

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses

Band: 127 (2001)

Heft: 24

Artikel: METAS: la traque aux imprécisions

Autor: Kaestli, Françoise

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80085>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

METAS: La traque aux imprécisions

Il existe des gens qui, dans le secret d'un laboratoire dûment protégé des influences extérieures, s'acharnent patiemment à gommer les incertitudes de nos appareils de mesure et des étalons que nous utilisons quotidiennement. La mesure d'un kilogramme donnée par une balance, celle du mètre, de la seconde, du volt, est-elle crédible? La question semble stupide tant nous nous fions à nos instruments de mesure usuels. Et même dans le contexte industriel - là où le jeu se complexifie, lorsqu'il s'agit de déterminer un rayonnement optique ou une radiation, et que les unités ne sont plus décelables à l'œil nu - , la confiance dans la métrologie offerte semble de mise. Triviales pour nous, ces opérations ne le sont pas pour les gardiens émérites de nos unités de mesure, qui établissent les expérimentations à même de nous fournir les éléments de référence que nous adopterons, et calibrent les instruments de mesure aux normes ultimes de la technologie. Ces chercheurs sont ceux de l'Office fédéral de métrologie et d'accréditation, désigné par l'acronyme METAS.

Cet office a inauguré de nouveaux locaux en mai 2001. Outre qu'elle répondait à la nécessité d'augmenter les surfaces de laboratoire et de renouveler les équipements de recherche, cette extension devait aussi satisfaire à de nouvelles exigences en matière de métrologie: les bâtiments sortis de terre remplissent une fonction essentielle de protection des laboratoires contre les fluctuations émanant de l'environnement et offrent des conditions optimales pour les recherches en cours ou à venir.

La mesure du kilo s'affranchit de la matière

Sous son apparente et rassurante immuabilité, le système international (SI) d'unités de base - ou unités rationnelles M.K.S.A. (pour mètre-kilogramme-seconde-ampère) - défini par Giovanni Giorgi en 1901 se métamorphose. Ainsi, la seconde est aujourd'hui définie comme la durée de

9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césum 133; et l'unité de temps qu'elle représente est réalisée au moyen d'un étalon à césum, en l'occurrence appelé «horloge atomique». Quant au mètre, il est maintenant donné par la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde. Seule l'unité de mesure de la masse, le kilogramme, est encore basée sur un artefact matériel (fig. 1 & 2). Mais son règne sous cette forme touche aussi à sa fin et la classique référence à un cylindre de platine et d'iridium, déposé au Bureau international des poids et mesures (BIPM) à Sèvres, devrait être caduque sous peu. Plusieurs équipes de recherche s'y emploient en effet à travers le monde, et il ne reste plus qu'à voir si le kilogramme sera finalement rameillé à une masse atomique ou relié à une constante électromagnétique!

Car l'unité de masse pose plusieurs problèmes. D'abord, les instituts de métrologie ne peuvent disposer d'un étalon qu'en le comparant au prototype international, sujet à endommagement, qui est conservé à Paris. Ensuite, sa masse n'offre pas une stabilité suffisante; évoluant sous l'effet du temps et des fluctuations du milieu, elle est soumise à des phénomènes d'évaporation ou d'accumulation de matière évalués à +/- 0,5 microgrammes par année. Affranchie de la matière, la nouvelle référence de mesure apportera en revanche une précision de l'ordre de 10⁻⁸ kg, et le projet de recherche intitulé «Balance de Watt» (fig. 3) qui est mené à Berne, vise à définir le kilogramme à partir d'une constante physique fondamentale, la constante de Planck, soit une grandeur invariable par définition.

Un dispositif expérimental, ingénieux et très précis, contre-balance exactement la puissance mécanique exercée par une masse dans le champ gravitationnel, avec la puissance électromagnétique produite par le déplacement d'une bobine où circule un courant, dans un champ magnétique homogène (fig. 4 et 5).

