Compte rendu de la conférence du mercredi 3 mars 2021
«La science est-elle devenue la mesure de toute chose ?»

Organisation : conférence organisée par **La Cité des Sciences et de l'Industrie (Merci à Pascal REMOND pour cette belle initiative).** Avec le soutien du magazine **POUR LA SCIENCE**
Crise sanitaire et confinement obligent, nous avons réalisé ***une conférence numérique.***
Lieu - Horaire : - mercredi 3 mars 2021 - De 19h00 à 20h30
Nous pouvions suivre en direct cette conférence sur Internet via Youtube. Le lien était :
https://www.youtube.com/watch?v=NntOIFkapNQ&feature=youtu.be

Participation : excellente : 329 internautes se sont connectés.
Thème et Intervenants :
-La SCIENCE est-elle DEVENUE LA MESURE de toutes CHOSES ?
Organisé par la Cité des sciences. Avec le soutien du magazine POUR LA SCIENCE
Avec :

- **Marc Himbert,** directeur scientifique du Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM).

Que ce soit pour assurer la loyauté des transactions commerciales, la qualité des produits, l'efficience des actions pour un développement durable, le succès d'une innovation technologique ou la construction de la pensée scientifique, la "mesure", par son objectivité supposée, joue un rôle de tout premier plan.
Instituées depuis l'origine sur des données anthropomorphiques, les unités de mesure reconnues à l'échelle internationales sont, depuis 2018, établies sur des phénomènes scientifiques et avec des dispositifs de haute technologie. Faut-il modifier désormais l'affirmation du philosophe grec Protagoras, selon lequel l'homme est la mesure de toute chose ?

Compte-rendu non relu par les conférenciers et n'engageant que son rédacteur.

Déroulement de la soirée :

Cité des Sciences : La conférence est introduite par une personne de la Cité des Sciences. Cette conférence s'inscrit dans le cadre d'un cycle de conférences intitulées « Grandeur et Démesure » organisées par la Cité des Sciences et de l'Industrie. (Voir sur le site : https://www.cite-sciences.fr/fr/accueil/).

Marc HIMBERT : nous présente le Laboratoire de Métrologie LNE-CNAM qu'il dirige scientifiquement. Cet organisme pilote la métrologie française. Il va tenter de répondre à la question : **La SCIENCE est-elle DEVENUE LA MESURE de toutes CHOSES ?**

La métrologie est la science de la mesure, couvrant toutes les mesures effectuées, à un **niveau d'incertitude établi,** dans n'importe quel domaine de l'activité humaine.

- **Mesurer :** c'est une question de **confiance**
- Qui nécessite **des références consensuelles (les unités de mesure : m, kg, seconde etc.).** On se souvient qu'il y a longtemps, le kilogramme avait un étalon conservé au Pavillon de Breteuil à Sèvres, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui.
- **2019** est la date d'une **révolution scientifique maîtrisée**. Les étalons sont désormais basés sur les avancées de la science de notre époque.

« Mesurer », c'est utile au quotidien : la mesure est un construit social qui permet :

- La **pacification** des interactions sociales : quand la mesure a parlé, on ne discute plus (ex la balance, le test antidopage, le cinémomètre : on paye ou l'on exclut le coureur dopé)
- La **loyauté des échanges**
- Le **respect des lois**

« Mesurer », c'est utile en production des biens et services :

La mesure sert à **déterminer la qualité des biens et services** produits. **Elle permet** :

- La **performance en matière de compétitivité** (par exemple pouvoir assembler les parties d'un Airbus dans des pays différents, avoir confiance dans un diagnostic, dans une thérapie appliquée à des patients malades).
- Le **développement technologique**
- Un **monde plus sûr et plus durable**
- **D'accompagner les évolutions technologiques, industrielles et sociétales.**

« Mesurer », c'est aussi modéliser pour comprendre et prévoir :

La mesure est à la base de la construction scientifique.

G.A.Boutry disait : « Il n'est pas possible de réaliser les expériences parmi les plus spectaculaires de la physique moderne sans mesurer quelques longueurs, quelques durées, quelques masses, directement ou d'une autre manière ».

Ce qui fait science c'est d'abord l'observation qui permet de modéliser, la **modélisation qui permet de prévoir** et la **prévision qui doit être confrontée à de nouvelles mesures** pour valider, infléchir, modifier, réussir à faire avancer la qualité du modèle et sa pertinence.

Sur le plan épistémologique (étude critique des sciences, de leur origine, de leur valeur et de leur portée), des étapes se sont succédé au cours de l'histoire, représentées par les trois scientifiques :

- **Euclide** qui passe du dénombrement aux mesures sur le continu,
- **Galilée**, le premier à écrire des proportionnalités entre des grandeurs différentes, à écrire l'esquisse des premières lois de la physique et de la chimie,
- **Karl ???** qui a mis les sciences expérimentales au même rang que les sciences de la connaissance au XVIIIème siècle.

Une diapositive montre les **deux statues côte à côte de deux savants importants** :

- **TYCHO BRAHE (1546 – 1601)** : est un astronome danois qui a fait des **observations sur le mouvement des planètes pendant plus de 40 ans.** Il n'a pas trouvé les lois correspondantes.
- **Johannes KEPLER (1571 – 1630)** : auteur des **3 célèbres lois qui régissent le mouvement des planètes**, dont la 3ème loi : le rapport du carré des périodes de révolution des planètes et du cube du demi grand-axe de la trajectoire elliptique est constant. Mais il a trouvé ces lois grâce aux observations de TYCHO BRAHE.

