

# La Référence.

Le magazine suisse de métrologie

N° 01 | 2026

Page 7 →

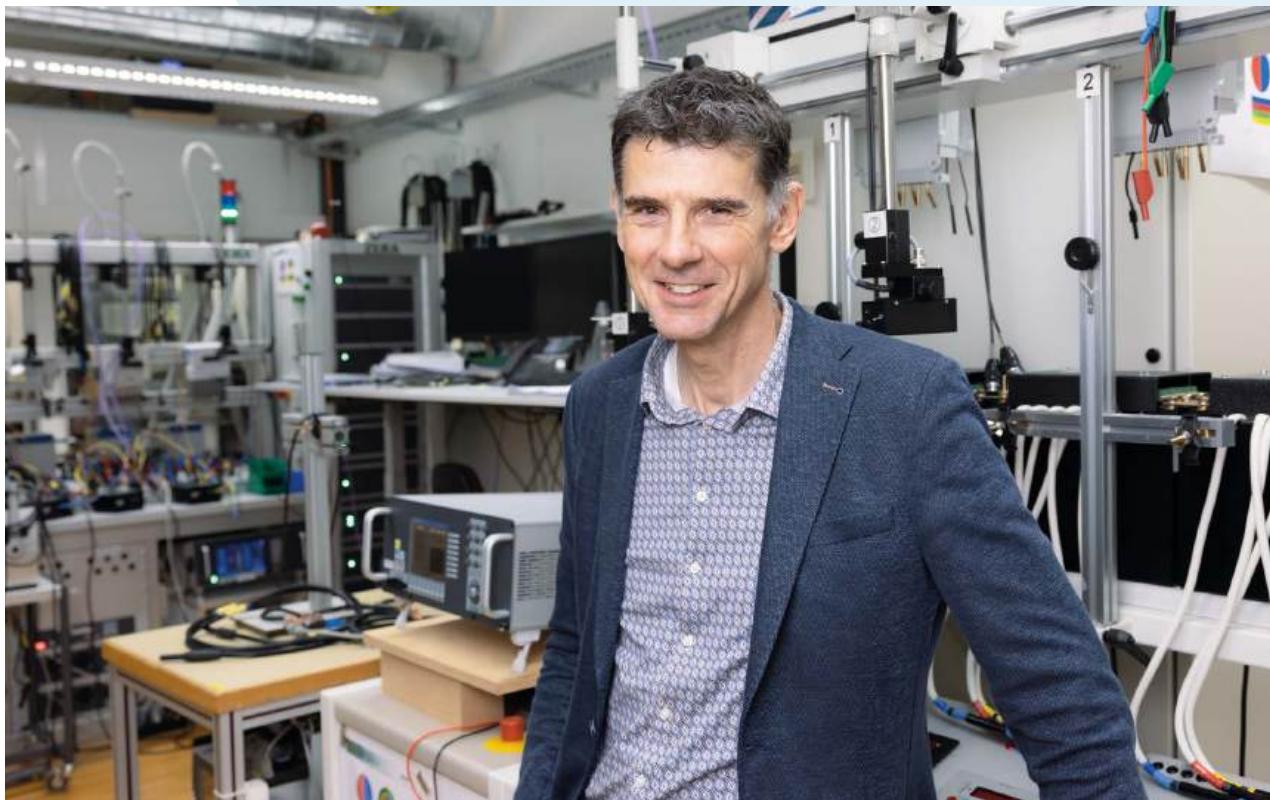
**Réalisation et dissémination  
de l'unité de longueur**

Page 16 →

**À la chasse aux  
PFAS dans les  
denrées alimentaires et le sang**

Page 25 →

**Nouvel étalon primaire  
pour l'étalonnage du débit  
avec de l'hydrogène**



#### 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

##### Comité de rédaction

Sören Fricke  
Hugo Lehmann  
Lena Märki  
Markus Zeier

##### Versions

Paraît en allemand, en français et en anglais (en ligne)

##### Crédits photographiques

METAS, emte.ch (p. 13)

##### Conception

Casalini Werbeagentur AG  
casalini.ch

##### Copyright

© 2026

Institut fédéral de métrologie METAS, Berne  
La reproduction d'articles avec mention de la source  
est autorisée. Veuillez envoyer un exemplaire de votre  
contribution 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

Étalonnage d'un instrument servant à surveiller  
l'exactitude des systèmes CT ZEISS METROTOM  
nano® avec la  $\mu$ -CMM de METAS.

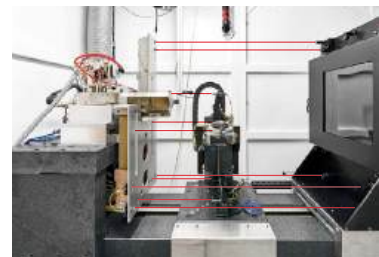
## Contenu

### 4 Précision des dimensions: le laboratoire Longueur, nano- et microtechnologie



### 7 Réalisation et dissémination de l'unité de longueur

### 10 METAS-CT: tomographie à résolution submicronique



## Éditorial

Chère lectrice, cher lecteur,

Sans précision, pas de comparabilité ni de confiance – que ce soit en laboratoire ou dans la vie quotidienne. La métrologie œuvre, la plupart du temps en coulisse, à garantir la fiabilité et elle continuera de le faire à l’avenir. Ce numéro de *La Référence* montre l’étendue de son influence, de la réalisation des unités fondamentales aux questions analytiques d’importance sociétale, en passant par les technologies haute résolution.

La métrologie des longueurs, la nanotechnologie et la microtechnique occupent cette fois le devant de la scène, avec un aperçu de la réalisation et de la dissémination de l’unité de longueur et un article sur la tomographie métrologique assistée par ordinateur de précision submicronique, qui fait dialoguer traçabilité et innovation technologique.

Il y est aussi question de composés perfluoroalkylés et polyfluoroalkylés (PFAS) dans deux textes

consacrés à l’analyse de traces dans le sang et dans les aliments ainsi qu’à l’harmonisation des procédés analytiques, qui montrent, ici également, l’importance de mesures fiables pour la préservation de la santé, la protection de l’environnement et les décisions régulatrices.

Enfin, nous nous tournons vers l’avenir avec un nouvel étalon primaire pour les étalonnages du débit avec de l’hydrogène et un essai sur les perspectives insolites qu’ouvre l’intelligence artificielle pour la métrologie de demain, nous invitant à nous interroger sur son rôle de génératrice de confiance au quotidien.

Bonne lecture !

D<sup>r</sup> Fabiano Assi  
Sous-directeur  
Institut fédéral de métrologie METAS

### 14 En bref

### 16 À la chasse aux PFAS dans les denrées alimentaires et le sang



### 19 Objet

### 20 PFAS: harmoniser et améliorer l’analyse de ces polluants éternels



### 25 Nouvel étalon primaire pour l’étalonnage du débit avec de l’hydrogène



### 28 Du futur de la métrologie





À propos de METAS

## Précision des dimensions : le laboratoire Longueur, nano- et microtechnologie

Assurant la traçabilité au SI du mètre en Suisse, le laboratoire Longueur, nano- et microtechnologie de METAS est au service de l'industrie et de la recherche. Ses places de mesure telles que METAS-CT ou  $\mu$ -CMM marquent un changement de paradigme en matière de précision.

Philippe Chavanne

Le laboratoire Longueur, nano- et microtechnologie de notre Institut est le centre de compétence national pour la métrologie dimensionnelle. Il réalise et dissémine l'unité du mètre à l'échelle de la Suisse et veille à ce que les mesures de longueurs dans l'industrie, la recherche et les contrôles officiels soient effectuées avec le niveau d'exactitude le plus élevé.

Le laboratoire est composé d'une équipe motivée de dix spécialistes qui non seulement effectuent des étalonnages et des contrôles, mais sont aussi très actifs dans le développement de la technologie de mesure. En moyenne, l'équipe mène trois projets de recherche et développement en étroite collaboration avec des partenaires industriels, et publie jusqu'à cinq articles scientifiques par an – une contribution essentielle à l'innovation et à la création de contacts internationaux.

Comptant 9 laboratoires climatisés et à faible niveau de vibrations, dont des salles blanches de classe ISO 7 et 3, et 32 stations de mesure de haute précision, le laboratoire bénéficie d'une infrastructure unique au monde. La traçabilité de toutes les

mesures aux étalons nationaux et la reconnaissance internationale par le BIPM garantissent une fiabilité maximale.

Outre l'étalonnage d'appareils de mesure et d'étalons, le laboratoire développe de nouvelles procédures de mesure, effectue des essais de type et soutient l'industrie dans des tâches de mesure com-



Daniel Schneeberger commande la machine à mesurer des photomasques située en arrière-plan, à l'intérieur de la salle blanche de classe ISO 3.



Illustration 1: savoir-faire, infrastructure et précision – les qualités distinctives du laboratoire Longueur, nano- et microtechnologie.

plexes. Avec plus de 2000 certificats d'étalonnage délivrés par an et 83 entrées CMC dans la base de données KCDB du BIPM, le laboratoire est un partenaire indispensable en matière de précision en Suisse.

### Nos cinq domaines de compétence

Le travail de notre laboratoire s'articule en cinq domaines de compétence qui couvrent toute la métrologie dimensionnelle:

#### 1 Longueur – à la base de la précision

Le laboratoire réalise l'unité du mètre (voir article suivant) et étalonne des étalons et des systèmes de mesure de longueur complexes. Dans son infrastructure, on trouve un banc de mesure de 50 m pour les étalons et les appareils de mesure de distances laser, ainsi que des systèmes interférométriques pour l'exactitude la plus élevée lors de l'étalonnage des cales étalons et des diamètres de différents types.

#### 2 Forme – exactitude géométrique

Étalonnage de la rondeur, de la rectitude, de la planéité et de la cylindricité pour les pièces de précision. Des machines de mesure telles que Talyrond 73 et Rondcom 65B permettent d'obtenir des incertitudes de l'ordre du nanomètre.

#### 3 Métrologie multidimensionnelle – le cœur du laboratoire

Des systèmes de mesure uniques, la plupart développés en interne, sont la vitrine du laboratoire. Ils fournissent à l'industrie une exactitude de mesure à la pointe de la métrologie internationale. Des géométries 2D et 3D complexes sont détectées avec la plus grande précision – que ce soit dans le domaine des microcomposants des industries horlogère et pharmaceutique que dans celui des assemblages complets du secteur aérospatial.

##### Nos technologies clés: Machine à mesurer tridimensionnelle à précision micrométrique ( $\mu$ -CMM)

- Développée en interne pour les mesures 3D tactiles de l'ordre du nanomètre
- Volume de mesure:  $90 \times 90 \times 38 \text{ mm}^3$ , Force de palpation:  $< 5 \text{ mN}$ , Répétabilité:  $5 \text{ nm}$ .
- Incertitude de mesure: jusqu'à  $27 \text{ nm} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot L$  (unidirectionnelle)
- Assure le palpation point par point et le scan de forme libre pour les microgéométries complexes

##### Machine à mesurer des photomasques

- Machine de mesure optique 2D pour les structures sur photomasques et règles en verre
- Plage de mesure:  $400 \times 300 \text{ mm}$ , Incertitude de mesure:  $16 \text{ nm}$ ,  $0.08 \cdot 10^{-6} \cdot L$  (Zerodur et quartz)
- Salle blanche de classe ISO 3, stabilité de température  $\pm 0.02^\circ \text{ C}$  pour une précision maximale



### Tomographie métrologique assistée par ordinateur (METAS-CT)

- Approfondie dans l'article «METAS-CT: tomographie à résolution submicronique»

### Microscope à force atomique (AFM)

- Pour des mesures de surface ultraprécises à l'échelle du nanomètre
- Plage de mesure:  $50 \times 50 \times 12 \mu\text{m}$ , incertitude pour les hauteurs de marche et les tailles de particules de l'ordre de quelques nanomètres
- Idéal pour les distances structurales 1D et 2D, les hauteurs de marches et les tailles de particules (p. ex. polymère, silice, métal)

### 4 Surfaces – qualité des surfaces fonctionnelles

Étalonnages des profils linéaires, des étalons de rugosité, d'ondulation et de contour ainsi que des rayons des arêtes de coupe à l'aide du palpeur de rugosité de surface MarSurf LD 130. L'évaluation des données de mesure est actuellement étendue à la norme ISO 21920.

