

# Partie I

## La métrologie ?

### C'est quoi, au juste ?

Un métrologue, « titre » généralement obtenu lorsqu'une personne prend cette fonction dans une entreprise, peut se sentir rapidement mal à l'aise dans sa vie quotidienne lorsqu'il s'agit de parler de son statut. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer la réaction de ses ami(e)s lorsque ledit métrologue énonce l'intitulé de son métier. Systématiquement ou presque, les yeux de ses interlocuteurs s'ouvrent en grand avant que ne fuse l'exclamation : « Mais c'est quoi, ça ? Jamais entendu parler ! »

Alors que la question de la fiabilité des mesures était encore au cœur de la société française à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, il semble qu'elle ne soit tout simplement plus aussi cruciale aujourd'hui. Inconsciemment et collectivement, nous avons acquis la sensation que les mesures vont de soi et expriment une « objective réalité ». Personne (ou presque) ne se soucie donc plus de cette question de nos jours...

« Le problème de la métrologie, c'est que nos enfants l'apprennent dans la cour de l'école, comme ils apprennent la vis et l'écrou. » Pierre Giacomo, alors directeur du Bureau international des poids et mesures (BIPM),

faisait ce constat au cours du X<sup>e</sup> Congrès International de Métrologie en 2001 à Saint-Louis (68). Par cette remarque, il signifiait que la perception que nous avons de la mesure date de notre prime enfance et qu'elle est acquise de façon quasi inconsciente. En effet, nous entendons chaque jour ou presque, et depuis toujours, des résultats de mesures. Celles-ci sont exprimées par une valeur unique, donc implicitement juste. Dès lors, tout comme l'enfant connaît la vis et l'écrou par leur fonction, et non par leur technologie très compliquée, il connaît la mesure par sa fonction mais non par sa technologie, elle aussi très compliquée.

Cette première partie a pour objet d'analyser, à partir de l'histoire de la mesure, la manière dont elle est perçue et de donner les éléments « techniques » pour comprendre ce qu'est un résultat de mesure. Nous montrerons ainsi à quel point notre intuition est éloignée de la réalité.

# 1

## **Savoir d'où nous venons pour comprendre où nous sommes Quelques mots d'histoire de la métrologie**

Le besoin de mesures est pratiquement né avec l'Homme pour quantifier le temps puis les distances pour ses voyages et enfin les quantités pour ses achats. Au-delà de ces nécessités du quotidien, les mesures sont essentielles à la science, tant fondamentale qu'appliquée, puisqu'elle est l'indispensable outil permettant de vérifier une théorie. Par exemple, le boson de Higgs, fruit de l'expérience de pensée de Peter Ware Higgs<sup>1</sup>, n'a acquis un statut d'existence effective qu'au moment d'une mesure de ses effets. De nombreuses théories scientifiques naissent ainsi d'observations et de mesures qui alimentent des modélisations. Aussi, bien que nous n'en n'ayons qu'une conscience partielle, la mesure est omniprésente et indispensable pour le fonctionnement au quotidien de notre mode de vie.

.....

1    Physicien britannique (1929).

## 1.1 Des mesures communes

À la veille de la Révolution française, le peuple faisait connaître, dans les cahiers de doléances, sa volonté de voir enfin émerger « un poids et une mesure ». L'histoire prête, même s'il y a débat, à Charles Maurice de Talleyrand-Périgord, évêque d'Autun puis homme politique, le principe fondateur d'un système d'unités devant être partagé par l'ensemble de la communauté savante et des peuples : « considérant [...] que le seul moyen d'étendre cette uniformité aux nations étrangères, et de les engager à convenir d'un même système de mesure, est de choisir une unité qui, dans une détermination, ne renferme rien ni d'arbitraire ni de particulier à la formation d'aucun peuple sur le globe ». Une fois ce principe accepté, et après de nombreux débats, la première définition du mètre<sup>2</sup> a été votée le 26 mars 1791 par l'Assemblée constituante. Le mètre est alors défini comme « la grandeur du quart du méridien terrestre, pour base du nouveau système de mesure ». Le système métrique décimal est ensuite institué le 18 germinal an III (7 avril 1795) par la loi « relative aux poids et mesures ».