Dans tous les domaines, la mesure permet :

- Une **réduction** drastique **de la complexité :**

Par exemple, la **métrologie** prend **quelques données** en quelques points du globe. De même les **nano-systèmes et microsystèmes** considèrent aussi **quelques données** en quelques points.
La **vision humaine des couleurs** avec le **diagramme de chromaticité** permet de caractériser la perception des couleurs. Là encore, **on essaie de modéliser** pour **réduire la complexité.**

- La pertinence des **modèles** (nanos, biophysique etc.)

Les mesures ou essais : le **mode opératoire** définit la **grandeur mesurée**, par exemple :

- **L'efficacité énergétique** d'un bâtiment
- La **qualité de l'air** : résultat de l'accumulation d'un grand nombre de mesures
- L'intensité d'un **séisme (Savoir que 9 sur l'échelle de Richter, c'est vraiment très grave). Une autre échelle existe : l'échelle de Mercalli** (Modified Mercalli Intensity scale – **échelle MMI**)

C'est une échelle de mesure de l'intensité d'un séisme, qui se fonde sur l'observation des effets et des conséquences du séisme en un lieu donné.
Ces essais permettent d'obtenir la **satisfaction du client**.
L'empreinte écologique a son sens dans le **mode opératoire** utilisé pour la déterminer.
Les modèles qui sous-tendent, représentent et, en fait, définissent les essais, sont essentiels.

Mesurer l'apparence (perception humaine de la vision) : la **taille**, la **forme**, la **couleur**, la **texture**, le **brillant**, l'**opacité**, la **translucidité**…On sait caractériser ces éléments afin de faire des mesures auxquelles on peut avoir confiance pour parler du **chatoiement de ce vêtement**, de l'**éclairage**, de **la fatigue** et du **confort visuel**, de l'**utilisation** non nocive des **écrans**… On sait **corréler des perceptions à des expériences de physique** qui donnent des **grandeurs mesurables**.

« Mesurer », vraiment ? On cherche à **mesurer la valeur d'une entreprise** ? On fait **dans le sport des mesures de l'aspect, de l'esthétique**. On parle même de **mesurer la joie, la tristesse ou la peur, la crainte**. On prétend **mesurer les capacités intellectuelles** (avec des tests – traduction d'essais - sur le QI), **l'intelligence.** A l'hôpital, aux urgences, on demandera de **situer votre douleur sur une certaine échelle**. Dans **l'Egypte du Moyen-Empire**, on prétendait **mesurer le poids des âmes (c'est la psychostasie)**. On cherche à **mesurer l'efficacité d'une politique**, de la **démocratie**, la **notoriété**… Attention de ne pas tomber dans la **quantophrénie** qui désigne cette maladie de la mesure, du ratio, des données chiffrées qui fait oublier les finalités d'une action.

« Mesurer », c'est d'abord quantifier une grandeur et comparer celle-ci à une référence :
Quand on met **des poids sur une balance** pour déterminer la masse d'un objet, on compare cet objet à des **références** (avec une **valeur numérique**, une **unité** et une **incertitude**).
Lord KELVIN (1834 – 1907) disait : « quand vous êtes capable de mesurer ce dont vous parlez et quand vous l'exprimez en chiffres, alors vous connaissez quelque chose à son sujet… »
Il faut donc **bien préciser** :

- **Quelle grandeur vous êtes en train de mesurer ?** Quelle connaissance avez-vous de la réalité ? par une **approche scientifique ou pragmatique**
- **Quelles unités et références vous utilisez ?** Pour avoir ainsi une **traçabilité internationale** et permettre des définitions, des comparaisons, et la reconnaissance mutuelle.

D'où l'utilité de disposer d'un ensemble de références qui soient les plus exactes possibles quant à : **la pérennité, l'uniformité, l'accessibilité, l'exactitude.**
Protagoras (sophiste grec du Vème siècle avant Jésus-Christ) disait : « l'homme est la mesure de toute chose ».
Nous verrons en effet que **les références ont été longtemps reliées à l'homme** et aux caractéristiques de la vie humaine.

Raccorder, c'est encore comparer :
Il existe une **hiérarchie des références :** d'où **plusieurs étalonnages possibles**.
Il existe des **références « primaires ».**
Les **unités sont matérialisées à partir de définitions conventionnelles** (le kilogramme, le degré Celsius…)
Il faut **réaliser des résultats de mesure en assurant leur traçabilité**. Celle-ci aujourd'hui s'établit à partir du **système international d'unités (SI)** et d'une convention internationale (la **convention du mètre**).
Il faut aussi **connaître quelle démarche expérimentale** a été utilisée ? Afin de valider les méthodes retenues.

La validation de ces méthodes se fait en utilisant des comparaisons, la normalisation et l'accréditation. Ceci permet **d'avoir confiance et d'inspirer confiance dans le résultat obtenu**.

Parlons aujourd'hui des unités et des références :

Ces unités et références permettent **une traçabilité internationale (par des définitions, des comparaisons, une reconnaissance mutuelle).**

Sept définitions conventionnelles permettent de construire le Système International des unités : le mètre, la sonde, le kilogramme, l'ampère, le Kelvin, la mole, la candela. Désormais toutes ces unités sont liées à des constantes physiques.

Une grandeur = une valeur numérique associée à une unité. Supposons que nous disposions d'une grandeur constante supposée invariante, dans le temps et dans l'espace. Si l'on fixe sa valeur numérique, cela revient à fixer une unité pour la grandeur correspondante.

