

# Minerai #18

MAI 2025 - MESURE ET MÉTROLOGIE



## Mesure et métrologie

**MAÎTRISER LA MESURE :  
UNE NÉCESSITÉ HISTORIQUE**

Page 14

**UN OUTIL INDUSTRIEL  
INDISPENSABLE**

Page 38

# Sommaire

Minerai n° 18

## Mesure et métrologie

### Actualités du réseau

**06** Actualité des Associations

**08** Actualité des Écoles



©Shutterstock



©Shutterstock

### Maîtriser la mesure : Une nécessité historique

- 14** Le système métrique décimal, hier et aujourd'hui Et demain ?
- 22** La métrologie au service de la qualité
- 28** La Mesure durable en Industrie et au Laboratoire
- 34** Quand les unités perdent toute mesure

**Mines+ (IMT Nord Europe Alumni, Mines Alès Alumni, Mines Albi Alumni) - Rédaction** Mathieu CHARBONNIER (IMT Nord Europe, 2010) · **Maquette, illustration & mise en page** Option Création . 0 954 600 600 . [contact@optioncreation.fr](mailto:contact@optioncreation.fr) · **PUBLICITÉ** SEFE (Société d'Édition de Formation Européenne) . 117 rue de Charenton 75012 PARIS . 01 80 91 48 13 . [sefe@sefe.fr](mailto:sefe@sefe.fr) . [www.sefe.fr](http://www.sefe.fr) · **IMPRESSION** PRINTCORP . 37 avenue des Châtelets . ZI des Châtelets 22440 PLOUFRAGAN . 02 96 60 97 00 · **ISSN** 2275-0568 · **PARUTION** 1570 exemplaires

Sauf mention contraire, les illustrations sont créditées à l'auteur de l'article.  
Crédit photo couverture : © AdobeStock





## Un outil industriel indispensable

**38** La métrologie dimensionnelle

**42** Métrologie du trafic  
dans les réseaux informatiques

**49** Le certificat d'étalonnage numérique AB

**55** Créer, améliorer, échanger,  
trois mots pour définir  
la mesure  
Une exposition pour s'y plonger

### Nos associations s'engagent !

Pour réduire les déchets et l'impact environnemental, nos 3 associations ont décidé de réduire progressivement le tirage papier de l'annuaire. De plus, les exemplaires imprimés sont désormais édités en France.



## Edito

### Deux poids, deux mesures

L'expression, bien connue, rappelle qu'il est utile -pour ne pas dire nécessaire- de faire preuve d'uniformité dans toute mesure, qui garantit une certaine universalité.

La recherche de cette objectivité la plus aboutie n'est pas qu'un enjeu scientifique.

Un coup d'œil historique nous fait observer que les cahiers de doléances de la Révolution française exprimaient un souhait de s'affranchir de l'arbitraire des unités de mesure seigneuriales. « Un Roi, une loi, un poids et une mesure. » peut-on y lire, alors que 700 unités de mesure différentes coexistaient dans notre pays.

Le cahier des charges de la commission en charge d'établir une nouvelle définition mètre précise alors que sa définition doit être "universelle, apolitique, et non liée au corps humain". Par ses concepteurs, le système métrique fut par la suite dédié "À tous les temps, à tous les peuples".

Dans ce numéro qui rend hommage aux 150 ans de la convention du mètre, nous sommes ravis d'avoir pu réunir des articles mettant en perspective des approches historiques et appliquées de la mesure et de la métrologie, avec la participation du Bureau International des Poids et Mesures, du Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, d'autorités administratives, d'universitaires, d'acteurs de l'industrie.

Bonne lecture !

**Mathieu CHARBONNIER**

IMT Nord Europe, promo 2010

# LORAN

**Votre Entreprise  
de construction de confiance**



## Notre offre

✓ **RÉNOVATION  
DES BÂTIMENTS**

Efficace, fiable,  
exceptionnel

✓ **GESTION  
DE LA CONSTRUCTION**

Les petits détails font  
la différence



## Précision, ponctualité, professionnalisme

Depuis son entrée dans le secteur en 2018, LORAN est réputée être une Entreprise de construction parmi les plus fiables. Nous offrons à nos clients un large choix de services, quels que soient leurs besoins. Peu importe votre projet, nos spécialistes sont là pour concrétiser vos désirs. Que vous ayez besoin d'aide pour un petit projet ou une réalisation plus importante, nous sommes là pour vous faciliter la tâche avec nos services spécialisés.

**Vous avez un projet en tête ?  
Contactez-nous et laissez nos experts réaliser votre projet.**

**Téléphone** 09 81 04 40 54  
**Web** [www.loran.ovh](http://www.loran.ovh)







# L'avenir de l'emballage **est façonné par nos collaborateurs.**

VPK est un fournisseur international d'emballages. Notre équipe est composée de plus de 7 500 personnes engagées réparties dans 60 sites dans 20 pays. VPK produit du papier recyclé, des emballages durables en carton ondulé, des emballages en carton compact et des mandrins.

A Alizay, VPK s'est engagé dans un projet autour de la décarbonation. VPK Paper Normandie est le premier pôle de développement durable 100% neutre en carbone pour l'économie circulaire en Normandie.

**Rejoignez-nous, et ensemble créons un avenir qui nous ressemble !**

VPK Paper Normandie  
Zone Industrielle du Clos Pré – BP4  
27460 ALIZAY

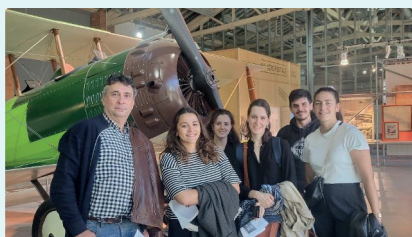
**[www.vpkgroup.com](http://www.vpkgroup.com)**

Contactez nos équipes RH :  
<https://recrutement.vpkgroup.com/fr/annonces>  
+ 33 (0) 2 35 02 72 72

# Actualité des associations

## IMT MINES ALBI

### Assemblée Générale à Toulouse



**L**e 19 Octobre 2024 a eu lieu notre Assemblée Générale à Toulouse. En plus de la présentation des bilans financiers et moraux, ainsi que de la feuille de route 2024-2025, les alumni ont pu profiter de délicieux repas toulousains ainsi qu'une visite du musée de l'Envol des Pionniers à Montaudran.

**Une journée riche en souvenirs !**

## IMT NORD EUROPE

### Alumni Refresher Retour sur la première édition

**P**our notre premier Alumni Refresher, qui a eu lieu le 20 mars sur le thème de l'IA, vous étiez près de 50 participants à une masterclass sur l'IA avec Benjamin ALLAERT professeur à IMT Nord Europe, Théophile Sempé et Majda de notre partenaire Cap Gemini Invent pour illustrer avec des cas d'usage parfaitement calibrés.

Merci aux intervenants et aux participants.

Merci aux équipes d'IMT Nord Europe Executive Education qui co organisait l'événement.

**À bientôt pour une nouvelle édition des Alumni Refresher !**



## IMT NORD EUROPE

### IMT Nord Europe au cœur de l'écosystème dunkerquois : un nouveau campus inauguré

**P**résent depuis 2020 à Dunkerque avec sa formation d'ingénieurs en Génie Énergétique par Apprentissage, IMT Nord Europe a effectué la rentrée 2024 dans un nouveau campus au cœur du tout nouveau Bâtiment d'EcosystèmeD, son partenaire local. Un bâtiment inauguré ce vendredi 15 novembre 2024 par Patrice Vergriete, Ancien ministre et Président de la Communauté Urbaine de Dunkerque, et Bertrand Gaume, préfet de la région Hauts-de-France.



## IMT MINES ALÈS

### Retour en images sur la cérémonie des EMAyens d'Or 2024



**L**a cérémonie des EMAYens d'Or 2024, co-portée par IMT Mines Alès et Mines Alès Alumni, a une fois de plus célébré l'excellence et les valeurs portées par notre communauté. Ce prix prestigieux met en lumière des diplômés dont les parcours exceptionnels incarnent l'audace, l'engagement, le partage, l'excellence, l'ouverture et la responsabilité. Le Jury de cette édition, composé de membres du personnel de l'école, de l'association des diplômés et de la Fondation Mines Télécom, a eu la tâche délicate de sélectionner six lauréats parmi de nombreuses candidatures inspirantes.

**Lors de la cérémonie, Victor PETIT, le Président de Mines Alès Alumni a rappelé l'importance de cette distinction pour notre réseau :**

*"La remise des EMAYens d'Or est un moment fort pour notre réseau Mines Alès Alumni, car il nous permet de célébrer l'excellence, l'engagement et l'inspiration qui émanent de certains de nos membres. Les lauréats que nous mettons à l'honneur aujourd'hui incarnent à la fois l'esprit de notre école et les valeurs de notre réseau. Ce sont des femmes et des hommes dont les parcours illustrent la diversité et la richesse des opportunités qu'offre notre diplôme. Mais ce sont aussi des exemples d'audace, de résilience et de créativité qui, j'en suis sûr, inspireront les générations présentes et futures.*

*En distinguant ces parcours exceptionnels, nous rendons hommage non seulement à des réussites individuelles, mais aussi à ce que nous construisons ensemble en tant que communauté. Car derrière chaque succès, il y a souvent un mentor, un conseil avisé, un soutien discret mais déterminant – bref, la force d'un réseau.*

*Alors ce soir, prenons le temps de célébrer, d'applaudir et de nous inspirer. À nos lauréats, merci pour vos parcours inspirants et pour porter haut les couleurs de notre école. Vous faites notre fierté."*

#### **Le palmarès 2024 :**

#### **des parcours inspirants à l'honneur**

Découvrez sans plus attendre le palmarès de cette édition, qui reflète à la fois l'esprit audacieux et le talent visionnaire de nos EMAYens et EMAYennes d'Or :

- **Catégorie Excellence :**  
Jérôme JOUTARD
- **Catégorie Partage :**  
Alain GUILBERT
- **Catégorie Engagement :**  
Aurore GATTI
- **Catégorie Ouverture :**  
Alejandro HERNANDEZ
- **Catégorie Audace :**  
Julien MENDEZ
- **Catégorie Responsabilité :**  
Théophile LEROY  
Projet expédition bleue



## IMT MINES ALÈS

# Alumni Stories : les carrières à l'international

**L**e 11 février 2025, l'association des anciens élèves d'IMT Mines Alès a organisé une soirée exceptionnelle intitulée **"Alumni Stories : les carrières à l'international"**. Cet événement, tenu en visioconférence, a permis à 19 participants d'échanger avec trois intervenants aux parcours internationaux inspirants : **Patrick ARCIDIACONO**, **Claude QUEYRANNE** et **Brieuc CORLAY**.

### Un partage d'expériences enrichissant

Les discussions ont porté sur plusieurs thématiques essentielles pour ceux qui envisagent une carrière à l'étranger :

- **Motivations et appréhensions de l'expatriation** : les opportunités professionnelles sont souvent le premier moteur d'un départ, mais la rapidité des décisions et l'impact sur la vie personnelle doivent être anticipés.
- **L'insertion sociale et culturelle** : s'intégrer localement, apprendre la langue et éviter de rester entre expatriés sont des clés de réussite.
- **Les débuts de carrière à l'international** : ces expériences permettent souvent une responsabilisation rapide et un apprentissage accéléré.
- **La reconnaissance du diplôme à l'étranger** : au-delà du prestige des écoles, ce sont les compétences et les résultats qui priment.

### Conseils pour les jeunes professionnels

Nos trois intervenants ont partagé des conseils pratiques à destination des jeunes diplômés et étudiants en quête d'expérience internationale :

- **Oser et être proactif** : Brieuc CORLAY a illustré l'importance du networking et des prises d'initiatives personnelles, notamment via une simple lettre manuscrite qui lui a ouvert des portes inattendues.
- **Gérer les différences culturelles** : Claude QUEYRANNE a partagé ses expériences de chocs culturels et d'adaptation à des environnements professionnels variés.
- **Choisir le bon contrat d'expatriation** : contrat local ou contrat expatrié, chaque situation comporte ses avantages et inconvénients en termes de protection sociale et de stabilité.
- **L'impact de l'expatriation sur la vie personnelle** : Patrick ARCIDIACONO a rappelé que l'éloignement entraîne des sacrifices mais aussi de nouvelles opportunités de création de liens professionnels et personnels durables.

### Un événement inspirant

Cette soirée a révélé la diversité des expériences et des parcours que peut offrir une carrière à l'international. Que ce soit en Europe, en Afrique, en Amérique ou en Asie, les alumni ont su s'adapter et se construire des trajectoires à la hauteur de leurs ambitions.

## IMT NORD EUROPE

# Création du Prix d'Excellence Oscar Waquet



**O**scar WAQUET était un ancien élève de notre école (promotion 1913). A sa retraite il a souhaité soutenir les jeunes diplômés issus de notre école afin de les encourager dans la suite de leur parcours. En 1981, il s'est tourné vers la Fondation de France pour créer une fondation portant son nom. A l'origine, la récompense était destinée à un élève méritant, diplômé dans l'option « mécanique » qui est ensuite devenue « métallurgie-mécanique ».

Le Prix Oscar WAQUET, selon cette modalité, s'est éteint avec la remise au 43<sup>ème</sup> et dernier lauréat (promotion 2023), en raison de l'épuisement de la dotation financière laissée par notre généreux camarade. Afin de continuer à faire vivre ce prix et l'esprit d'excellence qu'il entendait marquer, IMT Nord Europe Alumni et IMT Nord Europe ont souhaité conjointement faire perdurer ce prix et continuer d'honorer la mémoire d'Oscar WAQUET en adaptant les modalités au fonctionnement actuel de l'école.

Les critères de désignation des lauréats cumulent l'excellence académique et l'engagement étudiant.

Ainsi sont honorés des jeunes diplômés méritants issus de la formation d'ingénieur généraliste (sous statut étudiant ou en formation continue diplômante), des formations de spécialité (sous statut d'apprenti ou en formation continue diplômante), d'un parcours de DNM international ou de Mastère Spécialisé.

Les premiers prix de ce prix ont été remis lors de la cérémonie de remise des diplômes le 15 mars 2025, à Olivier KALUZINSKI, Abram LAINE, Maxeen RAMLO et Alex ROUSSELIN.

## IMT NORD EUROPE

# Bourse Queudot

**L**a commission Queudot, qui réunit IMT Nord Europe Alumni, IMT Nord Europe et des représentants du BDE IMT Nord Europe, s'est réunie ce vendredi 14 mars pour octroyer un soutien à 15 étudiants pour un montant total de 20 000 €.

Du nom de notre membre bienfaiteur Raymond Queudot (promo 1935), cette commission a attribué depuis 2010 plus de 345 000 € d'aides à plus de 200 étudiants ayant d'excellents résultats académiques, un projet professionnel et un besoin de financement.



## IMT MINES ALBI

# Sainte Barbe 2024

**E**n décembre 2024, 15 événements ont été organisés par vos associations alumni membres de Mines+. Ces événements ont permis de rassembler plus de 250 alumni pour **célébrer la Sainte Barbe en France et autour du monde**.

**On essaye de faire encore mieux cette année ?**



## IMT MINES ALÈS

### Forum Entreprises le 1<sup>er</sup> Forum de France (HORS PARIS)

Avec 20 ans d'expérience et de savoir-faire et conscients que les relations avec le monde économique demeurent de la première importance, IMT Mines Alès a accueilli au Forum Entreprises 2024 plus de **1800 élèves** de **7 écoles** et **330 entreprises**. L'édition 2024 a particulièrement mis en avant l'excellence en matière de Recherche et de Développement Économique de l'Institut Mines-Télécom (IMT) et à IMT Mines Alès et IMT Mines Albi en particulier, au profit ou en collaboration avec les entreprises. Cette année, un kiosque partagé de 36 m<sup>2</sup> exposait des thématiques phares de recherche menées au sein de l'IMT, ainsi que des dispositifs en matière de développement économique.

#### L'occasion pour les étudiants et les entreprises de découvrir :

- Les avancées scientifiques appliquées aux grands défis industriels, numériques, énergétiques et écologiques en France, en Europe et dans le monde. La Recherche à IMT Mines Alès et IMT Mines Albi s'oriente autour de 4 thématiques stratégiques : Industrie du futur responsable ; Souveraineté numérique & sobriété ; Ingénierie santé & bien-être ; Énergie, économie circulaire & société ;
- Les actions de Développement Économique : accompagnement des entreprises, formation continue, incubation, avec tout un panel de solutions proposées aux entreprises ;
- Les opportunités de Partenariats au cours de discussions autour de la recherche collaborative et du transfert technologique, du mécénat (défiscalisation via la Fondation), de formations sur mesure, de rencontre dédiée avec les élèves, ...

Cet événement représente une véritable plateforme d'échanges entre les futurs ingénieurs et les recruteurs, offrant aux élèves une occasion unique de rencontrer des acteurs clés de divers secteurs industriels, d'explorer des perspectives de carrières, et de tisser des liens précieux pour leur avenir professionnel.

## IMT MINES ALÈS

### La journée des audacieuses : une petite pierre pour rééquilibrer les compteurs de la mixité dans les études scientifiques



IMT Mines Alès accueille plus de 30% de jeunes filles. Cela pourrait sembler peu et pourtant, dans le monde de l'enseignement supérieur et particulièrement dans celui des grandes écoles d'ingénieurs, c'est bien plus que la moyenne. Alors que les collégiennes et lycéennes sont tout aussi performantes que leurs homologues masculins dans les matières scientifiques, pourquoi ne les retrouve-t-on pas ensuite dans les études et les métiers scientifiques ? Sans doute parce qu'on ne les y encourage pas vraiment...

L'égalité professionnelle entre les femmes et les hommes se prépare dès le plus jeune âge. Les jeunes filles peuvent se sentir moins légitimes à poursuivre des carrières dans des domaines où elles se sentent moins représentées, ce qui limite leur vision des possibilités professionnelles. Ainsi, il est essentiel de promouvoir des initiatives qui encouragent les filles à explorer un large éventail de carrières, notamment dans les sciences et la technologie, et de déconstruire les stéréotypes de genre dès le plus jeune âge.

Ainsi est né le projet de « La journée des Audacieuses » qui s'est déroulé les 18 et 19 novembre 2024 à IMT Mines Alès, articulée autour de la présence de Claudie HAIGNERÉ, première astronaute française. Cet événement a vocation à se renouveler tous les ans afin de célébrer les réussites féminines et de dire à toutes les jeunes filles qu'elles ont leur place dans les écoles d'ingénieurs, qu'elles peuvent ambitionner une carrière scientifique, qu'elles doivent croire en leur rêve et

qu'il est absolument impératif de ne rien s'interdire !

#### Mardi 19 novembre, un nouveau campus prend vie : le campus Claudie HAIGNERÉ

De nombreux événements ont jalonné ces deux journées, inscrites dans le programme officiel de la semaine de l'industrie, et dont l'ambition est de promouvoir l'image des femmes dans la science et l'industrie. Parmi eux, l'inauguration du campus Claudie HAIGNERÉ (Clavières) avec une fresque murale, éclatante de couleurs de l'artiste Pierre BERNARDINI, symbole de conquête et d'audace, qui célèbre les 180 ans d'IMT Mines Alès et rend hommage à Claudie Haigneré, première astronaute française.

17 salles et espaces de l'école ont également été nommés avec des noms féminin, retenus suite à une consultation interne. Il s'agit de femmes d'origine et de parcours variés. Certaines ont joué un rôle clé (bien que souvent méconnu) dans l'histoire des sciences. D'autres, artistes, aventurières ou résistantes ont fait évoluer la condition féminine et le genre humain. D'autres ont marqué l'histoire de notre école.

**LA JOURNÉE DES AUDACIEUSES**  
les 18 et 19 novembre 2024

Sous le marrainage de Claudie Haigneré première femme astronaute française.

Fais de ta vie un rêve, et d'un rêve, une réalité !  
A. de St-Exupéry

**PROGRAMME**

**18/11 20H** CONFÉRENCE CLAUDIE HAIGNERÉ, première femme astronaute française. Un parcours audacieux vers l'espace, une riche aventure.

**19/11 9H** CONFÉRENCE TINA KIEFFER, journaliste et fondatrice de "Toutes à l'école". Écologie et science, le challenge des femmes de demain.

**19/11 10H30** INAUGURATION du campus de Clavières au nom de Claudie Haigneré et de 17 salles aux noms de femmes qui ont marqué notre histoire...

ENTRÉE GRATUITE ET OUVERTE À TOUS  
sous réserve de places disponibles

**IMT MINES ALÈS**  
Campus de Clavières  
Accueil : 416 rue Jean Nicot Alès

RÉSERVATION OBLIGATOIRE  
<https://bit.ly/AudaceIMT>

Logos of partner organizations: IMT, Avenir, PIA, ANA, etc.



## Nathalie AZEMA

Première doyenne du corps professoral d'IMT Mines Alès

### En quoi consiste le rôle de doyenne du corps professoral d'IMT Mines Alès ?

Le rôle de doyen ou doyenne du corps professoral à IMT Mines Alès repose principalement sur des missions de conseil et de médiation auprès des enseignants-chercheurs (EC) et des différentes directions fonctionnelles de l'établissement : Direction de l'école, la DRDV (Direction de la Recherche du Doctorat et de la Valorisation), les directions des centres d'enseignement et de recherche, la DF (Direction de la Formation) ainsi que la Direction des ressources humaines.

L'objectif est d'assurer à la fois transparence et confidentialité : transparence, en expliquant par exemple, les processus et la légitimité des décisions prises, et confidentialité, pour les aspects plus personnels et sensibles. Ces interactions visent donc à faciliter l'information, fluidifier la communication et renforcer l'accompagnement des enseignants-chercheurs. Un autre aspect de ce rôle est de favoriser le sentiment d'appartenance des EC à l'école et au réseau IMT, tout en aidant à mieux comprendre le modèle et les spécificités de l'institut.

La particularité notable de cette fonction est qu'elle est directement rattachée à la Direction de l'établissement et s'exerce en toute indépendance. Le doyen ou la doyenne n'a aucune responsabilité hiérarchique, ce qui garantit une approche neutre et objective dans l'accomplissement de ses missions.

### Que ressentez-vous à l'idée d'être la première personne, et femme, à occuper ce poste à IMT Mines Alès ?

Être la première personne, et femme, à occuper ce poste à IMT Mines Alès est une expérience à la fois stimulante et enrichissante. Ayant toujours été impliquée dans des missions d'ordre collectif au sein de l'établissement, j'ai perçu cette toute nouvelle fonction comme un défi passionnant à relever, d'autant plus qu'elle reste entièrement à construire : il s'agit de la définir, d'en tracer les contours et de lui donner un véritable contenu. Ce



défi de fin de carrière me permettra de découvrir ou redécouvrir la diversité des nombreux aspects du fonctionnement de l'établissement.

Je ressens bien sûr, une certaine fierté d'être la première doyenne de cette Ecole créée il y a 180 ans ! Mon objectif est de mobiliser l'expérience accumulée au cours de mes 32 années de carrière pour assumer pleinement ce rôle de conseil, d'accompagnement et de médiation auprès de mes collègues.

### Quels sont, selon vous, les principaux défis associés à ce poste ?

L'enjeu principal de ce rôle est de parvenir à concilier les attentes des directions fonctionnelles d'IMT Mines Alès avec celles des enseignants-chercheurs, en travaillant sur les interfaces entre ces deux communautés. Ces interfaces sont souvent des zones sensibles, où des incompréhensions peuvent surgir. L'objectif est de favoriser une meilleure communication, une coopération harmonieuse et une compréhension mutuelle.

Les pistes de travail sont nombreuses et couvrent des aspects aussi variés que : l'accueil, information, la formation et l'accompagnement des EC, la sensibilisation à la recherche partenariale, l'évaluation et la reconnaissance de la diversité des activités des EC, l'identification des freins et leviers à la réalisation de leurs missions, des réflexions sur l'évolution des procédures et processus pour les rendre plus adaptées, sur la déontologie et intégrité scientifique, etc...

## Deux initiatives étudiantes d'IMT Mines Albi

### Deux initiatives étudiantes d'IMT Mines Albi sont lauréates du budget participatif de La Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée

Plus de 4 000 votants se sont mobilisés pour soutenir les projets innovants portés par les étudiants d'Occitanie dans le cadre du budget participatif "Vos solutions pour la vie étudiante". Parmi la liste des projets lauréats, 2 initiatives portées par les élèves ingénieurs d'IMT Mines Albi :

- **Installation de casiers dans le gymnase :** un projet porté par le Bureau des Sports afin d'installer des casiers pratiques et sécurisés ;
- **Soutien au Festival Acthèa 2025 :** un projet à l'initiative du Bureau des Arts pour maintenir le Festival Acthèa, un festival européen de théâtre étudiant et de spectacles vivants à Albi afin de proposer des tarifs accessibles pour tous.



## Palmarès Speak & Act 2025

### IMT Mines Albi obtient le renouvellement du label Best School Experience – Happiness Barometer 2025

Speak & Act, en collaboration avec JobTeaser, dévoile la 7<sup>e</sup> édition du classement Best School Experience – Happiness Barometer 2025 avec les 25 meilleures écoles d'ingénieurs où il fait bon étudier. IMT Mines Albi s'installe en 16<sup>e</sup> position sur plus de 125 écoles.

# Actualité des écoles

## IMT MINES TELECOM

### Les incubateurs technologiques de l'IMT : prêts à vous lancer ?

L'Institut Mines-Télécom (IMT) dispose d'un réseau national d'incubateurs qui vous accompagne dans votre projet technologique innovant, parmi lesquels vous retrouverez les incubateurs des écoles IMT Mines d'Albi, IMT Mines d'Alès et IMT Nord Europe.

#### Nous proposons un accompagnement à 360° sur vos projets innovants :

- Un accompagnement individuel par une équipe dédiée et qualifiée
- Un lien avec nos enseignants chercheurs et un accès à nos plateformes technologiques de haut niveau
- Des formations thématiques
- Un accès à l'écosystème de l'innovation
- La force du réseau IMT et participation à des salons internationaux (Vivatech, Bitz&Pretzels...)
- L'image de l'IMT
- Des financements spécifiques (prêt d'honneur de la fondation IMT)
- Un accès au réseau des Alumni
- Un accès aux ressources de l'école
  - Ressources documentaires
  - Normes
  - Lien avec les étudiants

En tant qu'alumni, vous aurez droit à une attention toute particulière. Quel que soit votre projet ou son domaine d'application, nous serons en mesure de vous proposer le parcours le plus adapté, ou de vous orienter vers les structures qui vous apporteront le meilleur accompagnement possible.

**Vous avez un projet ou une question, n'attendez plus, contactez-nous !**

#### IMT Mines Alès

[entreprendre@mines-ales.fr](mailto:entreprendre@mines-ales.fr)

Exemple de startups d'alumni :

**Eol'lien / Eol-lien.fr**

"Au moyen de voiliers de charge Eol'lien embarque en grosses quantités des marchandises issues de l'artisanat local occitan (vin de Banyuls, Riz de Camargue, Sel de Gruissan, Huile d'olive, Bières...) pour les revendre au détail à un réseau de consommateurs sensibles à l'origine du produit et à son acheminement et à des restaurateurs des ports qui s'engagent à respecter et valoriser leur territoire."

Eol'lien dessert déjà différents ports du bord de mer occitan : de Port Camargue à Banyuls-Sur-Mer, en passant par les ports de Gruissan, Agde et Sète."

#### Créé par

Frédéric DIJOL  
(IMT Mines Alès, promo 2006)

#### IMT Nord Europe

[incubateur@imt-nord-europe.fr](mailto:incubateur@imt-nord-europe.fr)

Exemple de startups d'alumni :

**IZAAC / izaac.fr**

IZAAC est la plateforme la plus performante pour maîtriser votre patrimoine immobilier. Votre allié au quotidien dans la gestion de vos bâtiments, de vos flux énergétiques, et la réalisation d'économies réelles sur votre facture.

#### Créé par

Léo Paul KEYSER  
(IMT Nord Europe, promo 2021)



#### IMT Mines Albi

[philippe.farenc@mines-albi.fr](mailto:philippe.farenc@mines-albi.fr)

Exemple de startup d'alumni :

**Hopteo / Hopteo.com**

L'app d'orientation préférée des lycéens, qui fait matcher les centres d'intérêts avec les formations adaptées. Hopteo, c'est un projet deeptech ambitieux, développé en collaboration avec un centre de recherche public, pour proposer des recommandations personnalisées et précises basées sur des algorithmes avancés.