En exprimant la puissance électrique à l'aide d'effets quantiques (Hall et Josephson), l'équation livre des rapports où la

Fig. 1: Le prototype suisse du kilogramme

Fig. 2: Manipulateur de poids robotisé pour la détermination de masse de 1 mg à 5 g

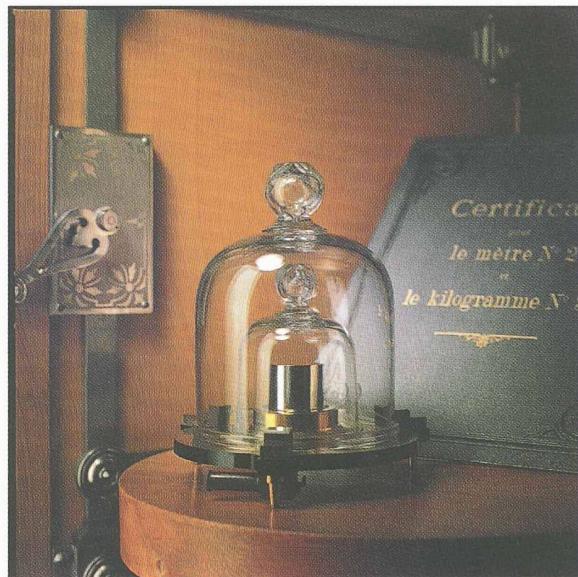
Fig. 3: Avec le projet de recherche de la balance de Watt, METAS est aux avant-postes pour la nouvelle définition de l'unité de masse, corrélée à une constante électromagnétique et non plus à un corps massif (Photos METAS)

masse devient fonction de la constante de Planck, h , une constante de la physique moderne aussi importante que la vitesse de la lumière, qui exprime le caractère discret du rayonnement électromagnétique. Au vu de sa complexité, l'expérience de la balance de Watt a été déjà lancée dans plusieurs pays, METAS s'y étant attelé dès 1997 avec un protocole de recherche qui se distingue de ceux des autres laboratoires sur quelques points essentiels. Les physiciens de METAS ont notamment choisi de mener leur étude avec une masse de 100 g - au lieu du kilogramme utilisé par les laboratoires anglais et américains -, ce qui réduit sensiblement le volume de l'expérience, notamment la taille des aimants en jeu et facilite le contrôle des données environnementales (température, humidité, vibrations).

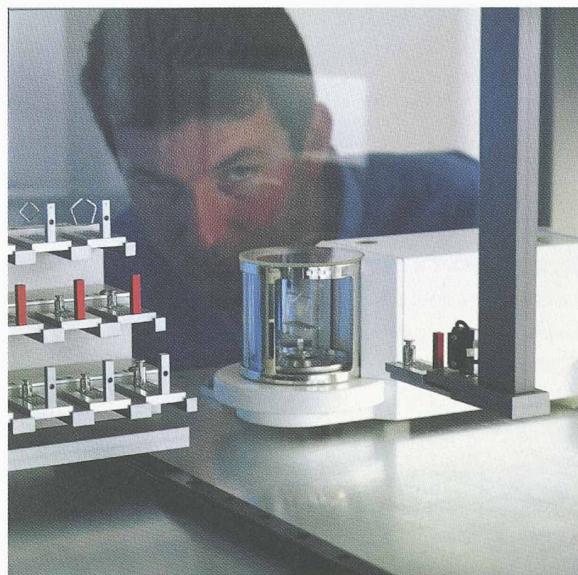
Quatre ans après le lancement du projet, les tests engagant le système complet sont en cours et les premiers résultats de détermination de la constante de Planck avec une incertitude relative de 1 ppm (une part par million) sont attendus pour la fin de 2001.