Une fois la définition adoptée, il a fallu la « matérialiser ». Sept ans environ seront nécessaires pour connaître enfin la longueur de ce nouveau « mètre » en « mesurant » la distance entre Dunkerque et Barcelone.

## 1.2 Une organisation internationale

Le 20 mai 1875, 17 États signent la Convention du mètre. Elle succède à la Convention internationale du système métrique, mise en place en 1870 à Paris et dont l'objectif, fixé par Napoléon III, était de propager l'usage général des mesures métriques, de faciliter les échanges et les comparaisons de mesures entre les États et de procéder à l'élaboration d'un mètre international à traits, donnant ainsi à la France un rôle moteur. Cette convention donne naissance à la Convention générale des poids et mesures<sup>3</sup> (CGPM) et au Bureau international des poids et mesures<sup>4</sup> (BIPM).

La CGPM est un organe de direction. Elle regroupe les délégués des États membres ainsi que des observateurs des États associés. Elle discute et examine les dispositions à prendre pour assurer l'extension et l'amélioration du Système international d'unités (SI), sanctionne les résultats de nouvelles

2 Dont il a fallu, bien sûr, inventer le nom pour l'occasion !

3 Lien : <http://www.bipm.org/fr/worldwide-metrology/cgpm/>

4 Lien : <http://www.bipm.org/fr/bipm/>

déterminations métrologiques fondamentales et prend des résolutions scientifiques de portée internationale dans le domaine de la métrologie (science des mesures et ses applications) ainsi que des décisions importantes concernant l'organisation, le développement du BIPM et sa dotation.

Le BIPM est chargé<sup>5</sup> :

- ▶ « d'établir et de maintenir des étalons de référence appropriés, utilisés pour conduire, au plus haut niveau métrologique, un nombre limité de comparaisons clés internationales ;
- ▶ de coordonner les comparaisons internationales des étalons de mesure nationaux par l'intermédiaire des Comités consultatifs du Comité international des poids et mesures, en jouant le rôle de laboratoire pilote pour certaines comparaisons considérées prioritaires et en menant les travaux scientifiques requis pour ce faire ;
- ▶ de proposer certains services d'étalonnage aux États membres ;
- ▶ de coordonner des activités entre les laboratoires nationaux de métrologie des États membres, notamment par l'intermédiaire de l'arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM<sup>6</sup> et de leur fournir des services techniques afin de soutenir leur travail ;
- ▶ de collaborer, selon les besoins, avec d'autres organisations intergouvernementales et organismes internationaux, directement ou par l'intermédiaire de comités communs ;
- ▶ d'organiser des réunions scientifiques visant à identifier les évolutions futures du système mondial de mesure qui seront nécessaires pour répondre aux exigences actuelles et à venir en matière de mesures dans l'industrie, les sciences et la société ;
- ▶ d'informer, par le biais de publications et de réunions, la communauté scientifique, le grand public et les décideurs sur les questions liées à la métrologie et à ses avantages. »

### 1.3 La métrologie légale : garantir la loyauté des mesures

Cette nouvelle structure des unités de mesure, avant même qu'elle soit internationale, a permis de faire émerger, conformément aux souhaits des citoyens, une organisation qui permettra de garantir la loyauté des .....

5 D'après le site du BIPM.

6 Comité international des poids et mesures (*International committee for weights and measures*).

échanges commerciaux (« un poids et une mesure »). Le 3 novembre 1801, un décret rend légal le système métrique en France. Un corps d'inspecteurs des Poids et mesures est créé. Le 4 juillet 1837, une loi promulguée par Louis Philippe interdit, sous peine de sanctions (art. 479 du Code Pénal), l'utilisation d'autres unités que celles définies par la loi du 18 germinal An III. Cette loi entre en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 1840, date à laquelle le corps des inspecteurs de 1801 est transformé en un corps officiel des vérificateurs des poids et mesures, fonctionnaires assermentés chargés de lutter efficacement contre la fraude.

Ces vérificateurs des Poids et mesures peuvent dresser des procès-verbaux en dehors de la présence d'un magistrat. Lesdits procès-verbaux sont ensuite transmis au juge de paix dans le cas de l'usage de faux poids ou au tribunal correctionnel dans le cas d'usage d'instruments faux<sup>7</sup>.