#### Créé par

- Omer BOUTILLIER  
(IMT Mines Albi, promo 2022)
- Antoine LANDRAING  
(IMT Mines Albi, promo 2022)
- Achille BOUTILLIER  
(IMT Mines Albi, promo 2022)

**Vous souhaitez devenir mentors des nouveaux projets entrants dans les incubateurs ? Contactez-nous**





# Partenariat pluriannuel entre Capgemini et IMT Nord Europe Alumni



## Nous sommes fiers d'annoncer la signature d'un partenariat exclusif et pluriannuel entre Capgemini et IMT Nord Europe Alumni.

Ce rapprochement marque une étape majeure pour le réseau Mines+ avec le renforcement des liens avec Capgemini - leader français du conseil et de la transformation digitale. Il s'agit de la première collaboration de cette nature entre une association d'Alumni et l'entreprise.

Celle-ci se traduit par la mise en place d'une nouvelle offre d'accompagnement professionnel ouverte aux diplômés ainsi qu'aux étudiants.

### *Un engagement inédit pour développer le réseau Mines+*

Annoncé lors de la Cérémonie de Remise des Diplômes des promotions 2024 à Lille Grand Palais, ce partenariat illustre la capacité de l'association IMT Nord Europe Alumni à mettre des offres de service diversifiées à la disposition de ses diplômés et de ceux de Mines+ répondant à ses besoins de développement.

Ainsi, **Capgemini fera bénéficier à l'ensemble du réseau Mines+ de ses compétences et expertises** en animant des conférences thématiques autour des défis technologiques et industriels actuels, en organisant des événements de recrutement dédiés, en participant aux publications du Minerais et en offrant des moments privilégiés de rencontres et d'échanges avec des dirigeants de l'entreprise.

### *Un partenariat tourné vers l'avenir témoignant des atouts de notre communauté*

Reconnaissant la qualité des talents composant les écoles de l'Institut Mines Télécom, Capgemini souhaite que les relations privilégiées qui seront développées au cours des prochaines années permettent de faire connaître la diversité de ses métiers et expertises, et d'inspirer de nouvelles vocations dans les domaines de la transformation digitale, de la data et de l'innovation technologique.

Ensemble, **IMT Nord Europe Alumni et Capgemini œuvrent pour faire bénéficier au réseau Mines+ de services dynamiques, innovants et connectés aux évolutions du monde professionnel.** Nous avons hâte de concrétiser cette vision et d'écrire, avec l'ensemble des diplômés, les prochaines pages de cette collaboration prometteuse !



**Mathieu CHARBONNIER**  
IMT Nord Europe Alumni  
Président



**Théophile SEMPE**  
Capgemini Invent  
Directeur de Cabinet  
Global Head of Strategy & Portfolio

## Présentation de Capgemini

**Le Groupe rassemble 340 000 collaborateurs dans plus de 50 pays.** Depuis plus de 55 ans, Capgemini propose des services et solutions de bout en bout, allant de la stratégie et du design jusqu'à l'ingénierie, en tirant parti de ses compétences de pointe en intelligence artificielle et IA générative, en cloud, et en data, ainsi que de son expertise sectorielle et de son écosystème de partenaires. Le Groupe a réalisé un chiffre d'affaires de 22,1 milliards d'euros en 2024.

**Aujourd'hui, une centaine d'Alumni des écoles de l'Institut Mines Télécom compose ses équipes en France.**

Get the Future You Want\* | [www.capgemini.com](http://www.capgemini.com)



**Grâce à nos centrales biomasse,**  
nous sommes fiers de contribuer  
à l'accélération de la transition énergétique  
en Martinique et en Guadeloupe.



**Albioma Galion, Martinique**

- 1<sup>ère</sup> centrale 100 % bagasse/biomasse d'Outre-mer
- Représente **près de 20 %** de l'électricité disponible sur le réseau
- En service **depuis 2018**



**Albioma Le Moule, Guadeloupe**

- **Accompagne la filière cannière locale** grâce à la valorisation de la bagasse
- Représente **près de 30 %** de l'électricité disponible sur le réseau
- En service **depuis 1998**

**Albioma est le 1<sup>er</sup> producteur d'énergie photovoltaïque en Outre-mer.** Sur le terrain, ses équipes dédiées installent, gèrent et exploitent des centrales solaires :

- en toiture
- sur des hangars et des serres agricoles
- sur des bâtiments industriels
- directement au sol



**Sainte-Rose, Guadeloupe**



**Concorde, Martinique**

[albioma.com](https://albioma.com)



Tout savoir sur  
nos activités  
aux Antilles :





## Et si on accélérait ensemble la **transition** **énergétique locale** ?

Depuis 2019,  
les équipes d'ib vogt France travaillent au cœur des  
régions françaises pour développer des projets  
photovoltaïques et agrivoltaïques vertueux et  
innovants, adossés selon le besoin à des solutions  
de stockage d'électricité.

**100 MWc**  
en exploitation

**300 MWc**  
autorisés

**+ 1GW**  
en développement

**+ de 70 000 foyers**  
alimentés en électricité verte

**ib vogt**  
France  
[www.ibvogt.fr](http://www.ibvogt.fr)



Organisme agréé pour la vérification en service



### **Fabrication - Vérification - Réparation - Modernisation Ingénierie - Formations**

#### **\* TOUS SYSTEMES DE PESAGE STATIQUE & DYNAMIQUE**

*Pont-bascule, transpalette peseur, trieuse pondérale,  
bascule de circuit,...*

#### **\* DOSAGE & CONDITIONNEMENT SOLIDE & LIQUIDE**

ZI Ancienne RN 43 - 62 157 ALLOUAGNE - Tél: 03.21.56.44.34

# Le système métrique décimal, hier et aujourd'hui Et demain ?

Depuis vingt-cinq ans, le 20 mai est la Journée mondiale de la métrologie. Cette manifestation annuelle permet de célébrer dans le monde entier l'importance des mesures pour la science et la vie quotidienne. Depuis 2024, à la suite d'une décision adoptée par sa Conférence générale, la journée mondiale de la métrologie est désormais l'une des journées mondiales de l'UNESCO. Sur tous les continents, des posters reprennent le thème de l'année dans des dizaines de langues. De très nombreux laboratoires nationaux de métrologie organisent des événements. La date du 20 mai a été choisie en référence à la signature à Paris en 1875 de la Convention destinée à « assurer l'unification internationale et le perfectionnement du système métrique » connue depuis sous le nom de Convention du Mètre. Ce traité diplomatique international signé dans le Salon de l'Horloge au ministère des Affaires étrangères par les plénipotentiaires de dix-sept nations, représentant déjà par le biais de leurs empires une large fraction du monde, a donné naissance au Bureau international des poids et mesures (BIPM), l'une des plus anciennes organisations internationales établie en France.

Ce traité qui permet au BIPM de fonctionner depuis sa création, est toujours en vigueur. Depuis un siècle et demi, le BIPM veille sur l'uniformité mondiale des mesures. Sa première mission a été d'étendre l'usage du système métrique, premier système de mesure à vocation universelle, et de fabriquer et conserver les prototypes internationaux du mètre et du kilogramme, représentations matérielles des deux unités fondamentales du système métrique qui ont constitué la première pierre à partir de laquelle s'est construite l'unification internationale des mesures. De nouvelles unités ont intégré le système métrique, formant un ensemble cohérent d'unités interdépendantes qui constituent aujourd'hui le langage universel de la mesure. Le BIPM est devenu le garant du Système international d'unités, le SI, dont le nom a été adopté en 1960. Continuité du système métrique, il est constitué de sept

unités de base : le mètre, le kilogramme, l'ampère, le kelvin, la seconde, la candela et la mole, dernière unité qui a rejoint le SI en 1971. Le SI est aujourd'hui le système de mesure internationalement reconnu. Le SI, mieux que l'espéranto, est utilisé sur tous les continents pour la science, le commerce, les échanges internationaux car les unités de mesure sont omniprésentes dans notre monde contemporain et sont à la base de chaque acte de notre vie quotidienne.

2025 est une année importante pour la communauté internationale de la métrologie qui se retrouvera à Paris en mai pour célébrer au siège de l'UNESCO et à Versailles le 150<sup>e</sup> anniversaire de la Convention du Mètre. La longévité n'est pas le seul fait remarquable de cette histoire. C'est la célébration d'une coopération internationale de tous les métrologues du monde entier dans laquelle le Laboratoire national de métrologie et

d'essais, LNE est pleinement engagé. Le LNE pilote et anime actuellement le réseau de la métrologie française, composé de dix laboratoires qui rassemblent près de deux-cent-vingt chercheurs en métrologie.

Cette collaboration entre le BIPM et les laboratoires nationaux de métrologie de ses soixante-quatre États Membres et trente-sept États et économies associés constituent l'un des plus beaux exemples de succès du multilatéralisme et d'une coopération entre États capable de transcender les clivages politiques. Les décisions prises au niveau international pour la métrologie s'effectuent sur la base du consensus. Certes, cela réclame comme l'a relevé Ken ALDER

» [des] réunions internationales avec de multiples discussions, des désaccords et la sociabilité collégiale qui permet d'atteindre le consensus.



Mais Le résultat comme l'historien américain l'a récemment souligné « est peut-être le monument le plus durable de la collaboration humaine. »<sup>1</sup>

Cet article retracera dans ses grandes lignes l'histoire des définitions des unités, leur importance dans les sociétés contemporaines, les technologies sur lesquelles elles reposent et leur évolution. Il balaira les défis pour les années à venir à l'heure de la physique quantique, de l'intelligence artificielle et du réchauffement climatique. La métrologie est une branche dynamique de la physique. Les unités autrefois matérielles sont désormais toutes reliées à des constantes de la nature. Leur dématérialisation les rend aujourd'hui plus abstraites pour le grand public qui ignore la complexité et la haute expertise scientifique mises en œuvre pour définir et réaliser ces unités qui règlent notre quotidien, de l'heure à la montre au GPS, à la synchronisation des cours de la Bourse, en passant par la médecine, la biologie ou encore le commerce.

## 1 - Comment les premières unités ont-elles été définies ?

La mesure repose sur trois piliers : un ensemble de grandeurs définies et adoptées par convention, des étalons qui servent de référence et des instruments. De l'Égypte ancienne aux Sumériens en passant par la Chine médiévale, l'humanité mesure depuis qu'elle est organisée en société et toutes les grandes civilisations ont développé leurs propres systèmes de mesure. La juste mesure est la meilleure garantie de la paix sociale quand elle peut constituer la base d'échanges équitables. Les grandeurs mesurées ont toujours été reliées aux besoins de la science et de la société en intégrant les évolutions de la physique. Les unités ont d'abord été anthropomorphiques : le bras, la coudée, le pouce, le pied (souvent celui du roi, de l'empereur, du héros grec, du pharaon) ou fondées sur des éléments naturels

comme le soleil pour mesurer le temps. Les mesures ont été par la suite définies par des objets. Jusqu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'étalon est avant tout local. Il est souvent matérialisé par une représentation incrustée dans un mur pour que la référence soit visible et reconnue par la communauté locale comme la référence légale. Des vestiges de ces pratiques subsistent comme la représentation de l'aune en métal incrustée sur un pilier de la façade de l'église Notre-Dame de Montferrand<sup>2</sup>. La Révolution s'approprie à son tour cette pratique ancienne au moment où sont adoptés les étalons provisoires du système métrique en 1795 : seize mètres en marbres sont gravés dans les murs de la capitale pour familiariser les Parisiens avec les nouvelles mesures.

### 1.1 La longueur

Le système métrique est mis en place au moment de la Révolution française. Jusque-là, les unités pouvaient varier de province à province voire de ville à ville à l'intérieur d'une même province ou encore de métier à métier. Ce chaos métrologique est favorisé par la société féodale où le monopole de la mesure appartient au Seigneur. Avec le développement du commerce, les révolutions industrielles et les tentatives de modernisation de l'État, la disparité des mesures, source d'injustice fait l'objet d'un mécontentement général que les cahiers de doléance des trois ordres ont mis en exergue.

La Révolution française va donc mettre en place un profond changement de paradigme pour les mesures afin de garantir leur universalité et les rendre adoptables non pas seulement à l'échelle du royaume mais aussi par un ensemble de pays ; des mesures « à tous les temps, à tous les peuples ». Cette quête d'universalité conduit à faire du mètre la première unité naturelle et universelle en fondant sa définition sur les dimensions

1. Préface de Ken ALDER, dans *Le Bureau international des poids et mesures, 150 ans de mesures pour le monde*, à paraître, mai 2025.

2. Anne LOMBARD-JOUEUR (1979). « Les mesures-étalons de l'abbaye de Saint-Denis, dans *Bulletin Monumental*, tome 137, n°2, pp. 141-154. (p. 152).

## PARCOURS



### Maguelonne CHAMBON

Directrice de la recherche scientifique et technologique au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), responsable de la gestion du réseau des laboratoires nationaux de métrologie en France, et actuellement présidente des programmes de recherche en métrologie cofinancés par la Commission européenne.

## PARCOURS

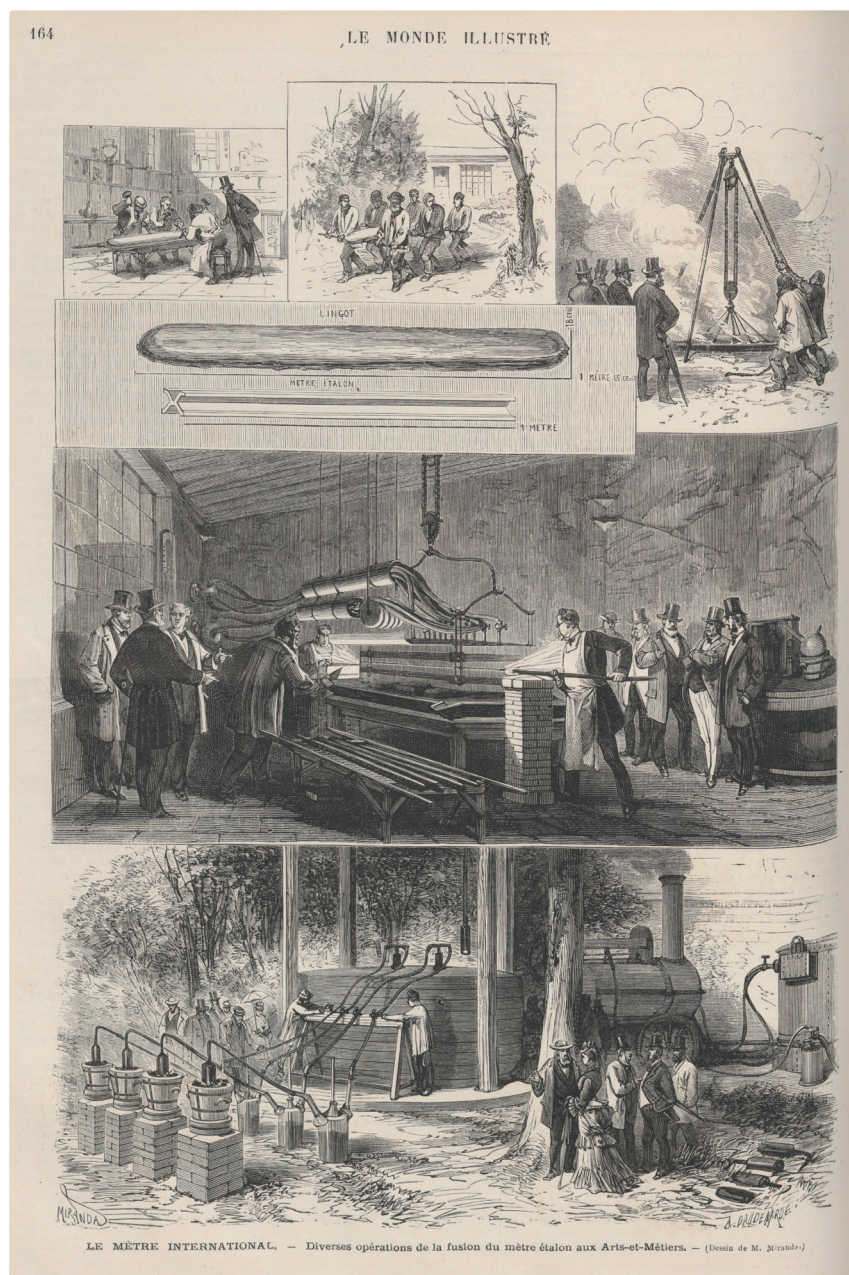


### Céline FELLAG ARIQUET

Elle est responsable du Service exécutif et réunions au Bureau international des poids et mesures (BIPM), et termine une thèse de doctorat sous la direction de Martina Schiavon sur l'histoire du BIPM de 1875 à 1960 (Archives Henri POINCARÉ - PRéST UMR 7117 CNRS - Université de Lorraine - Université de Strasbourg).

# Mesure et métrologie

Maîtriser la mesure - Une nécessité historique



Gravure de L'illustration - « *Diverses opérations de la fusion du mètre étalon aux Arts et Métiers* ». Source : Bibliothèque nationale de France, BnF

MÉCHAIN expose les résultats de leur mesure devant une assemblée de savants étrangers. L'adoption du système métrique est une idée scientifique et tout autant politique. Après la Terreur, le Directoire constitue une période de retour à une certaine stabilité pendant laquelle la France tente de revenir sur la scène diplomatique européenne. Le système métrique est ainsi un puissant moyen de diffuser les idées de la Révolution.

Les étalons du mètre et du kilogramme sont fondus en mousse de platine obtenue à partir du platine, car ce matériau est inaltérable. C'est l'orfèvre JANÉTY qui fournit la mousse de platine comprimée et martelée à chaud à partir de laquelle LENOIR ajuste l'étalon du mètre et FORTIN celui du kilogramme. Les étalons sont présentés par une délégation de l'Institut au Conseil des Anciens et au Conseil des Cinq-Cents le 4 messidor an VII (22 juin 1799). Lors de la cérémonie, la filiation avec les savants du siècle précédent comme Christian HUYGENS ou Charles Marie DE LA CONDAMINE et l'universalité de l'entreprise sont mises en exergue. Les savants « citoyens » des Républiques et royaumes amis comme Jan Hendrik VAN SWINDEN qui ont contribué à la sanction des résultats scientifiques de l'opération de la Méridienne sont solennellement cités un par un par ordre alphabétique. Les étalons sont ensuite déposés par l'Institut aux Archives nationales et conservés dans un coffre dont l'accès n'est possible qu'en réunissant trois clés.

de la Terre. En 1792, deux astronomes sont envoyés mesurer l'arc du méridien entre Dunkerque et Barcelone et passant par l'Observatoire de Paris. Un projet très ambitieux qui vaudra à Jean-Baptiste DELAMBRE et Pierre MÉCHAIN désignés pour relever le défi, de braver tous les dangers. C'est de cette épopée, menée aux pires heures de la Révolution que sera issue une représentation matérielle : un mètre dit à bouts, car mesurant un mètre d'une extrémité à l'autre et représentant un morceau du méridien. En devenant la dix-millionième partie du quart du méridien, le mètre n'appartenant plus à personne pouvait être la propriété de tous<sup>①</sup>.

## 1.2 La masse (le poids)

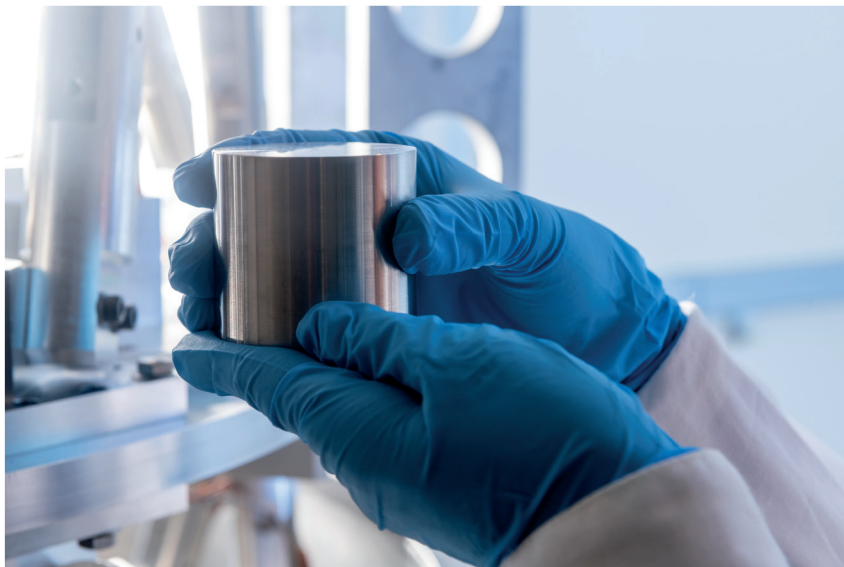
Ce système de mesure, universel et très facile à transposer offre alors la possibilité de mesurer des longueurs, des volumes, des surfaces et des masses. Car à partir du mètre, le kilogramme, alors appelé le grave, est la masse (nommée le poids à l'époque) d'un décimètre cube d'eau à la température de la glace fondante. Les chimistes Louis LEFÈVRE-GINEAU et Giovanni FABBRONI reprennent les travaux du chimiste et fermier général Antoine Laurent LAVOISIER, guillotiné en 1794, et déterminent la masse d'un volume connu d'eau. De retour à Paris, DELAMBRE et

## 1.3 Le temps qui passe, que s'est-il passé ?

Contrairement à des idées reçues, le système décimal était déjà bien utilisé par différentes civilisations, il y a quelques millénaires, comme chez les Sumériens, les Égyptiens, les Chinois, et ceci bien avant l'ère chrétienne<sup>②</sup> ; certainement pour une raison assez logique, le nombre 10 correspondant à la somme des doigts des deux mains. Des échelles de temps sur une base 10 ont donc existé : journées de 10 h,



Etalon de 1 kilogramme du BIPM.  
Source : Stroppa-BIPM



elles-mêmes découpées en 100 minutes, et chaque minute en 100 secondes. Bien sûr ces secondes n'avaient pas la même « valeur » que notre seconde actuelle. Des clepsydres fonctionnaient sur ce principe pour la mesure d'intervalle de temps.

L'Homme se confrontait aussi à son environnement naturel avec une année égale à 365 jours, qu'il était pratiquement et difficilement possible de découper en 10 parties. Avec la magie exercée des astres et des étoiles, le temps a toujours été une donnée essentielle pour situer la Terre par rapport au Soleil et le Soleil au reste de la galaxie. Il est aussi intrinsèquement lié aux cycles des jours et des nuits, des saisons et de la vie humaine. La lune est aussi très présente pour scander les mois, par exemple. Les douze mois de l'année ont scandé la vie quotidienne depuis des millénaires, de même que les jours de 12 heures, comme les nuits. D'autres systèmes de comptage, comme les systèmes dodécaire ou sexagésimal se sont installés confortablement au fil des siècles.

Lorsque l'Académie des sciences française met en chantier la réforme des poids et mesures, à la Révolution française dès 1790, comme nous l'avons vu précédemment, elle prône de définir un nouvel ensemble d'unités de mesure sur une base décimale. Cette proposition est une indiscutable rupture avec les traditions séculaires, pour marquer un nouveau départ. Et pourquoi ne pas ajouter une unité de temps pour compléter le système métrique ? Au moment de la Révolution française, la question de décimaliser le temps comme l'unité de longueur fait l'objet de nombreuses discussions. Suite au rapport de l'Académie en 1793 sur l'unité de poids et sur la question des nomenclatures, un nouveau calendrier sera défini ainsi que la division des jours. Cette proposition sera utilisée en France de 1792 à 1805 (avec rétroaction), durant la 1<sup>re</sup> république, dans le cadre de la mise en place du système métrique décimal et l'uniformisation des mesures. La journée est alors divisée en 10

heures de 100 minutes de 100 secondes. Mais cette proposition n'a pas résisté très longtemps au fait que la Terre tourne en 365,25 jours, que les semaines de 7 jours étaient très ancrées dans la vie quotidienne avec des journées de 24 heures de 60 minutes chaque. Au niveau scientifique, le temps était lié aux mesures d'angles, et la décimalisation du temps par conséquence liée aux mesures de circonférence. Le monde entier utilisait les mêmes mesures et les propositions faites sur cette décimalisation du temps manquaient fortement d'unité, ce qui a fait échouer ce projet.

En 1794, le Conservatoire des arts et métiers est créé pour être dépositaire des étalons de masse et de longueur, et en 1795 le Bureau des longitudes avec la mission fondamentale de traiter la métrologie du temps et de l'espace. On parlera toujours des poids et mesures, avec « le temps » présent en permanence mais cette unité de temps sera traitée à part d'une certaine façon. Le temps a sans aucun doute été une des grandeurs qui a suscité de très nombreux débats, où il n'y aura pas de consensus au démarrage de la Convention du Mètre. Le temps sera donc décimal qu'en partie, pour la seconde et ses sous-multiples. L'année, l'heure, le jour et la minute étant définies par ailleurs.

Différents systèmes intégrant la seconde vont voir le jour comme le CGS (centimètre-gramme-seconde) en 1873, le MTS (mètre-tonne-seconde) en 1919 ou encore le MKSA (mètre, kilogramme, seconde, ampère) en 1950.

Et pourtant, l'unité de temps ne sera officiellement introduite dans le système international des unités qu'en 1948 !

## 2 - Leur réalisation pratique au XIX<sup>e</sup> siècle et les évolutions actuelles et futures. Entre théories et applications

Le système métrique s'impose lentement mais durablement. Alors que le peuple a appelé de ses vœux à mettre fin à la disparité des mesures, une fois le système métrique établi et des milliers de règles distribuées, personne n'utilise les nouvelles mesures. Les usages sont profondément ancrés dans les sociétés. Napoléon impose le système métrique dans les pays occupés mais pour ne pas mécontenter le peuple, autorise en France, le système métrique à côté des anciennes unités. Cette absence de volonté politique freine son adoption qui ne sera rendue obligatoire que par la loi de 1837, imposée par Louis-Philippe. La métrification progresse notamment grâce au Conservatoire des arts et métiers. Il joue un rôle pivot dans l'organisation de la métrologie en France, chargé de conserver

3. Ken ALDER, *Mesurer le monde, l'incroyable histoire de l'invention du mètre*, Paris, Flammarion.

4. Franck JEDRZEJEWSKI « Le nombre et la mesure » - Octobre 1999.

5. Voir Christophe GAMEZ, *La décimalisation du temps au prisme du Bureau des longitudes (1875-1901). Entre patriotisme, rationalité et politique*, Mémoire de Master 2, épistémologie, histoire des sciences et des techniques, sous la direction de Martina SCHIAVON, Université de Lorraine, 2020. hal-04376271.

# Mesure et métrologie

## Maîtriser la mesure - Une nécessité historique

et fabriquer les étalons pour les États et les institutions scientifiques. Le Général Arthur MORIN, nommé à sa tête en 1848, est très engagé dans la promotion du système métrique. Il permet l'adoption du système métrique dans près d'une quinzaine de pays. Son implication dans les expositions universelles à Londres et à Paris aux côtés de son adjoint TRESKA a un rôle déterminant.

### 2.1 Le mètre et la seconde

#### **Le mètre, ses premières réalisations pratiques (les études associées en mécanique, matériaux).**

En 1869, la convocation à Paris, de la Commission internationale du Mètre, est la première étape vers la fondation du Bureau international des poids et mesures. La convocation de cette Commission diplomatique dont les travaux vont durer cinq ans, répond à l'appel des géodésiens qui lors de leur conférence à Berlin à l'automne 1867 ont émis une recommandation visant à faire du mètre, l'unité de mesure pour la géodésie et à la création d'un « Bureau européen de poids et mesures ». Il s'agit de créer une institution internationale qui puisse conserver les étalons et ayant autorité pour les comparer entre eux. Cette conférence a lieu la même année que l'Exposition universelle qui s'est tenue à Paris et où les poids et mesures occupent une place centrale. En 1867, le système métrique semble faire consensus, mais il faudra cinq années de tractations diplomatiques, de confrontations et de discussions pour s'entendre sur la forme de l'institution qui prendra en charge son internationalisation, aboutir à la création du BIPM et son installation en France.

La Commission internationale du Mètre se réunit pour la première fois à Paris en 1870, quelques jours après le déclenchement de la guerre franco-prussienne empêchant une partie des délégués, notamment Prussiens de prendre part à la réunion. Les commissionnaires se réunissent tout de même et s'accordent sur l'essentiel des travaux à conduire. En 1872 a lieu la seconde réunion qui permet d'entériner les décisions de 1870. La Section française composée en partie de représentants du Conservatoire des arts et métiers est chargée des aspects techniques pour la fabrication des futurs étalons.