La métrologie des rayonnements ionisants et de la radioactivité

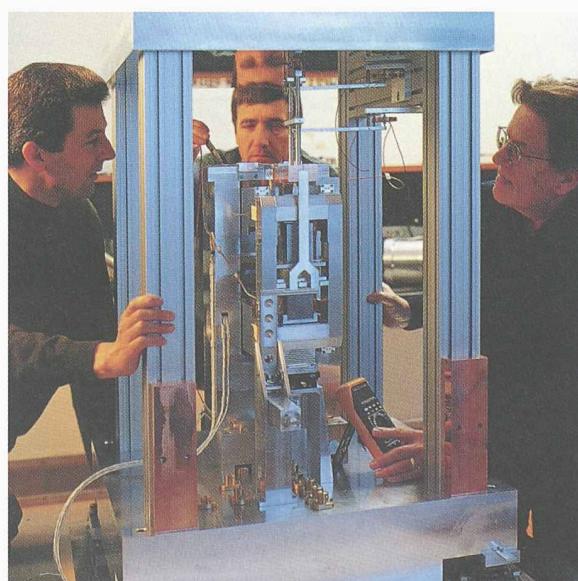
Bien qu'invisibles, les rayonnements ionisants sont omniprésents dans la nature et, en dépit de leurs dangers potentiels, l'homme en tire parti dans de très nombreux domaines. Il s'avère donc très important de pouvoir mesurer ce type de rayonnements avec toute la précision nécessaire, notamment en radiothérapie, où il s'agit d'atteindre l'effet thérapeutique voulu avec des doses aussi faibles que possibles pour éviter des effets secondaires indésirables. Aujourd'hui on mesure surtout la dose absorbée dans l'eau, exprimée en gray (énergie en joules absorbées par kilogramme d'eau) et c'est METAS qui est chargé de fournir des étalons de mesure permettant de réaliser l'unité du gray et de vérifier les dosimètres de référence des hôpitaux suisses tous les quatre ans (fig. 6 et 7). Actuellement METAS dispose des possibilités de mesure pour des rayonnements X à haute énergie et pour des rayonnements X mous. Les vérifications des dosimètres de référence se font dans les mêmes qualités de rayonnement que celles appliquées dans les hôpitaux. Pour les photons à haute énergie, les radiations sont générées par une source de cobalt ou un accélérateur d'électrons pour des tensions nominales comprises entre 4 et 21 MV. Pour les rayonnements mous, une installation à rayons X libère des faisceaux dont les tensions nominales vont de 8 à 100 kV. Quant aux possibilités de mesure s'appliquant à la vérification des dosimètres de référence pour les rayonnements d'électrons à haute énergie, elles sont actuellement en cours d'élaboration chez METAS.



1



2



3

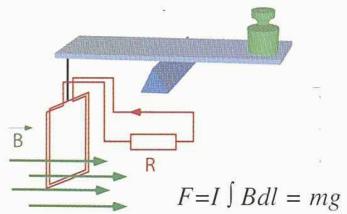
Fig. 4 : Principe de l'expérience: a) Lorsque la masse est posée sur le dispositif, celui-ci induit une force de compensation pour rétablir la position originale, b) la vitesse et la tension induites sont mesurées.

Fig. 5: Vue schématique de l'ensemble du dispositif expérimental

Fig. 6 et 7: Rayonnements ionisants. Les instruments de mesure de référence des services de radiothérapie des hôpitaux suisses sont vérifiés dans les champs de radiation d'électrons et de photons de haute énergie de METAS.
(Photo et illustrations METAS)

4 BALANCE DE WATT: PRINCIPE

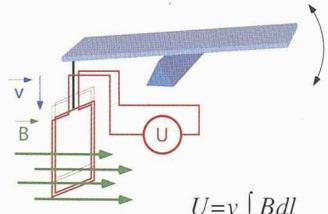
A. Force measurement



$$UI = mgv$$

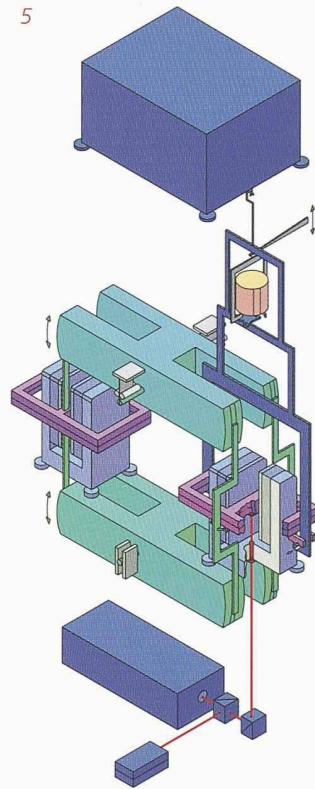
puissance électrique = puissance mécanique

