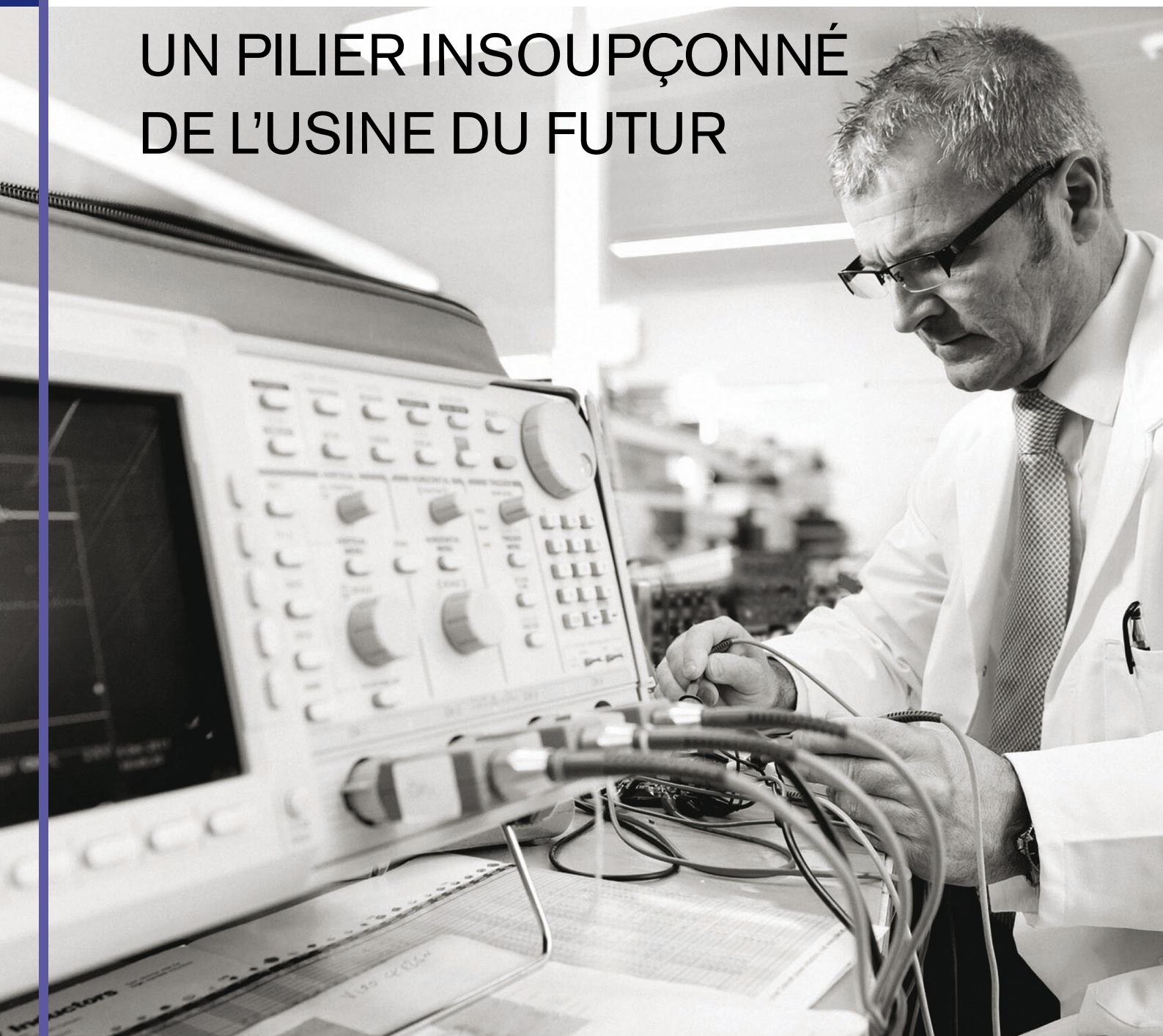


MÉTROLOGIE :

UN PILIER INSOUÇONNÉ DE L'USINE DU FUTUR





SOMMAIRE

Introduction p. 3

Les pratiques actuelles,
héritage de la métrologie légale p. 4

- Le raccordement
- La vérification
- Les périodicités

De la mesure à la décision p. 8

- Incertitude de mesure
et déclaration de conformité
- Risque client/risque fournisseur
- La « *sur-exigence* » : solution
des 30 glorieuses