La forme du prototype international du mètre est étudiée et proposée dès 1872 par Henri TRESKA, adjoint du directeur du Conservatoire, mécanicien et ingénieur. Il est l'un des soixante-douze savants dont le nom est inscrit sur le premier étage de la

tour Eiffel. Le mètre international sera un étalon dit à traits et non plus à bouts, c'est-à-dire mesurant un mètre entre deux traits gravés à sa surface. Il sera déterminé par la méthode de l'optique considérée plus noble. L'étalon à traits à l'avantage de pouvoir être placé dans un comparateur pour être comparé sans endommager les extrémités (contrairement au mètre des archives). Tresca a étudié huit principaux profils pour les règles étalons avant de recommander un profil en X de 16 mm avec talons. Cette forme offre une meilleure flexion et un plus grand coefficient de raideur. Elle est aussi la forme la plus facilement raccordable à la nervure centrale. La réalisation de cette section en X des futurs étalons à traits ajoute une difficulté supplémentaire importante. Elle est en soi un véritable défi technique qui requiert de multiples tests et essais.

Le chimiste Henri SAINTE-CLAIRE DEVILLE est à l'origine de l'une des plus importantes caractéristiques des prototypes : il propose dès 1870 un alliage de platine et d'iridium et conçoit une première règle en platine iridié remise aux membres de la Section française dès le 15 février 1870. Dès 1872, la Commission internationale du mètre valide définitivement ce matériau pour la confection des prototypes. Le platine iridié remplit tous les critères pour la fabrication des prototypes : il est inaltérable à l'air et au feu, aux agents chimiques, suffisamment dur pour ne pas se déformer sous l'effet de la friction, des chocs, et résistant à la pression. De plus, il est pratiquement insensible aux variations de température. Le mètre international et le prototype international du kilogramme seront fabriqués dans un alliage composé à 90 % de platine et à 10 % d'iridium avec une tolérance de 2 %. C'est une décision ambitieuse car la fabrication du platine iridié à l'échelle industrielle est encore très peu développée et la technique de séparation des métaux est à un stade expérimental et n'a jamais été réalisée complètement. SAINTE-CLAIRE DEVILLE doit être capable de préparer de l'iridium, non seulement très pur, mais en grande quantité. Le procédé entraîne la formation d'acide osmique dont les vapeurs sont dangereuses et néfastes pour la santé. SAINTE-CLAIRE DEVILLE et ses assistants en subissent souvent les effets. Une première fonte du platine a lieu au laboratoire de SAINTE-CLAIRE DEVILLE à l'École normale le 6 mai 1873 en présence du Président de la République Adolphe THIERS, accompagné de plusieurs ministres et de nombreux savants dont Louis PASTEUR.

Entre la forme et la composition, la Section française a placé la barre très haut en décidant de surcroît de procéder à une coulée unique de 250 kilogrammes pour que les futurs étalons soient issus d'un lingot unique en 1874. Patrice MAC MAHON alors Président de la République assiste lui aussi avec plusieurs ministres à une première coulée de quatre-vingts kilogrammes quelques jours avant la grande coulée qui a lieu au Conservatoire le 13 mai 1874 sous la direction de SAINTE-CLAIRE DEVILLE et Henri DEBRAY. Les enjeux politiques, scientifiques et financiers sont considérables. 250 kilogrammes de platine fournis par George MATTHEY représentent à l'époque une somme de 271 004,25 livres sterling. La Section française a réalisé plus de trente essais avant de procéder à la grande fonte.

Le 20 mai 1875, les plénipotentiaires de dix-sept nations signent le traité constituant l'acte de naissance du Bureau international des poids et mesures. Le Pavillon de Breteuil à Sèvres, dans le domaine national de Saint-Cloud sert depuis de siège au BIPM. Il faudra encore quatorze années pour fabriquer les prototypes internationaux du mètre et du kilogramme qui seront validés en septembre 1889 lors de la première conférence générale des poids et mesures, assemblée réunissant tous les quatre à six ans, les représentants des États Membres du BIPM. Ils sont déposés au BIPM qui en assure la conservation dans un coffre qui encore aujourd'hui ne s'ouvre qu'en réunissant trois clés.

À peine le mètre international sanctionné que déjà de nouvelles recherches sont lancées. En 1892, le physicien américain Albert MICHELSON est invité à effectuer au BIPM la première détermination de la valeur du mètre en longueur d'ondes lumineuse. Il débarque en juillet 1892 au port du Havre avec son interféromètre. Il travaille au BIPM avec Justin Miranda René BENOÎT, physicien de l'optique qui dirige alors le BIPM. En 1895, les travaux sont publiés dans le tome XI des *Travaux et Mémoires du Bureau international des poids et mesures*, la publication scientifique du BIPM. Ce volume sera adressé aux plus éminents savants de l'époque. Cette séquence inaugure les travaux sur l'interférométrie dont l'aboutissement est la première redéfinition du mètre en fonction de la raie orangée du krypton 86 en 1960. Une définition de transition jusqu'à la définition du mètre en fonction de la vitesse de la lumière en 1983 : première unité à être reliée à un invariant de la nature.



## Le mètre des lumières, première révolution quantique

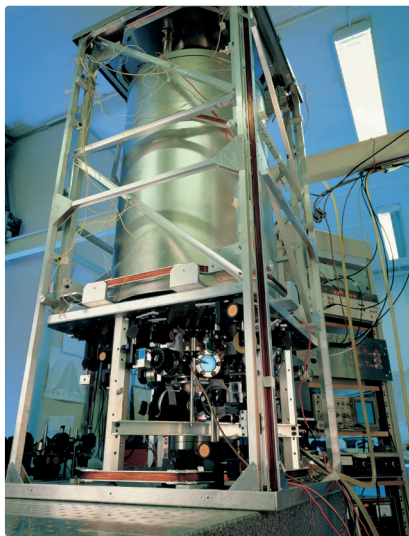
En 2003, Pierre GIACOMO avait déclaré :

» Des constantes physiques comme la charge élémentaire ou la masse de l'électron, la masse ou le coefficient gyromagnétique du proton, la constante de Planck, la constante d'Avogadro, etc., qui interviennent directement dans de nombreuses relations entre grandeurs physiques, servent souvent pour exprimer des mesures relatives dans des domaines où les ordres de grandeur défient l'imagination. Il serait séduisant, du point de vue esthétique, d'utiliser de telles constantes, universelles par nature, comme étalons fondamentaux. Aucune d'entre elles n'est connue actuellement avec une précision suffisante pour jouer ce rôle.

## Du temps astronomique au temps quantique

Elle n'avait peut-être pas de référence officielle, mais pour les astronomes au XIX<sup>e</sup> siècle, l'unité de temps était implicitement la seconde du temps solaire moyen. L'heure sera unifiée sur le temps solaire moyen du méridien de l'Observatoire de Paris, temps imposé en France en 1839 par décision. En 1912 est créé le Bureau International de l'Heure, installé à l'Observatoire de Paris. Les astronomes sont donc naturellement responsables de l'unité de temps définie alors comme la 86 400<sup>e</sup> partie du jour solaire moyen, et de l'échelle de temps associée fondée sur la rotation de la Terre.

Avec les débuts de la TSF (télégraphie sans fil), des horloges à quartz commencent à se développer dans l'Entre-deux guerres, avec des qualités supérieures aux horloges à température et pression constantes et les horloges à pendules. Par ailleurs, la première révolution quantique est en marche avec la loi de la relativité restreinte éditée par Albert Einstein, puis la relativité générale, la découverte de l'émission stimulée et le développement des lasers, qui vont être essentiels dans l'essor de la métrologie du temps et des fréquences. En 1956, et pour tenir compte des imperfections de la rotation de la Terre, qui semble ralentir en particulier de par les mouvements des marées, une nouvelle définition est proposée basée cette fois sur la révolution de la Terre autour du Soleil. L'unité de temps adoptée en 1960 officiellement est alors définie comme



la fraction de 1 / 31 556 925,974 7 de l'année tropique 1900. C'est la seconde du temps des éphémérides ratifiées par la 11<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM). Le temps reste donc astronomique... mais pas pour très longtemps.

Autour des années 1950, plusieurs laboratoires développent des horloges atomiques et des masers à hydrogène, en particulier aux États-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni. Ce fut une véritable révolution technique et technologique, qui permet d'accéder à une mesure du temps beaucoup plus stable et plus précise. Des instrumentations commerciales sont alors réalisées et disponibles pour les utilisateurs. En 1955, les physiciens du NPL (laboratoire de métrologie anglais) réalisent un prototype d'horloge atomique fonctionnant sur une transition du Cs à une fréquence autour de 9 GHz et surtout avec une incertitude relative autour de 10<sup>-10</sup>.

## Un véritable exploit. Alors quelle nouvelle définition pour le temps ?

Du fait de ces résultats scientifiques, la 13<sup>e</sup> CGPM acte donc le changement de définition de la seconde, en 1967. La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 (non perturbé). Définition toujours en vigueur même si elle a un peu changé sur la forme en 2018, suite aux changements de quatre autres unités.

C'est aussi le début d'une folle et incessante progression des étalons de fréquence, de leur précision, le principe s'améliorant d'année en année. Dans les années 1990,

← Fontaine atomique à atomes de césium du LNE-OP (TF-52 - LNE).

la France au LNE-OP, propose de nouveaux étalons de fréquence sur le principe d'une fontaine atomique utilisant des atomes froids de césium qui atteignent actuellement des incertitudes de l'ordre de 10<sup>-16</sup>, les plus précises à l'heure actuelle. Cela représente une progression d'un facteur 10 par décennie !

## 2.2 Le kilogramme

### Les premiers prototypes, les difficultés

Le prototype international du kilogramme a gardé pendant 130 ans la même définition, un gage de stabilité mais aussi une faiblesse dans le système car de ce petit cylindre de platine iridié a constitué la référence internationale pour la métrologie des masses. Un objet peut être volé, endommagé ou altéré. Des variations d'environ 50 x 10<sup>-9</sup> (50 µg/kg) de la masse des étalons sur une période de 100 ans a été mesurée (soit 0,5 µg/an). Quelques millièmes de gramme qui peuvent paraître insignifiants mais constituent une source de préoccupation quand dès qu'il s'agit du prototype international dont dépend toute la chaîne assurant la traçabilité de l'unité de masse ou d'un étalon national.

Dès 1927, Charles-Édouard GUILLAUME<sup>6</sup>, directeur du BIPM avait anticipé :

» Il semble donc que l'unité de masse soit garantie au cent-millionième près pour plus de 10 000 ans, et cette durée est à peine commencée. Sans doute, bien avant qu'elle soit écoulée, les travaux exécutés par les métrologistes des siècles futurs auront conduit à des solutions encore plus parfaites.

6. Sur l'alliage des prototypes voir en particulier le mémoire de Denis VIVARES, *Jean-Servais STAS (1813-1891) : Un acteur au cœur du conflit entre le Comité International des Poids et Mesures et la Section française*, Mémoire de Master 2, Épistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques, sous la direction de Martina SCHIAVON et Céline FELLAG ARIQUET, Université de Lorraine, 2021.

7. Physicien suisse, Charles-Édouard GUILLAUME a effectué une carrière de cinquante-trois ans au BIPM dont une vingtaine d'années en tant que directeur. En 1896, il met au point un alliage constitué de fer (64 %) et de nickel (36 %) qu'il nomme invar. Cet alliage sera décliné pour de multiples applications et sera notamment utilisé partout sur le terrain sous forme de fils ou pour les pendules des horloges astronomiques. Pour l'ensemble de ses travaux sur les ferromagnétiques, le Prix Nobel de physique lui sera attribué en 1920.

# Mesure et métrologie

Maîtriser la mesure - Une nécessité historique

## Le kilogramme depuis 2019

» Pendant longtemps, la mesure de la masse a été plus précise que celle de la longueur ou du temps, si bien que nous sommes un peu endormis »

avait déclaré dans un article paru dans Le Monde en 1996, Georges GIRARD, physicien retraité du BIPM.

Le prototype international du kilogramme a donc résisté pendant plus de 130 ans comme référence de l'unité de masse. Cet étalon matériel, qui fixait la valeur de sa masse, posait de grosses difficultés pour les scientifiques, ne serait-ce qu'au niveau de sa disponibilité. Et puis certes il y avait un étalon de masse avec une incertitude très faible, de quelques microgrammes, mais seulement pour la valeur de 1 kg. Dès que la mesure s'éloignait vers des valeurs de masse plus petites (mg, µg, ng, etc.) ou plus importantes (dizaine de kilogrammes, tonne, etc.) la précision diminuait fortement. Or pour certaines applications, une grande précision est nécessaire, comme pour le dosage de médicaments par exemples.

Pendant plusieurs années, deux voies ont été explorées pour répondre à cette demande de « dématérialisation du kilogramme », via la constante d'Avogadro,  $N_A$ , ou via la constante de Planck,  $h$ .

## Constante d'Avogadro, ou comment essayer de relier le macroscopique au microscopique

Sur le principe, le concept est assez simple. On essaie de compter un nombre d'atomes dans un matériau de masse bien définie. L'expérience proposée a été de réaliser une sphère quasi parfaite, d'une masse d'environ un kilogramme dont on mesure aussi le volume. Puis en mesurant le volume d'une maille du cristal, le nombre d'atomes peut en être déduit, ce qui correspond à la mesure du nombre d'Avogadro. Le matériau choisi a été le silicium, car ce fût un élément très bien étudié de par le développement de l'électronique, matériau de base des industries des semi-conducteurs, solide dans des conditions de température et de pression usuelles, et peu déformable de par sa structure cristalline cubique à faces centrées.

Ce matériau n'est toutefois pas totalement parfait du point de vue « métrologique ». L'expérience va devoir relever quelques défis et solutionner pas mal de difficultés. Un cristal n'est jamais complètement

pur ; il peut contenir des impuretés, des trous (atomes manquants), être composé d'isotopes différents, bref toute sorte d'inhomogénéités, défauts majeurs de la sphère. Par ailleurs, le silicium est plus léger que le platine (masse volumique plus faible), donc pour une masse équivalente la sphère aura un volume plus important et par conséquent plus sensible à la poussée d'Archimède.

Des sphères monocristallines enrichies en Si (à 99.94 %) ont été réalisées, de masse 1 kg. Après les études de structures cristallines par interférométrie à rayon X, la maille d'un atome a pu en être déduite. Le volume de la sphère et son diamètre sont mesurés par interférométrie optique. La masse de la sphère en Si (proche d'un kilogramme) est alors comparée précisément à un étalon de masse à l'aide d'une balance et la masse d'un atome peut être alors connue. C'est ainsi que les chercheurs d'un consortium incluant le Japon, l'Allemagne et l'Italie ont pu définir une valeur du nombre d'Avogadro (et par conséquent de l'unité de masse atomique) avec une incertitude relative de  $2 \times 10^{-8}$  à ce jour.

## La constante de Planck, utilisation des phénomènes quantiques

Dès 1975, Brian KIBBLE, chercheur au NPL, propose une nouvelle expérience pour mesurer le kilogramme, l'expérience de la balance du watt (qui porte dorénavant

le nom de M. KIBBLE), en utilisant un comparateur mais cette fois-ci pour mesurer une force mécanique par rapport à une force électromagnétique. Cette expérience se déroule en deux phases, l'une dite statique et l'autre dynamique. Elle bénéficie des progrès conséquents faits sur les mesures de résistances par effet Hall quantique et de différence de potentiel par effet Josephson, avec des incertitudes très fines en dessous de  $10^{-10}$  pour des valeurs assez classiques.

Et tout cela pourquoi ? pour permettre de relier les mesures de masse à la constante de Planck  $h$ .

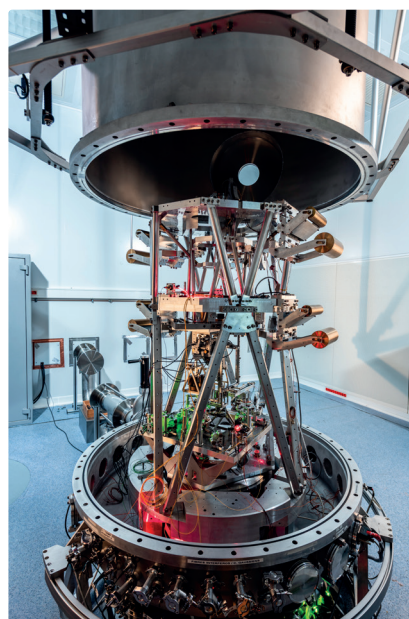
On obtient en effet la relation  $P = UI = mgv$ , dont les deux membres correspondent à  $P$ , respectivement une puissance électrique ( $UI - U$  la tension,  $I$  l'intensité de courant) et une puissance mécanique. D'où l'on peut déduire la masse  $m$ , que l'on peut écrire,

$$m = k \cdot \frac{f_J^2}{g \cdot v} \cdot h \cdot f_J$$

(est la fréquence d'irradiation des jonctions Josephson et  $k$  une grandeur déterminée expérimentalement des mesures de résistance – proportionnelles à  $h/e^2$  et de tension proportionnelle à  $2e/h$ ,  $g$  la gravitation). Les deux phases permettent d'éliminer des grandeurs qui ne sont pas connues avec suffisamment de précision. Dans la phase statique, un équilibre est recherché, au moyen d'une balance à



↑ Etalon à effet Hall quantique au BIPM.  
Source : Stroppa-BIPM



↑ Expérience de la balance du watt au LNE.  
Source : Stroppa-LNE



fléau symétrique par exemple, le poids d'une masse  $m$  placée dans le champ de pesanteur  $g$  par la force de Laplace qui s'exerce sur une longueur  $L$  de conducteur parcouru par un courant  $I$  et placé dans un champ d'induction magnétique homogène  $B$ . On obtient  $B.L.I = m.g$ . Le produit  $B.L$  est difficile à mesurer avec des incertitudes suffisamment faibles. La phase dynamique va permettre d'éliminer ce produit en déplaçant à une certaine vitesse constante  $v$ , suivant une trajectoire verticale, le même conducteur dans le même champ magnétique  $B$ . La vitesse est mesurée par interférométrie optique, et dans l'expérience française de la balance du watt, la gravitation  $g$  est mesurée par interférométrie atomique.

Plusieurs balances du watt sont en opération dans le monde. La plus performante aujourd'hui est celle du laboratoire national de métrologie canadien, le CNRC (Canadian National Research Council) qui a atteint une précision relative inférieure à  $2 \times 10^{-8}$ .

Les résultats incroyables de ces expériences ont permis le changement de définition de l'unité de masse, le kilogramme, en 2018 comme il suit :

« Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck,  $h$ , égale à  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à  $\text{kg.m}^2.\text{s}^{-1}$ , le mètre et la seconde étant définis en fonction de  $c$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  ».

### 3. Perspectives & conclusion

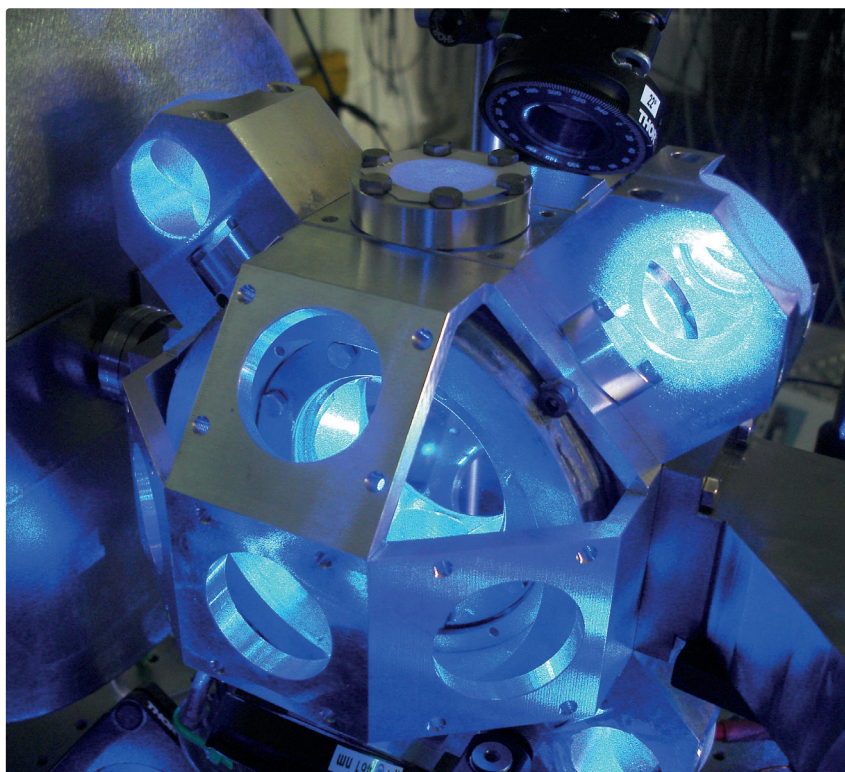
Aujourd'hui les mesures sont adaptées à la globalisation des échanges. La précision des mesures s'appuie sur des réseaux nationaux de métrologie reliés à un système international afin de garantir leur traçabilité. Le changement climatique, l'essor fulgurant de l'intelligence artificielle, le développement des mesures dans le milieu médical, sont autant de défis pour les années à venir. Ces questions qui font partie des grands enjeux du monde contemporain sont pris à bras le corps par les métrologues.

Le SI, tel que défini en 2018 et basé sur les constantes fondamentales, a un bel avenir devant lui. C'est un système vivant, en perpétuelle évolution, et les chercheurs et métrologues du monde entier ont entamé des travaux sur la candela ou encore défini une feuille de route pour une possible nouvelle définition de la seconde, des étalons de fréquence dans le domaine optique pouvant apporter une précision meilleure d'un facteur 100 dans les années à venir par rapport à la définition actuelle !

L'aventure continue ... ■



Etalon de fréquence dans le domaine optique, à atome de Sr du LNE-OP (Horloge à réseau optique de strontium - LNE).



# La métrologie au service de la qualité

### 150 ans du mètre : La métrologie au cœur de notre quotidien

En 2025, nous célébrerons le 150<sup>e</sup> anniversaire de la Convention du Mètre, un événement fondateur dans l'histoire des sciences. Ce traité, signé en 1875, a permis de définir et de standardiser la mesure du mètre, posant ainsi les bases d'une collaboration internationale dans le domaine des sciences et de l'industrie. Pourtant, bien que cet anniversaire soit une occasion unique de rappeler l'importance de cette convention, la création du mètre demeure largement ignorée du grand public.

Le mètre, que beaucoup considèrent comme une évidence, est pourtant le résultat d'une histoire complexe et minutieuse. C'est à partir de ce simple mètre que des milliers de technologies, processus industriels, et applications de la vie quotidienne s'appuient pour garantir la précision et la fiabilité des mesures. La métrologie, la science de la mesure, en est le socle indispensable.

### La métrologie : Mesurer le monde qui nous entoure

La métrologie est bien plus qu'une simple science des instruments de mesure. C'est la garantie que les mesures que nous utilisons tous les jours sont précises et cohérentes, et qu'elles respectent des normes universelles. Cela permet d'assurer que, peu importe où vous êtes dans le monde, un litre d'eau ou un kilogramme de pommes aura exactement la même valeur, de Paris à Tokyo, de São Paulo à New York.

Imaginez un monde où chaque horloge dans chaque maison aurait sa propre méthode de calcul du temps. Chez vous, une heure pourrait durer 65 minutes, chez votre voisin, 55 minutes, et le boulanger mesurerait le temps sur une échelle différente encore. Ce serait la fin des rendez-vous ponctuels, des horaires d'école respectés, ou même des gâteaux cuits à la perfection. C'est là qu'intervient la métrologie, pour s'assurer que, peu importe où l'on se trouve, les mesures restent uniformes et fiables.

Illustration réalisée par intelligence artificielle.





Ainsi, la métrologie assure la cohérence de toutes les mesures, qu'il s'agisse du poids des produits que nous achetons, des doses de médicaments que nous prenons, ou des distances parcourues par les avions. Sans elle, le monde serait plongé dans un chaos d'incertitudes et de variations incontrôlées.

## AQUANTY : Expertise en qualité et métrologie



Dans un monde en constante évolution, où les sociétés doivent s'adapter aux nouvelles technologies et aux exigences de plus en plus strictes des accréditations, il est essentiel de maintenir des compétences métrologiques de haut niveau. AQUANTY intervient là où la gestion de la métrologie devient complexe et nécessite un accompagnement spécialisé. Trois missions sont au cœur de l'activité de l'entreprise : **l'audit, l'accompagnement, et la formation**. Ces interventions permettent aux organismes de se préparer à l'accréditation, de garantir la conformité de leurs équipements de mesure et de former leur personnel aux dernières avancées et pratiques en matière de métrologie.

En effet, les équipements utilisés pour réaliser des mesures doivent être conformes aux normes métrologiques les plus exigeantes, notamment celles du **COFRAC** (Comité Français d'Accréditation). C'est sur ce terrain qu'AQUANTY joue un rôle primordial. Par l'intermédiaire d'audits métrologiques et d'une assistance directe, AQUANTY aide les laboratoires, les bureaux de contrôle, et d'autres organismes à se préparer aux exigences strictes des accréditations, telles que **ISO 17025**, et à optimiser leurs processus internes de mesure.

## Accompagner la métrologie en entreprise : un partenariat pour un défi stratégique

INOVALYS, un Groupement d'intérêt public constitué de 6 laboratoires accrédités COFRAC \*: Accréditations N° 1-5752, 1-7139, 1-7140, 1-7141, 1-7142 & 1-7143. Liste des sites et portées disponibles sur le site [www.cofrac.fr](http://www.cofrac.fr) dans plus de 35 domaines techniques, a fait appel à AQUANTY pour optimiser ses processus métrologiques. Cette collaboration fait avec Sophie LETARD (Directrice QSEqualité d'INOVALYS) et El Mehdi KABTA (responsable qualité métrologie sur le site du Mans) vise à garantir la cohérence et la fiabilité des mesures à travers tous les sites.

INOVALYS est le fruit du regroupement des laboratoires publics départementaux de la Loire-Atlantique, du Maine-et-Loire, de la Sarthe, de l'Indre-et-Loire et du Morbihan, où plus de 550 collaborateurs exercent leurs missions dans plusieurs domaines : Qualité et sécurité des aliments et de l'eau, Santé animale, Agriculture, œnologie et agro-alimentaire et Environnement.

Chaque site est piloté par un responsable métrologie assisté, si nécessaire, de métrologues. Ensemble, ils coordonnent et réalisent les activités métrologiques de leur site, en veillant à leur pertinence et efficacité. Ils participent également à l'harmonisation des procédures. La majorité des opérations métrologiques sur les équipements de mesures sont comparés en interne (vérification/étalonnage) par des étalons. Ces étalons sont ensuite comparés vers des organismes avec de meilleures performances métrologiques afin d'établir la traçabilité métrologique.



**inovalys**

## PARCOURS



**Anthony BARON**  
IMT Nord Europe, promo 2014  
Consultant en Qualité  
et Métrologie chez Aquanty.

## La traçabilité se comprend lors des litiges sur les quantités vendues et achetées, entre un client et un fournisseur

La métrologie est un processus support qui accompagne les services analytiques, leur permettant de réaliser des analyses conformes aux exigences normatives et réglementaires en vigueur. L'harmonisation des pratiques métrologiques est un objectif majeur d'INOVALYS qui apportera plusieurs avantages :

### 1. Cohérence et fiabilité des mesures :

En standardisant les méthodes et les équipements, les résultats obtenus seront comparables d'un site à l'autre et pourront s'inscrire dans une dynamique de comparaison de données intralaboratoire.

### 2. Efficacité opérationnelle :

La mise en place de procédures harmonisées permettra d'optimiser les capacités des opérateurs à intervenir sur l'ensemble des sites.

Cette démarche ne peut aboutir que si tout le personnel concerné adhère à cet objectif et participe activement à la dynamique d'harmonisation. Grâce à son regard extérieur, AQUANTY a pu prendre du recul sur l'ensemble des dispositions en vigueur sur tous les sites et animer le processus d'harmonisation, en cherchant à optimiser les pratiques (procédures et méthodes) entre les sites.

# Mesure et métrologie

Maîtriser la mesure - Une nécessité historique

## Processus métrologiques en hygiène alimentaire : un cas d'étude concret

Dans le domaine de la **bactériologie alimentaire**, par exemple, INOVALYS devait réaliser un dénombrement de levures selon des normes strictes (NF V08-059) sur des produits frais. Ce processus comportait plusieurs étapes où la métrologie prend sens : Processus métrologiques en Hygiène alimentaire pour un produit frais.

Grâce à l'intervention d'AQUANTY, INOVALYS a pu non seulement harmoniser ses pratiques entre sites, mais aussi réduire les risques d'erreur et améliorer la conformité de ses résultats aux normes exigées. Ce travail a permis d'uniformiser les pratiques métrologiques et de confirmer la traçabilité des mesures.

