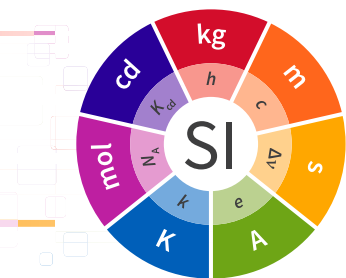


# Le SI et la métrologie en France

Des unités de mesure aux références



# Le SI et la métrologie en France

Des unités de mesure aux références

Un Système international d'unités et des étalons de référence de mesure : à quelles fins ?

Il est apparu impératif, au cours du temps, de disposer d'une base commune, universellement reconnue et facile à utiliser pour répondre aux besoins liés à la multitude des mesures qui régissent notre quotidien : besoins technologiques, impératifs économiques ou enjeux sanitaires, environnementaux, énergétiques...

... Le Système international d'unités (SI) répond à cette demande.

Des unités qui doivent être accessibles à tous, les plus stables dans le temps, associées à des mises en pratique réalisées avec une exactitude élevée.

De tous temps, le SI a suivi les évolutions scientifiques et technologiques, et les besoins de la société. Lors de la 26<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures de novembre 2018, une révision du SI a été adoptée. L'ensemble des unités de base est désormais fondé à partir d'invariables que sont les constantes de la nature : il revêt ainsi un caractère universel et pérenne.

Cet ouvrage a pour objectif de présenter les bases de la métrologie contemporaine, en prenant en compte les toutes dernières évolutions.

Informations sur les fondements et la structure du SI, définitions des unités, recommandations internationales et nouvelles mises en pratique réalisées par les instituts nationaux de métrologie français, voici ce que vous pourrez découvrir.

Cet ouvrage est destiné aux utilisateurs d'appareils de mesure, scientifiques, ingénieurs, étudiants ou enseignants.

ISBN:978-2-7598-2370-3



9 782759 823703

LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE ET D'ESSAIS **LNE**

**edp sciences**  
www.edpsciences.org



# Le SI et la métrologie en France

Des unités de mesure aux références



Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2370-3 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2369-7

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2019

---

# Préface

Au cœur de notre quotidien, la métrologie – science de la mesure – s’appuie sur des recherches dans les domaines de la physique et de la chimie afin d’accompagner l’innovation et d’assurer un monde plus sûr. La confiance dans la mesure est essentielle. Elle est aujourd’hui rendue possible par des étalonnages, vérifications et essais. Ces activités, réalisées quotidiennement dans les entreprises et les laboratoires, ont pour objectif d’assurer une traçabilité des mesures au Système international d’unités, le SI, afin de les rendre fiables et indiscutables.

Dosage de médicaments, micro-électronique, nanotechnologies, surveillance de l’eau, qualité de l’air ou pollution des sols : tous ces enjeux sont accompagnés d’importants besoins d’exactitude et nécessitent d’avoir recours à la métrologie. Celle-ci contribue à la réponse aux défis sociétaux de l’efficacité énergétique, de la protection de l’environnement et de l’évolution du climat.

Indispensable à la vie en société, la métrologie permet d’échanger en confiance avec des bases et un langage communs. L’importance de la mesure s’est accrue avec la croissance et la mondialisation des échanges commerciaux avec les évolutions technologiques qui induisent de nouveaux besoins : technologies quantiques, réseaux intelligents, intelligence artificielle, micro-capteurs...

Depuis longtemps, la France a joué un rôle particulier dans le monde de la métrologie : la Révolution française est à l’origine de la naissance du système métrique décimal ; la signature de la Convention du mètre en 1875 a eu lieu à Paris et la France conserve ce traité ; notre pays a toujours été très présent dans l’évolution du SI et de sa dissémination aux utilisateurs. Il l’a encore démontré récemment avec la redéfinition du SI votée en novembre 2018 à l’unanimité par la 26<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM). Les laboratoires français ont fortement contribué aux changements des définitions du kilogramme, du kelvin et de l’ampère, définis désormais à partir de constantes fondamentales de la physique quantique.

Cet ouvrage a été réalisé à l’occasion de la révision du SI dont la mise en œuvre est entrée en application le 20 mai 2019.