La métrologie au XXI^e siècle p. 11

- Du « *pire des cas* » à l'efficacité :
l'espoir du big data
- L'inférence bayésienne : dans les pas
de la norme NF ISO/CEI Guide 98-4
- Métrologie et instruments connectés :
la technologie au service de la fiabilité
et de l'efficacité

Conclusion p. 14

3 Questions à...

Dominique Foucard,
Michelin p. 15

François Daubenfeld,
PSA p. 16

Tahar Mellitti,
Alliance de l'Industrie du Futur p. 17

Annexes p. 18

- Quelques définitions
- Bibliographie

Nos remerciements à Jean-Michel Pou
et Laurent Leblond

Les véritables difficultés de la mesure ont été contournées pour des raisons historiques, mais elles existent bel et bien : **les mesures ne sont pas justes, et ne peuvent pas l'être**. Dans un monde où chacun pense pourtant qu'il peut se fier à une mesure, comment les choses se sont-elles organisées pour qu'il en soit ainsi ? Ce Livre Blanc de manufacturing.fr a pour objectif de faire découvrir à ses lecteurs le vrai visage de la métrologie, en expliquant pourquoi cette science est si mal appréhendée et comment elle pourrait s'installer comme l'un des piliers de l'entreprise du futur.

INTRODUCTION

La métrologie, science de la mesure, est une science si ancienne qu'elle ne préoccupe plus que quelques spécialistes, souvent discrets. Le besoin de mesurer est constitutif de toute l'histoire de l'humanité. Au-delà des besoins ordinaires, la métrologie est aussi, voire surtout, un outil indispensable pour les sciences.

Dans le monde industriel, la mesure est également omniprésente. Des plans d'expériences qui permettent de dimensionner un objet au contrôle réception des lots fournisseurs, en passant par le pilotage des procédés de fabrication, la mesure fait partie du quotidien.

Mais chacun comprend que la longueur d'une pièce en acier dépend de la température à laquelle elle est exposée et que ladite température a un caractère aléatoire au fil de la journée dans l'atelier. De ce fait, la longueur sera différente en fonction du moment, donc de la température à laquelle est réalisée la mesure.

Or, ces différences ne s'expliquent pas par la longueur de la pièce elle-même qui, par convention, doit être considérée à la température fixe de 20°C (norme ISO 1) mais bel et bien par une cause externe, la température, qui ne peut rester stable indéfiniment. En fait, les mesures sont le produit d'un processus, dit « *processus de mesure* », qui met en jeu différents facteurs, tous inexorablement imparfaits. Elles sont donc, elles aussi, et contrairement à notre intuition, imparfaites.

C'est le produit de toutes ces imperfections que les métrologues appellent « *incertitude de mesure* ».

« *Nous voulons tous des certitudes. L'incertitude nous tue* » (William Katz¹).
Voilà, résumée en deux phrases, toute la problématique soulevée par la métrologie. Dans l'industrie, les mesures fondent les décisions. Or, les mesures ne sont pas justes, et ne sont donc pas certaines. De ce fait, chaque décision génère des risques et ce sont ces risques que le métrologue devrait manager.

La métrologie, science de la mesure, est une science ancienne, si ancienne qu'elle ne préoccupe plus que quelques spécialistes, souvent discrets. Le besoin de mesurer est constitutif de toute l'histoire de l'humanité.

¹ William Katz est un historien américain auteur de nombreux livres sur l'histoire afro-américaine. Cette citation est extraite de son livre « Fête fatale », publié en 2013.

LES PRATIQUES ACTUELLES, HÉRITAGE DE LA MÉTROLOGIE LÉGALE

Il y a maintenant près de trente ans, la norme ISO 9001 a remis la métrologie dans la problématique industrielle, sous un angle essentiellement qualité. En exigeant, au paragraphe 4.11.1 de la norme ISO 9000 V 1994 – Généralités : « *Les équipements de contrôle, de mesure et d'essai doivent être utilisés de façon à assurer que l'incertitude de mesure est connue et compatible avec l'aptitude requise en matière de mesurage* », la norme décrivait parfaitement bien la mission de la métrologie. Comme rappelé ci-dessus, les mesures n'étant pas justes, l'inévitable incertitude qui les accompagne doit être en rapport avec les risques associés à la décision à prendre.