## Conclusion : La métrologie, un pilier indispensable à la qualité

La métrologie n'est pas seulement un domaine technique. C'est un enjeu stratégique pour toute entreprise qui souhaite garantir la qualité de ses produits

|                                             | 1-Prélèvement                                                                                                                          | 2- Transport                                                                                                                                                        | 3-Stockage                                                                                                                      | 4-Incubation                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             | <br>Pesée de $\pm 0,01\text{ g}$ à $\pm 0,1\text{ g}$ | <br>Température entre $2^{\circ}\text{C}$ et $8^{\circ}\text{C}$                  | <br>Température de $\pm 2^{\circ}\text{C}$   | <br>Température $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$                                                 |
| Expression du Besoin Equipements (INOVALYS) | Balance classée II                                                                                                                     | Sonde capable de mesurer à $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$                                                                                                               | Enceinte vérifiée régulièrement à $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , sonde de suivi avec une tolérance maximale de $0,5^{\circ}\text{C}$ | Enceinte vérifiée régulièrement à $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , sonde de suivi à l'intérieur avec une tolérance maximale de $0,25^{\circ}\text{C}$                                |
| Intervention AQUANTY                        | Harmonisation des processus de vérification des balances sur tous les sites, pour garantir des mesures uniformes et fiables            | Amélioration de l'incertitude des sondes en optimisant les procédures de vérification, assurant ainsi la précision du suivi de la température pendant le transport. | Amélioration de la procédure de caractérisation des enceintes, pour renforcer la précision des conditions de stockage           | Application norme de vérification (FD X 15140) et révision procédure caractérisation des enceintes thermiques pour garantir des conditions d'incubation optimales et stables. |

et services. Que ce soit pour répondre aux exigences des normes comme **ISO 17025** ou pour s'assurer que les mesures sont fiables et traçables, la métrologie est essentielle. En accompagnant des organismes comme INOVALYS, AQUANTY démontre que cette discipline est non seulement cruciale pour la conformité des mesures, mais aussi pour l'optimisation des processus internes et l'efficacité opérationnelle des entreprises.

La métrologie est un véritable outil de compétitivité, qui s'impose de plus en plus comme un facteur clé de succès dans un monde où la précision et la fiabilité des mesures deviennent des exigences incontournables. ■

 Processus métrologiques en Hygiène alimentaire pour un produit frais.



## Les forces du Groupe Eiffage en Hauts-de-France



L'enracinement local dense du Groupe Eiffage en région Hauts-de-France offre un service de proximité grâce à des équipes expertes, autonomes et dédiées à chaque projet. Le Groupe Eiffage compte de nombreuses réalisations de référence dans la région.

Les Glacis à Dunkerque est un exemple de synergie regroupant les forces du Groupe Eiffage. Ce projet de rénovation énergétique et bas carbone de 569 logements sur 9 bâtiments, labellisé « Ecoquartier » et « BBC Rénovation 2024 », sera livré le 1<sup>er</sup> trimestre 2028.

[www.eiffage.com](http://www.eiffage.com)

#EspritDeFamille

Rejoignez-nous sur les réseaux sociaux :

Eiffage Construction : Facebook | LinkedIn | TikTok

Eiffage Immobilier : Facebook | LinkedIn | X | TikTok

Eiffage Aménagement : Facebook | LinkedIn | TikTok

## DES SOLUTIONS RAPIDES ET DURABLES DANS LE TEMPS



Fondée en 2019 par Yann Armengaud, AT2M est née d'un parcours construit avec passion, détermination et expertise terrain.

L'entreprise incarne des valeurs fortes comme la sécurité, l'entraide et la réactivité, essentielles dans le secteur industriel. Aujourd'hui reconnue pour son professionnalisme, AT2M allie savoir-faire technique et valeurs humaines à chaque projet.



**Maintenance industrielle**



**Tuyauterie**



**Chaudronnerie**

**Yann Armengaud**  
06 40 46 62 45

[y.armengaud@at2m-maintenance.fr](mailto:y.armengaud@at2m-maintenance.fr)  
LinkedIn : Yann Armengaud





## BUREAU D'ÉTUDE TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

### OCÉADE INGÉNIERIE VOUS ACCOMPAGNE DANS VOS PROJETS !

Ingénieriste de l'énergie et du bâtiment, OCÉADE INGÉNIERIE accompagne ses clients dans tous leurs projets de construction et réhabilitation dans le secteur tertiaire, scolaire, hospitalier et de logement.



AUDIT ÉNERGETIQUE



AMO



BET ÉCONOMIE



BET ÉLECTRICITÉ



BET FLUIDE



COORDINATION SSI



BIM



ÉTUDES THERMIQUES



MAÎTRISE D'ŒUVRE



OPC

#### AGENCE ROUENNAISE

900, rue Herbeuse 76230 Bois-Guillaume  
Tél. : 02 35 71 65 10 - contact-r@oceade-ing.fr



[www.oceade-ing.fr](http://www.oceade-ing.fr)

#### AGENCE HAVRAISE

Zac du Camp Dolent, route de la Crête 76700 Harfleur  
Tél. : 02 35 21 63 08 - contact-m@oceade-ing.fr



[careers.ovhcloud.com](https://careers.ovhcloud.com)

#Industrie #Maintenance  
#Datacenter



# GazelEnergie RECRUTE !



**Analyste des Risques**



**Senior Energy Structurer**

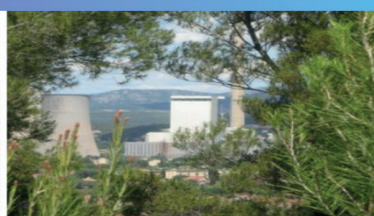


**Responsable Grands Comptes**

**Envie de participer à  
l'aventure de la transition  
énergétique ?**



*Rejoignez-nous*



JR ELEC SAS est une société spécialisée dans les travaux électriques allant de l'habitation au tertiaire, et ainsi que dans l'industrie des travaux neufs aux travaux de réhabilitation.

Nous réalisons tous types d'installations :

- HTA cellules HT
- CFO TGBT, éclairages, forces & bornes de recharge, ...
- CFA (intrusion, contrôle d'accès, sécurité incendie)

## NOS RÉFÉRENCES



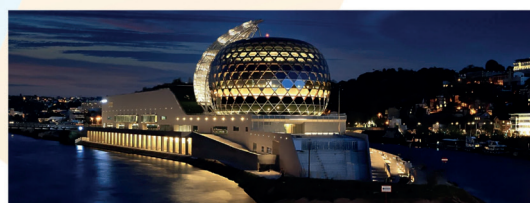
## CONTACTEZ-NOUS !

Contact@jr-elec-sas.com

+33 6 37 13 78 62

11 Av. Georges Politzer, 78190 Trappes

SAS au capital de 100 000€ - Siret : 82496677400039 APE : 4321A  
TVA intracommunautaire : FR 42 824966774



# La Mesure durable en Industrie et au Laboratoire

La Métrologie est la science des mesurages et ses applications. Elle comprend tous les aspects théoriques et pratiques des mesurages, quels que soient l'incertitude de mesure et le domaine d'application. C'est la définition que l'on peut lire dans le Vocabulaire International de la Métrologie (VIM), publié par le Bureau international des poids et mesures (BIPM). Le BIPM est l'organisation intergouvernementale dont les États Membres agissent en commun en ce qui concerne les sujets liés à la métrologie.

L'année 2025 marquera le 150<sup>e</sup> anniversaire de la signature de la Convention du Mètre. Les 20, 21 et 22 mai, permettront de reconnaître l'importance fondamentale de la science des mesures dans tous les aspects de notre vie (la cuisine, les transports, la santé, les technologies, l'industrie). La métrologie est omniprésente dans notre quotidien, influençant nos actions et nos décisions à un niveau souvent inconscient. Depuis tout petit, à l'école, on nous enseigne la justesse de ce que l'on mesure. Or, **toutes les mesures sont fausses** ! Cette affirmation peut sembler troublante mais elle illustre surtout le fait qu'une mesure

### PARCOURS

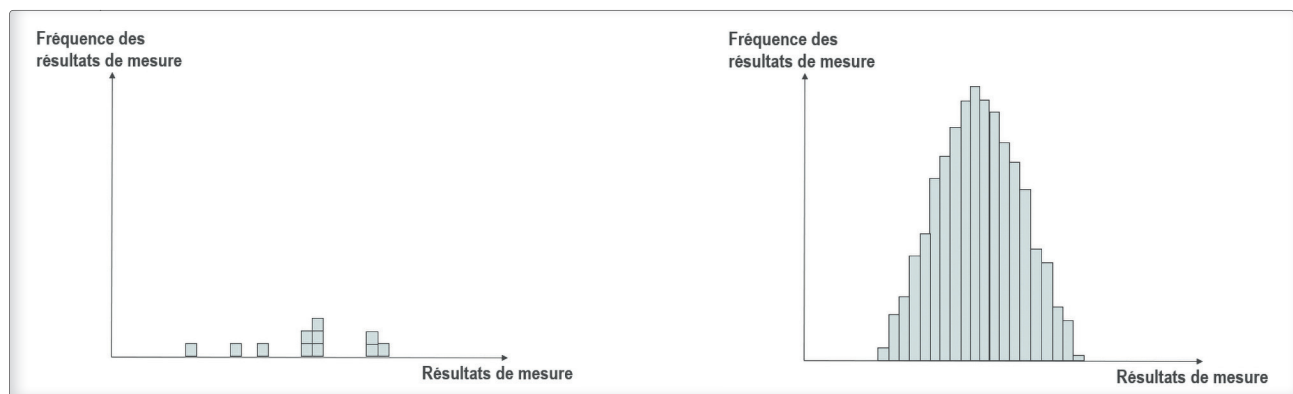


**Laurent SELSKI**

Consultant senior en Métrologie et Méthodologie de la Mesure chez Mesure+.

n'est jamais exacte ! Elle est toujours entachée d'une erreur, fruit de l'incertitude ou du doute. La "valeur vraie" d'une entité n'est jamais accessible, quelle qu'elle soit... elle est comme floutée. (Figure 1 & 2)

Et si l'on ne fait qu'une seule mesure, on comprend bien que l'on ne voit pas complètement la dispersion du processus. Il convient d'effectuer un certain nombre de mesures pour apprécier le résultat le plus représentatif qualifié par la moyenne (indicateur de tendance centrale) et l'écart-type (indicateur de dispersion ~moyenne des écarts par rapport à la moyenne).



↑ Fig. 1 & 2

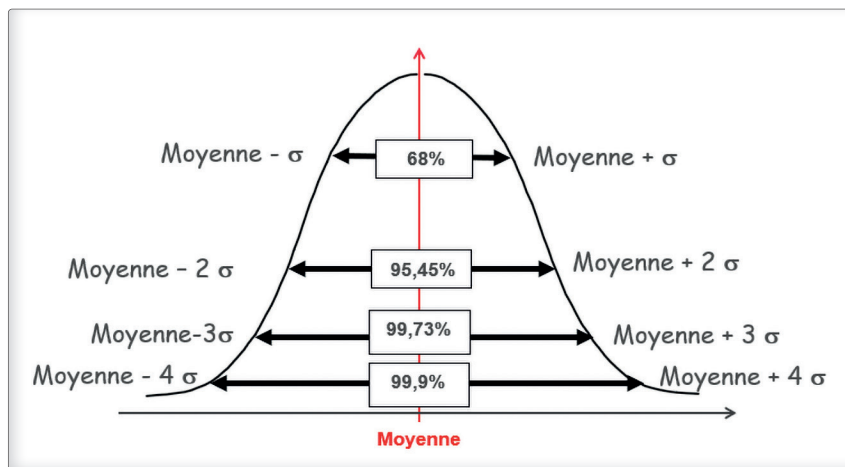


La dispersion des résultats de mesure suit donc une loi normale (Figure 3).

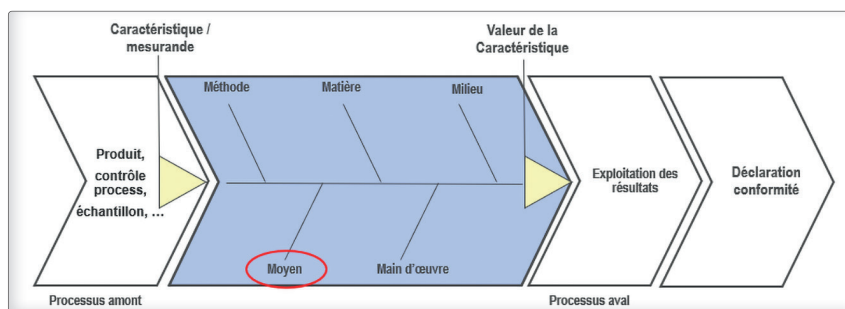
L'opération de mesure/contrôle/essai met en œuvre un processus. Elle apporte de la valeur ajoutée aux produits et services de l'entreprise. Ce processus de mesure, comme tout processus industriel, est caractérisé par les 5 composantes suivantes (5M) : les matières (Matière), les moyens techniques et matériels (Moyen), les méthodes de travail (Méthode), les acteurs directs ou associés (Main-d'œuvre), le milieu environnant (Milieu).

Maîtriser le processus de mesure, c'est maîtriser chacune de ses composantes. Pour prendre ensuite les bonnes décisions. (Figure 4)

Si le besoin est mal défini, l'exploitation des résultats ne peut se faire (du moins sans précautions). Attention également à ne pas uniquement considérer la conformité du moyen seul (l'équipement de mesure). Trop souvent, les entreprises pensent que présenter à l'auditeur le constat de vérification suffit (Figure 5).

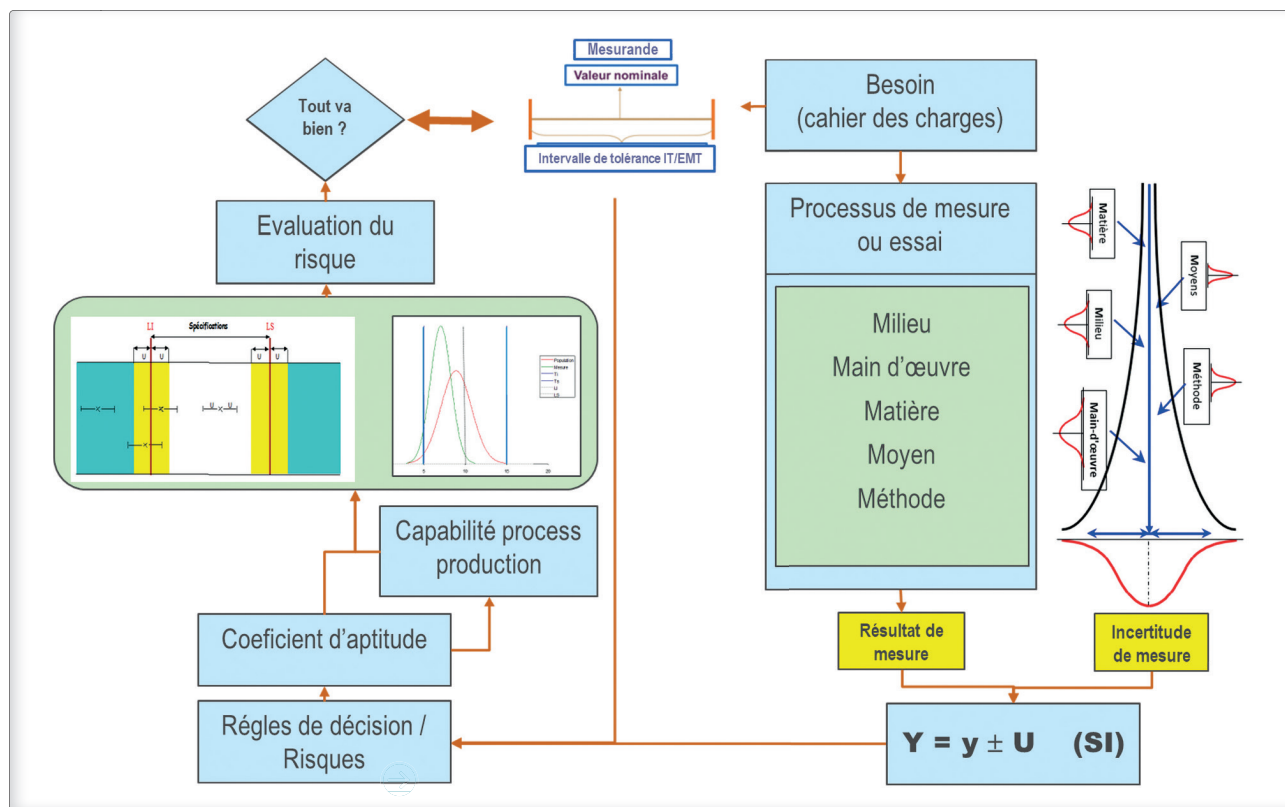


↑ Fig. 3



↑ Fig. 4 Processus de mesure / essai.

↓ Fig. 5



# Mesure et métrologie

## Maîtriser la mesure - Une nécessité historique

Ce schéma permet de comprendre l'interaction entre la production et le processus de mesure qui « voit » la fabrication avec un biais possible et plus ou moins floutée selon son aptitude.

### Point clé n°1 :

Afin de s'assurer de la pertinence des tolérances, il faut définir l'incertitude de mesure cible du processus de mesure, c'est-à-dire la capacité à réaliser la mesure pour un risque connu, et donc prendre la bonne décision.

Le coefficient d'aptitude C du processus de mesure doit être compris entre 3 et 10 selon le domaine de mesure. Il correspond au rapport entre l'intervalle de tolérance et la plage d'incertitude (Figure 6).

### Point clé n°2 :

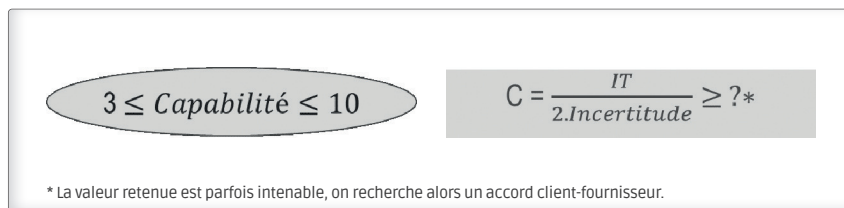
La résolution des équipements de mesure doit être inférieure à 10% de l'intervalle de tolérance (IT). Sinon, il conviendra de changer d'instrument. On cherche ici à bien percevoir les plus petites variations de la grandeur mesurée (Figure 7).

On doit connaître la justesse pour évaluer le biais dans l'IT. Le critère sur la justesse est défini pour l'entreprise, par exemple  $|\text{biais}| \leq 5\% \text{ IT}$ .

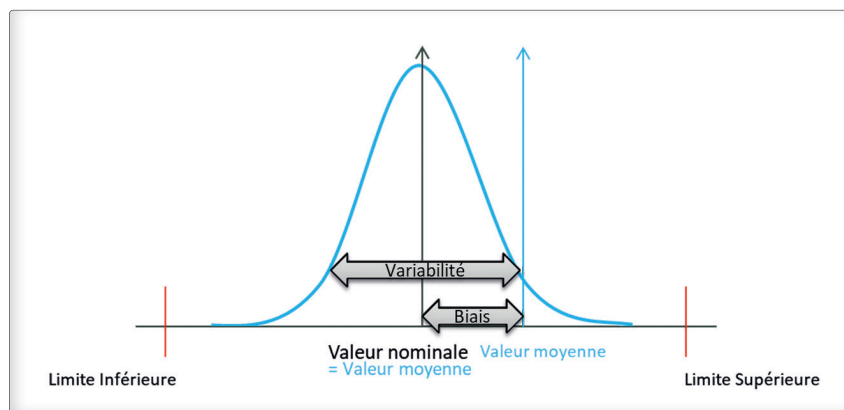
La **stratégie de l'entreprise ou du laboratoire est nécessaire** afin de mettre sous contrôle les processus de mesure. (Figure 8)

Pour les expertises et les conformités individuelles, on évalue l'incertitude de mesure afin de vérifier l'adéquation. Lorsque l'on veut caractériser ou vérifier la conformité d'une population, pour les fonctions prioritaires et un processus de mesure complexe (différent d'un seul équipement de mesure), on engagera une étude de capacité du processus de mesure (type r&R = répétabilité et reproductibilité).

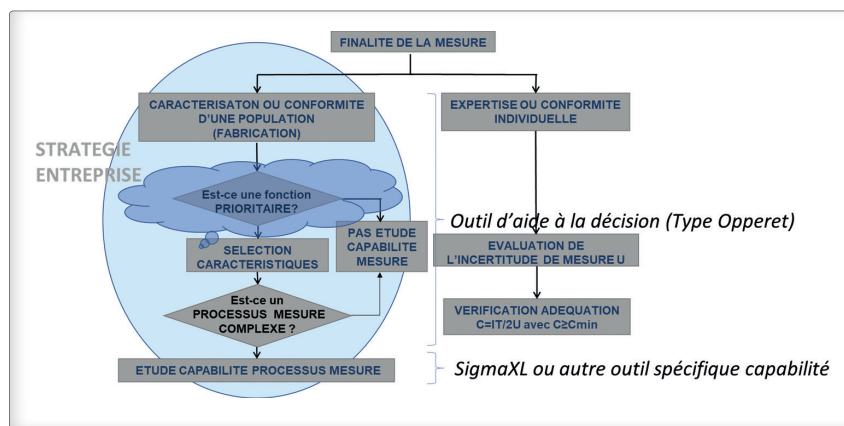
On distingue mieux maintenant la différence entre une mesure effectuée dans le cadre d'une expertise par un équipement et un processus de mesure complet qui validera (ou pas) les x échantillons mesurés (par y opérateurs). On comprend également que le gestionnaire de parc d'ECME (équipement de contrôle, de mesure et d'essais) ne doit pas suivre les équipements d'un même type de la même façon ! Tous les pieds à coulisse ne peuvent pas avoir une même périodicité de raccordement métrologique (étalonnage et/ou vérification). Cela est fonction du risque que l'entreprise accepte. Tous les thermomètres n'ont pas le même rôle, la même importance dans



↑ Fig. 6



↑ Fig. 7



↑ Fig. 8 Stratégie de l'entreprise ou du laboratoire.

les résultats qu'ils délivrent. Pourtant, la métrologie industrielle actuelle s'est calquée aux démarches appliquées par la métrologie légale depuis la révolution française. La métrologie légale regroupe des exigences et procédures de contrôle imposées par l'État pour garantir la fiabilité de certains instruments de mesure (balances, pompes à essence, taximètres...). Elle assure la protection du consommateur, la loyauté des échanges, l'application de la réglementation. Dit autrement, c'est la balance de votre boucher. Que celle-ci soit conforme ou pas lors de sa vérification annuelle par un organisme agréé, cela ne changera rien ni

pour le boucher (qui règle la facture pour avoir le précieux sésame), ni aux clients.

La métrologie industrielle ne peut pas se contenter de remettre en conformité une fois pas an les équipements trouvés non conforme. **L'entreprise ou le laboratoire doit avoir l'assurance tous les jours que sa production reste conforme.** Pourtant, toutes les normes actuelles (ISO 9001 et toutes celles liées au management de quelque chose), précisent que l'équipement de mesure doit être étalonné et/ou vérifié à intervalles spécifiés, ou avant l'utilisation. Dès le déploiement de l'ISO 9001, tout le monde a donc vérifié son parc tous



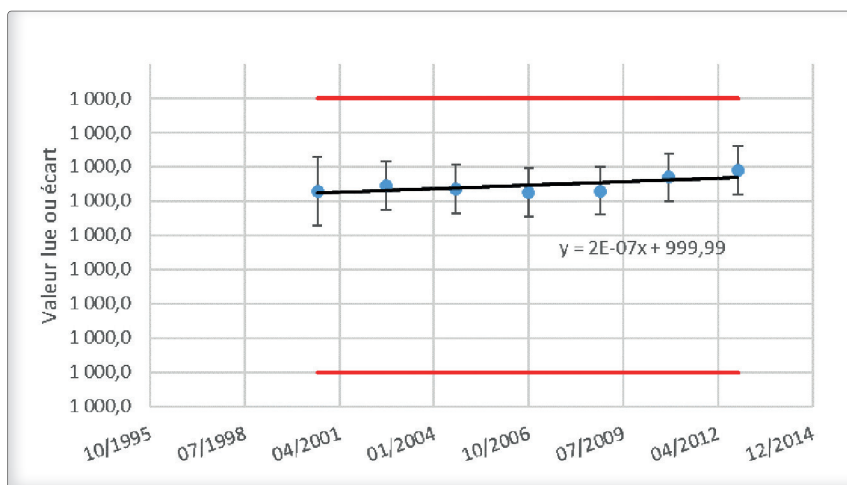


Fig. 9 Dérive selon le FD X07-014.

Coefficient

| Équipement   | Périodicité actuelle | Périodicité optimale | Périodicité retenue |
|--------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Multimètre 1 | 12 Mois              | 2,5 Année            | 2 Année             |

Formule de la périodicité élargie :  $10 * \exp(- (0,3 / 1) / 21,715)$

Formule :  $10 * \exp(- (\text{Incertitude imputable au moyen} / \text{Incertitude globale du processus}) / \text{Coefficient})$

Commentaires  
La nouvelle périodicité est de 2 ans.

Fig. 10

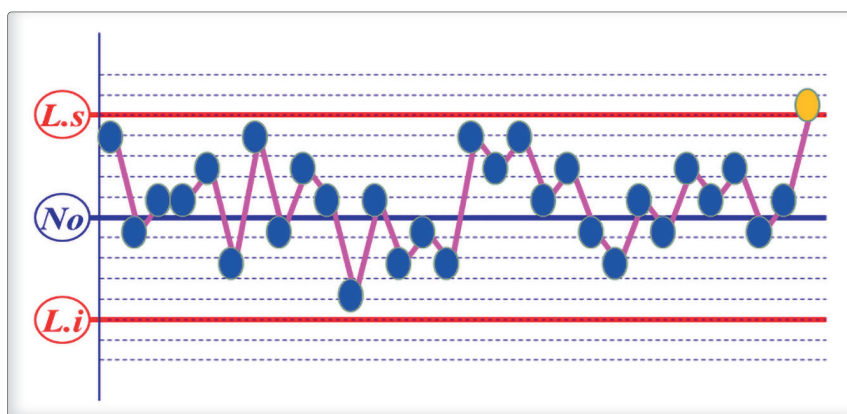


Fig. 11

les ans de façon arbitraire. Les sous-traitants se sont frottés les mains et ont proposé tout naturellement leurs services. Pourtant, depuis 2006, l'Afnor a sorti le fascicule de documentation FD X07-014 sur l'optimisation des intervalles de confirmation métrologique des équipements de mesure. Il apporte

quatre démarches qui peuvent être complémentaire :

- La détermination de la dérive maximale,
- Le rapport de périodicité,
- La surveillance des équipements,
- La méthode Opperet en annexe D (OPTimisation des PÉriodicités d'Étalonnage).

Les trois premières méthodes s'appuient respectivement sur des résultats passés, du poids de l'équipement de mesure dans le processus complet et d'un suivi par carte de contrôle.

(Figure 9, 10 & 11)

Opperet, pour sa part, est une méthode d'aide au choix des périodicités d'étalonnage et de vérification des équipements de mesure, basée sur la prise en compte des facteurs influents sur la qualité des mesurages réalisés.

Il peut s'agir de facteurs aggravant le risque de réaliser un mesurage erroné, comme l'utilisation intensive de l'équipement, des maintenances nombreuses, etc. ou de facteurs dits d'évitement (réduire le risque en diminuant la probabilité d'une mesure incorrecte) comme la redondance des mesures, le suivi statistique de l'équipement, etc.

Par exemple, si un micromètre est utilisé par un seul technicien expérimenté dans un laboratoire, il aura plus de chance de donner une « bonne » mesure que s'il passe entre les mains de plusieurs opérateurs peu attentionnés dans l'environnement poussiéreux de l'atelier.

D'autres contraintes peuvent être également prises en compte :

- **les contraintes économiques** : le prix de l'étalonnage d'un pied à coulisse n'est pas le même que celui d'une machine à mesurer tridimensionnelle,
- **les contraintes d'organisation**, comme la polyvalence des équipements, les créneaux de maintenance imposés ou le regroupement des étalonnages d'une même famille d'équipements, etc. peuvent constituer un frein au développement d'une périodicité adaptée à chaque équipement.

La méthode Opperet suggère neuf items, c'est-à-dire neuf thèmes de réflexion. Certains de ces items sont d'ordre quantitatif, d'autres sont d'ordre qualitatif.