Je remercie l’ensemble des laboratoires du réseau national de la métrologie française pour leurs contributions, et l’équipe du département R&D de la Direction de la recherche scientifique et technologique du LNE pour la conception et l’écriture de cet ouvrage accessible aussi bien aux enseignants, étudiants, ingénieurs de la mesure qu’aux simples curieux. Je vous en souhaite une bonne lecture !

Thomas Grenon  
Directeur général du LNE



---

# Avant-propos

La métrologie est une discipline pratique et dynamique qui tire parti des avancées scientifiques afin d'améliorer les résultats de mesure et accroître l'efficacité avec laquelle des mesures exactes peuvent être disséminées. Lors de sa 26<sup>e</sup> réunion qui s'est tenue en novembre 2018 à Versailles, la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a approuvé l'une des améliorations les plus importantes du système mondial garantissant la stabilité et la comparabilité des mesures : la CGPM a ainsi décidé de réviser les définitions de quatre des unités de base du SI. Ces changements ont constitué le point d'orgue du travail effectué depuis plusieurs décennies par les métrologues des laboratoires nationaux de métrologie du monde entier : ils ont, par conséquent, occupé le devant de la scène médiatique.

Les nouvelles définitions et les motivations qui ont conduit à les adopter font l'objet de cet ouvrage, dont les auteurs font partie des métrologues éminents ayant été impliqués dans le travail de révision du SI.

Les changements apportés au SI revêtent une importance considérable : désormais, tout laboratoire peut, en principe, mettre en pratique chacune des définitions de façon indépendante et l'éventail des méthodes permettant de réaliser les unités va par conséquent croître. Ainsi, le SI met en quelque sorte en œuvre l'une des plus grandes ambitions de la science de la mesure, à savoir l'universalité de l'accès aux mesures « à tous les temps, à tous les peuples ». Cette devise date de la loi de 1799 qui fixe la valeur du mètre et du kilogramme succédant à celle de 1795 instituant le système métrique en France.

L'une des conséquences de la révision du SI est que le prototype international du kilogramme ne sera plus le fondement de la définition de l'unité de masse comme il l'était depuis 1889. La nouvelle définition du kilogramme exploite les lois de la physique et se fonde sur une valeur numérique fixée de la constante de Planck. Néanmoins, le SI par ces changements de définition ne devient pas totalement quantique car le système continue à dépendre de méthodes pratiques (et classiques) pour sa mise en œuvre, à moins que de futures avancées en métrologie quantique, d'importance comparable à la découverte des effets Josephson et von Klitzing, n'en décident autrement.

Cette révision du SI ne marque pas la fin du processus d'amélioration du Système international d'unités. Il est à espérer que la métrologie connaîtra de nouveaux progrès qui conduiront à proposer d'autres révisions du SI, ne serait-ce que pour intégrer une définition



de la seconde fondée sur une transition optique en lieu et place de l'actuelle transition micro-onde. Cela marquerait un changement au sein d'un système dans lequel la réalisation de toutes les unités est déjà accessible « à tous les temps, à tous les peuples ».

Martin Milton  
Directeur du Bureau international  
des poids et mesures



---

# Sommaire

<b>Préface</b>	iii
<b>Avant-propos</b>	v
<b>Chapitre 1. La métrologie pour l'industrie et les enjeux publics et sociétaux</b>	1
I. De l'utilité de la mesure et des unités	1
II. Traçabilité des mesures et accords internationaux	6
<b>Chapitre 2. Le Système international d'unités, le SI</b>	9
I. Le SI : un fondement scientifique	9
II. Le SI : des institutions internationales	11
1. La Conférence générale des poids et mesures (CGPM)	12
2. Le Comité international des poids et mesures (CIPM)	12
3. Les comités consultatifs (CC)	12
4. Le Bureau international des poids et mesures (BIPM)	13
5. Les organisations régionales de métrologie (RMO)	13
6. Les laboratoires nationaux de métrologie	14
<b>Chapitre 3. Unités et grandeurs de mesure</b>	17
I. Unité de temps : la seconde (s)	19
1. Définition de l'unité de base du SI	19
2. Grandeurs et unités dérivées	20
3. Recommandations du CIPM pour la mise en pratique	20
II. Unité de longueur : le mètre (m)	22
1. Définition de l'unité de base du SI	22
2. Grandeurs et unités dérivées	22
3. Recommandations du CIPM pour la mise en pratique	22