### 5 Angles – précision dans la rotation

Étalonnages de polygones optiques, de cales angulaires et d'autocollimateurs. Les plateaux de mesure angulaire à paliers d'air et les règles sinus permettent d'atteindre jusqu'à  $0.001''$  de précision.

### Perspectives

L'évolution du laboratoire Longueur, nano- et microtechnologie ne s'arrête pas là: la prochaine grande étape sera la mise en service du microscope à force

atomique métrologique (AFM) 3D développé par le laboratoire. Ce système hautement innovant combine les avantages de la microscopie à force atomique avec une surveillance interférométrique sur trois axes et ouvre une nouvelle ère en matière de précision des mesures des surfaces et des nanostructures. Avec ce nouvel appareil, METAS renforce son rôle de leader dans le domaine de la métrologie multidimensionnelle et ouvre la voie à des applications dans le domaine du développement des batteries, des sciences de la vie et de l'industrie des semi-conducteurs. ●

### Pourquoi la métrologie dimensionnelle est-elle plus importante que jamais ?

Dans un monde où la précision est fondamentale pour la qualité, la sécurité et l'innovation, la détermination exacte des grandeurs géométriques est indispensable. Que ce soit dans l'industrie des semi-conducteurs, la construction de machines ou la technologie médicale, les exigences posées à la précision ne cessent d'augmenter – sous l'effet de la miniaturisation croissante, des densités d'intégration plus élevées et des exigences en matière de disponibilité des systèmes et de stabilité des processus revues à la hausse. La mission du laboratoire Longueur, nano- et microtechnologie de METAS est d'assurer que la Suisse reste à la pointe dans ce domaine.



### Témoignage d'un client: Martin Wiederkehr, chef du laboratoire d'étalonnage Saphirwerk AG

«Depuis plusieurs années, la collaboration avec le laboratoire Longueur, nano- et microtechnologie de METAS nous donne pleine satisfaction. Les délais de livraison sont courts, les incertitudes de mesure extrêmement faibles et les compétences techniques indéniablement très élevées. En bref, METAS est un partenaire fiable si on vise la précision la plus élevée.»



La métrologie en général

## Réalisation et dissémination de l'unité de longueur

À METAS, la réalisation du mètre repose sur des lasers hélium-néon hautement stables, réglés sur une transition atomique de l'iode telle que décrite dans la *Mise en pratique*. Grâce à ses étalonnages d'interféromètres laser, l'Institut garantit une chaîne d'étalonnage fiable et traçable aux étalons internationaux.

D<sup>r</sup> Kurt Gunderson, Philippe Chavanne

### Définition du mètre

Le mètre est défini comme la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 seconde. L'unité de longueur est donc directement liée à la constante naturelle qu'est la vitesse de la lumière.

### Réalisation de l'unité de longueur

À METAS, cette définition est réalisée en utilisant des lasers dont la fréquence est connue et extrêmement stable. Comme étalons primaires, nous employons trois lasers hélium-néon dont la fréquence optique repose sur une transition atomique – plus précisément sur une raie d'absorption du gaz d'iode. Ces lasers constituent des références optiques particulièrement stables et reproductibles et se prêtent donc à assurer continûment et durablement l'unité de longueur (illustration 1).

Les fréquences optiques des lasers sont directement liées à la réalisation de la seconde à l'aide d'un

peigne de fréquences optiques, ce qui permet une traçabilité directe de l'unité de longueur au temps. L'incertitude relative de la réalisation du mètre à l'aide de lasers hélium-néon stabilisés à l'iode est de  $2.5 \times 10^{-11}$  (voir *Mise en pratique*<sup>1</sup>). Pour comparaison, cela correspond à une incertitude de longueur d'environ 1 mm sur la circonférence de la Terre.

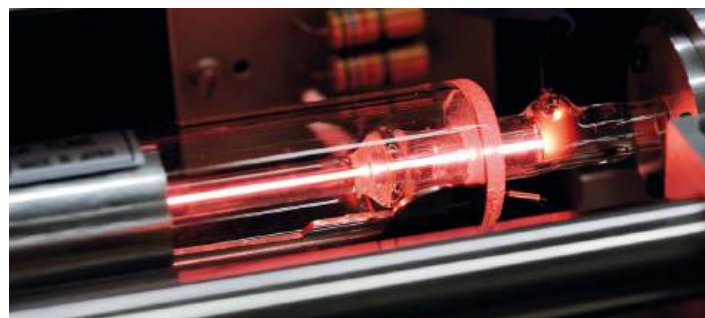


Illustration 1: montage d'un laser hélium-néon stabilisé à l'iode utilisé à METAS pour la réalisation primaire du mètre.

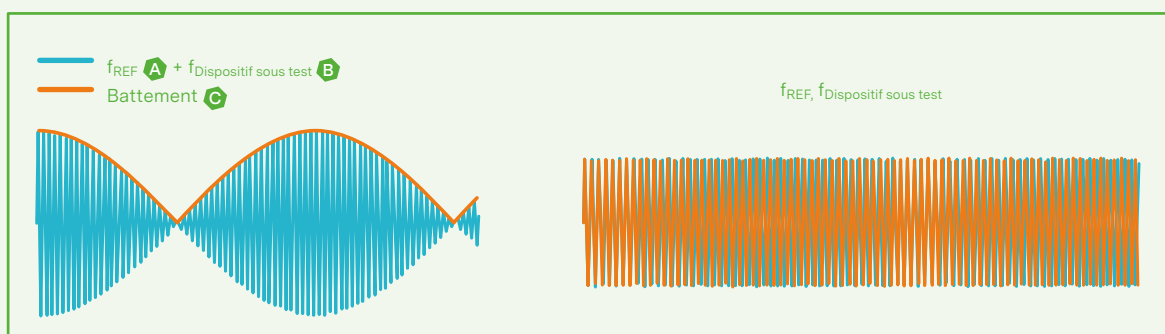
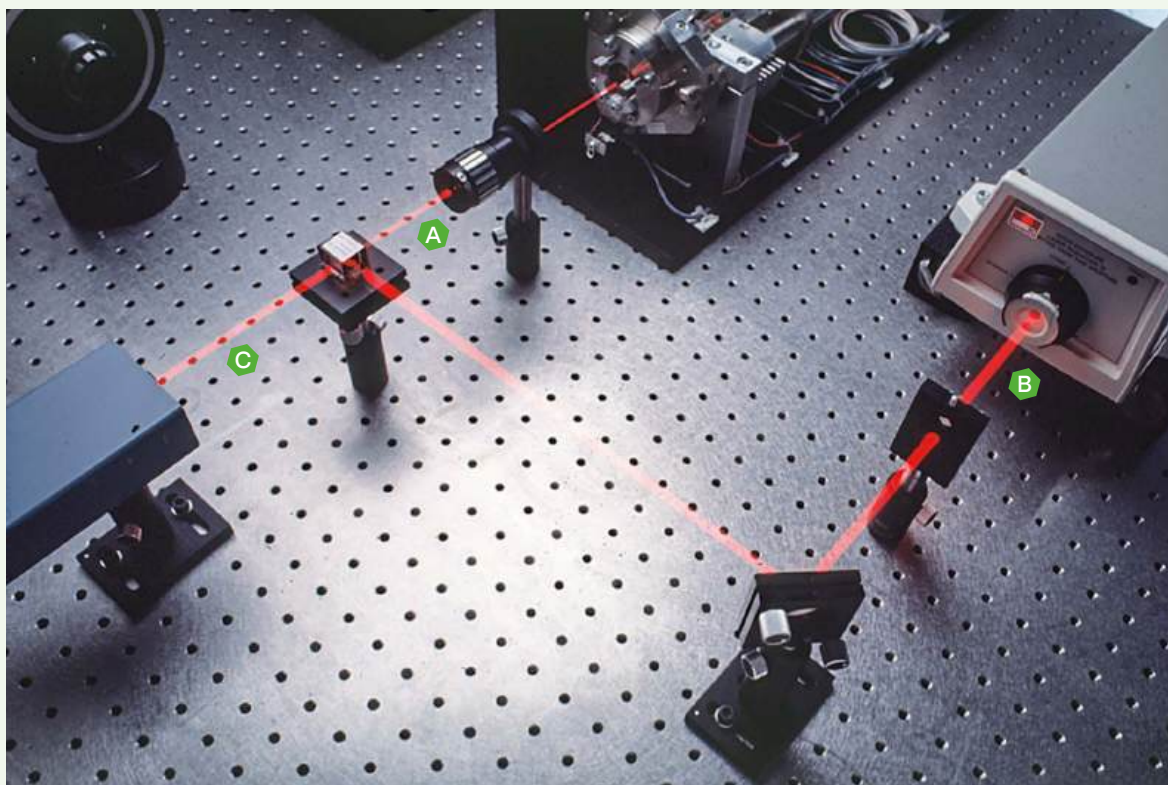


Illustration 2 : étalonnage d'un laser à l'aide d'une méthode de mesure hétérodyne, dans laquelle le faisceau du laser à étalonner **B** est superposé à celui de la réalisation primaire du mètre **A**. Le battement qui en résulte **C** correspond à la différence de fréquence à étalonner.

### Dissémination de l'unité de longueur

En métrologie des longueurs, les longueurs d'onde des lasers stabilisés, connues avec précision – par exemple  $0,633 \mu\text{m}$  dans le cas du laser hélium-néon rouge –, sont une sorte de règle immatérielle: elles permettent une comparaison directe des dimensions mesurées et de l'unité réalisée.

Dans les systèmes de mesure interférométriques, les longueurs d'onde de la lumière laser sont comptées et interpolées le long d'une distance donnée sur une mesure matérialisée. Cette méthode permet

une plage de mesure théorique exceptionnellement large, allant de plusieurs dizaines de mètres au niveau subnanométrique. Dans la pratique, l'indice de réfraction de l'air limite toutefois l'exactitude atteignable à quelques dizaines de nanomètres; les mesures au niveau subnanométrique sont donc possibles dans un vide ultra-élevé.

Une longueur d'onde laser stable et connue précisément est une condition sine qua non pour convertir avec exactitude les signaux d'interférence mesurés en une longueur clairement déterminée.

### Étalonnage des interféromètres laser

En métrologie des longueurs, toute chaîne d'étalonnage commence par l'étalonnage des interféromètres laser. Les fréquences optiques d'un laser hélium-néon, d'environ 474 THz, sont nettement supérieures à la plage directement détectable par l'électronique conventionnelle, et, par suite, ne peuvent pas être détectées par des appareils de mesure électronique. Aussi doit-on recourir à une méthode de mesure hétérodyne dans laquelle le faisceau du laser à étalonner est superposé à celui de l'étalon primaire, qui est un laser stabilisé à l'iode (voir illustration 2).

Le battement qui en résulte correspond à la différence de fréquence entre les deux signaux optiques. Le signal à basse fréquence ainsi créé reflète la différence entre les deux fréquences laser (très élevées). Puisque cette différence est généralement inférieure à 1 GHz, elle peut être mesurée directement après détection opto-électronique.