Par exemple, avec nos connaissances de la physique d'aujourd'hui on sait que la vitesse de la lumière est une constante invariante. Si nous fixons sa valeur numérique, cela définira l'unité de vitesse.

Depuis 2019 le système SI est basé sur ce principe pour les sept unités définies.

Définition des références consensuelles en usage aujourd'hui et telles qu'elles ont évolué au cours de l'histoire.

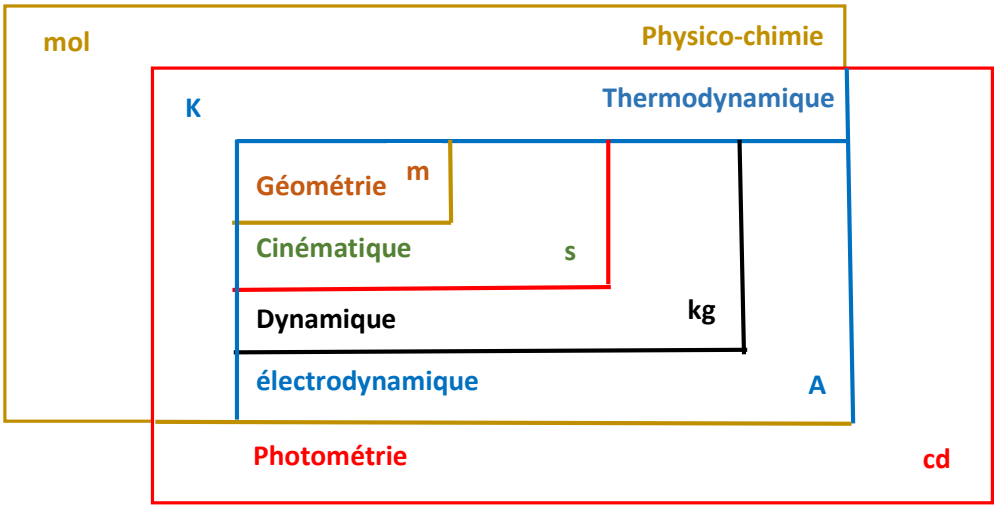
Pour les civilisations indo-européennes, l'histoire remonté à **6000 ans avant JC** dans le croissant fertile de la **Mésopotamie** : quand un propriétaire confiait son troupeau à un pâtre, il dénombrait ce troupeau de bêtes de bétail en plaçant **des billes d'argile dans une sphère d'argile** creuse qu'il conservait jusqu'au retour du troupeau. Plus tard on comprit que l'on pouvait graver sur les pierres soit des pictogrammes soit des fils à la base de l'écriture des chiffres.

En 2120 avant JC, la Coudée de Gudée (de la taille d'un coude) était utilisée par les habitants de **Lagash et du Sumer**. Elle permit de construire les temples babyloniens.

Longtemps **les unités sont restées liées à des caractéristiques de l'être humain**, ainsi :

- **Des unités naturelles**
  - La ligne, le pouce, l'empan, le pied, la coudée, l'aulne, le yard…
  - Le journal, l'hommée, la fauchée, le grain, la livre, le minot et leurs multiples
- **Des noms communs aux monnaies et mesures**
  - Le talent, la mine, le sicle, l'obole, le drachme, d'usage commercial et monétaire (alors plus petit…)
  - Liés au pouvoir de « haute justice »
- **Des périodes décisives**
  - **La révolution française (1780 – 1795) jusqu'à l'an III en Germinal** où fut promulguée la première loi sur les poids et mesures. L'an III est aussi l'année de la création du Conservatoire National des Arts et Métiers.
  - **La convention du mètre (en 1875),** signature de ce traité international toujours en vigueur aujourd'hui.
  - **La période 2018 – 2019** issue du traité précédent qui permet la **traçabilité des mesures à l'échelle mondiale.**

Les domaines scientifiques couverts par les grandeurs et unités SI : cohérence et rationalisation

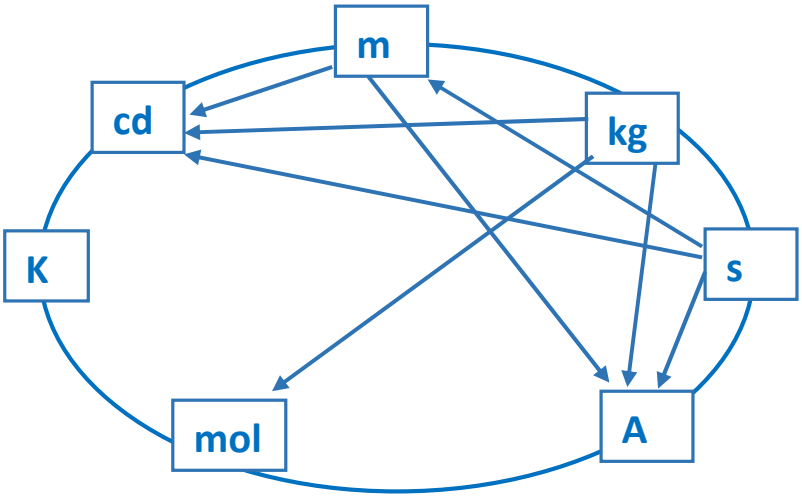


Les domaines de la **biochimie et de la biologie** sont inclus dans le **domaine de la physicochimie** du SI.

Historique :

An III en France : fut créé le **Système métrique décimal**.
En 1875 : ce fut la **Convention du mètre** (62 – 41) créée par les USA.
En 1960 et 1971 : apparut le **Système International (SI)** d'unités.
En 1999 MRA : ce fut une **Reconnaissance Mutuelle entre les Labos nationaux** 2019 (60 – 40 – 4 – 152).
En 2018 – 2019 on prend en compte les **Constantes de la Nature**.