B. Induced Voltage measurement



$$UI \propto h/4$$

5



Afin de pouvoir rattacher directement les possibilités de mesure mentionnées aux unités de base SI, METAS applique les principes de mesurage suivants: l'unité de dose pour le rayonnement X à haute énergie est réalisée au moyen d'un calorimètre à eau, dans lequel est mesurée la hausse de température engendrée par le rayonnement absorbé. Pour le rayonnement d'électrons à haute énergie, l'on recourt à une procédure basée sur une transformation radiochimique dans une solution aqueuse, dont la mesure quantitative est effectuée par photométrie à lumière ultraviolette. Enfin, pour les rayonnements X mous, on fait appel à des chambres à ionisation dont la construction particulière détermine les caractéristiques de manière très précise.

Pour couvrir la palette de services que les exigences légales obligent à fournir en métrologie des rayonnements ionisants et de la radioactivité, une répartition des multiples tâches a été établie au niveau suisse entre METAS et d'autres instituts

actifs dans ce domaine. Ainsi, l'Institut Paul Scherrer (PSI) à Würenlingen/Villigen et l'Institut universitaire de radiophysique appliquée (IRA) à Lausanne s'occupent de la vérification et de l'étalonnage des instruments de mesure pour la radioprotection. Le PSI est également en mesure de vérifier des appareils de détection du radon. L'IRA a en outre repris de METAS la charge de maintenir une base primaire de mesure pour l'unité d'activité qu'est le becquerel (nombre des

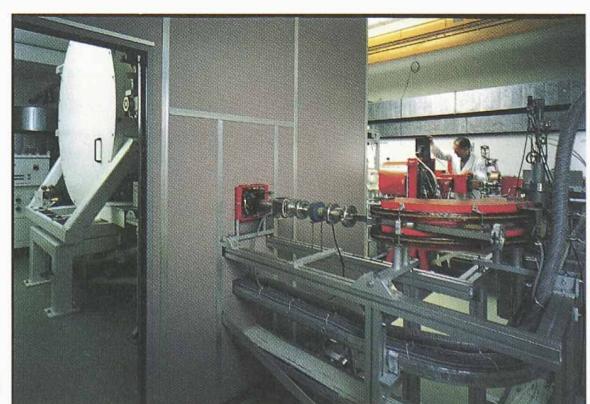
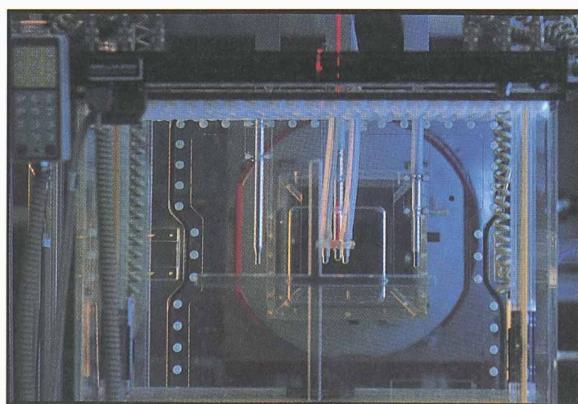


Fig. 8: La nouvelle salle CEM, dite anéchoïde, permet de mesurer le rayonnement d'antennes de téléphonie mobile.

Fig. 9: Extérieur de la chambre GTEM, de forme trapézoïdale, où il est possible d'étalonner des sondes de champ.