L'étalonnage des interféromètres laser à METAS n'inclut pas seulement la détermination de la fréquence optique, mais aussi l'étalonnage des unités de compensation de l'indice de réfraction, qui tiennent compte des influences environnementales telles que la pression atmosphérique, la température ou l'humidité et corrigent la variation de la longueur d'onde du laser dans l'air par rapport à la longueur d'onde stable dans le vide. ●

### La méthode XRCD: structure cristalline de silicium utilisée en tant que réalisation primaire alternative du mètre

À côté de l'interférométrie optique classique, il existe une réalisation primaire alternative du mètre, basée sur la structure atomique du silicium.

- **Principe de mesure:** détermination de la constante de réseau Si {220} d'un cristal de silicium de haute pureté au moyen de l'interférométrie à rayons X.
- **Dérivation du mètre:** la longueur est déterminée par le nombre de plans réticulaires sur une distance donnée.
- **Indépendance:** fonctionne sans interférométrie optique ni mesures du temps de vol.
- **Domaine d'application:** métrologie des longueurs de haute précision et analyses fondamentales, par exemple dans la détermination de la constante d'Avogadro.
- **Caractéristique:** est considérée comme une **réalisation primaire** alternative, car elle repose directement sur des structures physiques fondamentales (Bureau International des Poids et Mesures, 2019).

#### Source

- 1 Bureau International des Poids et Mesures (2019). SI Brochure – 9th edition: Appendix 2 – *Mise en pratique* for the definition of the metre in the SI. Tiré de <https://www.bipm.org/documents/20126/41489670/SI-App2-metre.pdf>

## Prestations

# METAS-CT: tomographie à résolution submicronique

**METAS-CT, développé à l'interne, monte la barre en matière de tomographie assistée par ordinateur traçable au SI. De nouvelles corrections de la température, du durcissement du faisceau et des déviations du rayon permettent de réduire l'incertitude de mesure et d'obtenir des résultats bien plus fiables.**

D<sup>r</sup> Alain Küng, Marc Trösch, Philippe Chavanne

### METAS-CT en bref

METAS-CT n'est pas un système de tomographie conventionnel, mais un instrument de mesure ultra-précis développé par notre laboratoire spécifiquement pour répondre aux exigences de la microtechnique et de la nanotechnologie. Il se compose principalement d'un tube à rayons X dont la résolution est inférieure à 1  $\mu\text{m}$  et le foyer (spot) effectif équivalent à environ 1  $\mu\text{m}$ , et d'un détecteur plat grand format (4096  $\times$  4096 px). Cette configuration permet d'obtenir une image en 3D des plus petits objets, de l'ordre du millimètre ou moins, avec une résolution et une exactitude de mesure réservées jusqu'à présent aux machines à mesurer tridimensionnelles tactiles.

Cependant, le matériel seul ne suffit pas: la traçabilité métrologique est garantie au moyen d'un système de mesure géométrique *in situ*. Huit interféromètres à fibre, cinq capteurs de rectitude optiques et trois capteurs d'indice surveillent la position relative de la source, de la table de rotation et du détecteur durant l'acquisition de chaque image, afin de déterminer la disposition du système lors de chaque projection et de l'inclure directement dans la reconstruction. Ce dispositif est complété par un système précis de gestion de la température, composé de plusieurs circuits de refroidissement et d'un réseau de capteurs de température, qui permettent d'enregistrer et de compenser les dérives thermiques. Le système atteint ainsi une stabilité à long terme de plusieurs heures et une exactitude de mesure submicronique lors des intercomparaisons avec des étalons à plusieurs billes.

### Derniers développements: de la théorie à la pratique

Les dernières années ont été marquées par des efforts intensifs en recherche et en développement, avec l'objectif d'amener la tomographie pour la métrologie dimensionnelle à un niveau supérieur. La compensation géométrique *in situ* constitue une étape clé. Alors que les systèmes classiques pré-supposent une disposition statique du système lors d'une projection, METAS-CT tient compte des changements de position tels que les dérives thermiques ou les mouvements minimes. Pour chaque projection, la disposition effective du tomographe est enregistrée et prise en considération lors de la reconstruction.

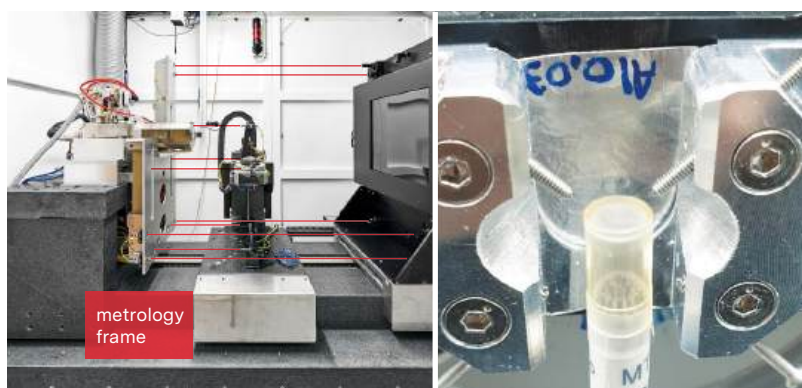


Illustration 1: aperçu de METAS-CT et image agrandie des billes de référence, fixées au bout des tubes pour compenser les déviations du faisceau lors du scan d'un objet.

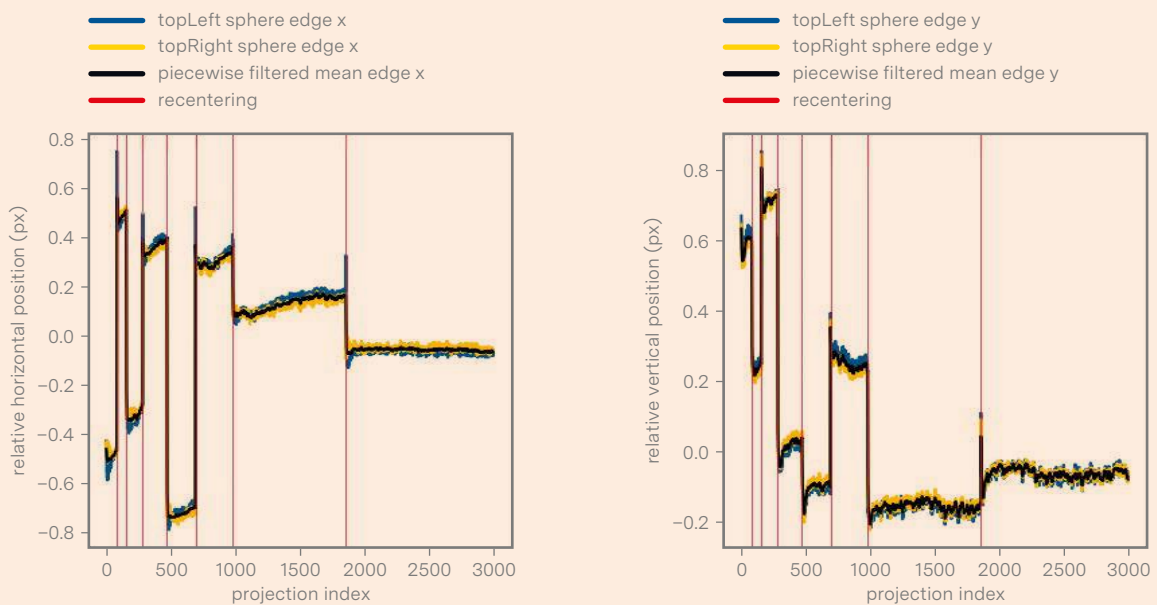


Illustration 2 : déviation des billes de référence et recentrage du foyer pendant le scan d'un de nos étalons.

Les derniers travaux ont porté en particulier sur la caractérisation exacte de la position du détecteur et la correction des déviations du foyer. En effet, si un détecteur plat peut, en théorie, représenter une surface plane avec des pixels parfaitement réguliers, ce n'est pas le cas en pratique. METAS a développé un procédé qui enregistre et corrige les différences géométriques pour chaque pixel. Le foyer du tube à rayon X change également durant la mesure en raison des effets thermiques. Deux billes de référence (voir illustration 1, à droite) permettent de retracer ces changements de position en temps réel et de les corriger pour chaque projection (illustration 2). L'incertitude de mesure à l'étape de l'analyse géométrique des données du scan est ainsi nettement réduite.

METAS-CT cherche également à remédier aux artefacts de reconstruction, engendrés entre autres par les faisceaux coniques – un autre aspect clé de la tomographie assistée par ordinateur – en utilisant des trajectoires supplémentaires lors du scan. Aux rotations classiques s'ajoutent des trajectoires verticales qui, couplées à des algorithmes de reconstruction avancés tels que TIGRE, contribuent à une nette réduction des déformations typiques.

Enfin, le durcissement du faisceau soulève aussi une question centrale. La matière modifie en effet le spectre des rayons X lorsque celui-ci la traverse, engendrant systématiquement des erreurs de mesure.

METAS a développé une méthode novatrice fondée sur l'analyse du bruit. La correction nécessaire, une solution élégante qui ne requiert aucune donnée matérielle complexe, est déduite de la répartition statistique des variations de niveaux de gris (voir illustration 4). L'illustration 3 montre comment les artefacts dus au durcissement du faisceau, notamment lors de grandes différences de contraste entre deux matériaux, peuvent être fortement réduits.

Ces développements montrent que METAS-CT n'est pas un simple appareil, mais un concept exhaustif qui allie matériel, logiciel et métrologie. La surveillance constante de tous les facteurs d'influence pertinents et leur compensation permettent de réduire sensiblement l'incertitude lors des mesures d'objets-tests et redéfinissent ainsi les limites de la tomographie métrologique assistée par ordinateur.

#### Application : analyser les filetages autrement

Les filetages ont l'air de simples spirales, or leur géométrie détermine la fonction de groupes de montage entiers. Le bon fonctionnement d'un boulon ne dépend pas seulement du diamètre, mais aussi de l'angle du flanc, du pas de vis et de la conservation de la forme. Nous nous inspirons de cet exemple pour comparer la méthode à trois fils classique et l'analyse tomographique moderne.

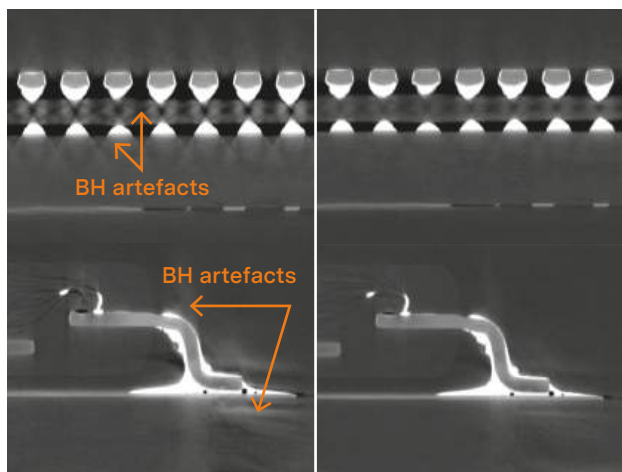


Illustration 3: projection d'une clé USB; à droite, avec correction par pixel du durcissement du faisceau, à gauche, sans.

La méthode à trois fils est un procédé de mesure largement établi depuis plusieurs décennies pour déterminer le diamètre sur flancs de base. Trois piges précises sont placées sur les flancs du filetage, la partie qui dépasse des filets est mesurée et le diamètre sur flancs calculé, en supposant les valeurs nominales du pas de vis et de l'angle du flanc (voir illustration 5, à gauche). Le procédé est simple et d'une exactitude étonnante: lors d'une comparaison directe, il a permis de déterminer la valeur 0,7586 mm pour une jauge de filetage NIHS S0.9 avec une incertitude de mesure élargie de seulement 1,2  $\mu\text{m}$ . Pour mesurer le «vrai» diamètre sur flancs, on détermine le pas de vis et l'angle du flanc au moyen de trois piges de tailles différentes qui présentent une incertitude de mesure plus grande ou d'un scan du filetage.