Il y a deux ans : des définitions pragmatiques … et pathologiques :



Le SI antérieur : une approche pragmatique à base scientifique :

Il y a deux ans, si j'avais fait cette conférence, je vous aurais dit que **la seconde** était définie par la fréquence d'oscillations entre deux états d'un atome de césium, c'est toujours vrai aujourd'hui. J'aurais dit que le **kilogramme** était la masse du prototype international du kilogramme choisi en 1889 et conservée dans une cave du Pavillon de Breteuil à Sèvres. Je vous aurais indiqué que le **mètre** est la longueur du trajet parcouru par la lumière pendant une certaine durée (la constante **c** datant déjà de 1983). Je vous aurais dit que, pour l'**ampère**, il faut mettre en œuvre la loi de Laplace en regardant quelle est la force exercée entre deux fils parcourus par un courant mais, heureusement, la découverte d'effets quantiques macroscopiques a permis d'utiliser des étalons un peu plus fiables depuis maintenant une trentaine d'années. Je vous aurais indiqué que la référence de **température** était liée à une propriété de l'eau, son point triple proche de zéro degré Celsius. Je vous aurais rappelé que la **mole**, unité de quantité de matière, était définie à partir du dénombrement du nombre d'atomes de carbone contenus dans 12 grammes de Carbone 12. Et qu'enfin, pour passer des grandeurs radiométriques aux grandeurs photométriques, il fallait utiliser un facteur de correspondance **d'efficacité lumineuse** qui traduisait, en un point particulier de la sensibilité spectrale de l'œil humain moyen, le lien entre énergie et énergie visuelle, le flux énergétique et le flux lumineux. Ce fut la base de la définition de l'intensité lumineuse, la **candela**.
L'Académie des Sciences Française (ASF) trouvait que la plupart de ces définitions étaient « pathologiques » et pas en phase avec les avances de la science moderne (horloges optiques, quantums électriques standard…).
L'Académie des Technologies (National Academy of Technologies of France - NATF) allait encore plus loin en trouvant que plusieurs définitions étaient inappropriées pour être utilisées à l'échelle du nanomètre.

Deux exemples pour montrer les difficultés pathologiques :

- **Le kilogramme… quelle pérennité ?** Une courbe montre une évolution sur 120 ans des différences de masse entre le prototype international et ses copies d'étalons secondaires diffusés dans les différents pays. Cette évolution traduit une dispersion d'environ 100 microgrammes en un siècle. Cette dispersion des prototypes dénote une dérive non maîtrisée, donc un problème de pérennité. Qui dit masse, dit pression, dit énergie.
- **Le kelvin et le point triple de l'eau : une constante de la nature… en pratique un artefact !** Le kelvin est la fraction1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Mais l'eau pure c'est un mélange de différents isotopes :
    - 0,000 155 76 mole d'Hydrogène ^{2}H par mole d'Hydrogène ^{1}H

- 0,000 379 9 mole d'oxygène ^{17}O par mole d'oxygène ^{16}O
- 0,002 005 2 mole d'oxygène ^{18}O par mole d'oxygène ^{16}O

On regarde les différences entre les températures des points triples de l'eau des différents pays, on arrive à des différences d'environ 30 microkelvin sur 300 kelvin. Cela reste donc une recette qui n'est disponible qu'un un point de l'étendue. **La décision a donc été prise en 2005 de changer la définition du kilogramme et, les années suivantes, de changer également les définitions pathologiques de l'ampère, du kelvin et de la mole.**

Vers des références pérennes, uniformes, accessibles, de plus en plus exactes…

On avait déjà changé 4 fois les références du mètre de l'an III à l'année 2018 en prenant :

- Le **méridien terrestre** (an III) étalon universelle (mais pour mesurer le méridien, le pôle nord n'est pas un point fixe de l'écorce terrestre)
- Le **prototype en platine iridié** (1875 – 1889) étalon opérationnel
- La **longueur d'onde de l'isotope 86 du krypto**n (1960) étalon élémentaire (Maxwell)
- Le **gel de la valeur numérique de c** (1983) (**longueur d'onde = c/fréquence**) étalon fondamental

Le mètre devient alors la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant une durée de 1 / 299 792 458 de seconde. On assigne donc une valeur numérique à la constante dans la formule :
Constante = (Constante) X [Unité]
La mesure préalable de c au meilleur niveau d'exactitude est : **c= Fréquence X Longueur d'onde** avec les précédentes références.
Désormais, on prend en compte le modèle de la théorie électromagnétique, y compris dans ses aspects relativistes, cette théorie n'étant pas démentie par l'expérience, au présent niveau d'exactitude : **c = 299 792 458 ms^{-1}** exactement.