La norme précisait ensuite, dans une série d'alinéas, les actions à conduire dans le but d'aider le lecteur à satisfaire cette exigence, actions difficilement compréhensibles dans un monde où la mesure est considérée comme une vérité intangible :

« Les équipements de contrôle, de mesure et d'essai doivent être utilisés de façon à assurer que l'incertitude de mesure est connue et compatible avec l'aptitude requise en matière de mesurage. »

« *Le fournisseur doit :*

- a) Déterminer les mesurages à effectuer, l'exactitude requise et sélectionner l'équipement de contrôle, de mesure et d'essai approprié capable d'apporter l'exactitude et la précision nécessaire ;*
- b) Identifier tous les équipements de contrôle, de mesure et d'essai qui peuvent avoir une influence sur la qualité produit, les étalonner et les régler aux intervalles prescrits, ou avant utilisation, par rapport à des équipements certifiés reliés de façon valable à des étalons reconnus au plan international ou national. Lorsque ces étalons n'existent pas, la référence utilisée pour l'étalonnage doit faire l'objet d'une description écrite ;*
- c) Définir le processus utilisé pour l'étalonnage des équipements de contrôle, de mesure et d'essai en détaillant le type d'équipement, l'identification spécifique, l'emplacement, la fréquence des vérifications, la méthode de vérification, les critères d'acceptation et l'action à entreprendre lorsque les résultats ne sont pas satisfaisants ;*
- d) Identifier les équipements de contrôle, de mesure et d'essai avec un marquage approprié ou un enregistrement d'identification approuvé pour indiquer la validité de l'étalonnage ;*
- e) Conserver des enregistrements d'étalonnage pour les équipements de contrôle, de mesure et d'essai ;*
- f) Évaluer et consigner par écrit la validité de contrôle et d'essais antérieurs lorsque les équipements de contrôle, de mesure et d'essai s'avèrent être en dehors des limites fixées pour l'étalonnage ;*
- g) Assurer que les conditions d'environnement sont appropriées pour la réalisation des étalonnages, contrôles, mesures et essais ;*
- h) Assurer que la maintenance, la préservation et le stockage des équipements de contrôle, de mesure et d'essai sont tels que l'exactitude et l'aptitude à l'emploi sont maintenues ;*
- i) Protéger les moyens de contrôle, de mesure et d'essai, y compris les matériels et les logiciels d'essai, contre les manipulations qui invalideraient les réglages de l'étalonnage. »*

À la lecture de ces exigences, on distingue bien les stigmates de la métrologie légale. Cette dernière, **pour assurer la loyauté des échanges commerciaux**, s'appuie essentiellement sur la vérification des instruments de mesure (lire l'encadré Quelques définitions importantes). Dans cet objectif, elle a publié des décrets pour chaque instrument concerné, décrets qui définissent le protocole des vérifications, les étalons à utiliser, les erreurs maximales tolérées (E.M.T) ou les classes de précision requises

et les périodicités de ces vérifications. Dans le monde de la métrologie légale, **un instrument « conforme » est nécessaire et suffisant pour garantir la loyauté de l'échange**, ce qui peut parfaitement être admis. En revanche, **pour la métrologie industrielle qui vise à garantir la fonctionnalité**, peut-on sérieusement appliquer ce même principe ? Autrement dit, dans un registre différent, qui pourrait avoir l'idée saugrenue de penser que seule la qualité des plaquettes de frein conditionne une distance de freinage ?