Cependant, cette méthode a ses limites en ce qui concerne la précision. En effet, si elle permet de mesurer en un point défini dans des conditions idéales, elle ne donne aucune information sur les variations locales, les flancs asymétriques ou les erreurs de pas de vis le long du filetage. De plus, elle ne peut pas être appliquée aux filetages intérieurs, ceux-ci étant inaccessibles. Les scanners actuels permettent de mesurer tant les filetages extérieurs qu'intérieurs, mais arrivent eux aussi à leurs limites en dessous de M1.

C'est là qu'intervient la tomographie assistée par ordinateur et qu'elle ouvre les perspectives. Au lieu d'informations ponctuelles, elle fournit une image complète du volume. Le scan permet de reconsti-

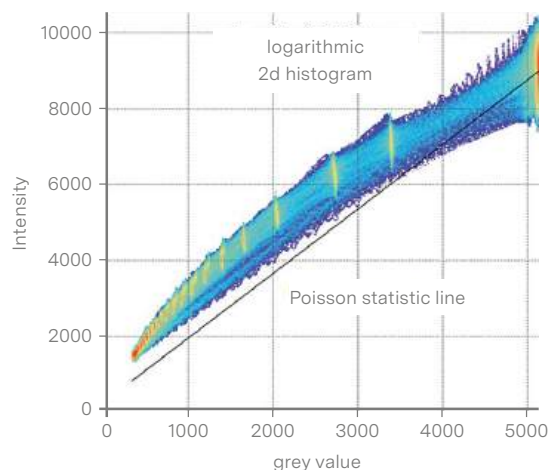


Illustration 4: bruit en fonction des niveaux de gris d'une cale étalon à gradins.

tuer la surface avec la plus haute exactitude grâce aux corrections de la disposition et des artéfacts. À partir de là commence l'analyse: les formes hélicoïdales le long des flancs déterminent le pas de vis, les coupes le long de l'axe fournissent le diamètre sur flancs et les analyses du profil sur tout le long permettent de déterminer l'angle du flanc et de repérer les plus petites asymétries (voir illustration 5, à droite).

Ainsi, la tomographie assistée par ordinateur ne détermine pas seulement les dimensions nominales, mais aussi la géométrie réelle avec ses divergences: bavures, marques de broutage, porosité et inclusions deviennent visibles, même dans les zones cachées. En termes d'assurance qualité, cela signifie que les défauts sont identifiés à temps, avant qu'ils ne nuisent au fonctionnement.

Un exemple typique est celui d'une vis que l'on a du mal à insérer dans un guide fileté, alors que, selon la méthode à trois fils, son diamètre sur flancs ne dépasse pas les écarts limites. Dans ce cas, un scan en révèle la cause, par exemple des variations minimales de l'angle du flanc ou du pas de vis dues à la vibration de l'outil d'usinage. Il est particulièrement difficile de repérer de tels effets sur de petits filetages avec les méthodes de mesure classiques: c'est là la force de METAS-CT.

En résumé, la méthode à trois fils reste incontournable pour l'étalonnage de filetages. Cependant, la tomographie assistée par ordinateur offre des avantages certains pour les caractérisations géo-

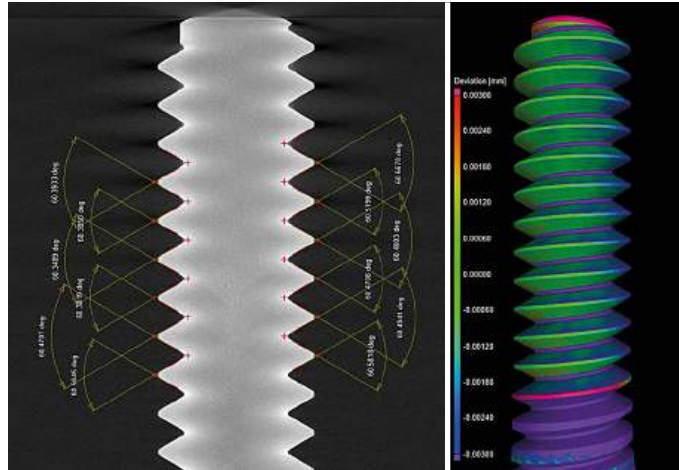
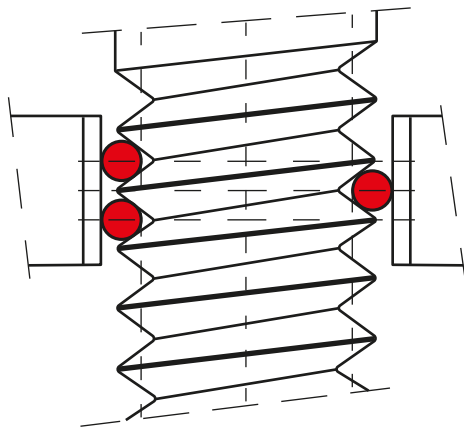


Illustration 5: mesure du filetage au moyen de la méthode à trois fils classique (à gauche) et caractérisation tomographique (à droite).

métriques complètes qui vont au-delà du diamètre sur flancs. METAS-CT et les derniers développements dans le domaine permettent une analyse complète et traçable de filetages, y compris l'angle du flanc et le pas de vis, à l'échelle micrométrique: un progrès technologique qui marque un changement de paradigme pour la mesure industrielle des plus petits filetages. ●

#### Bibliographie

- Bircher B.A. et al. (2020): METAS-CT: Metrological X-ray computed tomography at sub-micrometre precision, euspen Conference.
- Lüthi M. et al. (2020): X-ray flat-panel detector geometry correction to improve dimensional computed tomography measurements, Meas. Sci. Technol.
- Bircher B.A. et al. (2021): Measurement of temperature induced X-ray tube transmission target displacements for dimensional computed tomography, Precis. Eng.
- VDI/VDE 2630 Richtlinien: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik.

METAS-CT est conçu comme un système de référence métrologique pour le développement, la validation et la traçabilité de procédures de mesure par tomographie assistée par ordinateur, alors que les systèmes métrologiques commerciaux sont avant tout conçus pour la réalisation de mesures industrielles efficaces.

Caractéristique	METAS-CT	CT commercial
Emploi	Référence/recherche/recherche d'erreurs	Industrie/QS
Traçabilité	Directe, basée sur le SI	Indirecte, basée sur des objets
Incertitude	Fondée sur un modèle, $0,3 \mu\text{m} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot L$ (unidirectionnel)	Fondée sur des spécifications généralement traçables de manière fiable entre $5 \mu\text{m}$ et $20 \mu\text{m}$ .
Architecture du système	Ouverte	Fermée
Efficacité de mesure	Faible	Élevée
Flexibilité	Très élevée	Limitée

## PSI-Connect: une trentaine de jeunes chercheuses présentes à METAS



En novembre 2025, METAS a ouvert les portes de son site de Wabern à une trentaine de jeunes chercheuses à l'occasion du PSI-Connect. Ce programme de l'Institut Paul Scherrer (PSI) vise à faciliter les contacts entre les jeunes scientifiques hautement qualifiées et de potentiels employeurs. À cette occasion, METAS a présenté son rôle d'institut national de métrologie et a montré comment l'expertise scientifique, la recherche appliquée et la responsabilité sociale pouvaient interagir.

Outre un aperçu de différentes carrières, l'événement prévoyait des ateliers ainsi qu'un échange direct avec les différents domaines de METAS. C'était également l'occasion de souligner la bonne collaboration entre METAS et le PSI et l'importance de METAS en tant que plateforme de réseautage, de promotion des talents et de dialogue durable entre la recherche et l'application.

---

## METAS participe au pôle de recherche national « Precision »

Le Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation SEFRI a adopté les nouveaux pôles de recherche nationaux (PRN). Le laboratoire **Photonique, temps et fréquence de METAS fera partie du PRN « Precision »**, aux côtés de l'EPFZ, de l'Université de Bâle, de l'EPFL, du PSI, de l'Université de Neuchâtel et du CSEM. Cette collaboration a pour but de développer une horloge optique ultraprécise, soulignant ainsi la position d'excellence de la Suisse dans le domaine des mesures de précision du temps et de la fréquence. Elle vise également à ouvrir de nouvelles perspectives pour la recherche en physique fondamentale, dont les applications renforcent l'innovation et la souveraineté technologique de la place économique suisse.



Plus d'informations:

[https://www.sbf.admin.ch/dam/fr/sd-web/s2DtVF0Q6021/NFS\\_Precision\\_FR.pdf](https://www.sbf.admin.ch/dam/fr/sd-web/s2DtVF0Q6021/NFS_Precision_FR.pdf)

# Engagement pour l'infrastructure qualité suisse

METAS, le Service d'accréditation suisse SAS (rattaché au SECO) et l'Association suisse de normalisation SNV ont signé le 4 février 2026 une déclaration d'intention pour intensifier leur collaboration au sein de l'infrastructure qualité suisse. Leurs objectifs sont notamment d'en permettre un usage efficace, de tirer profit des synergies et d'accroître sa visibilité auprès des entreprises, des autorités et de la société.

**N. B.** Dans le prochain numéro, nous vous proposerons un article approfondi consacré à l'infrastructure qualité suisse.



## Mémorandum d'entente entre l'Azerbaijan Institute of Metrology et l'Institut fédéral de métrologie

L'Azerbaijan Institute of Metrology et METAS ont signé un mémorandum d'entente (MoU) technico-scientifique. Ce dernier forme la base de l'échange de connaissances techniques, du développement bilatéral de compétences métrologiques et de l'encouragement de l'innovation. En outre, il souligne le rôle central de la métrologie pour un progrès économique et technologique durable.



## Science slam : la science monte sur scène

Le premier science slam de METAS s'est déroulé le 9 décembre 2025. Son objectif: présenter la science et la recherche de manière créative, ludique et compréhensible. Les participantes et participants de METAS avaient cinq minutes au maximum pour présenter la complexité de leurs travaux scientifiques ou métrologiques, apprenant à aller à l'essentiel et à raconter une « histoire » parlante. Le science slam a été organisé en collaboration avec une équipe de l'Université de Fribourg. Grâce à sa grande expérience en la matière, celle-ci a préparé au mieux les participantes et participants de METAS, parvenant à créer une excellente ambiance pendant la joute. Merci à toutes et à tous!



## Deux nouveaux chefs de laboratoire dans le domaine Métrologie en chimie et en biologie

En 2025, deux nouveaux chefs de laboratoire dans le domaine Métrologie en chimie et en biologie ont été nommés. Julie Tolu a pris la direction du laboratoire Analyses et références organiques le 1<sup>er</sup> septembre. Elle a une vaste expérience en chimie analytique, en particulier dans les méthodes de spectrométrie de masse pour la détermination des polluants et des éléments dans les échantillons environnementaux et biologiques. Elle a en outre (co)dirigé des projets de recherche et encadré des étudiants de master, des doctorants et des postdoctorants durant plusieurs années. Tobias Heck, quant à lui, a été nommé chef du laboratoire Analyses et références biologiques au 15 octobre. Ayant des connaissances approfondies en biochimie des protéines, il apporte une longue expérience de cadre dans l'industrie pharmaceutique, notamment dans la technologie analytique des processus.





## Prestations

# À la chasse aux PFAS dans les denrées alimentaires et le sang

Revêtements antiadhésifs des ustensiles de cuisine, textiles déperlants et lipophobes, papiers et cartons couchés, pesticides ou encore mousses d'extincteurs, nombreux sont les produits et procédés industriels qui contiennent des PFAS. Mais à quel prix ?

D' Alexandra Jaus

Les PFAS (de l'anglais *per- and polyfluoroalkyl substances*) sont un groupe de composés chimiques difficilement dégradables produits depuis des dizaines d'années. Ils sont utilisés dans de nombreux produits et procédés industriels pour leur résistance à la graisse, aux impuretés et à l'eau.