Sans ce changement de définition du mètre, il n'y aurait pas (ou pas autant) de « GPS » ! (Global Positionning System)

- **Mesure de la distance terre-lune :** elle se fait avec une résolution de 3 mm sur 400.000 km et recule de quelques cm par an.
- **Positionnement par satellites :**
  - Les satellites non géostationnaires (situés entre 20 et 24000 km) ont des horloges atomiques embarquées et contrôlées.
  - Le récepteur « GPS » est un lecteur d'informations : identité, position corrigée des satellites, signaux d'horloges.
  - Les temps de parcours du « satellite » au « détecteur » se font avec un recalage puis un positionnement d'1ns soit 3m.
  - Il y a prise en compte du « canal atmosphérique» et des corrections relativistes.
  - On a un renfort de positionnements relatifs fixes **GNSS (Global Navigation Satellite System).**

Ces changements de définition en 2019 font émerger une révolution scientifique maîtrisée :

Les **définitions reposent désormais sur des constantes physiques fondamentales, des constantes de la nature** :

- Le **mètre** est défini par la **vitesse de la lumière**.
- Le **kilogramme** est défini par la **constante de Planck « h ».** Cette constante est à la base de la quantification en mécanique quantique.
- **On a abandonné la définition précédente de l'ampère. On l'a remplacée par la définition de la charge élémentaire de l'électron « e »**
- **On abandonne le point triple de l'eau et on le remplace par la constante de Boltzmann « k »** qui régit l'agitation thermique des molécules.
- **On abandonne l'ancienne définition de la mole** et **on la fixe sur la valeur de la constante d'Avogadro**, c'est-à-dire du nombre d'atomes contenus dans 12 grammes de carbone ^{12}C.
- **On re-formalise les définitions du mètre, de la seconde et de la candela** sous une forme qui ne change pas l'esprit de ces définitions (on a toujours une transition dans l'atome de césium dont la fréquence devient une constante fixée, la célérité de la lumière dans le vide et l'efficacité lumineuse).

Le Système International aujourd'hui :

Voir site : https://www.bipm.org/fr/measurement-units/rev-si/

A compter du **20 mai 2019**, le **Système International d'unités, le SI, est le système d'unités dans lequel** :

- **La fréquence** $\Delta\nu_{Cs}$ de la transition hyperfine dans l'état fondamental non perturbé de l'atome de césium, isotope 133, est égale à 9 192 631 770 Hz,
- La **célérité c de la lumière dans le vide** est égale à 299 792 458 m/s,
- La **constante de Planck h** est égale à 6,626 070 15 X 10^{-34} Js,
- La **charge élémentaire e** est égale à 1,602 176 634 X 10^{-19} C,
- La **constante de Boltzmann k** est égale à 1,380 649 X 10^{-23} J/K,
- La **constante d'Avogadro** N_A est égale à 6,022 140 76 X 10^{23} » mol^{-1},
- L'**efficacité lumineuse** K_{cd*} d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540 X 10^{12} Hz est égale à 683 lm/W.

Les modèles de l'électrodynamique, de la thermodynamique statistique, de la physique quantique, non démentis expérimentalement à ce jour, sous-tendent la définition des unités de mesure.

N, h, k, e ont des valeurs numériques différentes de 1 : il faut assurer **la continuité historique** des unités.

Au préalable on a mesuré les constantes et donné des schémas de traçabilité :

La **constante de Planck** a été mesurée avec la **balance de Kibble**.

La **constante de Boltzmann** a été mesurée par des **méthodes acoustiques** astucieuses.

Avantages de la dématérialisation des définitions :

- **Traçabilité directe** pour les **étalons électriques quantiques**.
- **Traçabilité directe en n'importe quel point de l'étendue de mesure** pour ces grandeurs, d'où :
  - Une simplification (auparavant il fallait faire 200 comparaisons pour mesurer de 1kg à 100µg en utilisant les formules : $E=h\nu$; $E=mc^2$; $E=kT$
  - Une amélioration de l'exactitude aux points extrêmes (très basses et très hautes températures, nanosystèmes…) en utilisant les formules : $K_J=2e/h$; $R_K=h/e^2$
- Emergence de **nouveaux principes de mesures** et de nouvelles technologies appropriées. Diversité et possibilité d'évolution des expériences de « raccordement » :
  - Lien à des mesures de **fréquence**… mc^2 $h\nu$
  - Capteurs et principes de **mesures à l'échelle quantique** ce qui permet un raccordement à l'optique quantique.

Avant 2019 :

Le kilogramme est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme…

Aujourd'hui :

Le **kilogramme, symbole kg, est l'unité SI de masse ;** il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la **constante de Planck, h**, égale à 8,826 070 15 X 10^{-34} lorsqu'elle est exprimée **en J s,** unité égale à kg m^2 s^{-1}, le mètre et la seconde étant définis en fonction de **c** et $\Delta\nu_{Cs}$.

Il reste donc une pédagogie à inventer…

Les mesure électriques avec e, h, c… ces constantes qui font la mesure

L'Effet Josephson (62 – 73) : h et e étant connues, la mesure d'une tension V revient à la mesure de nombres et d'une fréquence… **U = n.h.f /2e**

L'Effet Von Klitzing (80 – 85) : **e et h** sont connues, la mesure d'une résistance revient à la mesure d'un nombre… **$R=l.h/i.e^2$**

Les Ecluses à électrons (90) : e est connue, la mesure d'un (faible) courant se ramène à un comptage.

La Source Quantique Programmable de courant : on applique la loi d'Ohm avec $2(R_K K_J)^{-1}=e$

(Voir W.POIRIER et al, JAP 2014 : appliquer la mécanique quantique en physique du solide).

Mesure de masse avec h, e, c…

Mesurer une masse macroscopique avec la balance de Kibble : « Peser » une force électrique de Laplace (**m.g = B.L.I**), éliminer par une expérience d'induction (**E = B.L.v**) les éléments difficiles à mesurer L et B.