III.	Unité de courant électrique : l'ampère (A)	26
1.	Définition de l'unité de base du SI	26
2.	Grandeurs et unités dérivées	28
3.	Recommandations du CIPM pour la mise en pratique	29
IV.	Unité de masse : le kilogramme (kg)	31
1.	Définition de l'unité de base du SI	31
2.	Mise en pratique de la définition	33
3.	Grandeurs et unités dérivées	35
V.	Unité de température : le kelvin (K)	36
1.	Définition de l'unité de base du SI	36
2.	Mise en pratique de la définition	38
3.	Grandeurs et unités dérivées	44
VI.	Unité de quantité de matière : la mole (mol)	45
1.	Définition de l'unité de base du SI	45
2.	Grandeurs et unités dérivées	45
3.	Recommandations du CIPM pour la mise en pratique	48
VII.	Unité d'intensité lumineuse : la candela (cd)	49
1.	Définition de l'unité de base du SI	49
2.	Grandeurs et unités dérivées	49
3.	Recommandations du CIPM pour la mise en pratique	50
<b>Chapitre 4. Les références nationales</b>		<b>53</b>
I.	Temps-fréquence	56
1.	Les références de fréquence	56
2.	Les références de temps	64
3.	Comparaison des échelles de temps et diffusion des références	67
4.	Autre référence : gravimétrie	69
II.	Longueur	70
1.	Références primaires	70
2.	Références secondaires et moyens de comparaison	70
III.	Masse et grandeurs apparentées	75
1.	Réalisation de la définition du kilogramme	75
2.	Références pour les grandeurs dérivées de la masse	78
3.	Références de débit	83
IV.	Électricité-magnétisme	85
1.	Étalons primaires	85
2.	Références en courant continu et alternatif basse fréquence	94
3.	Références de mesure de signaux radiofréquences	99
V.	Température et grandeurs thermiques	104
1.	Réalisation de la définition du kelvin	104
2.	Références pour les grandeurs thermiques	106



VI.	Quantité de matière	111
1.	Méthodes primaires	111
2.	Étalons de transfert	116
VII.	Photométrie et radiométrie	117
1.	Références primaires en radiométrie	119
2.	Références de transfert en radiométrie	124
3.	Références en photométrie	128
VIII.	Rayonnements ionisants	130
1.	Introduction pour la mise en pratique	130
2.	Radionucléides	132
3.	Rayonnements neutroniques	145
<b>Annexe. Préfixes des unités et noms spéciaux d'unités</b>		<b>149</b>
<b>Pour aller plus loin...</b>		<b>153</b>
<b>Remerciements</b>		<b>155</b>



## Chapitre 1

---

# La métrologie pour l'industrie et les enjeux publics et sociétaux

### I. De l'utilité de la mesure et des unités<sup>1</sup>

---

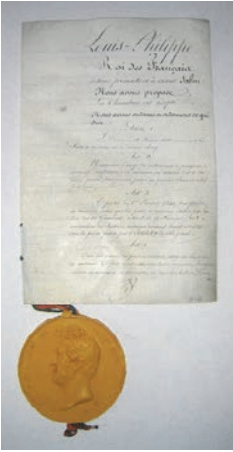
Il est très souvent nécessaire, voire indispensable, de devoir faire référence à une donnée chiffrée, pour une prise de décision ou pour l'accès à la connaissance. Ce nombre provient généralement d'une mesure qui, pour être utilisable, s'accompagne d'une unité qui permet de qualifier/quantifier la donnée.

De tous temps, la société et les hommes ont fait appel à des systèmes d'unités pour échanger, commercer, bâtir, comprendre leur environnement (proche ou lointain comme l'espace), et cela d'une manière pragmatique.

<sup>1</sup> Texte faisant référence à des interviews de personnes des laboratoires de métrologie du RNMF (Réseau national de métrologie française).



## Le SI, des applications tous azimuts



**Photo 1 :**  
Loi française du  
4 juillet 1837 sur la  
métrologie ; applica-  
tion du 1<sup>er</sup> janvier 1840.  
Source : photo BNM.