L'ordonnance du 16 juin 1839 fixe par exemple les limites d'acceptation des erreurs des balances<sup>8</sup> : ces limites servent de base à la déclaration de conformité desdites balances. Dans le cadre de sa mission qui consiste à garantir la loyauté des échanges commerciaux (et puisque l'usage des instruments concernés est connu « à l'avance »), le Service des poids et mesures<sup>9</sup> peut appliquer des limites d'erreurs maximales identiques sur tout le territoire. L'étalonnage, dans ce cadre, n'est qu'une étape intermédiaire qui permet de définir les erreurs de l'instrument afin de les comparer aux limites acceptables pour déclarer sa conformité (ou procéder à son ajustage voire à sa réforme), ce qui importe finalement aux marchands et aux consommateurs.

En 2016, cette mission de contrôle des instruments de mesure utilisés dans le cadre des échanges commerciaux est toujours en vigueur. Elle est placée sous le contrôle du Bureau national de métrologie (BNM) qui dépend de la Direction générale des entreprises<sup>10</sup> (DGE) depuis le 16 septembre 2014. Le BNM est chargé de faire appliquer les règlements, concernant notamment la conformité des instruments de mesure utilisés pour le commerce. Cette conformité repose en grande partie, mais pas uniquement, sur la vérification périodique desdits instruments. La vérification est matérialisée par une étiquette verte apposée sur l'instrument et à la vue du consommateur. Cette étiquette précise une date de validité, établie à partir de la date

.....  
7 C'est-à-dire « non-conformes » aux décrets qui en fixent les limites d'acceptation.

8 Écarts entre valeurs étalons et valeurs mesurées.

9 Première dénomination de l'actuel BNM.

10 Anciennement Direction générale de la compétitivité des industries et des services (DGCIS).

de vérification, et d'une périodicité fixée par décret. Il est important de préciser ici que cette stratégie n'est pas uniquement française. L'Organisation internationale de la métrologie légale (OIML) joue en quelque sorte le même rôle que le BIPM, mais dans le monde de la métrologie légale. L'OIML propose notamment des modèles de réglementation pour les différentes catégories d'instruments de mesure. Les États membres prennent l'engagement moral de mettre ces modèles en application autant que possible.

Le succès du BNM et, avant lui, de toutes les instances qui se sont chargées de rassurer le consommateur depuis 1837, est éclatant. À l'inverse d'il y a plus de 200 ans, plus personne, de nos jours, ne se tracasse « du poids et de la mesure », si ce n'est au sens figuré. Du fait de ce succès, et dans notre mémoire collective, le doute sur les mesures a totalement disparu. Les notions « d'instrument conforme » et de « mesure juste » apparaissent « associées ». Le besoin exprimé par le peuple (« Un poids et une mesure ») est donc satisfait.

## **1.4 Métrologie industrielle**

Depuis maintenant près de deux siècles, la métrologie industrielle se trouve trop souvent cantonnée à l'étalonnage des instruments de mesure afin de déterminer leur conformité par rapport à des erreurs maximales tolérées (EMT) par quasi-mimétisme avec les pratiques de la métrologie légale. Or, dans le monde industriel, la problématique ne se limite pas à la loyauté. La métrologie doit permettre de :

- ▶ fabriquer conforme et de préférence, du premier coup ;
- ▶ prendre des décisions pertinentes eu égard, notamment, à la conformité des produits et/ou des analyses lorsque la mesure sert à statuer sur ce point.

Pour résumer en une formule : quand la métrologie légale doit garantir la loyauté des échanges commerciaux, la métrologie industrielle doit garantir la fonctionnalité des produits par de bonnes décisions. Ce sont ces bonnes décisions qui sont indispensables à l'entreprise pour rester compétitive et donc assurer sa pérennité.

Pour la métrologie légale, la maîtrise des instruments de mesure est un acte suffisant. Cette maîtrise passe par des vérifications périodiques parfaitement décrites par des décrets établis à partir des enjeux et des conditions connues d'utilisation.

