moteurs diesel.

### Formation continue

Les concepteurs, ingénieurs et techniciens redoublant de créativité pour mettre au point et régler un système GPS, un processus de fabrication de smartphones ou de capsules de café, ou alors les scientifiques qui se penchent sur l'état du climat ont tous besoin de pouvoir prendre des décisions fondées sur des données fiables. Les cours proposés par METAS constituent ainsi une réponse au besoin de formation continue pour une approche rigoureuse de la science des mesures. ●

# JOURNÉE MONDIALE DE LA MÉTROLOGIE

20 MAI 2025



## 150 ans de la Convention du Mètre

*Des mesures  
« à tous les temps, à tous les peuples »*

En soutien à la Journée mondiale  
de la métrologie de 2025 de l'UNESCO



2024 • 2033  
International Decade of  
Sciences for Sustainable  
Development

[worldmetrologyday.org](http://worldmetrologyday.org)