Des critères qui en découleront, tous n'ont pas la même importance. On imagine aisément que, dans de nombreux cas, les critères traitant du risque de réaliser un mesurage erroné doivent peser d'avantage que ceux traitant de « l'organisation » des opérations d'étalonnage et de vérification. L'industriel doit donc choisir, pour chaque critère, un coefficient de pondération.

Le choix de la méthode Opperet impose de réunir un groupe de réflexion composé de différentes compétences.

# Mesure et métrologie

## Maîtriser la mesure - Une nécessité historique

Il peut être constitué des interlocuteurs suivants :

- le responsable de la Fonction Métrologie,
- un responsable de la fonction Qualité,
- un responsable de la fonction Maintenance,
- un représentant de la Fabrication,
- un représentant du service « Recherche et développement »,
- un représentant du service « Méthodes »,
- un représentant du service « Achats », etc.

La multitude des compétences représentées dans ce groupe de réflexion est une garantie de la pertinence des résultats obtenus, mais aussi de l'acceptation par tous des valeurs de périodicité proposées par la méthode Operet.

Cette analyse Operet est un véritable atout pour toute entreprise, car elle permet de décrypter les processus de mesure en place et d'imaginer ensemble la meilleure façon de suivre et gérer le parc d'équipement de mesure, au juste nécessaire.

## Affecter les ressources en fonction des risques dans le processus de mesure

Tous les équipements de mesure ne jouent pas le même rôle pour la conformité produit/process. L'entreprise doit développer une stratégie pour la bonne gestion de ses ECME. Certains moyens de mesure n'ont pas le droit à l'erreur alors que d'autres n'ont qu'un impact très faible sur le résultat final. (Figure 12)

Jusqu'à aujourd'hui, l'application du **raccordement périodique systématique** est majoritairement pratiquée. Le métrologue doit également se rappeler et peut être découvrir que le service des Méthodes met en place les plans de surveillance (PdS) produit/process lorsque cela est nécessaire sur toutes les fonctions critiques. (Figure 13)

Ces PdS s'ils sont suffisants et robustes (la métrologie devrait avoir un mot à dire et pourquoi les valider), il est alors possible de déployer demain le **raccordement conditionnel** (Figure 14).

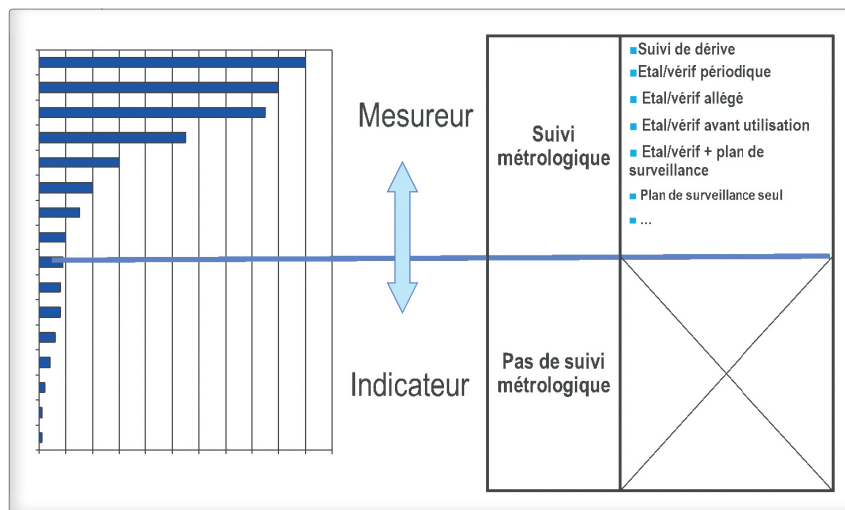


Fig. 12 Classification des moyens de mesure.

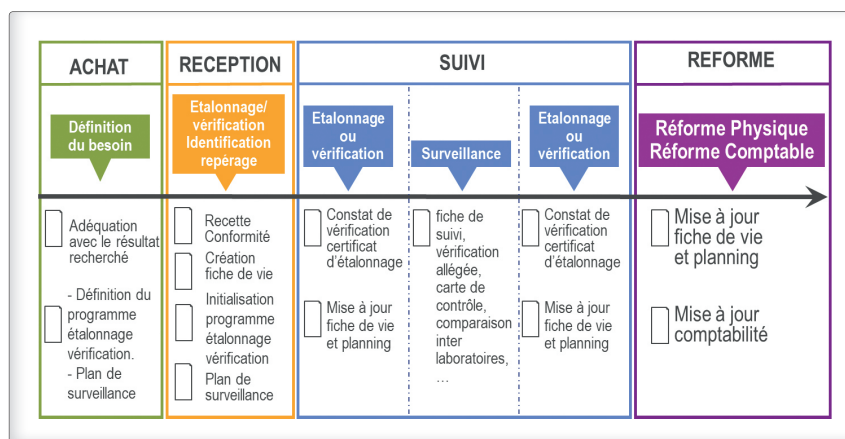


Fig. 13

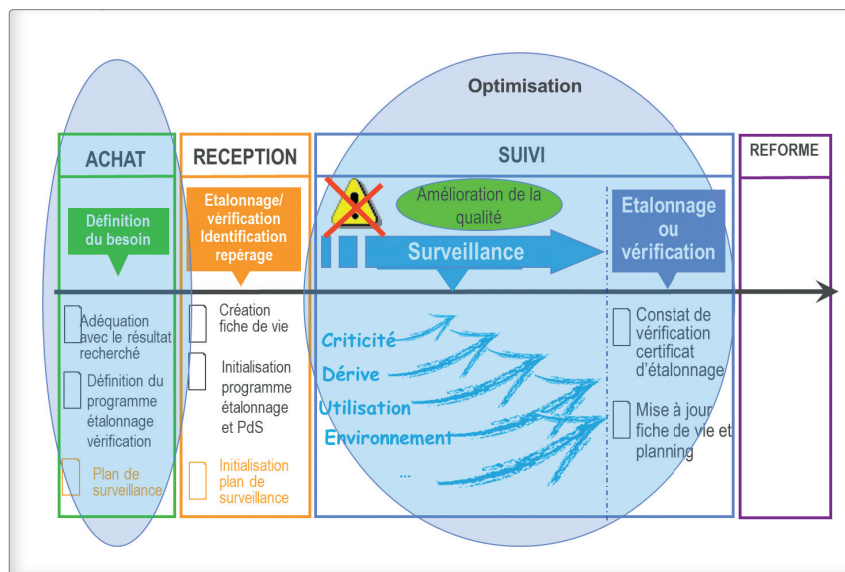


Fig. 14



La **mesure durable** doit être composée à partir du triptyque qualité, coût et délai. Le **système de management de la mesure** (SMM) bien structuré et fonctionnel permet effectivement :

- D'augmenter la qualité des mesures et donc les produits ou services proposés,
- De réduire les coûts de raccordement métrologique (très souvent imposé par les normes),
- D'étendre la disponibilité des équipements de mesure.

Le SMM complète à merveille le SMQ (système de management de la qualité). La norme ISO 10012 de 2003 est destinée à fournir des exigences génériques et des guides d'application pour le **management des processus de mesure** et pour la confirmation des équipements de mesure utilisés pour démontrer la conformité aux exigences métrologiques. Elle spécifie les exigences qualité relatives au système de management de la mesure qu'un organisme effectuant des mesures peut utiliser et intégrer dans le cadre du système de management global et qui est destiné à garantir que les exigences métrologiques sont satisfaites. La prochaine édition est en cours d'élaboration et devrait sortir en janvier 2026.

Au cours des prochaines années, la métrologie industrielle doit se transformer, s'éloigner de la métrologie légale et de son concept inadapté dans l'entreprise et le laboratoire. Elle doit embrasser de nouvelles démarches pragmatiques sur :

- son SMM avec des évaluations internes et externes,
- son dispositif de gestion et de maîtrise des compétences,
- sa maîtrise de la documentation,
- ses locaux et son environnement adapté,
- sa gestion rigoureuse des équipements et de ses activités (y compris la sous-traitance),
- sa maîtrise des équipements avec des surveillances et des méthodes de mesure formalisées et validées,
- ses prestations de mesures/essais avec l'estimation des incertitudes de mesure en adéquation avec les besoins.

Comment faire pour envisager le changement nécessaire de la **Fonction Métrologie** (Fonction qui a la responsabilité administrative et technique de définir et de mettre en œuvre le système de management de la mesure) ?

Avant de construire la *maison métrologie*, il convient de faire l'état des lieux.

Idéalement, selon l'expertise de l'entreprise ou du laboratoire, on effectue un audit interne par un évaluateur externe expérimenté et bienveillant. Celui-ci permet :

- d'avoir un retour extérieur et objectif sur ses pratiques en métrologie en vous inscrivant dans une démarche d'amélioration continue,
- d'afficher ses bonnes pratiques, sur l'ensemble de votre processus de mesure afin de donner de la confiance dans la qualité de vos produits.

## Conclusion

La Mesure durable est un enjeu majeur pour l'Industrie et le Laboratoire. Elle vise à relever les défis modernes des Systèmes de Management de la Mesure, en accompagnant les entreprises vers des pratiques plus innovantes, efficaces et efficientes. Elle contribue sans aucun doute aux objectifs de développement durable (ODD), par la réduction de l'impact environnemental, par une meilleure gestion des ressources et des processus de fabrication réellement optimisés. ■



## Paprec recrute !

Pour en savoir plus, rendez-vous sur le site :  
<https://carrieres.paprec.com/>

**Le groupe Paprec a recruté 2 000 personnes ces trois dernières années.**

Nous cherchons des ingénieurs, chefs de projets, équipes techniques...

# Quand les unités perdent toute mesure

S'il existe de nombreuses façons de mesurer des grandeurs physiques, l'expression de certaines unités défie l'intuition première de l'observateur voire s'éloignent radicalement de la nature de la grandeur mesurée. Elles peuvent néanmoins briller par leur praticité... ou leur second... degré !

### PARCOURS



**Mathieu CHARBONNIER**

IMT Nord Europe, promo 2010

Directeur commercial  
chez Eiffage Energie Systèmes.

**C**onsidérons par exemple l'origine du *nœud marin* : à l'origine, une planchette (un *loch*) était amarrée à un cordage comportant des nœuds régulièrement espacés qu'un marin comptait à haute voix au fur et à mesure qu'ils glissaient entre ses doigts. Le compte se faisait pendant la durée d'écoulement d'un sablier. Le nombre résultant, exprimé en nœuds, mesure bien une vitesse et non une longueur. (Bien entendu, la marine française et la marine anglaise n'appliquaient pas les mêmes conventions !)

Un nœud étant équivalant à un mille nautique par heure (soit 1 minute d'arc de latitude, ou 1,852 kilomètre par heure), l'usage en navigation est particulièrement adapté car cette unité respecte nativement la géographie terrestre.

Pour la petite histoire, l'usage du nœud marin n'est plus reconnu par le Bureau

International des Poids et Mesures depuis 2019.

Nous avons tous déjà constaté que pour mieux se représenter les surface ou les volumes, la presse emploie volontiers des « terrains de football équivalent » ou parle du « volume de piscine olympique » (lequel peut varier entre 2500 m<sup>3</sup> et 3750 m<sup>3</sup>, excusez l'incertitude !).

Ainsi l'aspect pratique et la perception des ordres de grandeurs l'emporte parfois sur la précision de la mesure.

### Nombre scientifique, valeur politique

Une distance peut se représenter en « jours de marche » (ou en nombre de distances de la Terre à la Lune, selon la valeur à exprimer !), tandis que de nombreuses unités de surface se référaient au travail agricole :

- le **jugère** romain représente à l'origine la surface qu'un attelage pouvait labourer en une journée ;
- le journal, l'**hommée**, la fauchée sont des surfaces traditionnelles qui correspondent à un jour de travail, leur superficie réelle dépend de la nature du sol plus ou moins facile à travailler et de la tâche prise comme référence ;
- la **sétéree** est définie comme étant la surface ensemencable par un setier de grains ; sa valeur varie d'un lieu et d'une époque à l'autre dans les mêmes proportions que le setier qui lui sert de référence.

En Europe occidentale, le système de mesure mis en place sous Charlemagne définit le **pan** comme la distance entre l'extrémité du pouce et celle de l'auriculaire d'une main aux doigts écartés, environ 24,8 cm selon les normes actuelles.

Le calcul se faisant majoritairement sur les doigts, les changements d'unités sont souvent des multiples de 12 (le nombre de phalanges d'une main atteignables par le pouce) : un « pied du roi » vaut douze pouces, qui lui-même vaut douze lignes, chacune valant douze points. On notera avec attention que la valeur dudit pied a officiellement rétréci de 0,2 cm en 1667 !

En France au Moyen-Âge, l'unité la plus petite était la livre. 280 livres équivalaient à la somme, l'unité de transport des animaux portant les charges sur leur dos (d'où provient l'expression de "bête de somme"). Pour les liquides, la somme était répartie en deux tonneaux placés sur le flanc de l'animal. Ainsi une **somme** pèse l'équivalent de 131 kg.

Les unités sont souvent définies par l'objet qui permet de contenir un liquide, ou de représenter une longueur. Ainsi l'amphore romaine contenait l'équivalent de 26 litres, tandis que l'amphore grecque était réduite à 19,4 litres.

Des siècles plus tard, l'énergie s'exprime bien en **barils de pétrole**...

L'homogénéité des unités est un instrument de cohésion économique et donc politique. Leur usage est un symbole fort, et inversement... Les seigneurs suzerains, profitant des troubles de l'État après le règne de Charlemagne, introduisirent des moyens de mesurer plus conformes à leurs intérêts. Bientôt chaque ville, chaque village eut ses poids et ses mesures particuliers ;



il y avait même des cantons (comme en Bretagne) où l'on était obligé d'avoir jusqu'à six mesures différentes dans le même grenier ! Cette confusion et les évolutions arbitraires des étalons ont donné lieu à des injustices conduisant à la ruine des habitants des campagnes.

Un **quintal** vaut 100 kilogrammes, chacun l'a appris à l'école primaire. Sauf une application locale médiévale qui avait défini le *quintal fromage* en Auvergne, d'une masse de 115 kg (tant mieux pour les gourmands !).

Curiosité des échelles : la température qui augmente peut faire geler l'eau !

Originellement, Anders Celsius avait défini en 1742 le 0 °C comme le point d'ébullition de l'eau, et 100 °C sa température de congélation. Le Français Jean-Pierre Christin inversa l'échelle l'année suivante.

Pour rester dans la thermique : le **clo** est l'unité mesurant l'isolation thermique utilisée pour les vêtements (*clothes* en anglais). C'est l'isolation qui permet à une personne au repos de maintenir l'équilibre thermique dans une atmosphère à 21 °C (1 clo vaut donc 0,155 m<sup>2</sup>.°C/W).

Au-dessus, la personne transpire, en dessous, elle ressent le froid.

## Messages revendicatifs et humoristiques

Le **smoot** (d'après Oliver R. SMOOT) est une unité de mesure de longueur créée en 1958 basée sur la hauteur de son créateur, étudiant alors au MIT. Pour l'anecdote, il devint par la suite président de l'American National Standards Institute et de l'Organisation internationale de normalisation (ISO). L'usage a déterminé que le pont de Harvard mesure 364,4 smoots... plus une oreille. Le marquage figurerait encore sur le pont, et aurait été utilisé par la police locale pour repérer les accidents y étant survenus.

Le **sheppey** (d'après l'île de Sheppey) correspond à l'éloignement à partir duquel (ou jusqu'auquel !) il est possible de représenter un mouton ; les praticiens l'évaluent à environ 1,4 km.

Les unités peuvent aussi servir en elles-mêmes de message au service de causes, comme dans le cadre de la campagne visant à identifier la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère pour se référer à une certaine année. L'auteur de cet article peut ainsi affirmer « je suis né à 348,6 ppm ».

On peut aussi citer la « seconde de New York » (*New York second*) correspondant à la durée d'attente à un feu tricolore venant de passer au vert avant que le taxi derrière vous ne klaxonne.

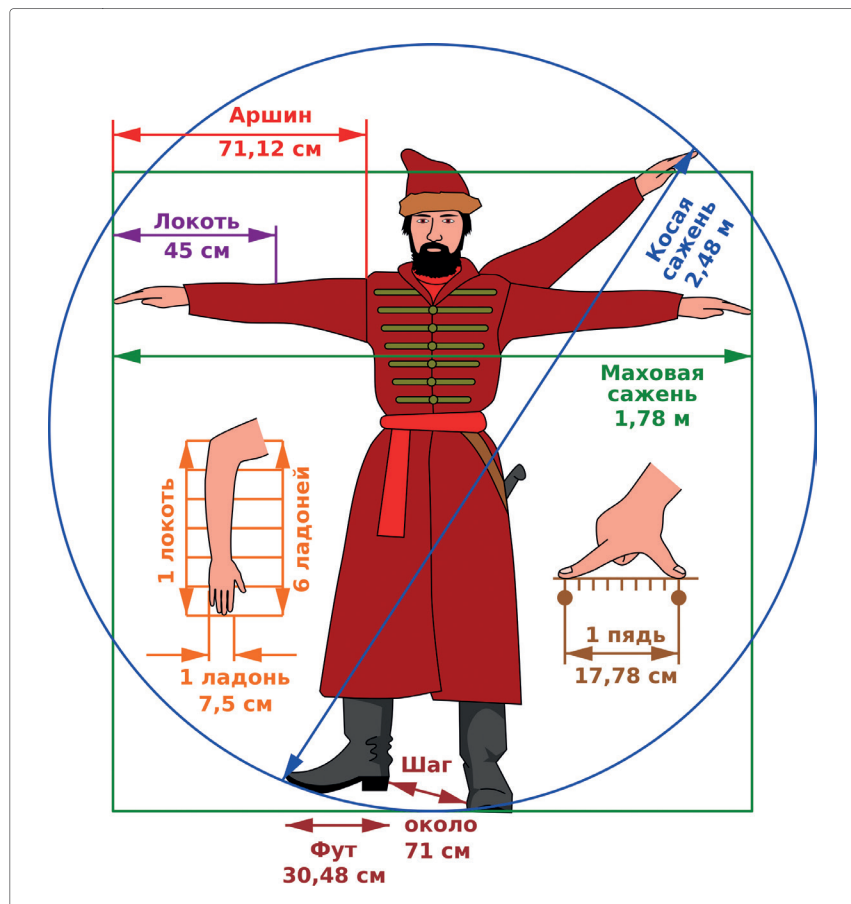
À l'instar de l'indice **Big Mag**, mesure de parité de pouvoir d'achat, inventée par le magazine *The Economist* en 1986, certaines unités de mesure expriment avec une grande simplicité des concepts plus complexes.

Ainsi on pourrait aussi imaginer la création de nouvelles unités de mesure de temps : « j'arrive dans 2 clopes et demi » ou « encore 3 stations de métro et j'arrive à mon rendez-vous », de nombre de personnes « il y avait bien 2 lignes de métro 13 en heure de pointe »

## Au-delà de l'unité, le symbole

Au-delà d'un souci légitime de précision et de facilitation des échanges, l'usage d'une unité peut aussi incarner une valeur d'adhésion politique. La maîtrise scientifique moderne a fini par objectiver et dépassionner les pratiques. La nature ayant horreur du vide (et la science aimant se moquer d'elle-même), la créativité scientifique et un peu d'autodérision ont permis le développement de nouvelles notions transmises par leur simple unité.

Pour célébrer ces découvertes truculentes, il serait finalement bien sympathique d'aller « boire un pot » dont le volume restera à l'appréciation de chacun ! ■



### SOURCES

- [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_humorous\\_units\\_of\\_measurement?oldid=687408740](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_humorous_units_of_measurement?oldid=687408740)
- Jean-Claude HOCQUET  
Les mesures ont aussi une histoire  
*Les mesures ont aussi une histoire - Persée*



Unités de longueur traditionnelles russes.  
Source : Wikipedia, sous licence Creative Commons



162 rue Henri Ducassou  
56850 CAUDAN

Tél. 06 43 29 32 98

[contact.lecoroller@l2ctuyauterie.fr](mailto:contact.lecoroller@l2ctuyauterie.fr)



SUIVEZ-NOUS SUR 



Environia SAS  
51 route de Saint-Jean-Ligoure  
87 110 Le Vigen  
[info@environia.com](mailto:info@environia.com)  
[www.environia.com](http://www.environia.com)  
05.55.14.48.49



**Fourniture, installation et maintenance d'équipements pour la méthanisation.**  
**Location de gazomètres et torchères mobiles pour vos besoins ponctuels.**







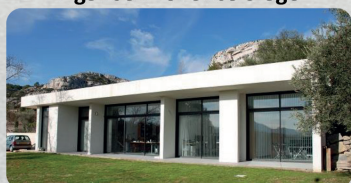
Parc d'activités de la Croisette - CS 20079 - 62302 LENS Cedex  
Tél. **03 21 08 11 11** - Email : [contact@entreprise-miroux.com](mailto:contact@entreprise-miroux.com)

<https://entreprise-miroux.com>



**Bureau d'Etudes Techniques**  
**Spécialisé dans le domaine des infrastructures, VRD et Hydraulique**

Agence Provence Siège



à La Bouilladisse (13)

Agence Var



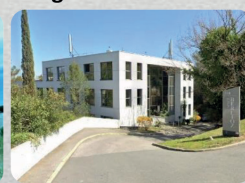
à Six-Fours (83)

Agence Rhône



à Orange (84)

Agence Côte d'Azur



à Sophia-Antipolis (06)

**Voirie**

**Réseaux Divers**

**Hydraulique**

**Environnement**

# La métrologie dimensionnelle

## La métrologie en quelques questions

### Pourquoi mesurons-nous la géométrie des produits ?

La métrologie dimensionnelle fait partie du domaine de la qualité, elle assure le contrôle de la géométrie des pièces ou assemblages issus d'une production. Le contrôle est effectué vis-à-vis du **besoin géométrique** exprimé via un plan. Le 3D peut également s'avérer indispensable pour les pièces complexes.

Le besoin géométrique d'une pièce se porte sur sa **montabilité**, sa **fonctionnalité** et enfin son **esthétique**. Ces besoins sont généralement identifiés par différents bureaux qui travaillent en coordination pour designer un produit afin qu'il atteigne l'ensemble des exigences souhaitées par le client.

- Le bureau des méthodes définit la procédure d'assemblage de la pièce, il pose ainsi les exigences géométriques de **montabilité** de la pièce. Cette étape permet de retranscrire le référentiel de contrôle de la pièce (ABC). Celui-ci détaille les zones de la pièce qui permettent de bloquer les 6 degrés de liberté de la pièce (3 Translations et 3 Rotations).
- Le bureau d'études définit la fonction de la pièce, il exprime donc les exigences géométriques de **fonctionnalité** de la pièce.

### PARCOURS



#### **Bastien DONADIEU**

IMT Mines Albi, promo 2014

Ingénieur tolérancement en bureau d'étude puis Associé co-gérant chez Mesure et Scan Laser (MSL) depuis 2019.

MSL est une PME de 20 collaborateurs qui fournit des services de métrologie dimensionnelle 3D palpé et scan, propose son expertise sur les besoins de mesure et tolérancement, rétroconception dans les domaines de l'aéronautique, du spatial, de l'énergie et du transport.

- Enfin, la qualité produit définit la qualité cosmétique de la pièce seule, et de la pièce dans son assemblage. Elle définit donc les exigences géométriques **esthétiques** de l'ensemble.

(figure 1)

### Comment l'exigence est-elle décrite ?

L'ensemble de ces exigences sont rassemblées dans des plans de définition ou de contrôle. Elles sont réparties en cotes dimensionnelles et en cotes géométriques.

La cote dimensionnelle limite les dimensions de la pièce. Cette cote est principalement une distance, un diamètre, un angle. Elles sont mesurables avec des outils "simples", comme un pied à coulisse, un micromètre ou une colonne à mesurer.

La cote géométrique limite le rapport de forme et de position de l'entité (surface, plan, alésage...) tolérancé. Ces cotes peuvent être diverses : planéité, parallélisme, localisation, co-axialité. Elles sont mesurées avec des moyens dits "3D" qui permettent de mettre en relation une entité (référence) par rapport à une autre (entité tolérancée). Il s'agit de bras poly-articulés, de machines à mesurer tridimensionnelles, de laser tracker... En Europe, les exigences géométriques sont exprimées sur le plan via un ensemble de normes regroupées sous le nom de "spécification géométrique de produits"

ISO GPS (Geometrical Product Specification). Il s'agit en réalité d'un "lexique graphique" qui détaille comment retranscrire une exigence géométrique sur un plan de définition. L'objectif étant que le besoin des différents bureaux puisse être fidèlement exprimé et compris par le fabricant de la pièce, ainsi que le métrologue qui vérifiera la conformité des cotes. (figure 2)



## Comment identifier le meilleur moyen de mesure ?

Dans le domaine de la métrologie dimensionnelle nous sommes donc amenés à mesurer des microcomposants électroniques jusqu'à des produits de très grandes dimensions comme des sous-marins, des avions ou des bâtiments entiers. Tant qu'il y a un besoin de contrôler que les exigences géométriques sont bien respectées il y aura besoin de **Métrologues 3D**.

Le niveau d'exigence dépend d'une part de la criticité de la pièce, du niveau de performance souhaité mais également de ses dimensions. Pour exemple, le défaut acceptable de position de la ferrure attache voilure du mât réacteur d'un avion par rapport à la zone d'attache du moteur est de 0.5 mm. Dans le génie civil, le positionnement d'un dock de supportage d'une machine d'usinage se fait à 10 mm près.

C'est le métier du métrologue d'adapter son moyen de mesure à la cote/exigence à mesurer. Les moyens de mesures utilisés pour le contrôle sont très variés. S'il s'agit d'une exigence dimensionnelle un simple pied à coulisse peut suffire. Mais s'il s'agit d'aligner l'afficheur tête haute d'un pilote avec l'ensemble fuselage de l'avion, un laser tracker de longue portée sera incontournable. Le métrologue va également devoir évaluer si l'incertitude de son moyen ne va pas détériorer sa mesure. Pour cela il adapte le moyen à la tolérance la plus fine exigée au plan. Communément, le moyen de mesure se doit d'avoir une incertitude de mesure au moins 4 fois inférieure à l'intervalle de tolérance le plus faible qu'il souhaite contrôler.

Si le design du produit est fait de surfaces gauches (en opposition aux géométries simples comme plan, cônes, cylindres, etc.) un scan de la surface sera plus pertinent. Cela permet de recueillir la position de milliers de points par seconde et balayant la pièce sans contact. Ceci est également privilégié sur les pièces souples pour éviter de les déformer au palpage.

(figure 3)

Fig. 3 Différents outils de mesure et leurs incertitudes.

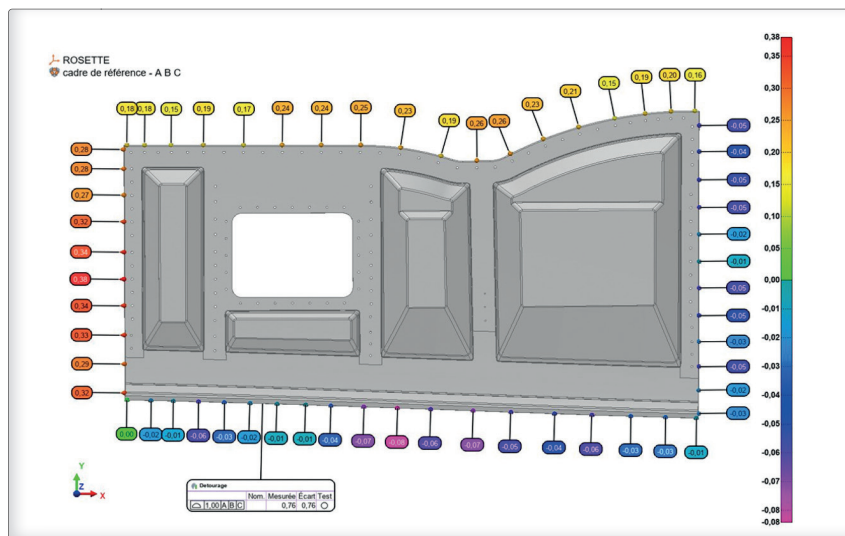


Fig. 1 Exemple de mesure du détourage de la pièce par rapport à son référentiel d'assemblage. Cela permet de savoir si la pièce se montera correctement vis-à-vis de ses voisines.