Fig. 10: L'utilisation de sondes meilleur marché et plus simples est préconisée dans certains cas; l'étalonnage peut alors se faire dans la cellule GTEM. (Photos METAS)

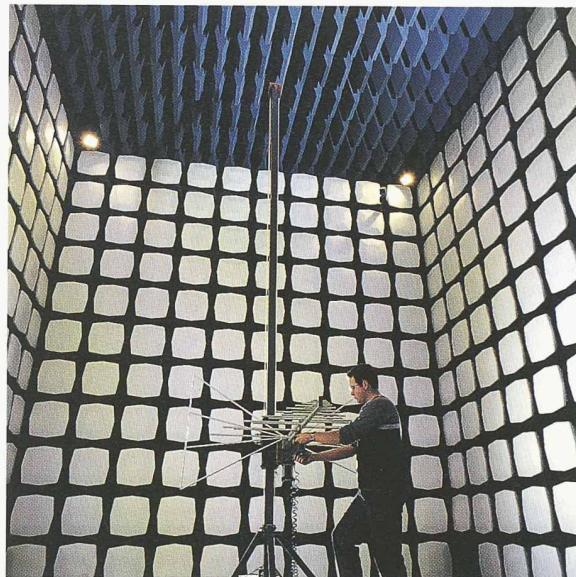
désintégrations d'un nucléide par seconde), et d'offrir des services dans le domaine de la métrologie de la radioactivité, par exemple pour des laboratoires de surveillance de l'environnement ou de médecine nucléaire et ce, en étroite collaboration avec l'entreprise *Heider* à Winterthour. L'IRA est encore responsable de vérifier les dosimètres de référence employés en radiothérapie pour des rayons X dans le domaine de 100 kV à 300 kV, ainsi que les instruments de mesure utilisés pour le contrôle des installations de radiodiagnostic.

Définition du volt et ondes électromagnétiques

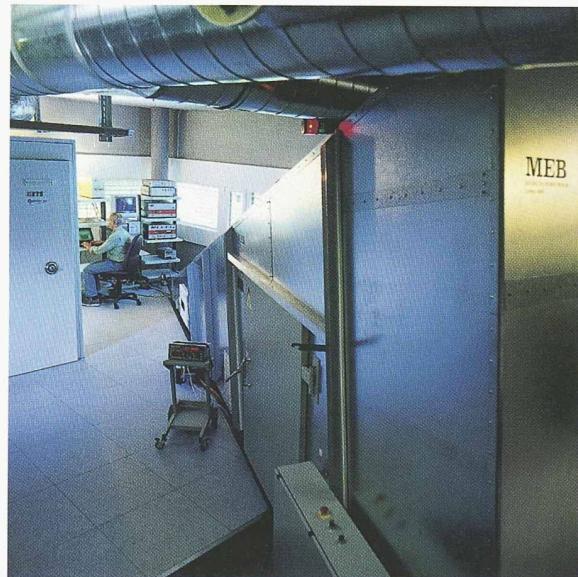
Curieuses installations propres à hanter le décor d'un film peuplé de robots futuristes, que celles exploitées par METAS au département d'énergie et puissance électriques, sous les noms de code GTEM (pour «Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode») et CEM (halle de mesure de la compatibilité électromagnétique). Les dispositifs techniques sans cesse renouvelés que nous employons ont en effet pour corollaire une charge croissante de l'environnement en ondes électromagnétiques. Commandes électroniques de puissance et d'éclairage, téléphones mobiles, appareils à micro-ondes, ordinateurs personnels et autres acquisitions techniques perturbent les réseaux d'électricité et de câbles, ainsi que les appareils qui y sont connectés par des signaux parasites et des champs électromagnétiques. Afin d'assurer un fonctionnement sans faille de tous les produits électrotechniques et de protéger l'homme et l'environnement on fixe, au niveau national et international, des valeurs limites pour ces grandeurs.