De plus, leurs liaisons carbone-fluor extrêmement fortes leur confèrent une grande stabilité thermique et chimique. Si ces propriétés rendent les PFAS particulièrement appréciés dans beaucoup d'utilisations, elles en font un réel problème pour l'environnement, où ils ne se dégradent guère (voir illustration 1). Les PFAS sont en effet persistants, d'où leur surnom de « produits chimiques éternels ». Compte tenu de leur toxicité souvent élevée et de leur faculté à s'accumuler, ils constituent un défi économique, scientifique et politique majeur.

### Conséquences des PFAS sur la santé

Les PFAS pénètrent dans le corps principalement par le biais de la nourriture. D'après l'état actuel des recherches, certains PFAS, tels que l'acide perfluoro-

roctanesulfonique (PFOS) et l'acide perfluorooctanoïque (PFOA), représentés à l'illustration 2, nuisent à la santé. Mais pour beaucoup d'autres PFAS, nos connaissances sont bien plus lacunaires. L'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) et l'Institut fédéral allemand d'évaluation des risques (BfR) ont conclu dans une étude à une corrélation entre la présence d'une certaine quantité de PFAS dans le sang et une production moindre d'anticorps après un vaccin; les PFAS rendraient donc la vaccination moins efficace. En outre, les deux institutions soulignent des effets potentiellement néfastes sur le foie, les reins ou le poids des bébés à la naissance.

### Les PFAS dans le sang de la population suisse

Lors de la phase pilote de l'Étude suisse sur la santé, initiée par l'Office fédéral de la santé publique (OFSP), une biosurveillance de plusieurs centaines d'adultes a été réalisée. Celle-ci avait entre autres pour but de mesurer les taux de différentes substances chimiques dans des échantillons de sang et d'urine et d'en étudier l'effet sur la santé. Le labora-



Illustration 1: objets ou produits qui contiennent des PFAS.

toire Analyses et références organiques de METAS a récemment publié – sur mandat de l’Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV) et avec d’autres partenaires – une étude scientifique<sup>1</sup> portant sur le taux de 30 PFAS dans le sérum sanguin de 630 personnes des cantons de Berne et Vaud.

Ces premiers résultats ont montré que la population de ces deux cantons est autant exposée aux PFAS recensés que la population d’autres pays européens. L’exposition au PFOS s’est notamment révélée préoccupante, car près de 4% des participantes et participants en présentaient une quantité qui dépassait le seuil recommandé. Bien que l’Union européenne et la Suisse aient interdit, à quelques exceptions près, cette substance il y a plus de dix ans, celle-ci subsiste dans le corps et l’environnement en raison de sa persistance et de sa grande mobilité.

De plus amples information sur cette étude sont disponibles sur la page<sup>2</sup> de l’OFSP.

### Analyse de poissons dans les lacs suisses

Pour réduire la quantité de PFAS que nous absorbons, des quantités maximales ont été définies en

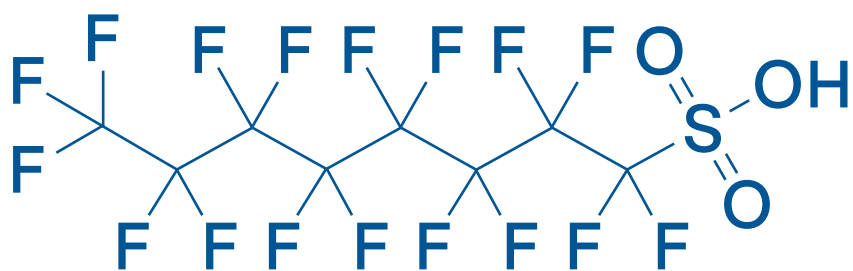
particulier pour l’eau potable et certains aliments d’origine animale.

En 2021 et 2022, le laboratoire Analyses organiques de l’OSAV avait examiné des poissons de différents lacs suisses à la recherche de PFAS. Les résultats de l’étude ont fait l’objet d’une publication<sup>3</sup> par METAS en 2023. Sa conclusion: les poissons issus de capture sauvage qui ne proviennent pas de lieux contaminés connus peuvent également être une source de PFAS chez l’humain.

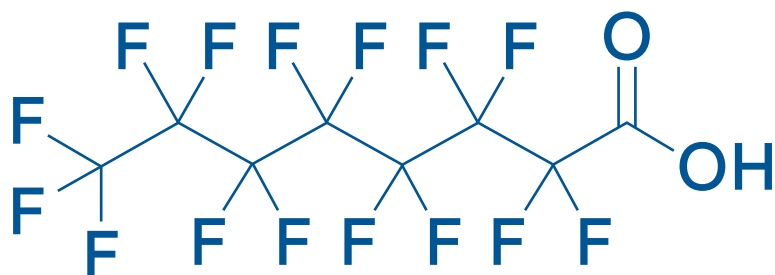
### Projets en cours

Actuellement, le laboratoire Analyses et références organiques effectue sur mandat de l’OSAV un monitoring approfondi des PFAS dans le lait, les produits

- 1 Jaus, A., Fragnière Rime, C., Riou, J., Brüscheweiler, B.J., Bochud, M., von Goetz, N. (2025). Serum biomonitoring of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the adult population of Switzerland: Results from the pilot phase of the Swiss health study. *Environment International*, 198, 109382. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109382>
- 2 <https://www.bag.admin.ch/fr/projets-de-biosurveillance-humaine-en-suisse>
- 3 Jaus, A., Rhyn, P., Valentini, J. (2023). Trace Level Analysis of Per- and Polyfluorinated Substances in Fish from Various Regions in Switzerland. *Toxics*, 11(11), 909. <https://doi.org/10.3390/toxics11110909>



PFOS (perfluorooctanesulfonic acid)



PFOA (perfluorooctanoic acid)

Illustration 2 : structure chimique des deux sortes de PFAS PFOS et PFOA.

laitiers et les aliments végétaux. Le défi réside dans la définition d'une méthode assez sensible mais robuste pour repérer les ultratracés de PFAS tout en préparant et en analysant efficacement plusieurs centaines d'échantillons. L'Association des chimistes cantonaux de Suisse a pour sa part récemment publié les résultats pour le lait, les produits laitiers et d'autres échantillons d'origine animale. Si ces résultats indiquent que les denrées alimentaires sur le marché suisse respectent en grande partie les valeurs maximales en vigueur, ils montrent aussi que les PFAS sont largement répandus et détectables en petites concentrations dans toutes les catégories de denrées alimentaires. Il convient donc de mener sans tarder d'autres études.

Par ailleurs, le laboratoire, toujours sur mandat de l'OSAV et en collaboration avec l'OFSP, mène actuellement une campagne d'analyse des PFAS dans le sérum d'enfants et d'adolescents. Les 800 échantillons sanguins proviennent de l'étude menuCH-Kids, une enquête menée en Suisse visant à mieux comprendre les habitudes alimentaires des enfants et adolescents âgés de 6 à 17 ans. Ils seront analysés au cours du premier semestre 2026. La chasse aux PFAS continue. ●

Objet

# PFAS : le voile invisible qui recouvre le quotidien

Les substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS) sont utilisées sur les textiles fonctionnels pour leurs propriétés à la fois déperlantes et perméables à l'air. Mais où ces composés se déposent-ils lors de la fabrication, de l'utilisation, de l'usure et de l'élimination des textiles ? De quelles substances l'environnement hérite-t-il ? Ces questions complexes se heurtent à un manque de données. Or une chose est sûre, sans mesures précises et comparables, impossible de faire le point sur ces polluants microscopiques. La métrologie fournit la base permettant de détecter les PFAS, de fixer des valeurs limites et d'accompagner l'innovation technique de manière responsable.

# PFAS: harmoniser et améliorer l'analyse de ces polluants éternels

Les PFAS, substances persistantes et bioaccumulables, suscitent un intérêt croissant en raison de leurs effets sanitaires. Le laboratoire Analyses et références organiques de METAS a reconnu le besoin et participe au projet métrologique européen 23IND13 ScreenFood. Celui-ci vise à développer des outils métrologiques, incluant matériaux de référence et méthodes analytiques, pour garantir des mesures fiables et comparer les données à l'échelle européenne.

Marina Chardonnes

### Un enjeu majeur de recherche et de régulation

Ces dernières années, les PFAS suscitent un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique, des autorités sanitaires et du grand public. En raison de leurs caractéristiques (persistance, bioaccumulation, effets néfastes pour la santé), les PFAS sont désormais considérés comme un enjeu majeur de recherche et de régulation.

Les PFAS constituent une famille très large, regroupant plus de 4000 composés différents. Cependant, seuls quelques-uns d'entre eux ont été suffisamment étudiés pour disposer de données toxicologiques et environnementales complètes. C'est pourquoi, à ce jour, seul quatre PFAS, notés PFOA, PFOS, PFNA et PFHxS, sont réglementés au niveau européen.

### Une réglementation pour protéger la santé publique

La Commission européenne a fixé pour ces quatre composés des valeurs limites maximales dans certains aliments (EU 2023/915) ainsi que des limites de quantification (EU 2022/1431) à respecter lors des analyses. La limite de quantification correspond à la plus petite quantité d'une substance qu'une méthode (incluant la préparation de l'échantillon et la quantification de la substance) est capable de quantifier de manière fiable et précise. En dessous de cette limite, on peut détecter une présence, mais on ne peut pas définir la quantité exacte. Ces mesures de la Commission européenne visent à protéger

la santé publique et à harmoniser la surveillance de ces substances à l'échelle des États membres. Depuis 2024, la Suisse a en partie repris ces recommandations européennes sur les teneurs maximales autorisées.

Les autres PFAS restent encore non réglementées et de nouvelles apparaissent, appelées *emerging PFAS*, afin de remplacer celles qui sont régulées.

### PFAS dans le projet 23IND13 ScreenFood

Le projet ScreenFood a pour objectif de développer les outils métrologiques nécessaires à l'analyse fiable des PFAS dans les denrées alimentaires. Il englobe la mise au point de méthodes analytiques robustes et la production de matériaux de référence certifiés, essentiels pour assurer la traçabilité et la comparabilité des mesures réalisées par les laboratoires.

En ligne avec les recommandations européennes en matière de surveillance des PFAS, ScreenFood participe à la construction d'un réseau métrologique capable de soutenir l'harmonisation et la reconnais-



Illustration 1: logos du projet.

sance internationale des résultats analytiques. Le projet, financé par le réseau Euramet, s'étend sur trois ans à partir de 2024 et rassemble METAS, des partenaires industriels, des acteurs académiques ainsi que plusieurs laboratoires et instituts étrangers.

Le projet se divise en plusieurs lots de travaux (work packages, WP) selon l'implémentation ci-dessous:

METAS participe principalement au développement de matériaux de référence certifiés (WP1), à l'élaboration de méthodes analytiques (WP2) et à l'organisation d'un test interlaboratoires utilisant les matériaux de référence produits dans le WP1 (WP4). Étant donné que le WP4 n'a pas encore démarré et que les WP1 et WP2 sont déjà bien avancés, cet article se concentre davantage sur ces deux volets.

#### **Le développement de matériaux de référence certifiés (CRM)**

Les matrices des matériaux de référence ont été sélectionnées afin de répondre à des besoins analy-

tiques concrets. Deux types de matrices ont été retenus: une sauce tomate et un produit à base de céréales destinée à l'alimentation des enfants. Ces choix reposent sur plusieurs critères: d'une part, il n'existe pour l'heure pas de matériaux équivalents ou similaires sur le marché. D'autre part, ces matrices sont complémentaires dans leur composition (p. ex. teneurs différentes en eau, en matière grasse, en amidon, en sucre) ce qui permet de couvrir une large plage analytique.

Au final, ces deux matrices représentent un défi analytique majeur, car les limites de quantification imposées par les recommandations européennes sont particulièrement basses pour ce type de produits. Elles constituent donc des candidates idéales pour un développement métrologique exigeant.