Fondé sur un idéal universaliste et consolidé continûment par les acquis de la science fondamentale, le Système international d'unités est riche d'applications dans tous les secteurs de l'activité humaine.

Depuis novembre 2018, l'ensemble des sept unités de base du Système international d'unités, appelé SI, est défini à partir de constantes fondamentales de la physique. Ainsi, la définition du kilogramme ne fait plus aucune référence à un étalon matériel, mais dépend désormais, entre autres, de la constante de la mécanique quantique, plus connue sous le nom de constante de Planck,  $h$ .

Abstrait ? À l'évidence. Depuis ses origines, la métrologie est une affaire de science fondamentale et de technologies de pointe, avec un objectif : garantir la précision, l'universalité et la pérennité des unités de mesure. Ce faisant, elle concrétise les idéaux universalistes des Lumières d'en finir avec l'arbitraire et le particulier. Mais au-delà, c'est l'émergence, dans le courant du XIX<sup>e</sup> siècle, d'un vaste marché international qui a convaincu les grandes nations de la nécessité de mettre en place un système commun et utilisable par tous, conduisant en 1875 à la signature de la « Convention du mètre ».

Autrement dit, la pérennité d'un système cohérent d'unités et sa dissémination répondent à un objectif éminemment pratique. D'un mot, il s'agit de garantir qu'un kilogramme de sucre est identique à Paris, New York ou Buenos Aires. Si bien que la quasi-totalité des activités humaines dépendent, sont transformées, voire sont déterminées par le travail des métrologues sans que nous en ayons toujours conscience.

Un seul exemple : d'abord fondé sur la longueur d'un méridien terrestre, le mètre est défini depuis 1983 comme une fraction de la distance parcourue par la lumière dans le vide, en une seconde. Or sans cette évolution, guidée par les progrès des sciences et des techniques, jamais les applications de géolocalisation (telles qu'utilisant le GPS – *Global Positioning System*) n'auraient vu le jour ! Ce dernier n'était pas inscrit dans la réforme de 1983, mais celle-là l'a rendu possible, illustrant comment la métrologie, loin des abstractions, est source d'applications tous azimuts.

Ce sont les illustrations les plus marquantes que les différents chefs des laboratoires du Réseau national de métrologie française, interrogés par Mathieu Grousseau, soulignent ici.

## Dans la vie quotidienne

Cette réalité est criante dans notre vie quotidienne. Sans le SI, il n'y aurait pas de garantie possible de la quantité d'essence délivrée à la pompe, de suivi rigoureux de la qualité de l'air ou d'évaluation des performances d'une ampoule à incandescence.



Le domaine de la santé, où des évolutions récentes de la métrologie auront un impact majeur, n'y échappe pas. Ainsi, peut-être vous êtes-vous déjà demandé pourquoi il était courant de voir les mêmes analyses sanguines répétées, plusieurs fois, par des praticiens différents ? Tout simplement car les différentes méthodes utilisées par les laboratoires d'analyses médicales pour doser les marqueurs biologiques n'étaient pas, jusqu'à récemment, rattachées à des références connues. *« Ce n'est pas que les choses n'aient pas été faites sérieusement, mais d'une méthode de dosage à l'autre, les résultats étaient potentiellement différents. De là une difficulté pour les comparer dans le temps et entre laboratoires ».*



**Photo 2 :**  
Surveillance de la qualité de l'eau.  
Source : fotolia.

Pour y remédier, une ordonnance de 2010 fait désormais obligation à ces laboratoires d'obtenir une accréditation garantissant la traçabilité des résultats de leurs analyses au SI, et cela d'ici 2020. Dans cette perspective, les laboratoires de métrologie ont initié dès 2006 des travaux permettant de combler le manque de méthodes et de matériaux de référence pour l'étalonnage des automates utilisés pour doser les différents biomarqueurs.

Glucose pour le diabète, créatinine pour l'insuffisance rénale, procalcitonine pour les chocs septiques, molécules associées aux risques cardiovasculaires ou aux maladies neurodégénératives... c'est ainsi plusieurs centaines de biomarqueurs qui devront faire l'objet d'un raccordement au SI dans les prochaines années.