La téléphonie mobile, qui est une des branches de l'économie enregistrant aujourd'hui la plus forte croissance, contribue fortement à l'électrosmog. Afin de protéger la population, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) a fixé des valeurs limites aux intensités de champ. La capacité d'un appareil ou d'une installation à fonctionner sans perturbation dans de tels champs est appelée compatibilité électromagnétique (CEM). Les appareils électroniques doivent donc pouvoir être utilisés sans heurts dans cet environnement, ne pas émettre d'ondes prohibées, et leurs fabricants sont tenus d'apporter la preuve du respect de la CEM. De plus, les examens correspondants demeurent encore fort complexes et il s'agit de les simplifier. Pour toutes ces raisons, les mesures dans le domaine de la CEM revêtent une grande importance pour l'économie et la politique environnementale.

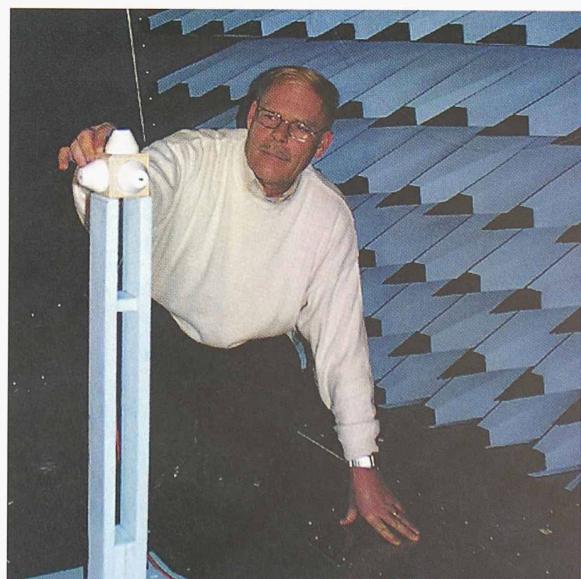
La halle CEM (fig. 8) réalisée dans le nouveau bâtiment permet à METAS d'apporter son appui en la matière. Dans sa



8



9



10

Fig. 11: Façade sud du bâtiment

Fig. 12: Aile du bâtiment comprenant des laboratoires souterrains

Fig. 13: Centrale de climatisation

Fig. 14: L'enveloppe de cuivre de la façade.
(Photos et illustration METAS)

configuration de base, elle est absolument dépourvue d'écho pour les ondes électromagnétiques comprises dans la bande de fréquence allant de 30 MHz à 3 GHz, si bien qu'elle se prête tout particulièrement à l'étalonnage d'antennes, à la mesure de champs électromagnétiques dans l'environnement ou, encore, à des tests en conditions de laboratoire. Moyennant l'ajout d'un sol conducteur, elle peut être rapidement transformée en un laboratoire électromagnétique à demi-écho. Cette halle remplit ainsi les exigences d'un examen CEM conforme aux normes édictées par la CEI (Commission électrotechnique internationale) pour les appareils de mesure soumis à l'obligation d'approbation.

Les mesures effectuées sur des antennes sont délicates et prennent du temps. Or dans de nombreux cas, on peut se borner à une mesure de champ, réalisable au moyen d'une sonde à moindre coût et plus simple à utiliser, telles qu'on les trouve en grand nombre dans le commerce. METAS soutient ces efforts d'économie en étalonnant ces sondes dans une cellule GTEM spéciale (fig. 9 et 10).

La CEM avec sol conducteur complète la technique de mesure par champs inducteurs dans la bande de fréquence inférieure à 200 MHz. Dans ce nouveau laboratoire, les chercheurs développent des méthodes de mesure inédites et améliorent les méthodes existantes, des travaux qui trouveront leur aboutissement dans la normalisation de la CEI.

On étudie par exemple l'énergie à haute fréquence dissipée aux raccords et le long des conducteurs (distribution d'électricité, transmission d'informations). Enfin, ces locaux permettent aussi l'étalonnage des systèmes de mesure correspondants.