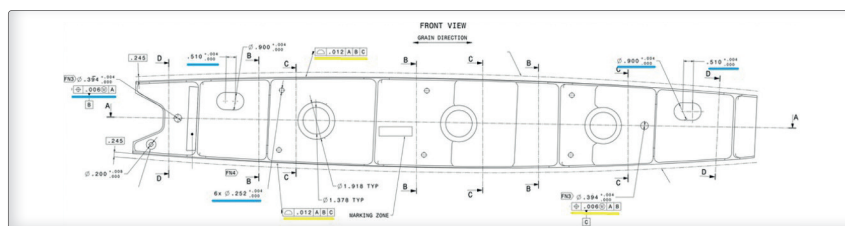
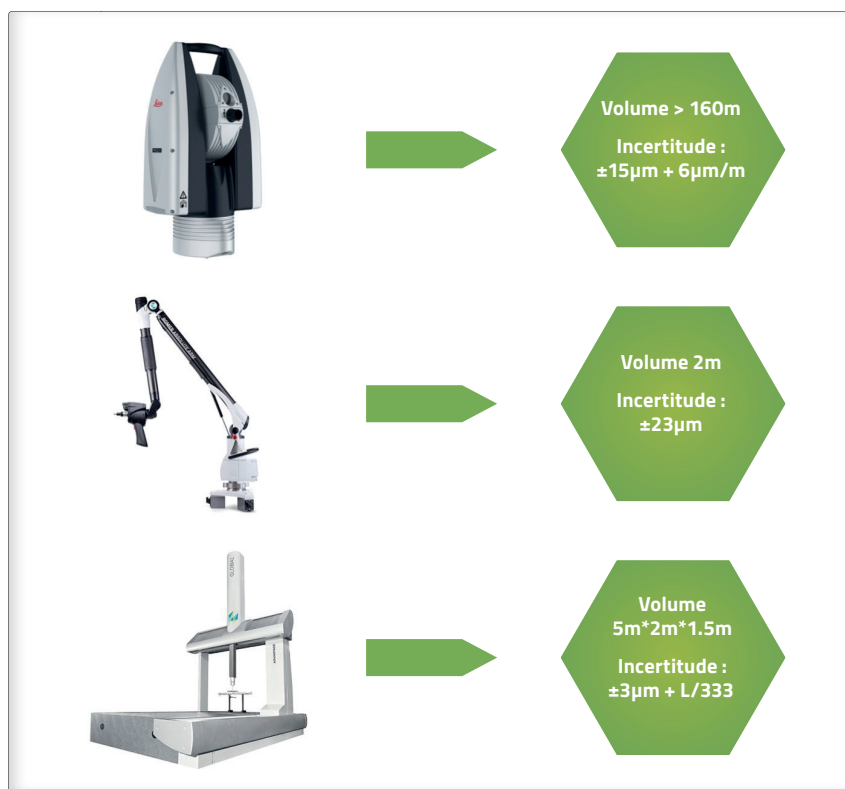


Fig. 2 Exemple de plan de pièce avec cotation géométrique (en jaune) et dimensionnelle (en bleu).



# Mesure et métrologie

Un outil industriel indispensable

## Comment la métrologie aide à faire "bon du premier coup" ?

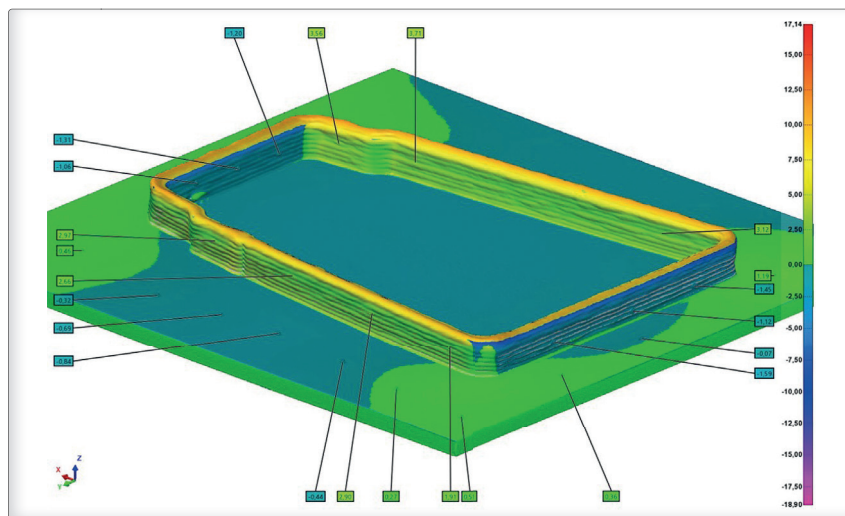
Quand il est intégré dans la chaîne de production, le service de métrologie permet également de faire du réglage de production. Une pièce forgée ou en impression métallique est scannée ; une fois le nuage de point maillé, il est comparé à la CAO de la pièce à usiner dans ce brut. Si le métrologue identifie un manque de matière (du fait d'un désalignement de la partie haute et basse de la pièce par exemple). Il indique au poste de fabrication la position de manque de matière afin que le process soit corrigé (réalignement du poinçon et de la matrice par exemple). Pour éviter de perdre la pièce, il analyse comment usiner le brut afin que la pièce usinée puisse "rentre" dans le volume de brut malgré le défaut de production. Il marque la pièce avec un poinçon pour définir où débiter l'usinage (en Translation X, Y et Z) et comment orienter l'usinage (en rotation sur X, Y et Z). Cela permet à l'usineur de positionner son programme de manière optimisée et ainsi sauver la pièce.

(figure 4,5 & 6)

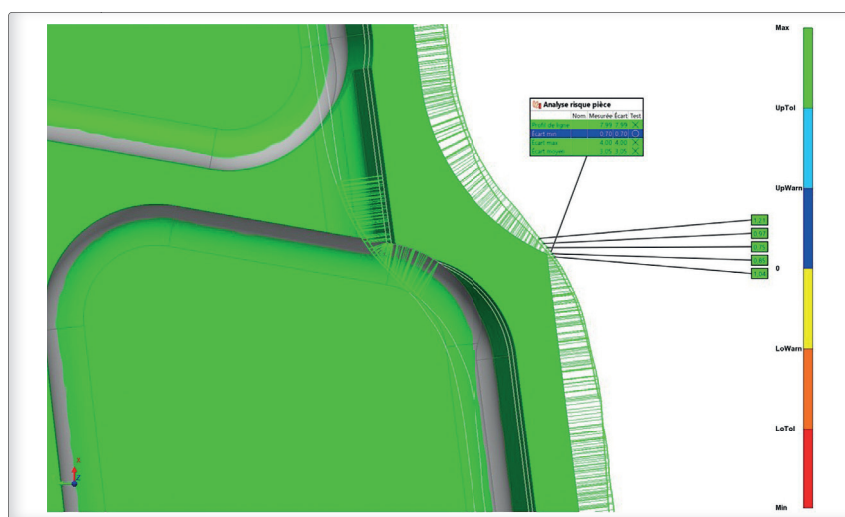
Le métrologue fait également de la remise en conformité d'outils de production. Un outillage permettant d'assembler à quelques centièmes près les pièces qui composent la structure du mât moteur d'Airbus se doit d'être régulièrement contrôlé (60 avions par mois pour l'A320). Cette mesure de grande précision est donc pilotée par le métrologue via une Machine à Mesurer Tridimensionnelle, dite MMT. Le programme de mesure, créé par le métrologue, vient palper l'ensemble des interfaces de l'outillage. Si des défauts géométriques sont identifiés, il incombe au métrologue de définir la stratégie de réglage. Ajouter/retirer de la matière, dégoupiller et repositionner l'interface, ajuster le référentiel, etc. Une fois l'outillage renvoyé en production, il doit être conforme.

(figure 7)

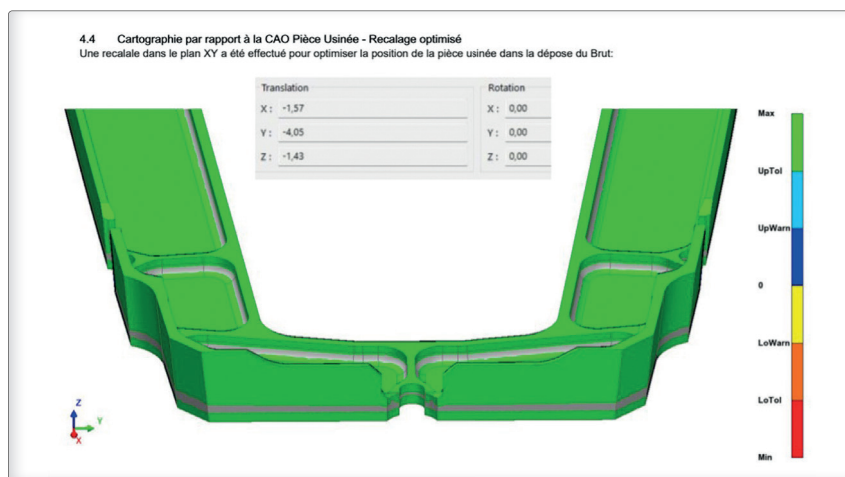
En conclusion, la métrologie 3D est en forte augmentation dans le monde industriel. Elle suit les besoins grandissants de contrôle qualité pour faire bon du premier coup. La cotation géométrique a en effet joui d'un fort déploiement avec les augmentations



↑ Fig. 4 Impression 3D métallique.

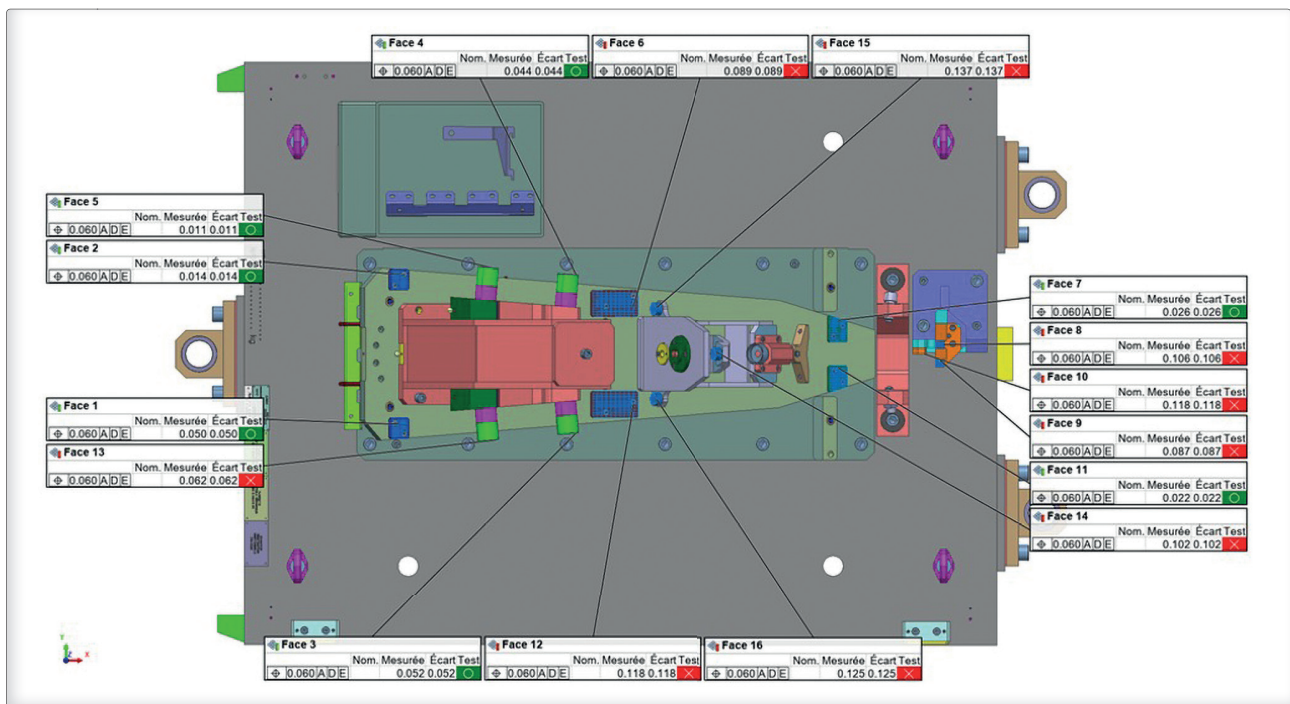


↑ Fig. 5 Identification d'un risque de manque matière à l'usinage (Les vecteurs représentent le surplus matière entre le Brut et la CAO de la pièce à usiner à l'intérieur de ce brut).



↑ Fig. 6 Consignes d'optimisation pour usinage pièce.





↑ Fig. 7 Consignes d'optimisation pour usinage pièce

de cadences de l'industrie automobile. L'interchangeabilité des pièces (pouvoir assembler n'importe quelle pièce A avec n'importe quelle pièce B) a permis aux chaînes de production d'économiser du temps d'assemblage et de retouches pièces. Les grandes industries ont rapidement suivi le pas et les exigences géométriques sont maintenant indissociables des cotations des pièces automobiles, aéronautique, spatial, navales, énergie, ameublement grand marché...

Dans les chaînes de grande série, la métrologie dimensionnelle de demain sera complètement intégrée aux lignes de production. En effet, les constructeurs de moyens de mesures présentent des performances de mesures sans contact de plus en plus précises et à des coûts

rivalisant avec des moyens manuels. Associée à des systèmes robotisés cela pourra permettre un gain de temps important. La recherche et développement du couple moyen de mesure et gamme de mesure sera toujours effectuée par un expert en métrologie dimensionnelle mais la réalisation de la mesure pourra être automatisée en grande partie.

Les entreprises de fabrication de plus petites dimensions ou les entreprises dont le secteur d'activité n'était pas encore impacté par des exigences géométriques pourraient se confronter à une généralisation de cette cotation de la part de leurs clients. Pour cela il faudra avoir la capacité d'interpréter ou de retranscrire le vocabulaire de la norme ISO GPS afin de fabriquer en cohérence avec l'exigence géométrique qui sera contrôlée. ■

# Métrologie du trafic dans les réseaux informatiques

L'Internet est une interconnexion de multiples réseaux basés sur des technologies diverses. Ainsi, l'Internet interconnecte des réseaux filaires (notamment en fibre optique), cellulaires (4G, 5G, ...), satellites en orbite basse (LEO) et géostationnaires (GEO), réseaux de capteurs et internet des objets (IoT), cloud, etc. Il sert de support à de plus en plus d'applications ayant des besoins de communication en termes de performance et de qualité de service (QoS) de plus en plus variés et exigeants. La gestion d'une interconnexion de réseaux aussi complexe est une tâche essentielle. Elle repose grandement sur la supervision de ces réseaux grâce à des techniques de métrologie permettant de mesurer et analyser le trafic transitant sur les réseaux ainsi que leurs paramètres de performance. La gestion des réseaux et de leur trafic est stratégique mais également très coûteuse pour les opérateurs. Aussi, l'objectif est de l'automatiser au maximum en exploitant les capacités de la métrologie et de l'intelligence artificielle (IA). Cela permet donc de réduire les coûts, mais aussi d'accélérer la réponse à tout événement. En particulier, les réseaux étant de plus en plus souvent la cible d'attaques, la métrologie et l'IA représentent une nouvelle approche pour la cybersécurité.

Dans un tel contexte, cet article a pour objectif d'introduire la problématique liée à la métrologie des réseaux, les différentes techniques de mesure et de capture de trafic et quelques outils libres et largement utilisés.

## Caractéristiques générales du trafic IP

Les réseaux aujourd'hui sont multi-services : ils transportent les flux de nombreuses applications possédant des caractéristiques différentes et des contraintes de QoS différenciées. Cependant, dans le souci d'une

modélisation simplifiée, on s'accorde généralement pour distinguer deux grandes classes de trafic dans les réseaux :

- Le trafic de type « **streaming** », dont la durée et le débit ont une réalité intrinsèque. Souvent associé à la notion de services « orientés connexion », son intégrité temporelle doit être préservée par le réseau. Le délai de transfert des données et leur gigue (la variation temporelle sur les délais) doivent être contrôlables, tandis qu'un certain degré de perte de paquets peut être tolérable. Les flux de trafic streaming sont typiquement produits par les services téléphoniques et vidéo (vidéoconférence), mais aussi par les jeux en ligne qui nécessitent des délais d'acheminement courts pour assurer l'interactivité requise entre les joueurs. Le protocole utilisé est généralement

UDP, non fiable, mais dont l'absence de mécanisme de reprise des erreurs assure des délais minimaux. Les applications dites de « streaming » (Netflix, Disney+, etc.) utilisent pourtant TCP (au lieu d'UDP), mais en fonctionnant sur la base d'une bufferisation d'au moins quelques secondes pour pallier les éventuelles baisses de débit sur les liens par exemple. Les délais entre l'émission et la visualisation au niveau du récepteur sont donc assez élevés, mais suffisamment courts pour des retransmissions en direct d'événements sportifs ou culturels (matches, concerts, ...). Les applications de streaming génèrent donc des flux qui ont une certaine élasticité, même si cette élasticité reste contrainte, notamment lors de retransmission de ces événements sportifs ou culturels (BeIN, DAZN, ...).



- Le trafic dit « **élastique** », ainsi nommé car son débit peut s'adapter à des contraintes extérieures (bande passante insuffisante par exemple) sans pour autant remettre en cause la viabilité du service. Cette classe de trafic est essentiellement engendrée par le transfert d'objets numériques tels que des pages Web (application HTTP), des messages électroniques (e-mail, application SMTP) ou des fichiers de données (application FTP ou Pair-à-Pair - P2P). Le respect de leur intégrité sémantique est indispensable mais les contraintes de délai de transfert sont moins fortes. Cette intégrité sémantique est la plupart du temps assurée par le protocole de transport (TCP) et ne constitue donc pas un élément de performance sur lequel l'opérateur de réseau puisse agir ; en revanche, le maintien d'un certain débit effectif minimum de transfert des documents est un objectif de QoS.

L'analyse des caractéristiques du trafic Internet s'effectue commodément en se plaçant à un niveau de représentation selon trois entités de trafic, correspondant à trois échelles de temps différentes et, de manière assez grossière, à trois niveaux (couches) de la pile protocolaire des réseaux de données :

- Les « **paquets** » forment l'entité de trafic la plus fine que l'on considère dans les réseaux de données, le paquet étant l'unité élémentaire traitée par la couche « réseau ». Les paquets sont *a priori* de longueur variable dans un réseau IP et leur processus d'apparition est très complexe, en raison notamment de la superposition de services de nature très diverse et de l'interaction des couches protocolaires (dispositifs de contrôle de flux et de retransmission en cas de perte de paquets, tels TCP).
- Les « **flots** » constituent une entité de trafic intermédiaire que l'on pense être la mieux adaptée pour effectuer les études d'ingénierie du trafic IP. Ils correspondent à des transferts plus ou moins continus de séries de paquets associés à une même instance d'une application donnée. Les flots de type streaming sont associés à des communications audio/vidéo (téléphonie sur IP, vidéoconférence, VoD) ou encore à des téléchargements en temps réel de séquences vidéos. Les flots de trafic élastique sont créés par le transfert d'un fichier, d'un message, d'un objet (ou document) au sein d'une page web, etc. Un flot correspond donc plus ou moins à la couche transport de la pile protocolaire Internet ; mais pas

complètement puisque cette notion n'est pas nécessairement équivalente à celle d'une connexion TCP. Les flots peuvent avoir des durées s'étendant de quelques secondes à quelques minutes, voir quelques heures.

- Au plus haut niveau, on peut définir la notion de « **sessions** » dans le but de se rapprocher des périodes d'activité des utilisateurs (transposition de la notion d'appels considérée en téléphonie à commutation de circuits). Pour le trafic streaming, ce niveau ne se distingue guère de celui des flots, du moins temporellement, puisque ce dernier correspond déjà à des communications ou des appels. S'agissant du trafic élastique, les sessions peuvent être associées à des connexions Telnet, FTP, ou à des envois de messages électroniques. La notion de session est (encore) plus floue au sujet des connexions de type WWW selon le protocole HTTP : on peut par exemple la définir comme étant la durée de transfert d'une page web dans son ensemble (comportant plusieurs objets à transférer) ou d'une suite de pages associées à une même consultation. Les sessions sont générées par la couche application des réseaux et l'ordre de grandeur de leur durée se situe entre quelques minutes et quelques heures.

Il est donc important en métrologie d'analyser le trafic Internet à ces 3 niveaux. Toutefois, en termes de mesures, les informations des 3 niveaux sont contenues dans les informations du niveau le plus bas, soit le niveau paquet. Dès lors, les mesures à proprement parler sont généralement faites au niveau paquet, et ce sont ensuite des logiciels de traitement des traces et mesures qui permettent d'en extraire les informations de niveaux flots et sessions.

## Les métriques

La QoS est aujourd'hui délicate à définir, et il n'existe pas de consensus au niveau des acteurs de la communauté réseaux. En effet, beaucoup limitent la définition de la QoS au triptyque :

- Délais de transmission des paquets et temps d'aller-retour (RTT : Round trip Time) ;
- Débit ;
- Taux de perte au niveau des paquets.

## PARCOURS



### Philippe OWEZARSKI

Directeur de recherche au CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), et travaille au LAAS (le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes), à Toulouse, France. Il a obtenu un doctorat en informatique en 1996 et une habilitation à diriger les recherches en 2006 de l'université Paul Sabatier, Toulouse III. Ces principaux thèmes de recherche se situent dans le domaine des réseaux informatiques du futur, et plus particulièrement sur la métrologie des réseaux IP et la gestion de la qualité de service et de la sécurité dans l'Internet à partir de mesures.

Cette définition se limite à considérer des paramètres physiques de la transmission de paquets de données. On peut aussi parler de KPI (Key Performance Indicators). Toutefois, de nombreux acteurs du domaine des réseaux considèrent également que la QoS intègre des paramètres plus complexes (et moins physiques) comme :

- la disponibilité des services réseau, i.e. la possibilité pour un utilisateur d'envoyer une information avec une QoS donnée, à tout moment ;
- la sécurité des transmissions, i.e. la capacité du réseau à assurer que les messages ne seront pas lus ou altérés par un pirate informatique ;
- la robustesse du réseau, i.e. sa capacité à continuer à fonctionner correctement et avec le niveau de performance et de QoS requis même en cas de panne de certains de ses composants, ou en cas d'attaque ;
- etc.

En ce qui concerne la métrologie, et sa première étape qui est la mesure ou la collecte d'informations, il est évident que ce sont des paramètres physiques qui vont

# Mesure et métrologie

Un outil industriel indispensable

pouvoir être mesurés. Les paramètres plus complexes, dont la définition et les métriques pourront être fixées par chacun, seront en fait déterminés à partir de la mesure de ces paramètres de base. Dans la suite qui se focalise sur la mesure et l'observation des effets du réseau sur le trafic et sa QoS, nous allons donc nous limiter à la mesure et l'observation du triptyque (délai, débit, perte).

Toutefois, le terme QoS peut avoir différentes connotations selon la personne qui l'emploie. Pour simplifier un peu la problématique, on peut considérer qu'il existe deux points de vue principaux :

- **Le point de vue des applications** (ou des utilisateurs) : chaque application a des besoins en termes de débit, délai, gigue, fiabilité, etc. Ces besoins sont naturellement différents d'une application à l'autre, et chaque application souhaiterait pouvoir bénéficier d'un service de communication spécifiquement adapté à ses besoins.
- **Le point de vue des opérateurs** dont les objectifs sont d'optimiser l'utilisation des ressources de l'infrastructure de communication (et ainsi de maximiser leurs gains), de limiter les pertes et les délais, et de pouvoir facturer de façon juste et cohérente les services rendus aux utilisateurs.

## Points durs juridiques

De nombreuses règles juridiques s'appliquent au domaine de la métrologie des réseaux. La loi RGPD (Règlement Général sur la Protection des Données) interdit notamment de créer des fichiers contenant des données sur les individus et leurs usages sauf à les en informer et obtenir leur autorisation. Typiquement, la collecte de traces de trafic entre sous le coup de cette loi.

Pour encore plus protéger les utilisateurs, les chercheurs et ingénieurs qui collectent des traces de trafic les anonymisent, i.e. transforment les adresses IP contenues dans les traces par un processus irréversible, mais qui a la propriété de conserver la structure hiérarchique de l'adressage Internet. Ainsi, les ingénieurs et chercheurs pourront continuer à mener leurs recherches sur le routage ou les matrices de trafic par exemple.

Toutefois, même en restant sur des aspects d'analyse technique des réseaux, il est très difficile de convaincre les

opérateurs de donner accès à des traces de trafic provenant de leur réseau. En effet, ces traces contiennent, pour un métrologue averti de très nombreuses informations sur l'architecture du réseau, les mécanismes protocolaires utilisés et les politiques de gestion mises en place. De la même façon, cela donne des informations sur la QoS que ce réseau peut offrir aux utilisateurs, sur sa robustesse face aux attaques, etc. Or la fourniture d'accès et de services Internet est un domaine économique très concurrentiel. Révéler les secrets de conception et d'administration d'un réseau revient donc à révéler un secret industriel et les concurrents pourraient ainsi en profiter en copiant cet opérateur. Également, révéler la qualité de service que peut fournir un réseau – surtout si elle est basse – ou les failles de sécurité peut aussi porter préjudice à un opérateur qui pourrait être boudé par les utilisateurs potentiels qui lui préféreront un concurrent. Révéler les secrets de conception d'un réseau pourrait également servir à des pirates informatiques pour l'attaquer de façon imparable. Finalement, ces informations de métrologie sont très stratégiques pour les opérateurs réseau. Ils les gardent donc jalousement, et contrôlent très fortement les informations qu'ils rendent publiques.

## Techniques et outils de mesure et métrologie

### 1. Mesures actives

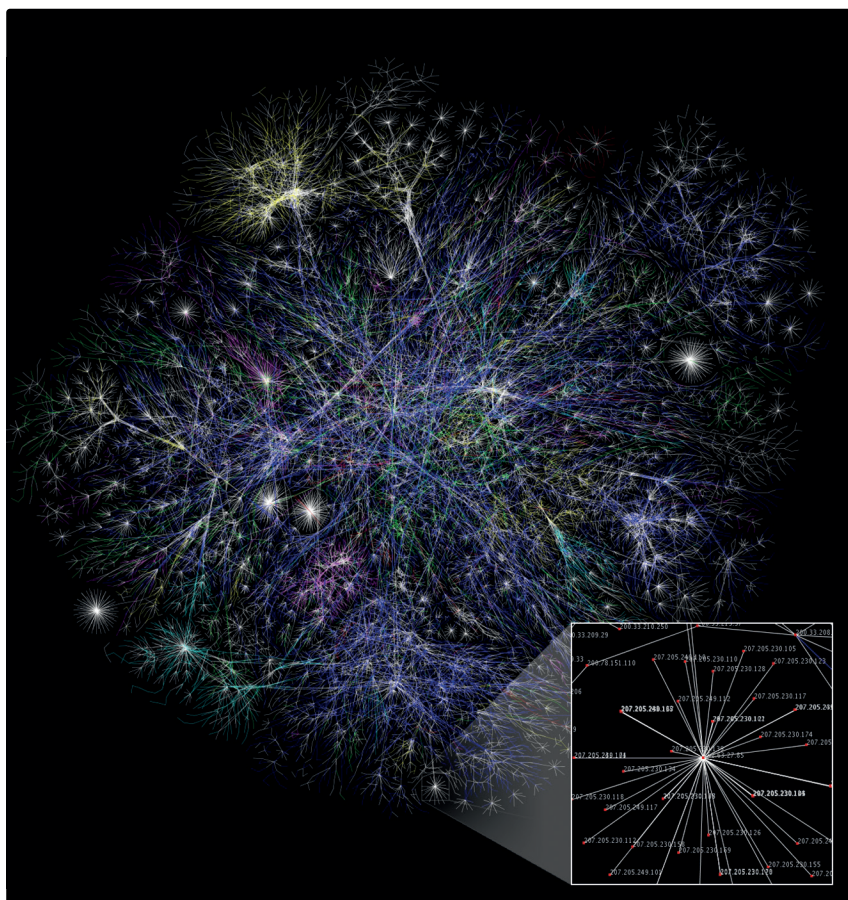
Le principe des mesures actives consiste à générer du trafic sonde dans le réseau à étudier et à observer les effets des composants et protocoles – réseaux et transport – sur le trafic : taux de perte, délai, RTT, etc. Cette première approche possède l'avantage de prendre un positionnement orienté utilisateur. Les mesures actives restent le seul moyen pour un utilisateur de mesurer les paramètres du service dont il pourra bénéficier.