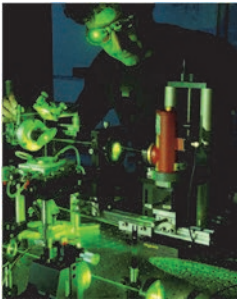
Ces exemples illustrent l'indispensable travail en continu des métrologues pour répondre aux exigences sociétales croissantes en matière de traçabilité. Celles-ci sont notamment particulièrement prégnantes dans le domaine de la radiothérapie et du radiodiagnostic. *« S'agissant des rayonnements ionisants, il est indispensable de s'assurer que la dose minimale nécessaire à l'objectif médical (mais pas plus), est délivrée au patient ».* Pour ce faire, dans un domaine où les évolutions technologiques sont rapides, les laboratoires développent des étalons primaires de dose, ainsi que des méthodes permettant de les disséminer jusqu'aux utilisateurs finaux. *« Par exemple, une nouvelle référence pour les faisceaux d'irradiation de très faible section a été développée récemment, pour laquelle les spécialistes ont dû mettre au point un calorimètre à l'architecture très différente de celle des dispositifs adaptés à des faisceaux plus larges ».*

## **Dans l'industrie**

Si les évolutions de la métrologie se font sentir jusque dans notre quotidien, elles accompagnent également le développement de l'industrie et des technologies. *« Sans une métrologie de précision, il serait tout simplement impossible d'assembler un véhicule dont les différentes composantes ont été conçues aux quatre coins du monde ».*

Ainsi, aujourd'hui, l'essor des nanotechnologies est largement conditionné par la mise en place d'une métrologie adaptée. *« L'ensemble*

des acteurs du domaine s'accordent sur le fait qu'une métrologie spécifiques aux plus petites échelles aurait un effet catalyseur sur le développement de filières industrielles ». Des plates-formes sont agrégées dans le but de constituer une série de références métrologiques nationales pour la caractérisation d'objets à l'échelle nanométrique. L'objectif concret est de raccorder aux unités du SI, huit paramètres parmi la multitude existante, qui permettent de caractériser finement des nanoparticules : taille, forme, état d'agglomération, structure cristallographique, charge, niveau d'impureté, surface spécifique et solubilité. « Ces développements sont essentiels pour le contrôle des procédés de fabrication et le passage à l'échelle industrielle des nanotechnologies ».



**Photo 3 :**

Caractérisation thermique de matériaux en couches minces.  
Source : photo LNE/  
Philippe STROPPIA.

La problématique est similaire dans le domaine des réseaux intelligents, notamment électriques. « Avec l'essor des énergies renouvelables, hétérogènes et éparpillées, auquel s'ajoute une consommation de plus en plus aléatoire, les réseaux électriques se complexifient ». Conséquence : de nouveaux outils de mesures sont nécessaires afin de s'assurer de la qualité de l'énergie. Concrètement, « les métrologues doivent faire avec des signaux plus bruités, plus complexes, ce qui implique des capteurs plus performants, plus fiables et, parce que plus nombreux, donc moins chers ». Par exemple, le développement d'un réseau miniaturisé sur lequel on recrée l'ensemble des perturbations, harmoniques d'ordre élevé, pics, creux... observables sur un réseau intelligent, afin d'étudier l'impact sur les installations, grâce à de nouveaux capteurs raccordés au SI ; ou encore la mesure de la puissance électrique engendrée par une forte tension associée à un courant élevé. « La mesure des deux en simultané est une gageure, notamment pour des applications dans le domaine ferroviaire ».

### Au laboratoire

Les évolutions constantes de la métrologie impliquent des développements au plus près des concepts scientifiques les plus fondamentaux. Au point que le travail des métrologues a lui aussi des répercussions sur les avancées de la recherche. C'est particulièrement vrai en mécanique quantique, discipline aujourd'hui aux confluents de la science fondamentale, d'une révolution technologique en cours et d'une haute précision toujours recherchée.