METAS, vue d'ensemble des prestations

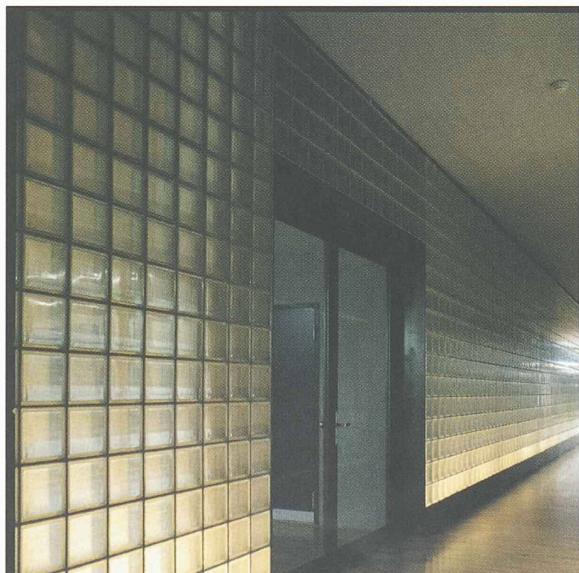
METAS n'échappe pas à la tendance actuelle de la technique qui traque la matière avec toujours plus de finesse. Dans la mesure où les progrès en métrologie découlent de percées scientifiques, l'office se doit même de devancer cette évolution afin d'offrir aux industriels et aux chercheurs des outils de mesure plus précis et plus fiables. Les développements de l'Office fédéral de métrologie et d'accréditation sont menés dans un cadre international indispensable à la comparaison des étalons et à l'évolution du système d'unité international (SI).

Parmi les nombreux domaines d'activités couverts par METAS, citons trois axes de travail fondamentaux:

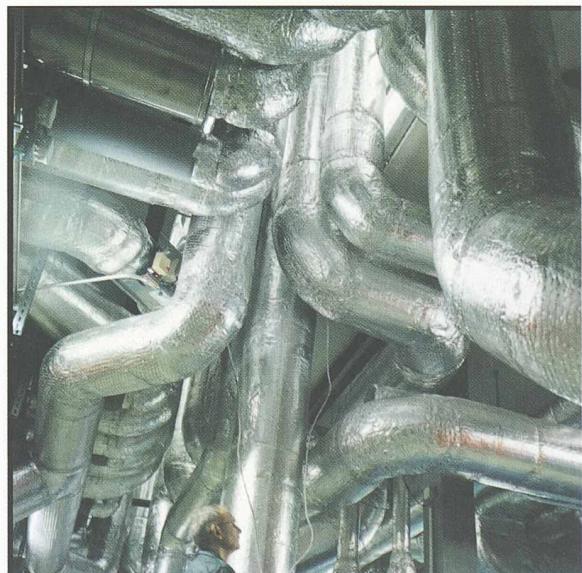
- mécanique, rayonnement et métrologie légale,
- électricité et métrologie pour l'environnement,
- service d'accréditation suisse.

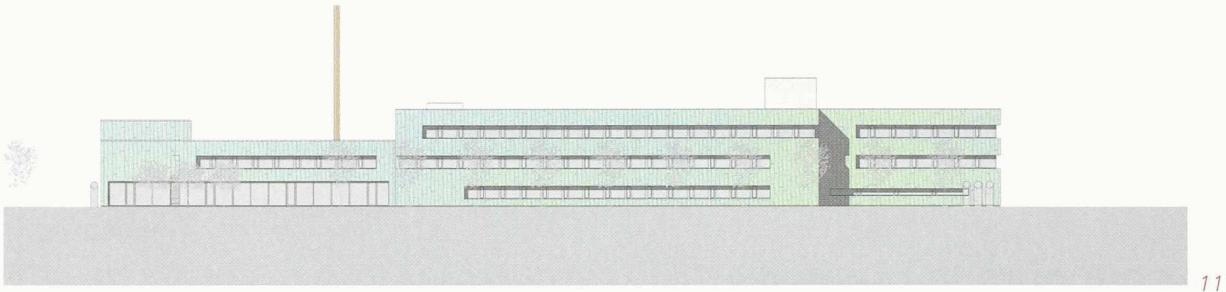
Le premier regroupe la recherche et l'étalonnage dans les domaines de la longueur, de l'optique, de la masse et des unités dérivées, de la thermométrie et du rayonnement ionisant. Le second concerne des instruments de mesure de phénomènes acoustiques, électromagnétiques, de chimie analytique (en particulier, mesure d'émissions gazeuses et de particules) et de temps-fréquence. La troisième division, enfin, est liée au service d'accréditation suisse en pleine expansion. L'accréditation vise l'établissement, dans le monde entier, d'une infrastructure compétente d'organismes d'étalonnage, d'essai, d'inspection et de certification. Ce système a une dimension internationale, car il fournit la base des accords intergouvernementaux pour l'élimination des barrières techniques aux échanges. Au niveau national, il appuie les efforts