On obtient **m = (E.I) / (g.v)** qui se ramène (**h est connue**) à des mesures de fréquence et de vitesse…

Mesurer la masse d'un atome grâce à l'effet de recul sur atomes froids…
Lors de l'émission ou de l'absorption d'un photon, un atome échange la quantité de mouvement **hν/c**. La variation induite de sa vitesse peut être observée par la variation apparente de sa **fréquence de de Broglie-Compton** ou par **interférométrie atomique**… **h et c** sont connues. On mesure ainsi la masse avec la plus haute exactitude aujourd'hui.

Et pour passer à l'échelle macroscopique : dans un cristal macroscopique pur et parfait, on mesure la structure de la maille par diffraction X, la forme, le volume par interférométrie optique… on en déduit le nombre d'atomes, et donc la masse :

$$m = \frac{8V \,.\, 2R_\infty \, h \, m_{Si}}{a_0^3 \quad c\alpha^2 \quad m_e}$$ (K. Fujii et al, Métrologie 53, A19 (2016))

Mesure des températures avec k, c…
Par pyrométrie optique sur toute l'étendue (hautes températures y compris) : par mesures spectrales (**loi de Planck**), mesures totales (**loi de Stefan-Boltzmann**) ; les constantes sont désormais co $P = \sigma T^4$

Par thermométrie électrique à bruit : La **puissance de bruit de Johnson** dans un composant est comparée à une référence de bruit avec un outil lié à la référence électrique quantique.

Par thermométrie acoustique : T et k sont liées à la vitesse du son ν dans un gaz. On mesure la fréquence de résonance sonore dans une cavité, et on déduit ν_{son} en éliminant la géométrie (difficile à mesurer) en utilisant la même cavité en résonateur électromagnétique. On mesure ν_{son} en unités de **c** connue !

Par thermométrie quantique : observer les corrélations quantiques sur un laser, induites par le report sur le bruit de phase, dû à la pression de radiation, du bruit de photon. Cette contamination dépend des photons, de **kT**.

Autres perspectives en mécanique :
Les distances et les formes : mesures de Radio Fréquences et optiques, travaux sur le canal, les formes, les nano-objets. Références d'indice ab initio (depuis le début).

Mesures de faibles forces 500 fN (femtonewton valant 10^{-15} Newton) : observer par interférométrie les déplacements induits dans un résonateur mécanique par l'application de la **pression de radiation** d'une source optique.

Micromasses et microforces : mesures électriques dans un électromètre. Outils et propulseurs : résolution en **pN = piconewton = 10^{-12} N.** Forces intercellulaires. Filtres : détection en **ng/cm²** (1 nanogramme = 10^{-9} gramme)

Et demain… revoir la seconde, les horloges :
Horloges atomiques : le Césium depuis 50 ans et TAI (Temps Atomique International) :

- Des micro-ondes à l'optique et au-delà (facteur de mérite X 10^4) avec des liaisons assurées (peignes femtos)
- De l'atome isolé au réseau piégé ou cohérent : plus de limites liées au mouvement
- Des lasers ultrastables
- Des comparaisons continentales par fibre optique à 10^{-18}

Nouvelle définition de la seconde ?

- Une transition optique à la place du césium…
- Plusieurs transitions optiques avec pondération.
- Une constante physique fondamentale ?
- Aspects relativistes : temps propre et gravitation :
  - Projets spatiaux (10^{-18} / cm sur terre)
  - Géodésie à horloges (inversement)

Désormais une base scientifique pour les unités de mesure :
« Vous ne lâchez un point d'appui que lorsque le suivant est parfaitement établi, et que le passage peut s'effectuer sans hiatus… » disait H.CURIEN à la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) en 1999.

$$E = mc^2 \qquad E = h\,\nu$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \qquad E = k\,T$$

$$R_K \approx h / e^2 \qquad R_J \approx 2e / h$$

- Une continuité assurée
- Des modèles scientifiques confortés, intégrés aux définitions du SI : des unités pour un monde quantique
- Une traçabilité garantie et améliorée, principalement ramenée à des mesures de fréquence faites à très haute exactitude.
- Des perspectives de principes de mesure nouveaux
- Des technologies à inventer.

Soit, l'outil d'un progrès raisonné, choisi et partagé.

Question d'un participant : quel était le rôle de la révolution française dans l'uniformisation du système de mesure ?

Marc HIMBERT répond : à la révolution française on met en cause l'autorité du seigneur dans son fief qui avait la capacité de définir et de maîtriser ses propres étalons de mesure. On était pour l'uniformité des mesures (indépendamment des pays et des partis). Tous les cahiers de doléances évoquaient le nécessaire de cette uniformisation. Ce qui est impressionnant est que ce n'est pas ce qu'a répondu la convention. Elle n'a pas répondu sur l'uniformité mais sur l'universalité. C'est l'une des rares périodes où l'on retrouve des scientifiques dans les allées du pouvoir (comme Lavoisier qui fut Président du Comité des Poids et Mesures avant d'être guillotiné). L'universalité est de créer un système qui s'appliquera à tous les temps et à tous les peuples, en prenant comme référence le méridien terrestre.

Question d'un participant : pourquoi cette grandeur suffit-elle pour tout mesurer?

Marc HIMBERT répond : à l'époque on reliait tout au mètre. Certaines grandeurs étaient reliées entre elles : on disait que l'unité de masse était reliée à un certain volume d'eau ($1dm^3$) puis ce fut ce dm^3 d'eau au maximum de densité de l'eau et on n'avait pas de problème avec l'électricité et le magnétisme car les phénomènes les concernant n'étaient pas encore découverts au point de les intégrer dans un système d'unité. On a aussi, à cette époque, créé le franc comme unité de monnaie. La Convention du Mètre, à sa création, ne concerne donc que les longueurs et les masses.