Une fois les matrices définies, les analytes ont été sélectionnés principalement en fonction de la législation et des préoccupations sanitaires actuelles. Au total, 24 PFAS ont été retenues.



Illustration 2: Chromatographe liquide (LC) couplé à un spectromètre de masse moléculaire (MS/MS).

## Plan de mise en œuvre

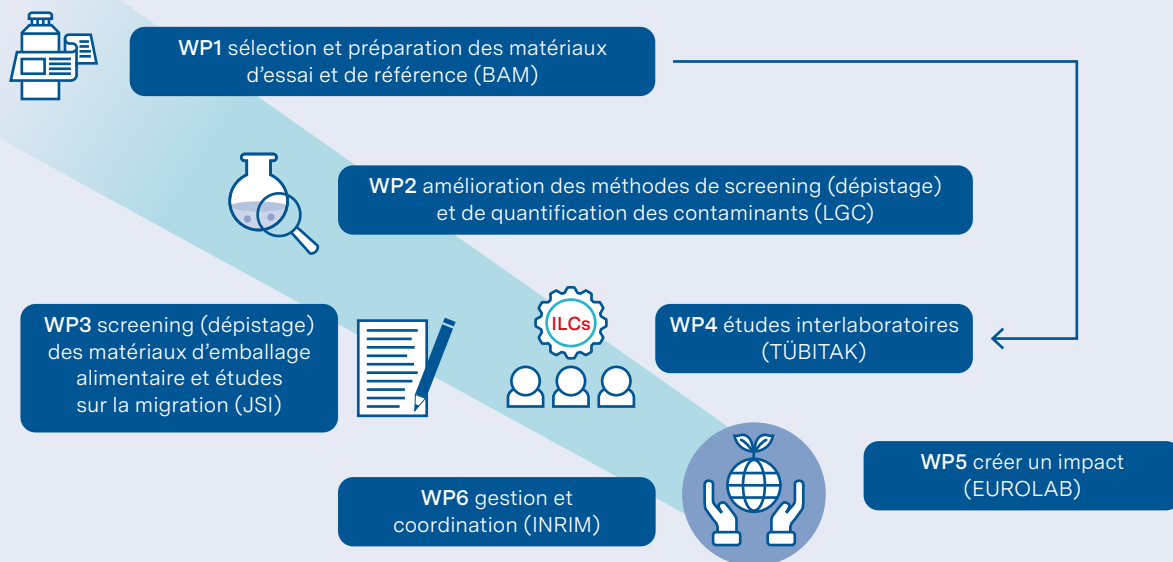


Illustration 3 (inspirée d'INRIM) : implémentation des WP dans le projet 23IND13 ScreenFood. Entre parenthèses, les instituts responsables correspondants.

## Méthode d'analyse



Illustration 4 : workflow standard d'analyse des PFAS dans une matrice alimentaire.

Ces deux matériaux de référence (sauce tomate et produit pour enfant à base de céréales qui contiennent les 24 PFAS) sont actuellement en cours de création par l'institut national de métrologie turque (TÜBITAK). Il n'existe pas de méthode universelle pour concevoir des matériaux de référence dans les matrices alimentaires. La procédure diffère fortement en fonction de la matrice choisie et des analytes ciblés. Pour obtenir des matériaux de référence de qualité, il est essentiel de veiller à ce que les composés (PFAS) ne soient pas altérés durant le processus de préparation. Leurs propriétés spécifiques, telles que leur volatilité, leur photodégradation ou leur tendance à s'adsorber sur certaines surfaces, doivent donc être prises en compte. C'est pourquoi différentes approches expérimen-

tales sont actuellement testées par TÜBITAK afin d'identifier les conditions les plus adaptées. METAS et d'autres partenaires sont responsables de faire les tests préliminaires sur les matériaux de référence créés par TÜBITAK afin de sélectionner les meilleures conditions pour la conception de ces matériaux.

Ces matériaux seront par la suite utilisés pour les tests interlaboratoires prévus au WP4. Les résultats de ces tests permettront entre autres d'établir la valeur de référence certifiée et d'estimer l'incertitude associée, conformément aux exigences métrologiques internationales.

### Le développement des méthodes analytiques

Le développement de méthodes est le processus consistant à élaborer et à optimiser une procédure analytique permettant de mesurer des analytes, dans ce cas les PFAS, de manière fiable dans une matrice donnée, dans ce cas la sauce tomate et un produit à base de céréales pour enfants. Il s'agit d'identifier les étapes nécessaires (extraction, purification, concentration, etc.), de choisir les paramètres pertinents, puis d'ajuster progressivement ces conditions pour obtenir une méthode performante en termes de sensibilité, de sélectivité, de précision et de robustesse.

Le principal défi analytique dans ce projet réside dans la capacité de la méthode à atteindre les limites de quantification requises tout en maintenant une précision et une justesse suffisantes. Cette exigence est cruciale pour pouvoir caractériser correctement les matériaux de référence.

La préparation des échantillons constitue une étape clé pour réduire les limites de quantification et doit être soigneusement optimisée.

L'analyse des PFAS dans les denrées alimentaires suit généralement un processus similaire à celui de l'illustration 4.

Dans un premier temps, l'échantillon est homogénéisé. La procédure consiste ensuite à extraire uniquement les composés d'intérêt (ici les PFAS) tout en limitant la coextraction d'autres constituants tels

que les sucres ou les pigments. Enfin, pour pouvoir mesurer des quantités aussi faibles, l'extrait doit être concentré avant l'analyse.

Les composés d'intérêt sont ainsi identifiés et quantifiés par chromatographie liquide (LC) couplée à un spectromètre de masse moléculaire (MS/MS) (voir illustrations 2 et 6). En bref, les PFAS sont séparés au cours du temps par la LC et sont détectés par

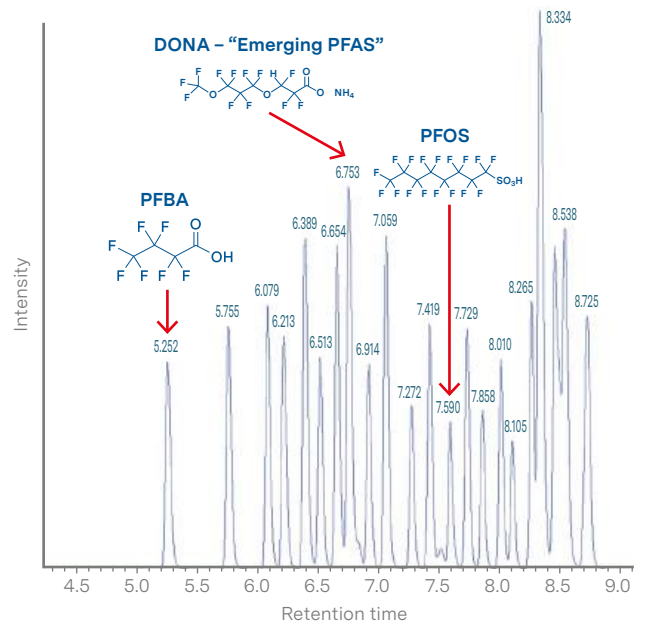


Illustration 5: chromatogramme LC MS/MS avec les PFAS: PFBA (acide Perfluorobutanoïque), DONA (sel d'ammonium de l'acide perfluoro-4,8 – dioxa-3H-nonanoïque) et PFOS (acide Perfluorooctanesulfonique).

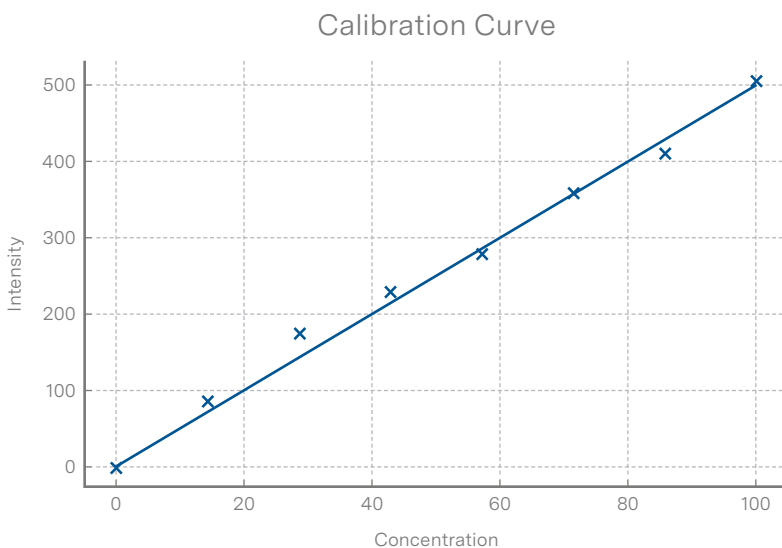


Illustration 6: droite d'étalonnage avec sur l'axe des X la concentration de l'analyte et sur l'axe des Y l'intensité mesurée par le détecteur.

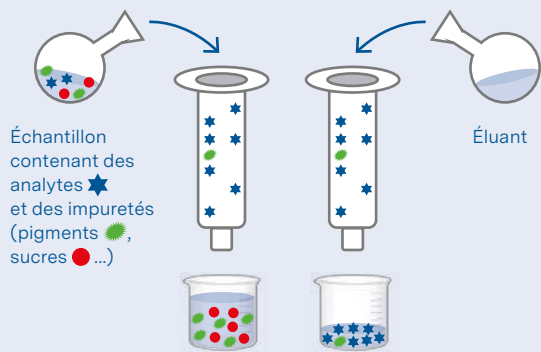


Illustration 7: principe de fonctionnement d'une SPE.



Illustration 8: chargement des échantillons dans une cartouche SPE.

Illustration 9: extrait purifié après l'élimination des impuretés.

MS/MS sous forme de pics. Chaque pic correspond à un composé et son intensité est proportionnelle à la quantité présente dans l'échantillon (voir illustration 5). La quantification se fait ensuite à l'aide d'une droite d'étalonnage, construite à partir de solutions de concentrations connues (voir illustration 6), idéalement certifiées.

Actuellement, METAS et les autres partenaires testent plusieurs approches pour 1) l'extraction des analytes (PFAS) de la matrice (sauce tomate) et 2) la préconcentration et la purification de l'extrait, afin d'éliminer les substances coextraites avec les PFAS qui perturbent leur détection et quantification. Particulièrement à METAS, une extraction liquide-liquide et une extraction par paire d'ions ont été évaluées pour l'étape d'extraction, tandis que les méthodes QuEChERS (Quick Easy Cheap Effective Rugged and Safe) et l'utilisation de différentes cartouches SPE (Solid Phase Extraction) ont été étudiées pour la purification et la préconcentration. La SPE repose sur le passage de l'échantillon à travers une phase solide (résine) dont les propriétés chimiques permettent de retenir sélectivement les analytes recherchés avant de les relarguer dans une petite quantité de solvant, permettant ainsi leur isolation, purification et concentration avant l'analyse (voir illustrations 7, 8 et 9). Concrètement, les PFAS sont d'abord retenues sur la résine, tandis que les sucres, pigments et autres composés qui n'interagissent pas avec celle-ci traversent la cartouche sans être retenus et sont éliminés. Ensuite, un solvant spécifique est utilisé pour rompre l'interaction entre les PFAS et la résine, ce qui permet de les éluer. On obtient alors une solution contenant le solvant et les PFAS, tandis que les composés indésirables ont été éliminés lors des étapes précédentes.

Une fois le développement de la méthode achevé (c'est-à-dire une fois les conditions optimales déterminées), celle-ci passera à la phase de validation. Cette étape consistera à évaluer différents paramètres, tels que la robustesse, la précision et la justesse. Elle permettra également de déterminer l'incertitude de mesure, un élément essentiel pour la quantification des substances analysées.

La méthode validée sera utilisée pour analyser les matériaux de référence lors du test interlaboratoire (WP4).