De révision en révision, l'exigence a été reformulée mais pas réellement précisée. Au contraire, on notera que dans la dernière version (2015) de l'ISO 9001, elle est beaucoup moins explicite et laisse une place importante à l'interprétation de la norme (paragraphe 7.1.5.2) :

« Lorsque la traçabilité de la mesure est une exigence ou lorsqu'elle est considérée comme un élément essentiel visant à donner confiance dans la validité des résultats de mesure, l'équipement de mesure doit être :

a) Etalonné et/ou vérifié à intervalles spécifiés, ou avant son utilisation, par rapport à des étalons de mesure reliés à des étalons de mesure internationaux ou nationaux. Lorsque ces étalons n'existent pas, la référence utilisée pour l'étalonnage ou la vérification doit être conservée sous forme d'information documentée ;

b) Identifié afin de pouvoir déterminer la validité de son étalonnage ;

c) Protégés contre les réglages, les dommages ou les détériorations susceptibles d'invalider l'étalonnage et les résultats de mesure ultérieurs.

Lorsqu'un équipement de mesure s'avère inadapté à l'usage prévu, l'organisme doit déterminer si la validité des résultats antérieurs a été compromise et mener l'action appropriée, si nécessaire ».

Ainsi, au fil des années de pratiques et de révisions des normes « Qualité », une forme de consensus s'est installée entre auditeurs et audités, clients et fournisseurs, industriels et prestataires d'étalonnage. Ce consensus veut que la démonstration de la conformité² et de la traçabilité métrologique se traduisent, dans les faits, par un étalonnage³. Des lors, les exigences sont considérées satisfaites.



² Ou vérification, voir définition en annexe.

³ Voir définition en annexe.

° *Le raccordement*

Depuis 30 ans, la métrologie se focalise donc essentiellement sur la démonstration de la traçabilité métrologique des instruments de mesure. Beaucoup de choses ont été faites dans ce sens avec, notamment, l'avènement du COFRAC (Comité français d'accréditation) et la norme NF EN ISO/CEI 17025 qui décrit les exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.

D'un B.N.M (Bureau National de Métrologie) qui habilitait exclusivement les compétences techniques des laboratoires jusqu'aux années 1990, nous sommes passés depuis à l'accréditation, c'est-à-dire à la reconnaissance, non seulement des compétences techniques, mais aussi de l'organisation générale du laboratoire à satisfaire son client en termes de qualité. Savoir faire telle ou telle prestation « *dans les règles de l'art* » ne suffit plus désormais. Il faut démontrer sa capacité à maintenir, voire améliorer, le niveau de performance du laboratoire et surtout assurer la pérennité de cette compétence. La garantie offerte par le COFRAC se traduit, dans les faits, par l'apposition de son logotype sur les documents remis, certificat d'étalonnage ou constat de vérification. Le COFRAC se charge d'auditer le laboratoire afin de vérifier que, pour les prestations accréditées, il applique une méthode reconnue, utilise des étalons traçables métrologiquement aux références internationales, maîtrise ses incertitudes d'étalonnage et qu'il applique l'ensemble des exigences de la norme NF EN ISO/CEI 17025 au quotidien.

De nos jours, tous les prestataires d'étalonnage, ou presque, sont accrédités par le COFRAC. Cela ne signifie pas que toutes leurs prestations sont couvertes par l'accréditation, mais que certaines, clairement identifiées dans leurs conventions disponibles sur Internet, le sont. Ceci implique que le laboratoire a construit et maintient un système qualité conforme à la norme NF EN ISO/CEI 17025. Le COFRAC s'est installé dans le paysage des entreprises certifiées. Il est également au cœur des politiques publiques. Citons par exemple l'obligation réglementaire faite aux laboratoires de biologie médicale d'être accrédités suivant la norme NF EN ISO 15189 pour pouvoir continuer à exercer.

Au final, tous ces prestataires proposent essentiellement d'assurer la vérification des instruments de mesure en respectant la traçabilité métrologique. Ils proposent également des prestations de maintenance/ réparation, des services de logistique (navettes de livraison), des prestations sur site voire du travail en régie, de l'assistance à la gestion des vérifications périodiques à l'aide de logiciels spécialisés et souvent de la formation.

• *La vérification*

Depuis que les industriels sont sensibilisés (certains diront soumis) à la métrologie via les systèmes Qualité, leur question principale est relative à la « *conformité* ». Cette conformité, déclarée pour un instrument de mesure lors de sa vérification, est souvent interprétée comme le fait que les mesures qui seront réalisées avec cet instrument seront « *justes* ». Or, ce ne peut pas être le cas comme nous l'avons montré précédemment.