Question d'un participant : aujourd'hui on veut mesurer tout à partir de ces 7 grandeurs, pourquoi pas plus ?

Marc HIMBERT répond : si on introduisait une autre grandeur en définition autonome, on risquerait l'incohérence. On trouverait alors des grandeurs dont l'unité pourrait être définie de deux façons différentes, et l'on risquerait, dans la matérialisation, l'incohérence, ces deux chemins risquant d'aboutir à deux valeurs différentes. Prenons comme exemple, pour illustrer ceci, l'unité de puissance. C'est le produit d'une force par une vitesse (**P = mgv**), on la définit donc bien à partir d'une masse, d'une longueur et d'une durée. Mais la puissance est aussi une grandeur électrique, produit d'une tension U par un courant I et si on prenait l'intensité du courant I comme unité de mesure, on aboutirait à une incohérence avec la définition mécanique. **La métrologie, c'est la continuité historique de l'activité humaine.**

Question d'un participant : au niveau des échelles de mesure, est-on embêté aujourd'hui par les propriétés quantiques ?

Marc HIMBERT répond : on est forcément embêté. La question est de savoir si « embêté » est le mot juste ? Car ces fluctuations de nature quantique, on peut les mettre à profit pour étudier leurs variations, c'est ce qu'on va faire pour essayer d'accéder aux fluctuations thermiques d'un constituant avec un laser et voir comment ce bruit quantique peut être modifié. La vraie question est : quelle est la grandeur que l'on mesure ? Les grandeurs dont on dit qu'elles ont des fluctuations quantiques, sur le plan de ce système quantique, sont des fluctuations parfaitement naturelles et maîtrisées, ce n'est pas un phénomène parasite, ce n'est pas du bruit, c'est intrinsèquement lié à cette grandeur elle-même. Donc, qu'on y soit confronté quand on fait des mesures, c'est une façon de caractériser cette grandeur. On peut le voir au travers du **principe d'incertitude de Heisenberg** : en mécanique quantique, tu ne peux pas mesurer simultanément pour un objet sa position et sa quantité de mouvement. Si l'un est mesuré avec précision, l'autre aura une incertitude énorme. La question est : décrire un système quantique avec des positions et quantités de mouvement, est-ce pertinent comme on le fait en mécanique classique ? La mécanique quantique n'est pas gênante, elle fait que ce qui caractérise les objets sont des grandeurs qui ne sont pas les mêmes. Et si on leur donne le même nom et qu'on veuille les considérer comme les mêmes, on a des soucis. Mais sinon, oui, dans certains domaines à l'échelle du laboratoire, on n'est pas très loin de certaines limites quantiques. Cela représente un très faible pourcentage des mesures réalisées dans le monde.

Question d'un participant : dans un autre domaine, pourquoi les tests COVID ne sont-ils pas fiables à 100% ?

Marc HIMBERT répond : je ne suis ni chimiste, ni biologiste, je ne sais donc pas répondre à cette question. En revanche comme tout citoyen, ayant un âge intéressé par ce sujet, je peux essayer de répondre en tant que tel. Dans un test il y a plusieurs éléments :

- Il y a d'abord **un protocole** qui permet de faire l'expérience (façon de faire ce prélèvement, habilitation de la personne qui prélève) et j'ai l'impression que ce protocole est « blindé », sûr.
- Il y a ensuite **la mesure** elle-même : elle est forcément incertaine. Son incertitude repose d'une part, sur la situation du virus dans les tissus. Les méthodes d'indétermination ont des seuils : le seuil de détection (qui permet de dire, oui, il y a des virus) et le seuil de quantification (qui permet de dire, oui, il y en a et je peux vous dire combien)
- Il y a ensuite **les références** qui permettent de statuer, on fonction des mesures, si on est positif ou négatif.

Tous ces éléments ont des incertitudes qui affectent la prise de décision et, personnellement, je ne suis pas étonné sur les résultats obtenus.

Question d'un participant : qu'est-ce qui fait que les français sont bons en métrologie ?

Marc HIMBERT répond : l'un des premiers éléments est notre performance dans la mesure du temps, des fréquences et de la température, en électricité, sur certaines parties de la pression. Il y a plusieurs causes à cela : d'abord parce que la France est à l'origine du traité de 1875 et elle est gardienne de ce traité, ensuite la proximité du Bureau International (qui est un organisme intergouvernemental) facilite un certain nombre d'échanges. Et même si elle reste très fondamentale, il y a une action de l'état qui est résolue et raisonnable dans ce domaine. Sur l'activité métrologique la plus en amont, la France fait 10% de l'activité européenne, elle est le 3ème pays pour les investissements en métrologie à l'échelle européenne (Royaume-Uni compris). Prenons aussi les utilisations : les rayonnements ionisants, la France est très présente dans cette partie de la métrologie. On est au top pour la métrologie de l'apparence. La métrologie est l'un des domaines où l'on peut comprendre que l'on fasse des mesures redondantes.