#### Garantir des mesures fiables pour la quantification des PFAS

Le projet européen **ScreenFood** vise à améliorer l'analyse des PFAS dans les aliments en développant des **matériaux de référence certifiés** et des **méthodes analytiques robustes**. Ces outils garantissent des mesures fiables, comparables entre laboratoires et conformes aux limites réglementaires européennes. METAS participe activement au développement de ces matériaux et méthodes. ●

<https://www.screenfood.eu/>

The project 23IND13 ScreenFood has received funding from the European Partnership on Metrology, co-financed from the European Union's Horizon Europe Research and Innovation Programme and by the Participating States.



Prestations

## Nouvel étalon primaire pour l'étalonnage du débit avec de l'hydrogène

METAS a développé un nouvel étalon primaire pour étalonner le débit avec de l'hydrogène. Il l'a appelé  $pVTt$  en référence à la pression ( $p$ ), au volume ( $V$ ), à la température ( $T$ ) et au temps ( $t$ ), qui y jouent un rôle central. Cette installation, qui fonctionne aussi bien avec de l'hydrogène pur qu'avec du gaz naturel enrichi à l'hydrogène, sert à étalonner les tubes de Venturi à débit critique et les compteurs de gaz.

D<sup>r</sup> Hugo Bissig, Sven Hellmüller

La loi des gaz parfaits  $p V = n R T$ , bien établie en physique et en métrologie, met en relation la pression ( $p$ ), le volume ( $V$ ), la quantité de matière ( $n$ ), la température absolue ( $T$ ) et la constante universelle des gaz parfaits ( $R$ ). Le principe de mesure utilisé par l'installation  $pVTt$  découle de cette relation et permet de déterminer la quantité de gaz réel contenue dans un certain volume, en tenant compte du facteur de compressibilité.

### Les volumes de référence immergés dans l'eau

À droite sur le schéma de l'installation (voir illustration 1) se trouvent les cinq volumes de référence

(trois d'une capacité de 200 l, un de 50 l et un de 10 l) dans lesquels le gaz qui a parcouru le circuit de mesure est collecté. Ces cinq volumes sont immergés dans l'eau, afin que leur température intérieure reste stable et homogène.

L'immersion dans l'eau est indispensable, car le gaz qui arrive dans les volumes apporte de l'énergie, qui fait monter la température alors que la quantité croissante de gaz augmente la pression. Pour refroidir le gaz dans les volumes, il faut lui retirer de la chaleur. Cette dernière passe du volume à l'eau froide à travers la paroi, puis est aspirée au moyen

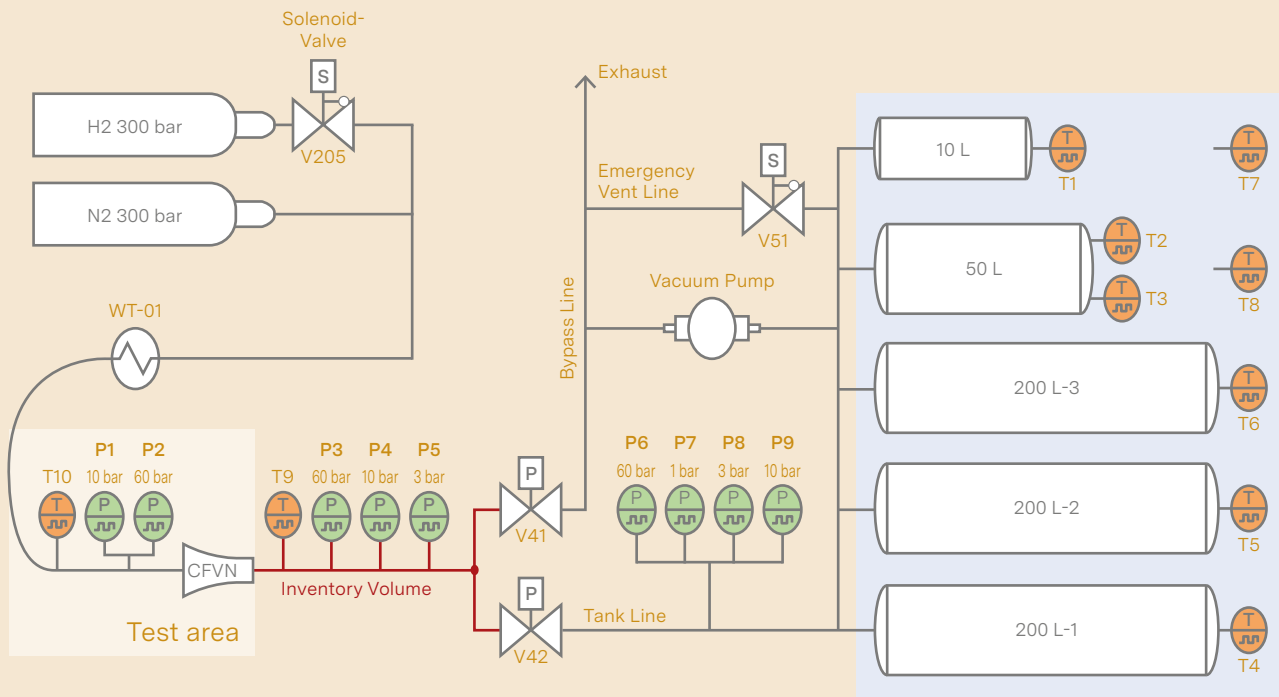


Illustration 1: schéma PID de l'installation pVTt avec, au milieu, le circuit de mesure et les vannes, et, à droite, les volumes immergés dans l'eau.



Illustration 2: aperçu de l'installation pVTt avec l'ordinateur de commande (devant à gauche), le circuit de mesure avec vannes (au fond à gauche), les volumes immergés dans l'eau (au fond à droite) et le boîtier électronique (devant à droite).

d'un échangeur de chaleur. Ainsi, l'eau et le gaz des volumes sont refroidis et maintenus à 20 °C après l'arrêt du débit.

### **Comment la quantité de gaz collectée est-elle déterminée ?**

Avant une mesure, le volume de référence est aspiré afin qu'il ne contienne plus qu'une infime quantité de gaz. La pression et la température sont mesurées. Ainsi, la densité du gaz dans les conditions du début de la mesure peut être déterminée. Au bout du circuit, le gaz est dévié vers le volume de référence en débit constant. Le moment de cette déviation marque le début de la mesure. À mesure que le gaz arrive dans le volume de référence, la pression et la température augmentent.

Dès que la pression souhaitée est atteinte, le gaz reprend son cours initial, toujours en débit constant. Cette nouvelle déviation marque la fin de la mesure; la période entre les deux déviations correspond donc à sa durée. Enfin, la température du gaz dans le volume de référence, et par conséquent la pression, sont stabilisées. Après un temps d'attente, les capteurs de pression et de température indiquent que plus rien ne change. À ce moment, la pression et la température du gaz peuvent être déterminées et la densité calculée.

Le débit massique moyen est calculé d'après la densité au début et à la fin de la mesure, la durée de celle-ci et le volume du conteneur de référence étalonné. Si nécessaire, le débit volumique est obtenu en divisant le débit massique par la densité dans le circuit.

### **Qu'est-ce que les tubes de Venturi à débit critique ?**

Les tubes de Venturi à débit critique sont utilisés en mécanique des fluides pour générer un flux de gaz constant. La forme du col est définie dans la norme ISO 9300:2022. Si le débit est assez fort à l'entrée du tube, le gaz traverse le col à la vitesse du son. Ce débit est maximal et indépendant de la pression de l'autre côté du tube (débit critique). Les tubes de Venturi étalonnés sont ensuite utilisés comme étalons de référence pour l'étalonnage des instruments de mesure.

### **Plage de débit utilisée**

L'installation est conçue pour l'étalonnage de compteurs de gaz domestiques et de compteurs de référence sur les dispositifs d'étalonnage. On vise un débit entre 0,1 g/min et 250 g/min pour une pression allant jusqu'à 40 bar et une incertitude de mesure élargie de 0,3%. Des mesures sont actuellement en cours pour identifier les principaux facteurs d'incertitude et leur influence, et valider l'installation. ●



La métrologie en général

# Du futur de la métrologie

En 2025, la communauté métrologique a célébré le 150<sup>e</sup> anniversaire de la Convention du Mètre, jalon s'il en est vers un système d'unités harmonisé<sup>1</sup>.  
Pouvons-nous nous en inspirer pour penser l'avenir de la métrologie ?  
Y a-t-il dans le présent des signes qui nous permettent d'imaginer des scénarios pour la métrologie de demain ?

EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR METROLOGIE  
- SWISS INSTITUTE OF METROLOGY

Cette image a été générée par l'IA.

D' Hugo Lehmann

Paré de son esprit scientifique, le métrologue accueillera sans doute avec scepticisme l'idée de prédire l'avenir, et s'en tiendra à Niels Bohr et à sa boutade « *Les prévisions sont difficiles – surtout lorsqu'elles concernent l'avenir* ». Mais dans d'autres domaines tels que les trajectoires des planètes, les physiciens ont moins de scrupules à prédire le futur à l'aide de formules vérifiées de manière expérimentale. Quoi qu'il en soit, une chose est sûre : l'avenir de la société ou l'évolution des indices boursiers n'obéissent à aucune mécanique céleste.

Cependant, l'ici et maintenant cache très probablement l'un ou l'autre signe nous permettant de prédire l'évolution. Ou, comme l'a si justement écrit l'auteur de science-fiction William Gibson : « *L'avenir est déjà là. Il est juste inégalement réparti* ». En fait, le présent est jalonné de signes précurseurs. Le problème réside dans le fait que ces derniers ne sont pas toujours perçus comme tels ou qu'ils ne sont perceptibles que pour certaines couches sociales.

Mais si l'avenir était déjà présent, une intelligence artificielle (IA) bien entraînée devrait, en principe, parvenir à dégager ces signes à partir des données fournies. Afin de générer un scénario d'avenir pour la métrologie, nous avons interrogé trois IA génératives : Copilot<sup>2</sup>, ChatGPT<sup>3</sup> et Perplexity<sup>4</sup>.

## L'IA, un détecteur de signes prémonitoires

Voici le prompt que nous avons donné aux trois IA génératives :

« *Peux-tu me citer quelques signes avant-coureurs qui vont profondément transformer la métrologie au cours des 5 à 10 prochaines années ?* »

Les réponses des IA sont résumées dans les tableaux 1 à 3. Nous les avons abrégées par souci de lisibilité.