Une chose est sûre, la précision quantique est une réalité métrologique, puisque certains des effets de l'étrange mécanique sont mis en œuvre pour réaliser des étalons ultra précis. Par exemple, des étalons de tension, de résistance et de courant électrique fondés sur les effets Hall et Josephson, ne dépendent que de la charge de l'électron,  $e$ , et de la constante de Planck,  $h$ . À cet égard on peut, par exemple, citer les travaux proposés pour la génération d'étalon de courant basé sur un circuit quantique et exact à  $10^{-8}$  près, contre  $10^{-6}$  habituellement.

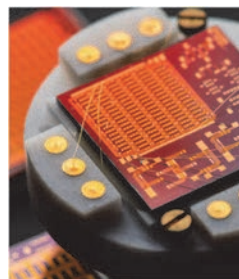




Ces recherches au service de la métrologie ont également un impact sur le développement des technologies quantiques qui visent par exemple à concevoir des ordinateurs où des qubits, susceptibles d'être à la fois 0 et 1 (en remplacement des bits) ce qui laissent augurer des performances de calcul hors normes. Ainsi, des chercheurs développent des nanofils qui pourraient constituer un tel qubit... projet au départ né d'une collaboration avec des métrologues pour utiliser ces systèmes pour la réalisation d'étalons de courant mono-électronique. « *Même système, vision différente, permettant des avancées majeures* ».

Des convergences semblables sont aussi observées en métrologie du temps-fréquences où la mécanique quantique donne le « la » de la seconde depuis plusieurs décennies. Ainsi, les laboratoires de métrologie et universitaires travaillent de concert à la réalisation d'un réseau fibré pour disséminer la seconde atomique aux acteurs scientifiques, et maintenant aux industriels. Ceci pour effectuer des tests fondamentaux sur la violation de parité, dans les molécules, par exemple.

Par ailleurs, les métrologues du temps développent actuellement une nouvelle génération d'horloges atomiques, dites optiques, dont la précision devrait atteindre  $10^{-18}$  contre  $10^{-16}$  aujourd'hui. « *À ce niveau de précision, on est sensible à des effets géodésiques via la variation du potentiel gravitationnel* ». Si ces effets sont bien entendu à prendre en compte pour atteindre la précision visée, cela signifie à l'inverse qu'une horloge atomique portable qui l'atteindrait pourrait devenir un instrument de mesures géodésiques au centimètre près ! « *C'est bien sûr prospectif, mais cela illustre tout l'enjeu de la métrologie : avoir un coup d'avance sur les applications* ». Qui, au-delà des abstractions de laboratoire, sont définitivement tous azimuts !



**Photo 4 :**  
Échantillons de Hall pour les références de métrologie électrique.  
Source : photo LNE/  
Philippe STROPPIA.



## II. Traçabilité des mesures et accords internationaux

---

À l'heure de l'internationalisation des marchés, de la conception, de la fabrication et de l'assemblage de pièces et de produits en tous genres, il paraît assez évident que la traçabilité et la comparaison des mesures effectuées dans plusieurs pays ou régions sont indispensables pour l'assurance de la qualité des produits et des instrumentations. La cohérence des résultats de mesure doit être établie ; elle passe souvent par des comparaisons internationales au plus haut niveau d'exactitude, entre les différents acteurs en métrologie, dont les instituts nationaux de métrologie. Cela a conduit à l'établissement d'un accord de reconnaissance mutuelle des certificats d'étalonnage et de mesurage en 1997, pour faciliter les échanges commerciaux en particulier : le CIPM MRA (voir **chapitre 2**).

Pour assurer la traçabilité des mesures des utilisateurs, et permettre cette cohérence en tous lieux et à toute heure, différentes voies sont possibles qui établissent l'existence d'une chaîne ininterrompue de comparaisons, à différents niveaux d'incertitude de mesure. Ceci donne un lien fiable entre les mesures industrielles et des références déterminées et conforte la traçabilité des mesures au système international d'unités, le SI.

Ce raccordement des entreprises, des laboratoires et de tout autre organisme technique, peut être reconnu par le biais du système de chaînes d'étalonnage, via l'accréditation. En France, l'accréditation est assurée par le Cofrac, Comité français d'accréditation.

De la même façon que les instituts nationaux de métrologie, les organismes d'accréditation ont signé des accords au niveau international pour la reconnaissance de la validité des raccordements sous accréditation ; c'est le MRA (*Multi Recognition Agreement*) défini par ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*). Le Cofrac est signataire du ILAC MRA.