Il faut reconnaître ici une forme de hiatus entre industriels et laboratoires d'étalonnage. Les premiers s'investissent rarement dans l'évaluation des incertitudes de mesure. Ils comprennent, implicitement, lorsque le laboratoire indique que l'instrument est conforme, que les mesures qu'il réalisera seront justes. Les auditeurs les confortent souvent dans ce sens car cela est également plus simple pour eux, surtout si le document qui donne l'information porte le logotype du COFRAC. Les seconds, les laboratoires prestataires, se « *cachent* » en quelque sorte derrière les normes et les



spécifications du constructeur pour annoncer une conformité. En procédant ainsi, ils savent qu'ils ne garantissent pas la conformité à l'utilisation au quotidien, dans chaque entreprise, par chaque opérateur. Ils répondent simplement aux exigences d'une norme qu'ils ont souvent eux-mêmes écrite.

Il est important ici de comprendre que la norme est un consensus obtenu par un travail collectif de différentes personnes concernées par une problématique. Mais qui dit consensus ne dit pas vérité et la norme est souvent critiquable. Elle doit servir de base à une réflexion plus personnelle, intégrant les réalités du terrain sur lequel on compte l'utiliser. Elle ne peut pas être considérée comme une vérité absolue, elle n'en a d'ailleurs pas la prétention. Certains auront sûrement remarqué, sur ce point, une mention récemment apparue dans les normes : « *La norme est destinée à servir de base dans les relations entre partenaires économiques, scientifiques, techniques et sociaux. La norme, par nature, est d'application volontaire. Référencée dans un contrat, elle s'impose aux parties. Une réglementation peut rendre d'application obligatoire tout ou partie d'une norme (...).* ».

Chacun doit par conséquent comprendre qu'il faut s'interroger sur la pertinence d'appliquer telle ou telle norme. Il est nécessaire de considérer son propre contexte, notamment pour ceux qui n'auraient pas eux-mêmes participé à l'élaboration du document. En effet, tout le monde peut participer à l'élaboration de la norme. Il suffit pour cela, en France, d'être adhérent de l'AFNOR ou des organismes, souvent des syndicats professionnels, hébergeant les bureaux de normalisation sectoriels concernés. Il est également possible de participer gratuitement aux enquêtes publiques pour émettre ses propres avis et, potentiellement, défendre son point de vue.

- **Les périodicités**

La question de la gestion des vérifications est souvent centrale au cours des audits de certification. La norme indique qu'il faut étalonner/vérifier périodiquement les instruments de mesure, tout comme le fait la métrologie légale. Il convient alors de définir des périodicités (intervalles spécifiés) pour les instruments et la tradition a voulu que là encore, le modèle de la métrologie légale, reposant sur des périodicités calendaires appliquées uniformément à une famille d'instruments, soit recopié. Si, dans le cas des échanges commerciaux, le risque de dérive d'un instrument ne fait que favoriser, le cas échéant, le vendeur ou l'acheteur en défavorisant l'autre, sans grande conséquence au final, les conséquences sont bien différentes dans le monde industriel. En effet, chaque mesure conduit à une décision et si l'instrument dérive ou subit un accident, les décisions qui suivront, pourront être erronées et cela indépendamment de la date de réétalonnage de l'instrument. Il suffit alors d'imaginer ce cas de figure dans un avion où un instrument défaillant aurait « *laissé passer* » une pièce critique pourtant non conforme pour se convaincre de l'importance de la mesure industrielle : le crash potentiel de l'avion n'est sans doute pas du même niveau de gravité que dix grammes de plus ou de moins sur le rôti du dimanche !

Il n'est pas rare, malgré des outils permettant de sortir de ce modèle inadapté, de voir des gestions de parcs d'instruments qui reposent sur des périodicités calendaires fixées arbitrairement à un an ou deux. A partir de l'inventaire des moyens, des logiciels aident désormais les industriels à établir, d'un côté les plannings des étalonnages/vérifications à venir et de l'autre les indicateurs « *de performance* » de la fonction Métrologie. Ces indicateurs sont souvent établis sur la base des instruments déclarés « *conforme* » et sur les retards d'intervention.

La question de la gestion des vérifications est souvent centrale au cours des audits de certification. La norme indique qu'il faut étalonner/vérifier périodiquement les instruments de mesure, tout comme le fait la métrologie légale.