Cela implique cependant pour mesurer des délais de disposer de machines de mesure synchronisées. En effet, si les horloges des machines sonde impliquées dans une mesure de délai sont désynchronisées, le résultat n'aura aucune valeur et ne sera pas exploitable. Il existe bien des protocoles de synchronisation d'horloges

en réseau, dont le plus connu et utilisé est NTP (Network Time Protocol), mais les évaluations de performance de ce protocole ont montré que même s'il parvenait à des résultats assez satisfaisants pour les réseaux locaux, il est totalement insuffisant sur les réseaux longues distances étendus comme l'Internet. En l'absence de solution logicielle, une solution matérielle peut être utilisée. Elle consiste à utiliser des antennes GPS pour synchroniser les équipements de métrologie sur le signal PPS (Pulse Per Second) du GPS, les impulsions reçues correspondant aux secondes pleines des horloges atomiques de référence. Le temps est donc parfaitement synchronisé à l'échelle planétaire, et la dérive des horloges est quasiment inexistante, car les horloges sont recalées toutes les secondes. Un tel système de synchronisation reste malheureusement très coûteux, et à multiplier par le nombre d'équipements de mesure qui doivent en être équipés.

L'un des problèmes majeurs avec les mesures actives est la perturbation introduite par le trafic de mesure qui peut faire évoluer l'état du réseau et ainsi fausser la mesure. En effet, le résultat de la mesure donne une information sur l'état du réseau transportant à la fois les données normales des utilisateurs et de signalisation du plan de contrôle du réseau, mais également l'ensemble des paquets sondes. Or on souhaiterait avoir une information qui correspond au trafic normal uniquement, sans les paquets sondes lesquels ont forcément un impact sur les performances du réseau. Il faut donc soit être capable d'estimer l'impact des paquets sondes sur les performances du réseau, soit être sûr que ces paquets sondes auront un impact minimal, si possible quasi nul. C'est cette dernière proposition, a priori plus simple, qui suscite le plus d'efforts de recherche. On parle de trafic de mesure non intrusif. Ainsi, de nombreux travaux abordent ce problème en essayant de trouver les profils de trafic de mesure qui minimisent les effets du trafic supplémentaire sur l'état du réseau.

Les mesures actives simples restent tout de même monnaie courante dans l'Internet pour lequel de nombreux outils de test, validation et / ou mesure sont disponibles. Parmi eux, on peut citer les très célèbres *ping* et *traceroute*. *Ping* permet de vérifier qu'un chemin est valide entre deux stations et de mesurer certains paramètres comme le RTT ou le taux de perte. *Traceroute* permet de voir apparaître l'ensemble des routeurs



← **Fig. 1** Carte des routes de l'Internet.  
Projet OPTÉ, 2005.

traversés par les paquets émis jusqu'à leur destination et donne une indication sur les temps de passage en chacun de ces nœuds.

Il existe également toute une batterie d'outils pour l'estimation de la capacité d'un lien ou d'un chemin, comme *clink* [DOW 99], *pathchar* [JAC 97], etc. De la même façon des outils, souvent assez similaires dans leurs processus estiment le débit disponible sur un chemin du réseau. On peut citer *Abing* [NAV 03], *Spruce* [STR 03], *pathchirp* [RIB 03], *IGI* [HU 03], etc. Cet article, dont l'objectif est de faire un tour d'horizon des différentes techniques de mesure, n'a pas pour objectif de rentrer dans les détails des algorithmes de chacun de ces outils. Le lecteur pourra se référer aux publications originales qui décrivent ces outils. A noter toutefois, et c'est aussi une des raisons pour laquelle nous ne nous attardons pas sur la description de ces outils, qu'ils restent assez peu efficaces : ils sont très long à converger et de fait inadaptés pour un réseau dont le trafic varie beaucoup. Ils sont également imprécis ne serait-ce que pour estimer le débit moyen disponible [LAB 05].

En plus de la mesure des KPI, la métrologie active, via le plus souvent l'outil *traceroute*, permet de cartographier l'Internet. La **figure 1** représente une carte des routes de l'Internet, telle que déterminer par le projet OPTÉ en 2005.

## 2. Mesures passives

Les projets de mesures passives sont apparus beaucoup plus récemment que les projets de mesures actives car ils nécessitent des systèmes de capture ou d'analyse du trafic en transit relativement avancés, et développés très récemment – même si quelques logiciels simples, mais aux capacités limitées, existaient déjà comme *TSTAT*, *NTOP*, *TCPdump*, *TCPtrace*, etc. Des équipements matériels plus performants sont en fait à la base de l'essor actuel en matière de métrologie passive, et ont notamment ouvert la voie à la métrologie passive microscopique. Le principe des mesures passives est de regarder le trafic et d'étudier ses propriétés en un ou plusieurs points du réseau. L'avantage des mesures passives est qu'elles permettent des analyses très avancées. En revanche, il est très difficile de déterminer le service qui pourra

être offert à un client en fonction des informations obtenues en métrologie passive. Il vaut mieux pour cela utiliser des techniques actives.

Les systèmes de métrologie passive, peuvent également se différencier en fonction du mode d'analyse des traces. Ainsi, le système peut faire une analyse en-ligne ou hors-ligne. Dans le cadre d'une analyse en-ligne, toute l'analyse doit être effectuée dans le laps de temps correspondant au passage du paquet dans la sonde de mesure. Une telle approche, temps-réel, permet de faire des analyses sur de très longues périodes et donc d'avoir des statistiques significatives. Par contre, la complexité maximale pour ces analyses reste très limitée à cause du faible temps de calcul autorisé (d'autant plus faible que la capacité du réseau est importante). A l'inverse, une analyse hors-ligne oblige la sonde à sauvegarder une trace du trafic pour analyse ultérieure. Une telle approche demande ainsi d'énormes ressources ce qui représente une limitation pour des traces de très longue durée. Par contre, une analyse hors-ligne permet des analyses extrêmement complètes et difficiles, capables d'étudier des propriétés non triviales du trafic. De plus, comme les traces sont sauvegardées, il est possible de faire plusieurs analyses différentes sur les traces, et de corréliser les différents résultats obtenus sur la trace, ou obtenus sur des traces différentes, pour une meilleure compréhension des mécanismes complexes du réseau.

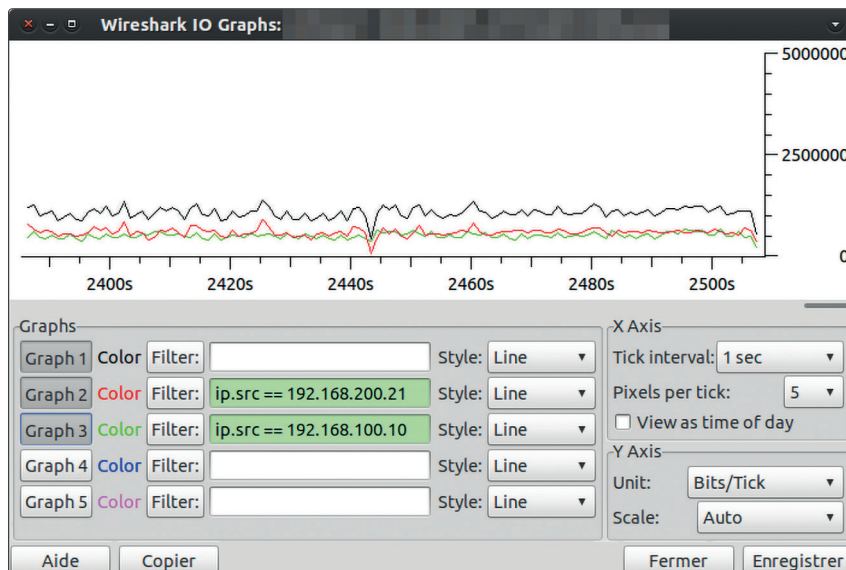
Enfin, il existe également d'autres besoins qui peuvent apparaître de seconde importance lors de la conception d'un outil de mesure mais qu'il ne faut pas négliger. Le premier concerne le problème de la métrologie d'un réseau complet et du rapatriement des données collectées au niveau des différents points de métrologie. Il est important de trouver un moyen de ramener ces données vers les machines d'analyse de façon efficace et sans influencer sur le réseau et sa charge. Le second concerne la nature des informations à collecter, et notamment la taille des enregistrements faits sur chaque paquet. En effet, collecter la totalité des données du paquet, avec donc toutes les informations applicatives, est contraire aux règles fixées par la RGPD sur le droit à la vie privée. Il faut donc bien réfléchir aux



# Mesure et métrologie

Un outil industriel indispensable

Fig. 2 Trafic capturé et tracé avec Wireshark.



données à collecter sur chaque paquet et leur représentation formelle par rapport à l'analyse que l'on souhaite faire.

Le plus célèbre outil de métrologie passive est Wireshark (la figure 2 donne un exemple de trafic mesuré, représenté via l'interface graphique de l'outil). Comme bon nombre d'outils similaires, il utilise la librairie LIBPCAP. Cette librairie permet d'aller lire sur une interface réseau les paquets qui transitent, d'en récupérer une copie, et de la stocker et/ou analyser. Naturellement, cet outil possède les avantages et les inconvénients de sa nature logicielle. Les avantages font qu'il est facile à utiliser, largement disponible (Wireshark est un logiciel libre), et ne nécessite pas d'équipements matériels coûteux pour fonctionner. A l'opposé, cet outil souffre de problèmes d'imprécisions, notamment temporelles, car le système opératoire effectue de nombreuses tâches – et peut même être interrompu – entre la capture du paquet et son estampillage par exemple. De même, des problèmes de performance limitent les capacités de traitement et d'analyse de cet outil logiciel, et parfois même de capture. Dès lors que le débit du trafic sur le lien monitoré augmente, cet outil ne donne plus satisfaction. Pour augmenter ces capacités, il faut utiliser des machines dont les capacités de traitement et de communication externes et internes sont largement supérieures, et en utilisant des noyaux temps-réels pour limiter les problèmes de précision temporelle.

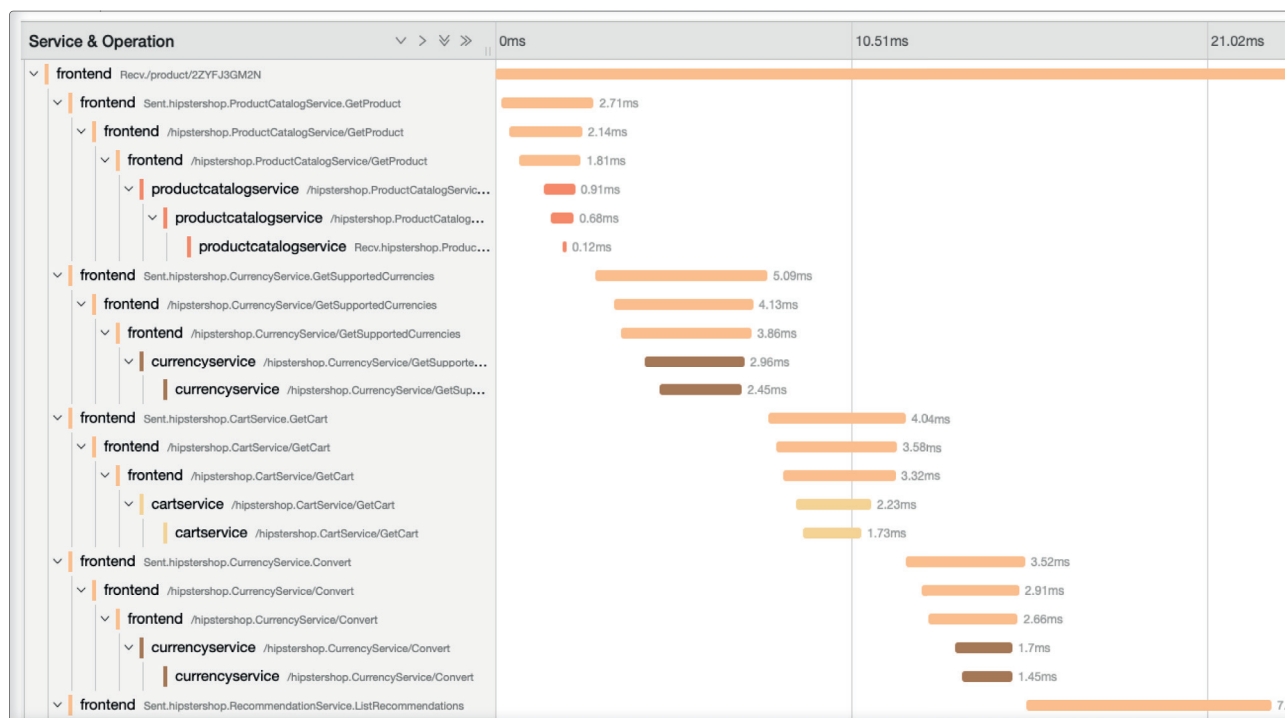
Toutefois, en pensant à la mise en œuvre opérationnelle des solutions de métrologie

dans un réseau, il apparaît que l'endroit idéal pour positionner des sondes de mesures passives est indéniablement dans les routeurs. CISCO a ainsi développé le module *Netflow* [CIS 25] dans ses routeurs, qui scrute le trafic en transit, et génère régulièrement des informations statistiques sur ce trafic. *Netflow* a ainsi été utilisé dans de nombreux projets de recherche, mais tend aussi à remplacer les solutions de gestion de réseaux chez les ingénieurs réseaux d'exploitation. *Netflow* est à la base un mécanisme pour améliorer les performances des routeurs CISCO avec une gestion interne du routage par flux qui ne nécessitait de ne router que le premier paquet de chaque flux, les paquets suivants étant ensuite commutés vers le même port que le premier paquet du flux. Ainsi, même si la commutation / routage *Netflow* a disparu des nouvelles générations de routeurs CISCO, le composant logiciel de mesures statistiques est resté, et a même été repris par toutes les marques de routeurs. L'expérience montre toutefois que les performances de *Netflow* restent limitées (code écrit en Java et interprété), et que l'influence sur les performances du routeur est non négligeable. Mais il s'agit là d'une solution disponible sur tous les routeurs de l'Internet qui est aujourd'hui largement utilisée par les opérateurs. Il faut toutefois noter que *Netflow* offre des mesures au niveau des flots du réseau, et pas au niveau des paquets pour lesquels seules quelques statistiques sont disponibles (nombre de paquets, éventuellement leurs flags, ...).

## Mesures pour les nouveaux réseaux aux architectures micro-services

Les réseaux sont historiquement conçus comme des systèmes monolithiques où chaque fonction est exécutée sur un matériel dédié, communiquant avec ses intermédiaires par des canaux fixes et des piles protocolaires figées. Ces limites disparaissent avec les nouveaux réseaux, et notamment les réseaux cellulaires 5G avec la virtualisation des fonctions réseaux (NFV) qui permet de déployer des services à la demande sur n'importe quel type de matériel. La structure du réseau peut être définie logiciellement et on passe alors à un système de client-serveur qui suit le principe REST. Les procédures permettant le bon fonctionnement du réseau deviennent donc des micro-services déployables dynamiquement et n'importe quelle entité peut ensuite les solliciter par le biais de protocoles de haut niveau, souvent HTTP. Les nouvelles architectures des réseaux reprennent ainsi les principes du cloud et de ces micro-services.

Le Cloud Computing a bouleversé la façon dont sont développés et déployés les logiciels. De nos jours, les applications Cloud sont conçues comme des systèmes distribués en permanente évolution. Ce changement de paradigme a également eu un impact considérable sur la façon dont les logiciels sont monitorés : les applications Cloud peuvent se composer



↑ Fig. 3 Trace Opentelemetry.

de plusieurs centaines de services, et les outils de monitoring doivent donc maintenant intégrer les échanges et appels dynamiques entre ces micro-services, en plus des échanges de trafic entre nœuds du réseau tels que présentés dans ce qui a précédé dans cet article.

Pour cela, une approche basée sur une nouvelle source de télémétrie a été développée dans le domaine du monitoring des applications orientées micro-services. Le récent standard OpenTelemetry permet de monitorer les échanges entre micro-services, et ainsi de les exposer en détail, comme le montre la figure 3.

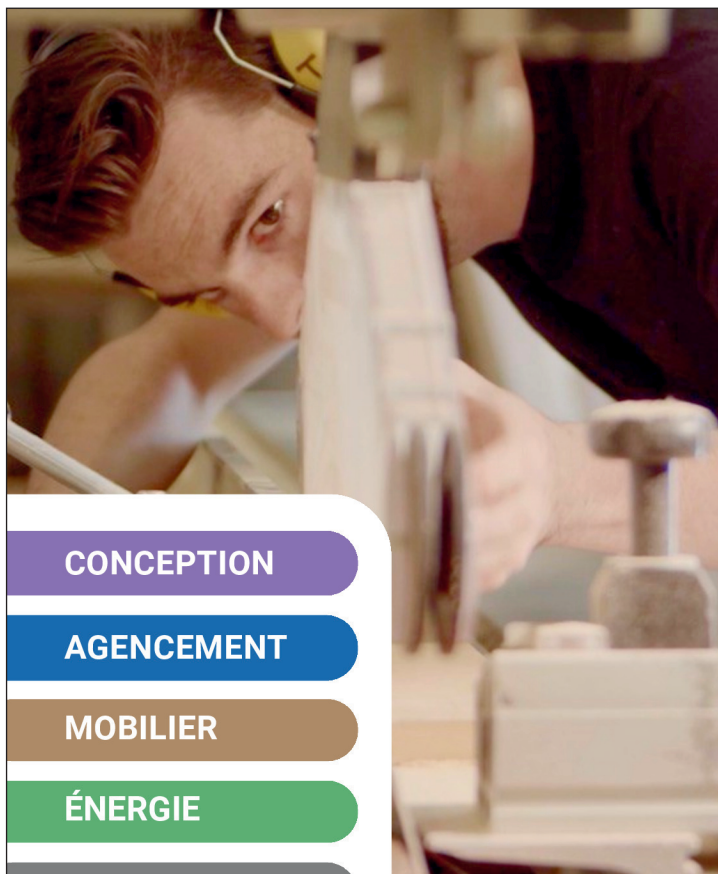
base de toutes les fonctions permettant le fonctionnement des réseaux comme l'ingénierie du trafic, la cybersécurité, la gestion des ressources, etc. Couplée à l'IA, la métrologie permet d'automatiser la gestion de toutes les fonctions du réseau, qui deviennent par ailleurs logicielles dans les réseaux du futur, afin d'apporter une plus grande flexibilité, des adaptations instantanées aux conditions de trafic rencontrées et des coûts d'opération réduits. Le couple métrologie – IA est en train de redéfinir les principes architecturaux et de fonctionnement des réseaux du futur. ■

## Conclusion

Cet article a proposé une rapide introduction à la métrologie des réseaux informatiques, ses problématiques, et a mis l'accent sur quelques outils de base pour l'illustrer. La métrologie a ainsi pour objectif de collecter des mesures de performance des réseaux, mais aussi de collecter des traces du trafic qu'ils transportent. La caractérisation, modélisation et analyse de ces mesures et traces sont les données de base pour la conception et la gestion des réseaux du futur. Les résultats des analyses sur ces données de mesure et de trafic sont à la

## RÉFÉRENCES

- [DOW 99] A. B. Downey, "Using Pathchar to Estimate Internet Link Characteristics", ACM SIGCOMM, 1999, pp. 222-23
- [JAC 97] V. Jacobson. "Pathchar -- a tool to infer characteristics of internet paths". Avril 1997
- [NAV 03] J. Navratil. "ABwE: A Practical Approach to Available Bandwidth Estimation", PAM 2003, La Jolla, April 2003
- [STR 03] J. Strauss, D. Katabi, F. Kaashoek, "A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation Tools", ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop, 2003
- [RIB 03] V.J. Ribeiro, R.H. Riedi, R.G. Baraniuk, J. Navratil, L. Cottrell, "PathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths", Passive and Active Measurement Workshop, 2003
- [HU 03] N. Hu, P. Steenkiste, "Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques", IEEE Journal on Selected Areas in Communication, No 21, 2003
- [LAB 05] Y. Labit, P. Owezarski, N. Larrieu, "Evaluation of active measurement tools for bandwidth estimation in real environment", 3rd IEEE/IFIP Workshop on End-to-End Monitoring Techniques and Services (E2EMON'05), Nice (France), 15 Mai 2005
- [CIS 25] "NetFlow Services Solutions Guide", [https://www.cisco.com/c/fr\\_ca/tech/quality-of-service-qos/netflow/index.html](https://www.cisco.com/c/fr_ca/tech/quality-of-service-qos/netflow/index.html)



CONCEPTION

AGENCEMENT

MOBILIER

ÉNERGIE

MÉTALLERIE

**pagès**  
GROUPE

Des expertises métiers  
à chaque étape de  
vos projets techniques.



[www.groupepages.fr](http://www.groupepages.fr)   | [contact@groupepages.fr](mailto:contact@groupepages.fr)

**Fineza**  
consulting

## Intelligence industrielle.

Fineza s'engage auprès de ses clients, comme partenaire de valeur, par un conseil et une expertise ancrés dans une expérience solide.

Nous mobilisons une équipe issue de l'entreprise et du conseil, alliance robuste qui sécurise la croissance, le développement, et la performance des projets auxquels nous contribuons.



Transformation  
managériale



Excellence  
opérationnelle



Advanced  
digital analytics

Fineza Consulting - 94 RUE LEGENDRE 75017 PARIS  
[mohamed.feguir@fineza.fr](mailto:mohamed.feguir@fineza.fr)



# Le certificat d'étalonnage numérique AB

La métrologie évolue pour répondre aux besoins des utilisateurs dans la fiabilité des mesures. Aujourd'hui, les évolutions du numérique et le développement de logiciels de mesure aspirent à faciliter l'accessibilité des résultats de mesures pour les acteurs de la mesure, grâce aux formats numériques des documents. Ainsi l'un des documents les plus importants demeure le certificat d'étalonnage numérique. Le certificat d'étalonnage numérique (électronique) est indispensable car il nous permet d'être efficaces en termes de qualité, coût, délai des résultats de mesures.

## Introduction

Dans l'industrie de la production, la bonne qualité d'un produit ne peut être garantie que si les équipements de mesure utilisés sont régulièrement étalonnés, ou s'ils sont directement ou indirectement raccordés aux étalons nationaux. C'est la tâche centrale des instituts nationaux de métrologie que de rendre possible cette traçabilité. Dans ce contexte, le certificat d'étalonnage est un élément décisif de tout système de gestion de la qualité métrologique. Mais le certificat d'étalonnage numérique peut fournir plus qu'une simple preuve de traçabilité métrologique. Cet article a pour but de définir l'approche des laboratoires de Métrologie nationaux, privés, également adaptée aux particuliers effectuant des mesurages et éditant des certificats d'étalonnage pour la transmission des résultats de mesures d'étalonnage.

## Qu'est ce que le certificat d'étalonnage numérique ?

Un certificat d'étalonnage numérique (CEN) est un fichier qui contient toutes les informations relatives à l'étalonnage d'un instrument de mesure selon la norme FD X 07 - 012.

## PARCOURS



### Atsé Sévère AMON

IMT Nord Europe, promo 2015

Sous-directeur de la Métrologie,  
Secrétaire de la commission  
d'octroi d'agrément  
en métrologie au Ministère  
du Commerce et de l'Industrie  
de Côte d'Ivoire, Point focal  
des reformes communautaires  
UEMOA en métrologie.

Ce fichier peut être généré à l'aide d'une application ; soit :

- Un fichier pdf, tif ou jpeg obtenu en scannant le certificat format papier. Il est la copie conforme du certificat papier et comporte les signatures sous forme d'image. Le fichier peut être facilement ouvert et se présente sous la forme d'une image du certificat papier avec la signature ;
- Un fichier texte, une feuille de calcul ou un fichier Word ou Excel. Il ressemble au certificat papier mais ne comporte pas d'image comme celle de la signature.

## Description (contenu) d'un certificat d'étalonnage numérique

Le certificat d'étalonnage numérique a les mêmes données que le certificat d'étalonnage papier. La différence réside au niveau du cachet et des signatures des approbateurs. Un champ est donc réservé dans le certificat numérique pour recevoir la signature ou le cachet sous forme d' image. Pour plus de célérité, le certificat numérique peut être édité par les intervenants quelle que soit leur position. Il suffit simplement d'avoir une connexion internet pour passer le relais à chaque étape de la rédaction.  
(Figure 1 - page suivante)

La structure fondamentale du certificat d'étalonnage numérique, comme indiquée dans le schéma ci-dessus, est décrite comme suit :

- 1. Les données de gestion** (réglementées) contiennent des informations présentant un intérêt central. Elles sont indispensables pour une identification formelle. Leurs champs de données sont donc strictement prédéfinis.
- 2. Les données concernant les résultats de mesure** sont également réglementées s'il s'agit des indications suivantes sur la base du système international (SI) : identifiant, valeur de mesure, incertitude élargie, facteur

# Mesure et métrologie

Un outil industriel indispensable

d'élargissement, unité et heure (facultatif). Il est également possible de réaliser des unités en-dehors du SI (par exemple : milles nautiques, millimètres de mer cure...). Outre ces exceptions ce sont toujours les indications en unités SI qui s'appliquent.

**3. Les commentaires et graphiques** sont sauvegardés dans le domaine non réglementé. De même, il est possible d'y déposer des données disponibles dans des formats d'échange établis ou à créer.

**4. Le CEN** est parachevé par un fichier directement lisible (par l'utilisateur humain) qui pourrait être de forme similaire au certificat d'étalonnage analogique. (Figure 2)

## Les avantages du certificat d'étalonnage numérique

Comme tout fichier, un certificat d'étalonnage numérique peut être :

- Enregistré sur support numérique (disque dur de PC, réseau, clé USB, CD-ROM/DVD, et sur internet) ;
- Envoyé par e-mail au sein de votre organisation ou à vos clients ;
- Conservé dans les bases de données ;
- Réactif, efficace, moins encombrant, ce qui permet de gagner du temps ;
- Inclus ou relié par hyperliens dans les documents ;
- Imprimé à la demande aussi souvent que vous le souhaitez, ce qui peut permettre d'économiser du papier et de l'encre.

## Gestions des copies non conformes et des modifications non autorisées d'un certificat d'étalonnage numérique

Tout document numérique peut être modifié lorsque c'est nécessaire. Même un format pdf peut facilement être édité, modifié. Cette modification est

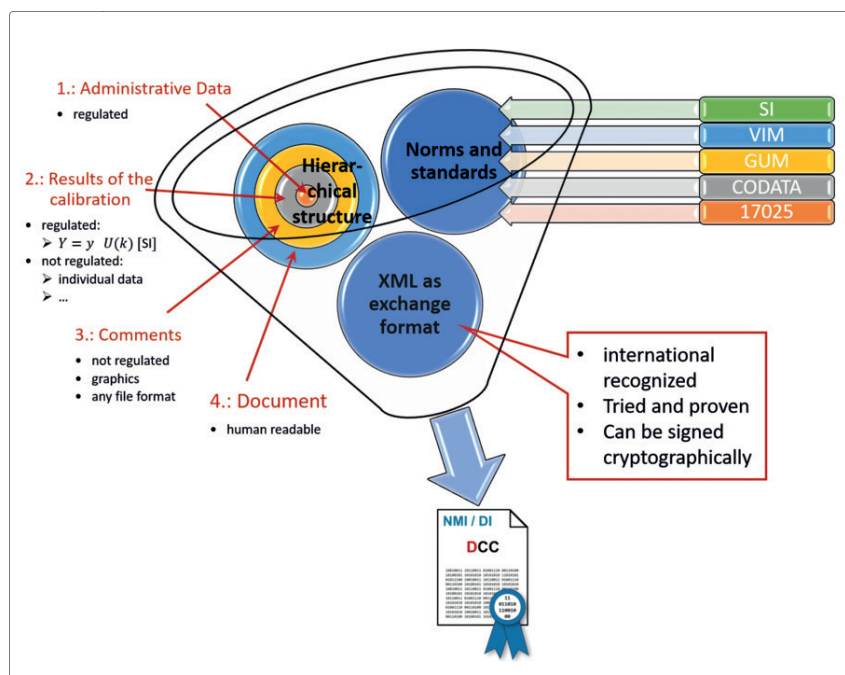


Fig. 1 Structure d'un certificat d'étalonnage numérique (CEN). Source : PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt).