12



13





des organismes d'évaluation de la conformité pour atteindre, conserver et développer leur compétence professionnelle. Un tel service est indispensable au soutien d'une activité industrielle de pointe.

Un bâtiment bien particulier

La construction de laboratoires de métrologie de haute technologie est une entreprise extrêmement délicate. Le bâtiment (fig. 11) a été conçu pour garantir une stabilité optimale des conditions ambiantes, hiver comme été, pour la mesure à l'intérieur des laboratoires et certains d'entre eux sont installés dans les sous-sols (fig. 12). Lui-même entouré d'une «peau verte» faite de plaques de cuivre et recouverte d'un stabilisateur (qui évite au maximum l'érosion du cuivre dans la nature), le bâtiment est protégé des rayonnements électromagnétiques. Une construction active en température garantit la stabilité requise des conditions intérieures, la température du laboratoire ne devant pas s'écartez de plus d'un dixième de degré de la valeur consigne de 20°C durant certaines mesures. Des conduites d'eau thermostatisées dans le sol et les plafonds des laboratoires permettent le réglage individuel de la température et de l'humidité de chacun. Le renouvellement et la circulation de l'air sont assurés par des monoblocs indépendants (fig. 13). Enfin, pour que des vibrations perturbatrices ne se propagent pas dans les laboratoires situés en sous-sol, ces derniers reposent sur des dalles spécialement dimensionnées et séparées des autres éléments de construction.

Les extensions du site affichent des besoins énergétiques importants qui appelaient des équipements de récupération.

Ainsi, la chaleur dissipée par la ventilation et le système de réfrigération est récupérée et un système de sondes géothermiques a été installé afin de réduire au minimum les besoins en énergie non renouvelable. Cet édifice, dont la planification et la construction ont duré plus de huit ans, ouvre de nouveaux horizons à la Suisse dans le domaine de la métrologie et de l'accréditation et lui permet de conserver sa place dans la communauté internationale.

L'occasion d'un projet sur la façade

Les intempéries et la pollution atmosphérique entraînant la corrosion et l'érosion des métaux recouvrant toits et façades, ces réactions posent des problèmes sur le plan environnemental. Projet unique en Europe, une recherche déterminera les pertes en métal sur les façades de cuivre (fig. 14) enveloppant les nouveaux bâtiments de METAS à Bern-Wabern. Un filtre spécial, destiné à retenir le cuivre, a été posé sur les surfaces extérieures, et une analyse attentive du matériau ainsi piégé, développée par l'EAWAG, apportera des informations originales sur l'érosion de tels revêtements.

Références :

- W. BEER, B. JEANNERET, B. JECKELMANN, P. RICHARD, A. COURTEVILLE, Y. SALVADÉ et R. DÄNLICKER: «A proposal for a new moving-coil experiment», IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 48, N° 2, pp. 192-195, 1999
- W. BEER, A. L. EICHENBERGER, B. JEANNERET, B. JECKELMANN, P. RICHARD, H. SCHNEITER, A. R. POURZAND, A. COURTEVILLE et R. DÄNLICKER: «The OFMET Watt balance : progress report», IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 50, N° 2, pp. 583-586, 2001
- OFMET-Info, Vol. 5, N° 2, 1998