A l'heure où l'efficacité des organisations passe souvent par la digitalisation et l'exploitation des données (Big Data), il est probable que la métrologie évoluera elle aussi vers l'utilisation des informations dont elle dispose.

S'attacher à obtenir un taux d'instruments déclarés conformes suite à vérification revient finalement à faire un travail inutile. En effet, l'étalonnage/ vérification ne change pas l'état de l'instrument, il le constate. En bouleversant les habitudes, et en organisant non plus des étalonnages arbitraires mais des étalonnages « conditionnels », c'est-à-dire lorsqu'il y a un doute sur la « santé » de l'instrument, un indicateur qui viserait un taux important de « non conforme » permettrait de savoir si les instruments étalonnés sont finalement déclarés non conformes (objectif d'efficacité à atteindre), donc si la stratégie de surveillance qui permet de douter de l'instrument est ou non efficace. L'amélioration de cette stratégie devient alors un double objectif rationnel pour l'entreprise qui cherche ainsi à prévenir les problèmes potentiels plutôt que les subir dans des conditions de coûts plus favorables.

DE LA MESURE À LA DÉCISION

Les mesures fondent les décisions. Puisque les mesures ne sont pas justes, les décisions ne sont pas certaines. La métrologie et la statistique vont, ensemble, offrir des solutions pour décider malgré les doutes...

- *Incertitude de mesure et déclaration de conformité*

L'évaluation des incertitudes de mesure fait l'objet d'une bibliographie importante tant le sujet se développe depuis une vingtaine d'années. Le G.U.M (Guide pour l'Expression des incertitudes de Mesure), connu également en France sous sa forme normative sous la référence NF EN ISO Guide 98-3 (2014) fait office de référence internationale depuis sa date de publication, en 1995. Ce document explique comment les imperfections des différents facteurs participant à la mesure se combinent au travers du « modèle de mesure ». Construit à partir des théories statistiques adaptées au contexte de la mesure, le G.U.M fait partie en principe des connaissances de base du métrologue. Il convient néanmoins de reconnaître que la profession a encore beaucoup de travail pour s'approprier réellement tous les concepts qui fondent son approche. Il n'est pas rare que les métrologues butent devant telle ou telle évaluation, tel ou tel facteur à prendre en compte ou encore sur tel ou tel niveau d'interaction entre des grandeurs d'entrée du modèle.

Une autre approche, plus expérimentale et plus ancienne, permet également d'évaluer les incertitudes de mesure. La série des normes ISO 5725 décrit l'organisation et le traitement des résultats de mesure obtenus dans le cadre de comparaisons inter-laboratoires. Dans ces normes, l'outil statistique est également très largement sollicité car il est au cœur, de façon incontournable, de l'évaluation des incertitudes de mesure et des risques associés. A n'en pas douter, la formation des métrologues doit intégrer de façon beaucoup plus marquée la dimension statistique. Des normes internationales sortent périodiquement sur le sujet et toutes vont dans le sens d'une plus grande maîtrise du monde probabiliste. De la simulation numérique (ISO/CEI Guide 98-3/S1:2008) à la déclaration de conformité (NF EN ISO/CEI Guide 98-4), toutes les normes actuelles s'appuient sur des concepts statistiques que le métrologue devra assimiler pour réaliser sa mission.

- *Risque Client/Risque Fournisseur*

Le management de ces risques, Client et Fournisseur, passe par la connaissance des incertitudes de mesure. Il est l'enjeu essentiel de la