## Discussion

L'IA, les jumeaux numériques, les technologies quantiques, la métrologie dans les chaînes de valeur et les réseaux d'instruments de mesure : voilà les principaux « porteurs d'avenir » mentionnés par les trois IA. Quant à la durabilité, elle n'apparaît que dans les propositions de Copilot et ChatGPT. En outre, il est intéressant de noter que ChatGPT mentionne les effets sociaux tels que la confiance dans les résultats de mesure et le manque de main d'œuvre qualifiée (pas reproduit dans le tableau ci-dessus par manque de place) sans que l'on ne le lui ait explici-

<sup>1</sup> <https://www.bipm.org/en/bipm-anniversary>

<sup>2</sup> Microsoft. (2026). M365 Copilot (GPT-5 Chat Model), <https://m365.cloud.microsoft/chat/>

<sup>3</sup> OpenAI. (2026). ChatGPT (GPT-5.2), <https://chatgpt.com/>

<sup>4</sup> Perplexity AI. (2026). Perplexity AI – plateforme de recherche et de réponses basée sur l'IA, <https://www.perplexity.ai>

Réponses de Microsoft Copilot à une question ouverte sur les signes avant-coureurs de la métrologie (5 à 10 ans):

Signal #	Copilot
1	<p><b>Thème</b> Métrologie quantique</p> <p><b>Signal</b> Progrès dans le domaine de l'informatique et de la communication quantiques</p> <p><b>Effet</b> Mesures ultraprécises du temps, de la fréquence et des champs; nouvelles normes SI possibles</p>
2	<p><b>Thème</b> Systèmes de mesure basés sur l'IA</p> <p><b>Signal</b> Intégration de l'apprentissage automatique dans les processus de mesure</p> <p><b>Effet</b> Étalonnage et détection des erreurs automatisés; instruments à étalonnage automatique</p>
3	<p><b>Thème</b> Jumeaux numériques pour les processus de mesure</p> <p><b>Signal</b> Industrie 4.0 et modèles virtuels</p> <p><b>Effet</b> Simulation et optimisation en temps réel; moins d'étalonnages physiques</p>
4	<p><b>Thème</b> Blockchain pour la traçabilité</p> <p><b>Signal</b> Importance croissante de l'intégrité des données</p> <p><b>Effet</b> Données de mesure et certificats numériques infalsifiables</p>
5	<p><b>Thème</b> Métrologie axée sur la durabilité</p> <p><b>Signal</b> Changement climatique et préservation des ressources</p> <p><b>Effet</b> Rôle central pour les mesures de CO<sub>2</sub>, d'énergie et de cycles; nouvelle métrologie «verte»</p>
6	<p><b>Thème</b> Nanotechnologie et nouveaux matériaux</p> <p><b>Signal</b> Progrès en science des matériaux</p> <p><b>Effet</b> Mesures plus précises au niveau atomique; nouveaux capteurs pour conditions extrêmes</p>
7	<p><b>Thème</b> Systèmes de mesure en réseau</p> <p><b>Signal</b> Interconnexion croissante des appareils</p> <p><b>Effet</b> Données de mesure en temps réel provenant de réseaux mondiaux; nouveaux défis en matière de qualité et de sécurité des données</p>

Tableau 1: réponses générées par Copilot au même prompt (abrégées par souci de lisibilité).

tement demandé. En général, les réponses de Perplexity sont un peu plus détaillées que celles de ses concurrents.

En dehors de ces différences, les propositions se sont révélées cohérentes et exemptes d'hallucinations. Afin de corroborer les réponses des trois IA, nous avons demandé à Copilot de résumer les signaux mentionnés ci-dessus en six champs. Ci-après, la substantifique moelle.

### Les six développements essentiels de la métrologie (5 à 10 ans)

#### 1. Systèmes de mesure basés sur l'IA et dominés par les logiciels

Les chaînes de mesure sont pilotées par les données; l'IA prend en charge la détection, le contrôle et les modèles d'incertitude. La fiabilité des logiciels devient essentielle.

*Implications:* directives pour l'IA dans les chaînes de mesure, données de référence, procédures de validation des logiciels et contrôle des versions.

#### 2. Traçabilité numérique

Les étalonnages deviennent numériques, automatisés et basés sur l'état. Les certificats peuvent être lus par des machines; des pistes d'audit basées sur une API.

*Implications:* pilotage des certificats numériques, guides pour la traçabilité numérique et la conformité continue.

#### 3. Métrologie dans le processus (en ligne/en périphérie) et réseaux de mesure IoT

La mesure est effectuée directement sur la machine/le produit; des flottes de capteurs en réseau fournissent des données de qualité en temps réel.

*Implications:* étalonnage en périphérie, services de référence pour le temps/la fréquence, bancs d'essai pour les systèmes de mesure mobiles/collaboratifs.

Réponses de ChatGPT à une question ouverte sur les signes avant-coureurs de la métrologie (5 à 10 ans):

Signal #	ChatGPT
1	<p><b>Thème</b> L'IA n'est plus un partenaire d'analyse mais de mesure</p> <p><b>Signal</b> Les systèmes de mesure prennent des décisions autonomes (stratégie, interruption, réétalonnage)</p> <p><b>Effet</b> Les prescriptions de mesure conventionnelles (statiques, basées sur des normes) sont remises en question</p>
2	<p><b>Thème</b> Chaînes d'étalonnage numériques</p> <p><b>Signal</b> Certificats cloud, jumeaux numériques d'instruments de mesure, traçabilité de type blockchain</p> <p><b>Effet</b> La métrologie passe de la preuve sur papier à la preuve de confiance en temps réel</p>
3	<p><b>Thème</b> La métrologie s'intègre au cœur du processus</p> <p><b>Signal</b> Plus de techniques de mesure en cours de fabrication/en ligne avec une précision individuelle moindre, mais une intelligence des données élevée</p> <p><b>Effet</b> La métrologie en laboratoire classique perd son monopole</p>
4	<p><b>Thème</b> Incertitude de mesure dépendante du contexte</p> <p><b>Signal</b> L'incertitude de mesure davantage tributaire de l'application, du risque et du but de la décision</p> <p><b>Effet</b> Une métrologie davantage basée sur la théorie de la décision et du risque</p>
5	<p><b>Thème</b> Le logiciel devient l'instrument de mesure à proprement parler</p> <p><b>Signal</b> Systèmes de mesure de plus en plus dominés par les logiciels (capteur + modèle + IA)</p> <p><b>Effet</b> La métrologie doit sérieusement intégrer l'ingénierie logicielle</p>
6	<p><b>Thème</b> La métrologie quantique quitte le laboratoire</p> <p><b>Signal</b> Applications industrielles des capteurs quantiques (temps, gravitation, champ magnétique)</p> <p><b>Effet</b> Le savoir-faire métrologique devient encore plus spécialisé, mais aussi plus stratégique</p>
7	<p><b>Thème</b> La durabilité devient un critère de mesure</p> <p><b>Signal</b> Question de l'empreinte carbone des mesures, des appareils et des étalonnages</p> <p><b>Effet</b> La « bonne » métrologie devient écologique</p>

Tableau 2: réponses générées par ChatGPT au même prompt (abrégées par souci de lisibilité).

#### 4. Jumeaux numériques et validation virtuelle

Les représentations virtuelles des systèmes de mesure permettent la simulation, les analyses d'incertitude et la réduction ciblée de l'étalonnage physique. *Implications*: validation des modèles, critères pour les étalonnages virtuels, interfaces avec les systèmes de gestion du cycle de vie et de fabrication.

#### 5. Métrologie quantique et nouveaux capteurs

Les étalons de temps/de fréquence quantiques et les nouvelles plateformes de capteurs quantiques sont utilisables dans la pratique. *Implications*: programmes de transfert universitaires, infrastructure pour des services de temps distribués, directives sur la réintégration de capteurs innovants.

#### 6. Métrologie axée sur la durabilité et la confiance

Les mesures dans les domaines du CO<sub>2</sub>, de l'énergie et de l'économie circulaire gagnent en importance; la confiance et la traçabilité sont au centre des préoccupations. *Implications*: méthodes d'évaluation écologiques, étalonnage à distance, cadre pour le *trust by design*.

#### À METAS, avons-nous reconnu ces signes avant-coureurs ?

À l'être humain que je suis – doué d'une intelligence limitée mais naturelle –, le scénario d'avenir présenté ici paraît, tout compte fait, pertinent. Les thématiques d'avenir, du moins vu d'aujourd'hui, y figurent – ce qui n'a rien d'étonnant si on pense à la manière dont fonctionne l'IA.

Réponses de Perplexity à une question ouverte sur les signes avant-coureurs de la métrologie (5 à 10 ans) :

Signal #	Perplexity
1	<p><b>Thème</b> <b>Métrologie en ligne entièrement en réseau</b></p> <p><b>Signal</b> Les systèmes de mesure sont directement intégrés dans les lignes de production, fournissent des données en temps réel et pilotent les processus de manière automatique</p> <p><b>Effet</b> Les jumeaux numériques utilisent en permanence les données de mesure pour l'étalonnage, la surveillance et le contrôle de la qualité prévisionnel</p>
2	<p><b>Thème</b> <b>Métrologie basée sur l'IA et les données</b></p> <p><b>Signal</b> Utilisation du traitement d'images par apprentissage profond dans l'inspection optique ; logiciels générant automatiquement des programmes de mesure et modélisant l'incertitude de mesure à partir des données</p> <p><b>Effet</b> Les décisions en matière de qualité reposent de plus en plus sur des évaluations probabilistes et contextuelles de grands ensembles de données</p>
3	<p><b>Thème</b> <b>Portable, assistée par robot et sans contact</b></p> <p><b>Signal</b> Tendance vers des systèmes de mesure 3D portables et des scanners manuels directement sur la machine</p> <p><b>Effet</b> Les robots de métrologie et les cellules de mesure collaboratives permettent des mesures automatisées et répétables, même sur des composants complexes et de grande taille</p>
4	<p><b>Thème</b> <b>Nouveaux capteurs quantiques</b></p> <p><b>Signal</b> Projets de recherche sur les étalons quantiques, déjà testés comme références dans des instituts de métrologie</p> <p><b>Effet</b> Les capteurs quantiques permettent des étalons et des mesures d'une exactitude et d'une stabilité nettement supérieures</p>
5	<p><b>Thème</b> <b>Métrologie basée sur les services et le cloud</b></p> <p><b>Signal</b> La métrologie évolue vers des modèles de services et de cloud : l'évaluation, les protocoles et les comparaisons de référence s'effectuent de plus en plus à distance</p> <p><b>Effet</b> Les espaces de données partagés garantissent une traçabilité continue et permettent l'analyse comparative des processus tout au long de la chaîne de valeur</p>

Tableau 3: réponses générées par Perplexity au même prompt (abrégées par souci de lisibilité).

Les grandes absentes: la médecine, les sciences de la vie et la biotechnologie, probablement parce que dans ces domaines, les approches métrologiques ne sont pas au premier plan. À l'inverse, les thèmes liés à la numérisation, nettement mieux représentés dans l'aperçu ci-dessus, semblent plus en phase avec l'IA. L'improbable – le fortuit mais possible – ou les aspects interdisciplinaires, quant à eux, demeurent invisibles pour l'IA. L'aperçu est néanmoins une invitation bienvenue à revoir les objectifs de la recherche et de l'innovation à METAS. Un coup d'œil à notre portefeuille de projets révèle que nous menons actuellement des activités dans l'ensemble des domaines susmentionnés. Ouf! Nous avons encore une fois eu de la chance. Ou s'agit-il d'une prophétie qui se réalise d'elle-même, l'IA ayant de toute manière – à l'instar d'un serpent qui se mord la queue – puisé à des sources métrologiques? ●

«The future is already here, it's just not evenly distributed.»

William Gibson

Information, formation continue et cours

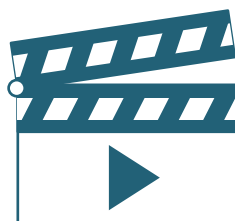
# Soif de nouvelles connaissances ?



METaspects



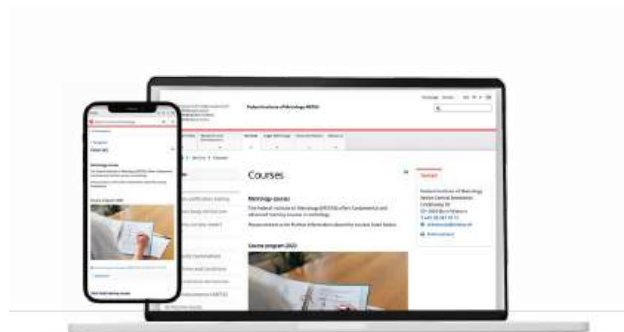
[www.metas.ch](http://www.metas.ch)  
> Documentation  
> Publications METAS



Vidéotheque



[www.metas.ch](http://www.metas.ch)  
> Documentation  
> Vidéos



[www.metas.ch](http://www.metas.ch)  
> Services  
> Offre de cours

Retrouvez toutes les publications de METAS sur son site Internet et profitez d'un condensé de connaissances sur l'Institut et la métrologie ainsi que des publications périodiques.