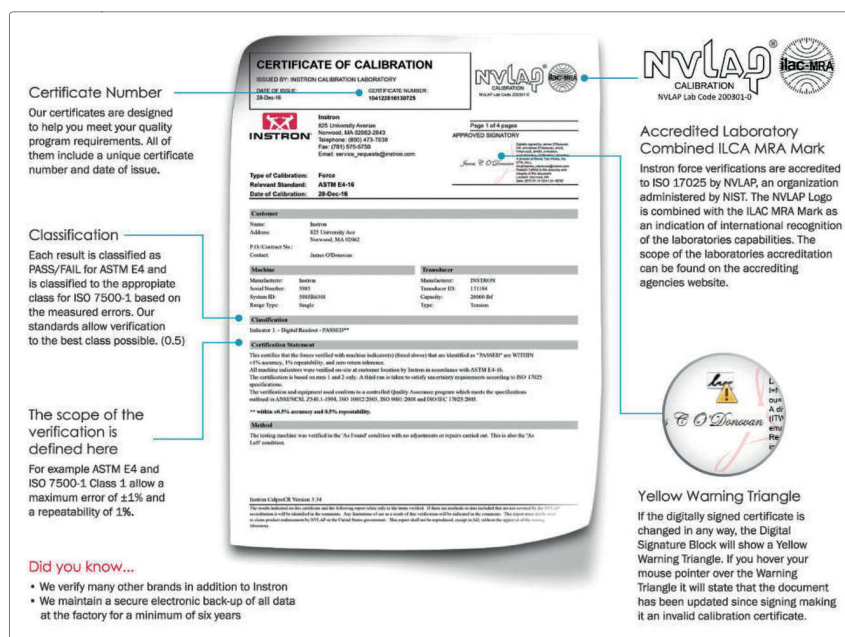


Fig. 2 Exemple de certificat d'étalonnage numérique Source : <https://www.instron.com/fr/Service-and-support/services/calibration-lab-and-accreditations>

uniquement effectuée par le personnel autorisé. Les notifications parviennent immédiatement aux différents acteurs de l'élaboration des certificats en cas de changement. Pour se protéger, la sécurité, la protection et l'intégrité documentaire du certificat sont assurées par :

- un mot de passe pour avoir accès à l'application ;

- des techniques de cryptage numérique. Les certificats d'étalonnage numériques (électroniques) sont des fichiers numériques qui comportent un algorithme de cryptage intégré et caché dans le fichier. Si le fichier original a été modifié, un message apparaît pour en informer la personne qui lit le fichier.

## Les utilisateurs d'un certificat d'étalonnage numérique

Les acteurs participant à l'élaboration des certificats d'étalonnage (les techniciens de laboratoire, le responsable technique, le chef de service ou toute personne habilitée...) sont :

- Les unités de production utilisant des instruments de mesure ;
- Les particuliers détenant des instruments de mesure.

## Conclusion

Dans un contexte de recours croissant aux outils numériques, le certificat d'étalonnage évolue également vers une forme numérique. Des travaux conduits par le PTB examinent la faisabilité pour faciliter l'application de cette nouvelle approche pour les laboratoires de Métrologie et d'Essais. ■

### BIBLIOGRAPHIE

- ISO/CEI 17025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais
- GUM-JCGM 100 : 2008 : Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
- VIM 3 (JCGM 200-2012) : Vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés
- FD X 07 – 012

### WEBGRAPHIE

- [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)
- [www.ptb.de](http://www.ptb.de)
- [www.instron.com](http://www.instron.com)



Construction de réseaux électriques,  
de télécommunication et d'éclairage public



205 chemin de Malemort 84380 MAZAN

04 90 69 82 43

contact@fgm-tp.fr

[www.fgm-tp.fr](http://www.fgm-tp.fr)



**ACOUSTI  
control**

spécialistes du conseil  
et de la mesure acoustique

**BUREAU  
D'ÉTUDES  
ACOUSTIQUES  
ET VIBRATOIRES**

DOMAINE  
D'ACTIVITÉ



BÂTIMENT  
ENVIRONNEMENT  
INDUSTRIE

COUVERTURE  
NATIONALE



AGENCE DE PARIS  
AGENCE DE NANTES  
AGENCE DE LYON

MATÉRIELS  
ET LOGICIELS



SONOMÈTRES DE CLASSE 1 VÉRIFIÉS  
SOURCES DE BRUIT ÉTALONNÉES  
CAPTEURS VIBRATOIRES  
LOGICIELS RÉFÉRENCES

Bureau d'études acoustiques et vibratoires  
dans les domaines du bâtiment, de l'environnement  
et de l'industrie, **nous recherchons régulièrement  
des ingénieurs en acoustique. Contactez-nous !**



09 72 63 00 70



contact@acousticcontrol.fr



[www.acousticcontrol.fr](http://www.acousticcontrol.fr)

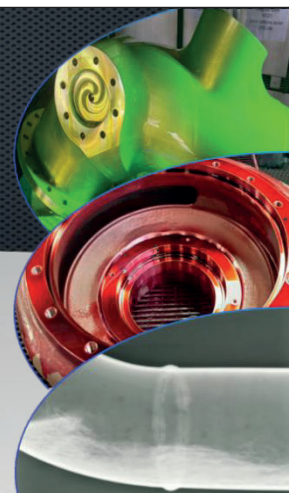


- Contrôle Non Destructif (CND/END) de l'état d'intégrité de structures ou des matériaux.
- Assistance technique, suivi de chantier, inspections.
- Des interventions dans les domaines des industries, du nucléaire, de la chimie et de la pétrochimie.



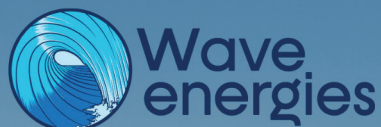
- Visuel indirect (VTI)
- Magnétoscopie (MT)

- Ressuage (PT)
- Ultrason (UT)
- Radiographie (RT)



## Elsa

utilise tous ses super pouvoirs pour accélérer la transition énergétique.



Nous rassemblons talents et donneurs d'ordres autour d'un projet commun : construire et exploiter en sécurité

éolien offshore, biogaz, nucléaire, hydrogène, pétrole et gaz



rejoignez nous et postulez

Le Havre|Marseille|Paris|Nantes|Alger|Abou Dhabi



**MAZZOLINI**

**ENTREPRISE GENERALE DE BATIMENT**

72 Bis Rue Emile Zola  
59970 FRESNES SUR ESCAUT  
Tel : 03 27 25 92 28  
Sarl.mazzolini@wanadoo.fr



**TRINOMA**  
MOTION CAPTURE AND ANALYSIS

**Let's move, together**

Proudly supporting movement scientists since 2013

trinoma.fr



### Activité Mécanique :

Nous accompagnons les industriels dans tous leurs travaux de mécanique: Maintenance sur site, prise de cotes et conception, réalisation suivant plan ou modèle (usinage, tôlerie, chaudronnerie), soudure, tuyauterie, mise en conformité machine/ cartérisation, convoyage, dépannages

Tel : M. PARDOUX : 07.68.94.48.49

M. MASKIEWICZ : 07.66.99.49.45

# SAMRI

**Société Amiénoise de  
Mécanique & Robinetterie  
Industrielle**

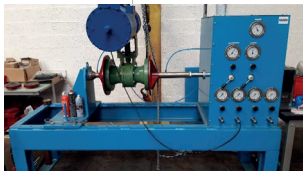
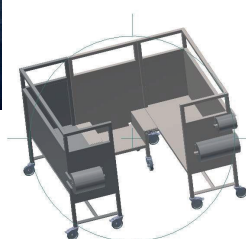
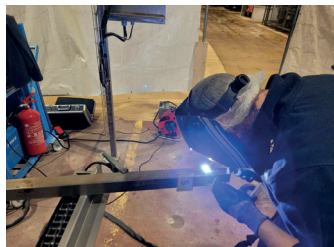
### 2 adresses:

3 rue des Poiriers

80540 Guignemicourt

Zone Industrielle, rue de la  
voierie

Lieu dit «Le Fief de Saucourt»  
60120 HARDIVILLERS

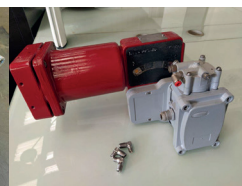
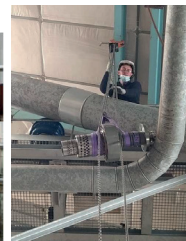


### Activité Robinetterie :

Nous réalisons la dépose/repasse, maintenance sur site et révision en atelier de tous types de vannes et toutes marques (Vannes de régulation, vannes TOR, désurchauffes), clapets, purgeurs, vérins...

Gestion d'arrêts techniques dans tous types d'industries

Tel : M. FOLLET : 07.49.06.52.76



ARdennes  
CONstructions  
METalliques

*Serrurerie*

*Charpente*

*Chaudronnerie*

*Constructions métalliques*

11 Bagot centre

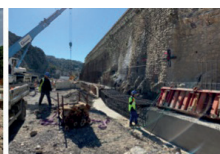
08400 SAVIGNY SUR AISNE

Tél : 03 24 71 88 11 - Fax : 03 24 71 66 69

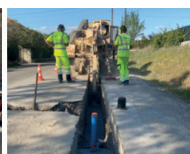
[www.arcomet-sa.fr](http://www.arcomet-sa.fr)



Démolition



Génie civil



Réseaux humides



**Réseaux humides**



**Démolition**



**Génie civil**

Avenue des Pins d'Alep

ZAC du Rieu

30319 Alès cedex

Tél. 04 66 25 01 96

[contact@scaic.fr](mailto:contact@scaic.fr)



**Société spécialisée dans la tuyauterie  
et la chaudronnerie industrielle INOX**

Agence de SORGUES

548 bis, chemin de Brantes - ZI de Boivassière - 84700 SORGUES

Tel/Fax : 04 90 88 41 77 - Email : [contact@setic-france.fr](mailto:contact@setic-france.fr)

[www.setic-france.fr](http://www.setic-france.fr)



Chemin des Courtillets 6, 1212 Grand-Lancy, Genève  
Tél.: +41 22 794 13 10 - Email : [electricite@novelec-ge.ch](mailto:electricite@novelec-ge.ch)

[www.novelec-ge.ch](http://www.novelec-ge.ch)



**Expertise bâtiment généraliste auprès  
des compagnies d'assurances et des  
particuliers**

- ✓ Tous corps d'état
- ✓ Spécialités étanchéité, structure et piscine
- ✓ Expert agréé CRAC depuis 2016

Entreprise engagée pour l'environnement

[contact@sudexia.fr](mailto:contact@sudexia.fr)



**GROS ŒUVRE - TERRASSEMENT - VRD**

**CONSTRUCTION DE LOGEMENTS  
COLLECTIFS ET INDIVIDUELS**



SEA CONSTRUCTION a à cœur la formation professionnelle des jeunes aux métiers du BTP et s'engage régulièrement, notamment par le biais de contrats d'apprentissage et de stages découverte, à la transmission des compétences, du savoir faire et du savoir être, auprès des jeunes désireux de faire leur carrière professionnelle dans le BTP.

2 rue Henri Moissan - 34500 BEZIERS  
04 67 76 87 62 - [contact@seaconstruction.fr](mailto:contact@seaconstruction.fr)

**MICHEL TP**

**BAGARD**  
**04 66 60 78 33**



**Bureau d'études structures**



**CEBA**

860 chemin des Plantades  
83130 LA GARDE  
Tél. : (04) 86 11 96 76  
[contact@bet-ceba.fr](mailto:contact@bet-ceba.fr)  
[www.bet-ceba.fr](http://www.bet-ceba.fr)



# Créer, améliorer, échanger, trois mots pour définir la mesure

## Une exposition pour s'y plonger

Cette année fête le 150<sup>ème</sup> anniversaire de la convention du mètre, signée le 20 mai 1875. Cette convention est un traité international. Il établit un cadre mondial pour la standardisation des mesures, ouvrant ainsi la voie au développement des échanges internationaux.

**I**l amènera la création du Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres, dont la mission est toujours d'assurer l'uniformité des mesures dans le monde. Il standardisera la définition du mètre et du kilogramme ainsi que l'évolution de leurs étalons de référence. Il consacrera en 1960 le système international d'unités (SI) et ses sept unités fondamentales.

Il a permis la naissance d'un langage universel indispensable aux domaines des sciences et de l'industrie dans le monde entier. Le 20 mai 2025 la journée mondiale de la mesure a ainsi choisi pour thème « Des mesures à tous les temps, à tous les peuples ».

Depuis 2003, une association dont je suis membre a pris le nom d'Eurêk'Alès. Notre équipe est composée d'un médiateur scientifique permanent et d'une quarantaine de bénévoles issus de l'industrie, du monde académique et de la recherche, mais également d'autres domaines d'activité comme la santé, la philosophie, etc. Cette pluridisciplinarité, alliée à la richesse des parcours de nos membres, confère à notre structure une grande agilité thématique et favorise un environnement de travail chaleureux et dynamique. En 2024, nos actions, menées directement ou via des partenaires utilisant nos ressources, ont permis de toucher plus de 10 000 personnes, dont plus de 7 000 scolaires.

L'évènement de cette année ne pouvait laisser indifférent notre association dont l'objectif est de diffuser la culture scientifique, technique et industrielle auprès du grand public et des scolaires.

### PARCOURS



#### Jean-Claude DURIEZ

IMT Nord Europe, promo 1971

Retraité, Jean-Claude DURIEZ a occupé les postes de Directeur adjoint de l'École des Mines d'Alès et de l'École des Mines d'Albi, ainsi que Directeur de l'École des Mines de Nancy et de l'École des Mines de Douai, avant de devenir, à titre bénévole, Délégué Général du groupement Mines Plus.

C'est pourquoi nous avons décidé de consacrer une de nos deux expositions annuelles, d'une durée de trois mois chacune, à ce thème. Nous avons délibérément consacré l'essentiel nos ateliers pédagogiques aux quatre unités de base les plus couramment utilisées, relatives à la longueur (le mètre), la masse (le kilogramme), la température (le Kelvin) et le temps (la seconde) car elles sont incontournables pour l'ouverture aux sciences des scolaires. Notre exposition - quant à elle - sera ouverte de début octobre à la fin des vacances de Noël 2025.

### Comment sera organisée cette exposition ?

Pour chacune des unités nous explorerons son histoire et celle des instruments qui ont permis d'améliorer la précision de leurs mesures. Une bonne trentaine d'ateliers interactifs permettront au public de se confronter à ces mesures.

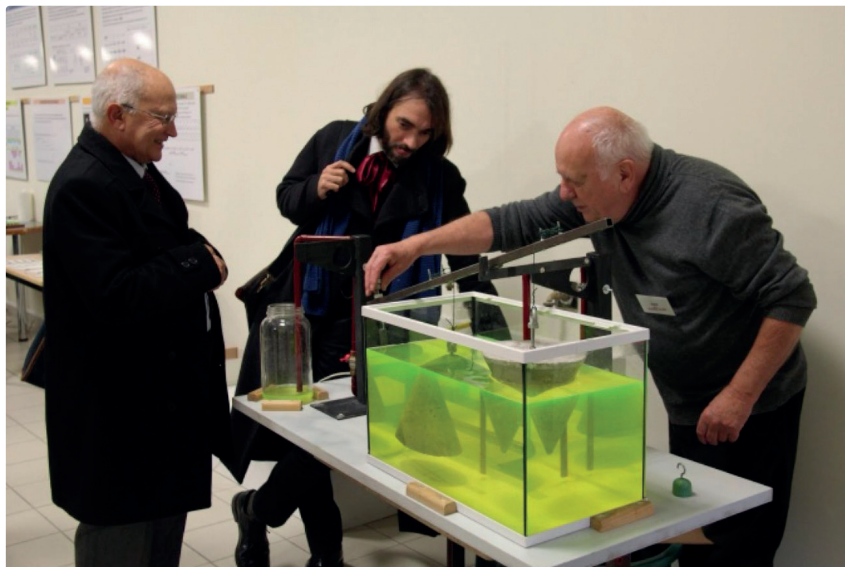
L'exposition traitera la notion de référentiel lequel n'a cessé d'évoluer depuis des millénaires. Sa dernière modification ne date en effet que de 2018.

Elle mettra en exergue la relation entre la mesure et l'humain. Elle explicitera par une approche transversale l'évolution des systèmes d'unités et des appareils de mesure en fonction des besoins humains, depuis l'individuel jusqu'à l'universel. L'exposition traitera de la subjectivité de la mesure, des unités, des instruments, de leur étalonnage et de leur capabilité. Enfin au travers de quelques ateliers nous aborderons les unités secondaires ou dérivées, telle que la vitesse, la fréquence, etc. pour terminer par une fresque qui a pour objectif ambitieux de situer dans le temps et en parallèle l'évolution des unités de mesure et des institutions qui les ont promues avec l'évolution des instruments de mesure qui a accompagné ces mutations.

Cinq élèves ingénieurs de l'IMT Mines Alès ont rejoint notre équipe projet pour la préparation de cette exposition dans le

# Mesure et métrologie

Photo de Cédric VILLANI visitant une de nos expositions précédentes.  
Source : [Christian MICHEL](#)



cadre de de leur projet de première année (Benjamin BARJOT, Maxime BOUCARD, Thibault CHAUMETTE, Gabin JOURAND et Adrien MARLY). Le CCSTI Centre Sciences Val de Loire nous apporte également son appui par la mise à disposition d'éléments d'exposition qu'il a récemment élaborés. Le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais nous a également apporté son soutien par ses conseils et la mise à disposition de nombreux éléments bibliographiques.

## Comment avons-nous procédé ?

Nous avons choisi le thème de la mesure pour des raisons évidentes d'opportunité : le 150<sup>ème</sup> anniversaire de la convention du mètre, mais aussi et surtout parce que le thème nous paraissait assez emblématique pour présenter avec une approche scientifique les outils pour la mettre en œuvre.

Donc tout a débuté par une étude bibliographique sur la mesure, l'évolution comparée des référentiels et systèmes d'unités de mesure avec l'évolution des instruments de mesure. Puis la recherche d'éléments pouvant constituer l'amorce et la colonne vertébrale de notre exposition.

De cette démarche est ressorti que depuis que l'être humain a entrepris de s'organiser de manière sociétale la notion de mesure s'est immédiatement imposée. Quels que

soient les domaines, la grande majorité des améliorations n'a pu se faire sans que la mesure intervienne pour la permettre.

D'abord utile pour répondre aux impératifs liés aux échanges d'informations et aux échanges commerciaux, la notion de mesure demeure incontournable dans notre quotidien. Elle a donné naissance à une science prenant le nom de métrologie, laquelle permet d'échanger en confiance avec des bases et un langage commun.

Le système international (SI) garantit, malgré les aléas de la géopolitique, la stabilité et la comparabilité des mesures ainsi que l'universalité de leur accès. Au sens métrologique une mesure est partout devenue la détermination d'une dimension par rapport à un étalon.

Notre choix de n'aborder en détail que 4 des 7 unités est justifié par le fait que ce sont celles qui interviennent dans quasiment tous les aspects de notre vie quotidienne. Ce sont également celles à l'origine d'une grande partie des unités secondaires comme par exemple la vitesse qui fait intervenir la longueur et le temps.

Nous avons souhaité aborder l'universalité de l'accès aux mesures. Elle est relativement récente puisqu'elle date de la signature de la convention du mètre en 1875 découlant de la loi de 1799 qui fixait la valeur du mètre et du kilogramme, loi succédant à celle de 1795 instituant le système métrique décimal en France.

Enfin nous déclinons la dernière évolution de novembre 2018, réforme entrée en vigueur le 20 mai 2019. Elle définit les définitions des 7 unités du SI

antérieurement basées sur des étalons matériels et dorénavant sur les constantes fondamentales de la physique quantique.

## Quel sera le contenu de l'exposition ?

Notre objectif est qu'à la fin de l'exposition le public scolaire et le grand public aient retenu la nécessité de quantifier, de mesurer et donc de disposer d'instruments adaptés et fiables utilisant des unités reconnues.

**En introduction** un atelier propose aux visiteurs d'avoir à répartir équitablement entre trois personnes une même quantité de matériaux granuleux de dimensions homogènes, en leur laissant le choix de la méthode. A leur disposition plusieurs instruments : un bécher gradué, une balance des poids des récipients dont un contenant les matériaux à distribuer... Les visiteurs échangent et définissent la méthode qui leur paraît la plus efficace et la plus juste. Nous mettons ainsi en évidence le caractère indispensable des outils et instruments de mesure.

Vient ensuite la notion de **subjectivité** : comment appréhendons-nous la mesure d'un élément ? comment l'évaluons-nous et comment définissons-nous un ordre de grandeur pour la définir ? Au travers de 4 ateliers le visiteur se confronte à l'appréciation d'égalité ou de différence entre les caractéristiques ou



représentation d'objets. Il s'agira ici de préciser si elles sont de dimensions ou de masses égales ou différentes, ainsi que d'apprécier la température d'un milieu ou la durée d'une manipulation et de les comparer par mesure ou repère à une valeur exacte.

Ensuite viennent les notions de **grandeurs mesurables ou repérables et leurs unités associées** dans le SI. Un atelier permet d'approfondir la notion de valeur mesurable et de valeur repérable en cherchant à étudier et définir 4 objets complexes à l'aide des 4 grandeurs disponibles.

Puis viennent logiquement les **instruments de mesure**.

Un premier atelier permet au visiteur d'associer une grandeur à un instrument, comment l'exprimer et dans quelle unité. Cet atelier très accessible permet de couvrir les 7 unités de base. Il visualise les notions de grandeur mesurable ou repérable. Il aborde également quelques unités dérivées dont certaines seront approfondies ultérieurement par de ateliers spécifiques.

Suivent 3 ateliers traitant de la **longueur** : un sur le choix de l'instrument le plus adapté à l'objet à mesurer et à l'expression de son incertitude, un sur l'importance des sous-multiples du mètre pour aborder la précision et un sur la notion d'incertitude permettant d'exprimer au passage l'importance de la cotation fonctionnelle.

Nous abordons ensuite la **masse** avec deux ateliers, un exprimant la différence entre masse et volume, et un proposant différents instruments parmi lesquels il faut choisir pour mesurer la masse d'un objet.

Pour la **température**, nous abordons les définitions du Kelvin et du degré centigrade (une température exprimée en degré centigrade pouvant l'être par un nombre négatif). Un atelier offre une panoplie d'instruments parmi lesquels le visiteur doit choisir le plus usité en fonction de l'objet à mesurer. Un second est à l'étude pour expliciter la différence entre la température de contact, la convection et le rayonnement.

Enfin, pour le **temps**, un atelier permet de différencier l'heure selon la latitude et situe le jour et la nuit. Un autre aborde la saisonnalité, manière dont le temps a été perçu dans le passé. Un atelier permet de replacer une série d'instruments sur leur période d'apparition. Un autre permet de comparer les temps d'écoulement

de plusieurs sabliers, un présente le principe de fonctionnement d'une horloge à poids et un autre l'évolution de la mesure depuis la mécanique jusqu'à l'électronique. Enfin un atelier permettra d'exprimer les multiples de la seconde relevant anachroniquement du système sexagésimal, système de numération utilisant la base 60.

Qui dit instrument de mesure dit **étalonnage** et chaîne d'étalonnage. Comment l'avons-nous abordé ?

Nous avons choisi que cette partie de l'exposition pose les questions suivantes : ma mesure est-elle vraie ? d'où la nécessité d'un étalon (un atelier y est consacré). L'étalon est-il bon ? d'où la nécessité d'une chaîne d'étalonnage. 4 ateliers sont envisagés : comparer la dimension d'une pièce par rapport à une cale étalon, comparer la masse de différents volumes identiques de matériaux différents, étalonner un capteur avec un thermomètre de référence (méthodologie), étalonner un pendule simple avec un chronomètre ou un stroboscope.

## Unités secondaires

Un atelier spécifique proposera aux visiteurs de rattacher une unité dérivée à une ou plusieurs unités de base. Il sera prétexte à s'intéresser, selon les visiteurs, à certaines unités sans dimension (densité, radian, stéradian). Quelques ateliers permettront d'illustrer les mesures correspondantes : détermination de la masse volumique d'un corps solide, mesurer une fréquence, mesurer la vitesse avec le tube de Pitot qui permet de mesurer la vitesse d'un fluide par une mesure de pression différentielle. C'est Henri PITOT (1695-1771) un physicien français né à Aramon dans le Gard, qui est à l'origine de sa découverte en 1732 et nous souhaitons honorer sa mémoire. Le tube de Pitot est encore utilisé de nos jours notamment dans l'aéronautique.

Enfin la notion de capabilité d'un instrument de mesure. Les qualités, les erreurs et défauts d'étalonnage. Qu'est-ce qu'un instrument fidèle et comment s'en assure-t-on ? Un atelier permettra d'aborder les points relatifs à la résolution, la linéarité et le calibrage d'un instrument de mesure.

Une **fresque** présentera en clôture l'évolution dans le temps des unités de mesures, des systèmes de mesure, et des institutions chargées de les améliorer et d'assurer leur diffusion en parallèle avec l'évolution des instruments. Son but est de faire exprimer en fin de visite, ce que les élèves auront retenu de l'exposition et de rappeler que la science est un continuum a priori sans fin au service du développement de l'humanité pour peu que l'on sache en faire un bon usage.

## Et en marge de l'exposition

Nous préparons une journée de rencontre entre professionnels au cours de laquelle des fabricants de systèmes de mesure viendront à la rencontre des industriels du Grand Alès, mais aussi des étudiants et des chercheurs de l'IMT Mines Alès pour leur présenter leurs matériels et innovations. Les élèves de l'IMT Mines Alès cités en début d'Article participent à l'organisation de cette journée.

Trois conférences auront également lieu pendant la période d'exposition. Des contacts sont en cours avec le LNE (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais) pour une conférence sur les nouveaux étalons, une par François LESTREMAU professeur de l'IMT Mines Alès sur la métrologie de l'eau, et une est envisagée sur l'ingénierie de conception dans laquelle la mesure est l'un des éléments essentiels.

Si vous passez par Alès au cours du dernier trimestre 2025, notre exposition est ouverte au grand public tous les mercredis et samedi après-midi et tous les après-midi pendant les vacances scolaires sauf les veilles de Noël et du Nouvel An.

Notre exposition est organisée avec l'appui de la ville d'Alès, de l'agglomération d'Alès et de la Région Occitanie. ■

**C**e magazine **Minerai** a été lancé avec la volonté de regrouper par thématique les contributions des diplômés de nos écoles,

en faisant participer les élèves et les partenaires (école, start-ups, ...) pour présenter un document riche en témoignages sur un sujet touchant à la vie professionnelle des ingénieurs. La démarche va donc de pair avec le développement des groupes professionnels de l'association, encouragée depuis quelques années pour développer le réseau professionnel des ingénieurs membres de **Mines+**, et faire rayonner la formation de qualité proposée par nos écoles.

La réalisation du numéro que vous tenez entre les mains ou lisez sur un écran est le fruit d'un travail passionnant, intellectuellement enrichissant, qui est actuellement supporté par une toute petite équipe.

Nous sommes donc à la recherche de personnes disposant d'un peu de temps (1h par mois est déjà suffisant), et de beaucoup de bonne volonté !

Les diplômés, élèves, enseignants-chercheurs, personnel de l'École, souhaitant contribuer sont donc les bienvenus pour collecter les informations sur un sujet d'ingénierie, et identifier des contributeurs parmi nos réseaux. Nous vous garantissons un accueil sympathique et enthousiaste dans cette aventure !

Pour tout renseignement (non engageant), nous vous invitons à prendre contact avec notre secrétariat :  
**minerai@mines-plus.org**

## >> Développer le réseau

Adhérer à l'association !

## >> Pourquoi adhérer ?

Nous essayons de fournir un maximum de services aux Diplômés et aux Élèves. Toutefois, afin d'y parvenir, nous avons besoin de ton soutien financier.

## >> Cotiser en ligne

[www.imt-nord-europe.org](http://www.imt-nord-europe.org)  
[www.mines-albi.org](http://www.mines-albi.org)  
[www.mines-ales.org](http://www.mines-ales.org)

## >> Prochain numéro L'Intelligence Artificielle

Pour continuer de recevoir ton magazine, vérifie que les coordonnées et ta cotisation sont à jour sur le site.

## >> Participer

Rédaction d'articles, idées à développer, relectures, avis et observations...

N'hésitez pas à nous contacter :  
**minerai@mines-plus.org**







### Nos domaines d'activités



Construction



Rénovation



Surélévation



Développement  
immobilier

**Construction  
et rénovation  
durable  
dans toute  
la Suisse  
Romande**



**De la conception à la livraison,  
Legato SA est l'entreprise  
de référence pour des projets  
immobiliers clefs en main.  
Nous garantissons une exécution  
rigoureuse, innovante et maîtrisée,  
alliant qualité architecturale,  
précision technique et gestion  
financière optimisée.**



**On ne cherche pas des "premiers de la classe". On cherche ceux qui veulent construire la suivante.  
Si c'est vous, postulez !**



**info@legato-eg.ch  
+41 24 426 77 00**







FILIALE DE LA DIVISION  
FAYAT ÉNERGIE SERVICES



[satelec.fayat.com](http://satelec.fayat.com)