métriologie. Cependant, ces concepts méritent d'être bien compris pour ne pas se fourvoyer. Dans le cadre des échanges commerciaux, ces concepts se comprennent aisément. Soit le rôti est plus gros que ce qu'indique la balance et le boucher (le Fournisseur) se voit lésé. A l'inverse, s'il est moins gros, le client est perdant. Il y a bien ici un véritable « *partage des risques* » entre client et fournisseur. Dans le monde industriel en revanche, les choses sont moins simples ... L'exemple des analyses en biologie médicale permet de comprendre qu'en réalité, et malgré le vocabulaire consacré, c'est toujours le client qui assume une erreur de décision. Le risque client correspond alors à la situation dans laquelle un patient réellement malade n'est pas « *mesuré* » malade du fait de l'incertitude de mesure. Dans ce cas, il ne bénéficie pas du traitement qui aurait amélioré sa situation et le vocable « *risque client* » se comprend aisément. A l'inverse, le risque « *dit* » fournisseur correspond à la situation où le patient n'est pas malade mais il est vu malade du fait de l'incertitude de mesure. Dans ce cas, il aura « *la chance* » de subir par exemple trois mois de chimiothérapie inutiles, puisqu'il n'a rien en réalité. Le lecteur comprendra que c'est bien le patient lui-même qui subit ce risque et en aucun cas le laboratoire (fournisseur) qui a fait la mesure.



Cet exemple peut se transférer dans le cas des productions industrielles. Le risque fournisseur (rebuter ou retoucher des entités pourtant conformes) pèse finalement sur les coûts et délais de production. Il est donc subi, au final, par le client, dans la mesure où le coût des produits livrés intègre forcément le coût de ces erreurs de décisions ...

L'évaluation de ces risques n'est pas chose aisée. Elle fait appel, là encore, à des propriétés statistiques qu'il n'est pas possible de développer ici. Il convient néanmoins de garder deux choses essentielles à l'esprit :

o **Le risque client n'existe que s'il existe des entités non conformes.**

*En effet, la mesure qui contrôle ne fait pas la réalité de l'entité, elle n'en donne qu'une représentation. Si le procédé de fabrication ne produit pas d'entités non conformes, le client n'en recevra pas, quelle que soit la qualité de la mesure. En revanche, le risque fournisseur, quant à lui, sera d'autant plus important que la qualité de la mesure sera faible. Ce constat nous invite à réfléchir sur le fait que l'évaluation des risques ne repose pas uniquement sur l'incertitude de mesure, mais également sur la production elle-même. Les risques sont le fruit de la combinaison des probabilités du procédé de fabrication **et** du processus de mesure.*

o **Les risques client et fournisseur n'évoluent pas symétriquement.**

Le lecteur intéressé par l'explication de ces évolutions comparées pourra trouver des informations dans la norme NF ISO CEI Guide 98-4 ou encore dans le livre « Smart Metrology : de la métrologie des instruments à la

métrologie des décisions ». La figure 1 permet de visualiser les évolutions en fonction d'un paramètre appelé « Facteur de garde »⁴. La figure 2 représente le passage entre la « Tolérance » et la « Zone d'acceptation », c'est-à-dire la zone dans laquelle il faudra trouver la mesure pour déclarer l'entité mesurée conforme à la tolérance.

La figure 1 montre que le risque client diminue de façon très faible alors que le risque fournisseur, lui, peut atteindre des sommets. Et comme le risque fournisseur est, dans les faits, un risque client particulier, il devient important de considérer ce phénomène pour établir la tolérance exigée.

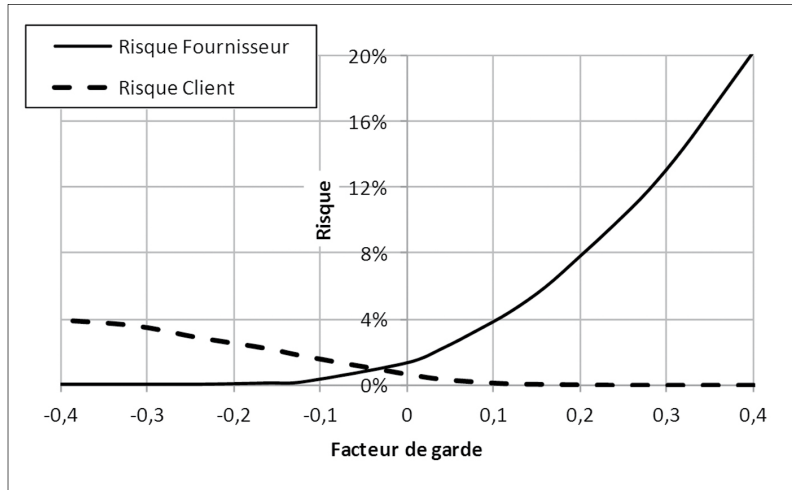


Figure 1 : Evolution comparée des risques client et fournisseur.