Dans le cadre industriel, la question de la mesure est beaucoup plus complexe. Comme nous le verrons par la suite, et contrairement à la perception inconsciente que nous avons évoquée précédemment (« un poids et une mesure »), les mesures ne peuvent pas être justes et les étalonnages périodiques ne changent rien à cette fatalité. La seule prise en compte des étalonnages pour envisager la qualité des mesures est une réflexion aussi stupide que le fait de croire qu'en voiture, il suffit d'avoir de bonnes plaquettes pour bien freiner !

## 1.5 Métrologie industrielle et qualité

Malgré des démarches entamées dans les années 1980 par le BNM afin de sensibiliser les industriels à cette discipline, il faut bien admettre que le véritable essor de cette dernière, ou plutôt le succès des prestations d'étalonnage, est essentiellement dû à l'avènement des référentiels qualité, la série des normes « ISO 9000 » en tête.

Aujourd'hui encore, si le besoin technique de maîtrise de la mesure est rarement ressenti<sup>11</sup> comme essentiel par les industriels, il leur faut, pour déclarer la conformité aux référentiels, prouver au minimum qu'ils ont bien étalonné leurs instruments. Si chacun peut constater que le raccordement<sup>12</sup> est devenu une pratique acceptée, l'évaluation des incertitudes de mesure n'en est, quant à elle, qu'à ses débuts. La difficulté conceptuelle<sup>13</sup> et la difficulté mathématique n'ont pas aidé à faire accepter ce besoin, tant du côté des industriels que de celui des auditeurs<sup>14</sup>. Il est en effet plus simple de s'assurer que le moyen a été vérifié<sup>15</sup> que d'évaluer la pertinence d'un calcul d'incertitude !

Pour les vérifications, et faute de décret, les industriels s'appuient la plupart du temps sur des normes forcément généralistes pour s'assurer de la conformité de leurs instruments. Dans certains domaines (l'électricité notamment), les spécifications « constructeur » servent ainsi de base à

- .....
- 11 Tout se passe, en effet, pour les industriels comme pour les consommateurs : les mesures sont apparemment justes.
  - 12 Il s'agit de la traçabilité métrologique, c'est-à-dire la propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages.
  - 13 On a mis des années, à partir de 1837, pour oublier les erreurs de mesure dans notre vie de consommateur.
  - 14 Ceci est d'autant plus vrai que tout le monde se passe de ces calculs d'incertitudes depuis toujours.
  - 15 Il suffit de consulter un document et de regarder une étiquette.



la déclaration de conformité. Sachant que l'incertitude de mesure finale dépend en grande partie de composantes propres aux conditions d'utilisation (et strictement indépendantes des caractéristiques intrinsèques du moyen), une telle stratégie (norme ou spécification) ne peut pas être satisfaisante du point de vue technique.

En revanche, on se satisfait de la sécurité « inconsciente et séculaire » associée au mot « conforme », résultante d'une simple vérification de l'instrument. Les normes sont trop généralistes pour être universelles. Elles décrivent les erreurs que la technologie de tel ou tel instrument peut générer et la façon de les déterminer. Cependant, elles ne peuvent en aucun cas fixer une limite<sup>16</sup> cohérente avec tous les usages. Il en va de même pour les spécifications « constructeur » qui représentent l'engagement du fabricant mais ne présument en rien de l'incertitude qui s'exprimera finalement à l'utilisation du moyen.

Ces dernières années, les métrologues, conscients du caractère insatisfaisant de ces usages, ont pu observer que la quantification des incertitudes de mesure (et pas uniquement des erreurs de l'instrument) est une question récurrente mais également une pratique qui devient progressivement incontournable. Cette nouvelle orientation, plus technique, vise à adapter une stratégie à la réalité de l'entreprise et ne pourra que valoriser le travail des métrologues. Aussi, et plutôt que d'obtenir un simple tampon de conformité, les métrologues devront exprimer et justifier un besoin spécifique qui manque à ce jour.

.....

16 Les normes françaises donnent encore des limites, notamment dans le domaine de la métrologie dimensionnelle, alors qu'une norme internationale (ISO 14978:2006, *Spécification géométrique des produits (GPS) – Concepts et exigences généraux pour les équipements de mesure GPS*) s'y oppose.