Rédacteur : Jean-Pierre BULLIARD
Vice-Président d'IESF Franche-Comté
Vice - Président des Ingénieurs INSA de Franche-Comté

Prochaines Bars des Sciences numériques :

-LA FEMINISATION DES ARMEES : progrès social ou enjeu opérationnel

Lundi 8 mars de 18h30 à 20 h

Le 8 mars 2021, à l'occasion de la journée internationale des droits des femmes, ***la mutuelle Unéo et l'IRIS, avec le concours d'AF1D2,*** *vous invitent à débattre de ce sujet.*

Copier le lien ci-dessous dans GOOGLE pour une inscription Obligatoire dans la limite des places disponibles :

my.eudonet.com/XRM/frm?lbl=formulaireconfuneo8mars2021&tok=A604225B&cs=iTldE83tATZXuT2qzXlcIVT8kB9nIP1k&p=KEq9JKSPWakvzKnDXUWVVt-kqcPUkVIpoFOCD51tilA%3d

Depuis plus de 20 ans, la professionnalisation des armées françaises et la fin des quotas aux concours d'entrée dans ses écoles de formation, les femmes ont intégré le ministère des Armées et ces militaires sont aujourd'hui plus de 33 000. Deux ans après la mise en œuvre du plan mixité et dans le contexte récent et tragique de la première mort au combat d'un sous-officier féminin dans le cadre de l'opération Barkhane au Mali, en quoi la féminisation des armées reste-t-elle un enjeu sociétal et stratégique ? Pour l'armée française, quel est l'état des lieux vingt ans après l'adoption de la résolution 1325 de l'ONU, affirmant pour la première fois, le rôle central des femmes dans le maintien de la Paix et de la sécurité ? Recruter des femmes, est-ce une simple réponse au cadre législatif, ou est-ce disposer d'une véritable plus-value lors des engagements opérationnels ? Quels défis au niveau tactique, opératif et stratégique ?

Avec :

-Camille BOUTRON, *sociologue, chercheuse au sein du domaine « Défense et société » de l'Institut de recherche stratégique de l'École militaire (IRSEM)*

-Capitaine Marion BUCHET, *pilote de chasse, officier en charge de la sécurité aérienne sur la base de Tours*

-Administratrice générale Nathalie TOURNYOL DU CLOS*, directrice, adjointe au directeur des ressources humaines du ministère des Armées*

-Animée par Gaspard SCHNITZLER, *chercheur au sein du pôle Défense, sécurité et armement de l'IRIS*

-TOUS COUSINS : comment mesurer la parenté entre les espèces

Organisé par la Cité des sciences. Avec le soutien du magazine POUR LA SCIENCE

Mercredi 10 mars 2021 à 19h cliquez à l'heure dite sur le lien en direct

https://www.youtube.com/watch?v=ZucW0p1bdbw&feature=youtu.be

La parenté entre espèces, c'est-à-dire leurs degrés de cousinage, est une mesure abstraite. En effet, les ancêtres ont disparu par définition. Mais on peut mesurer indirectement la parenté en organisant les partages entre espèces : qui partage quoi avec qui ? Les indices observés peuvent concerner l'anatomie, mais aussi le matériel génétique, ou les comportements. Cela peut concerner les espèces actuelles et fossiles, nous verrons de quelle manière. Ainsi, ce ne sont pas les différences, mais les partages qui font la mesure de la parenté. Les arbres qui en résultent permettent de raconter l'histoire du vivant et de faire des classifications.

Avec : **Guillaume Lecointre,** systématicien, professeur au Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN).

-CAPTEURS : du NANO au MACRO !

Organisé par la Cité des sciences. Avec le soutien du magazine POUR LA SCIENCE

Jeudi 11 mars 2021 à 11h cliquez à l'heure dite sur le lien en direct

https://www.youtube.com/watch?v=62h2N-Lo7JM&feature=youtu.be

Mesurer une température, des déformations ou un degré d'humidité, c'est utiliser des capteurs constitués de matériaux qui réagissent à ces phénomènes tels que les changements de température, de forme ou d'humidité.

Au XXème siècle, on a cherché à diminuer de plus en plus la taille de ces capteurs. Cette course à la miniaturisation nécessite l'utilisation de matériaux de plus en plus complexes, notamment des matériaux dits intelligents ou encore plus récemment, des nanomatériaux.
Le résultat, c'est une grande variété de micro et nano-capteurs, qui sont ensuite installés dans un large panel d'objets de nos vies quotidiennes. Comment fonctionnent-ils ? Comment sont-ils mis en œuvre ? Quel est l'usage des données qu'ils génèrent massivement ?

Avec :
-Laurence Bodelot, enseignante chercheuse à l'École polytechnique, chercheuse en mécanique du solide ;
-Bérengère Lebental, ingénieure en cheffe des ponts et des forêts, chercheuse en nanoélectronique et enseignante à polytechnique.

-Société : SOUS LA TOISE DU BIG DATA
Organisé par la Cité des sciences. Avec le soutien du magazine POUR LA SCIENCE

Mercredi 24 mars 2021 à 19h cliquez à l'heure dite sur le lien en direct
https://www.youtube.com/watch?v=KNv6W4d8DhI&feature=youtu.be

L'arrivée des données massives, les fameuses big data, interrogent la manière de produire les statistiques qui alimentent le débat public. Comment mesure-t-on aujourd'hui un phénomène social ou économique tel que l'indice des prix, le chômage, les inégalités, la croissance, ...? Qu'est-ce qu'une donnée, comment l'obtient-on, et comment l'analyse-t-on ? Les traces numériques en très grand nombre peuvent contribuer à la mesure statistique, mais sont-elles totalement fiables ? En 2020, avec la crise sanitaire et le besoin de disposer d'information rapide, l'utilisation des données massives s'est accélérée dans la statistique publique. Qu'est-ce que cela pourrait changer dans notre désormais célèbre « monde d'après » ?

Avec : **Pauline Givord**, économiste, direction de l'animation de la Recherche, des études et des statistiques du ministère du Travail (DARES) et chercheuse associée au Laboratoire Interdisciplinaire de l'évaluation des Politiques publiques de Science Po.