## **Définitions de quelques notions utiles**

### **Métrologie**

Science des mesurages et ses applications.

### **Mesurande**

Grandeur que l'on veut mesurer.

### **Mesurage**

Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur.

### **Exactitude de mesure**

Étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande.

### **Incertitude de mesure**

Paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées.

### **Répétabilité de mesure**

Fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de répétabilité.

### **Reproductibilité de mesure**

Fidélité de mesure selon un ensemble de conditions de reproductibilité.

### **Traçabilité métrologique**

Propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude.



---

# Remerciements

Les auteurs, de la direction de la recherche scientifique et technologique (DRST) du LNE,

**Diane Gumuchian,**

chargée des programmes R&D du RNMF pour les domaines chimie-biologie et longueur et grandeurs dimensionnelles, LNE

**Françoise Le Frious,**

chargée des programmes R&D du RNMF pour les domaines temps-fréquence et électricité-magnétisme, LNE

**Valérie Morazzani,**

chef du département de programmation R&D, LNE

**Florian Platel,**

chargé des programmes R&D du RNMF pour les domaines température et grandeurs thermiques et masse et grandeurs apparentées,

**Maguelonne Chambon,**

directrice de la DRST, LNE

**Mathieu Grousson,**

journaliste indépendant ;

et avec l'aide de **Stéphane Plumeri,**

pour ses nombreuses relectures, arrivé récemment dans l'équipe en tant que chargé des programmes R&D du RNMF pour les domaines radiométrie-photométrie et rayonnements ionisants,

remercient chaleureusement tous leurs collègues des laboratoires du réseau national de la métrologie française. Leurs travaux de recherche et de développement ont grandement contribué à la révision du SI en 2018 et contribuent chaque jour à la réalisation des étalons nationaux de mesure au meilleur niveau métrologique.



Nombre de ces collègues ont accordé un temps précieux pour relire cet ouvrage :

#### **Temps-Fréquence**

Sébastien Bize, Jocelyne Guéna,  
Jérôme Lodewyck  
(Observatoire de Paris)

#### **Longueur**

Georges Favre, Nicolas Feltn,  
Jean-Marc Moschetta,  
José Salgado  
(LNE)  
Jean-Pierre Wallerand  
(CNAM)

#### **Masse et grandeurs apparentées**

Philippe Averlant,  
Frédéric Boineau, Pierre Otal,  
Matthieu Thomas  
(LNE)

Patrick Pinot, Zaccaria Silvestri  
(CNAM)

Henri Foulon  
(LADG-Cesame exadebit)

Florestan Ogheard  
(CETIAT)

Christophe Sarraf  
(ENSAM)

#### **Électricité – Magnétisme**

Mohamed Agazar,  
Djamel Allal, Sophie Djordjevic,  
Dominique Fortuné,  
Daniela Istrate, Pierre-Jean Janin,  
Aristo Philominraj,  
François Piquemal, Wilfrid Poirier,  
Olivier Thévenot  
(LNE)

#### **Température et grandeurs thermiques**

Bruno Hay  
(LNE)

Mohammed Sadli  
(CNAM)

Éric GeorGIN  
(CETIAT)

#### **Quantité de matière**

Paola Fisicaro,  
Béatrice Lalère, Tatiana Macé,  
Sophie Vaslin-Reimann  
(LNE)

#### **Radiométrie-Photométrie**

Gaël Obein, Bernard Rougié  
(CNAM)

Jean Gaudemer  
(LNE)

#### **Rayonnements ionisants**

Isabelle Aubineau-Lanièce,  
Bruno Chauvenet, Philippe Cassette  
(CEA)

Vincent Gressier  
(IRSN)

Les auteurs remercient également Martin Milton, directeur du Bureau international des poids et mesures, pour avoir accepté de préfacier cet ouvrage.

Enfin ils saluent aussi le travail fait sur les illustrations par Valérie Maillard de la société Esquif, ainsi que l'éditeur EDP Sciences pour la valorisation du contenu apportée par la mise en page, ainsi que pour l'édition de ce livre.