• La « sur-exigence » :
solution des 30 glorieuses

A ce stade, le lecteur peut légitimement s'interroger sur l'importance de ces concepts puisque dans la vie industrielle, on ne s'en préoccupe pas vraiment, le sujet étant soi-disant traité par les étalonnages/vérifications périodiques. Or les stratégies actuelles de gestion d'un parc d'instruments ne répondent en aucun cas à cette question mais tout se passe, sur le terrain, comme si elles le faisaient.

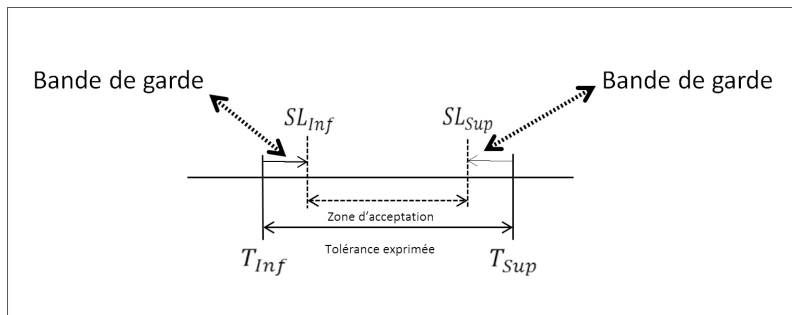


Figure 2 : Concept des bandes de garde.

La norme ISO 14253-1 (Spécification géométrique des produits [GPS] - Vérification par la mesure des pièces et des équipements de mesure - Partie 1 : règles de décision pour prouver la conformité ou la non-conformité à la spécification) nous permet de comprendre la raison pour laquelle les incertitudes de mesure sont « oubliées » dans le quotidien industriel. En théorie, et suivant cette norme, il est nécessaire d'évaluer les incertitudes de mesure puis de les

soustraire de la tolérance exigée pour définir une nouvelle tolérance, dite « zone de conformité ». C'est dans cette zone que devra être trouvé le résultat de la mesure pour pouvoir déclarer, sans (trop de) risque, la conformité de l'entité (figure 3, page suivante).

Or les pratiques industrielles sont très souvent beaucoup plus simples (figure 4, page suivante).

L'incertitude de mesure n'étant pas considérée dans la pratique courante sans problème majeur apparent, cela signifie qu'en réalité les tolérances exprimées sur les spécifications ont d'ores et déjà les propriétés de la « zone de conformité ».

⁴ Le facteur de garde se définit comme le ratio : $1 - (SL_{sup} - SL_{inf}) / (T_{sup} - T_{inf})$ où $[SL_{inf}, SL_{sup}]$ est l'intervalle d'acceptation et $[T_{inf}, T_{sup}]$ l'intervalle de tolérance ou de spécification. Le graphique est construit pour un procédé de loi normale de moyenne 0 et d'écart-type 1, une incertitude-type de mesure de 0,25 et une tolérance de $T_{sup} - T_{inf} = 4$.

Ce constat n'est pas surprenant. Les tolérances actuelles ont été déterminées à partir d'un modèle où les entités fonctionnellement conformes sont obtenues par itérations de mesures de mise au point. Les bornes de spécification ont donc été revues pour s'adapter à des valeurs mesurées considérées comme juge de paix. Le coût indirect, niché dans le risque fournisseur de cette stratégie, mérite d'être analysé : combien coûte au final le fait d'oublier les incertitudes de mesure ?

L'opportunité est parfois définie comme la face positive du risque. Cette définition convient parfaitement à la métrologie. Vue sous cet angle, l'incertitude de mesure se présente comme une fabuleuse opportunité pour tendre vers une expression plus rationnelle du besoin fonctionnel. En effet, en prenant en compte cette incertitude de mesure, il s'avère possible d'élargir les spécifications actuelles « *au juste nécessaire* » et d'envisager ainsi, non seulement des coûts de production plus faibles mais également de moindres consommations, tant en énergie qu'en matières premières pour un futur « *durable* ». Aussi, ceux qui sauront remettre en cause cette croyance en des mesures justes ont un véritable potentiel d'amélioration de la productivité industrielle.

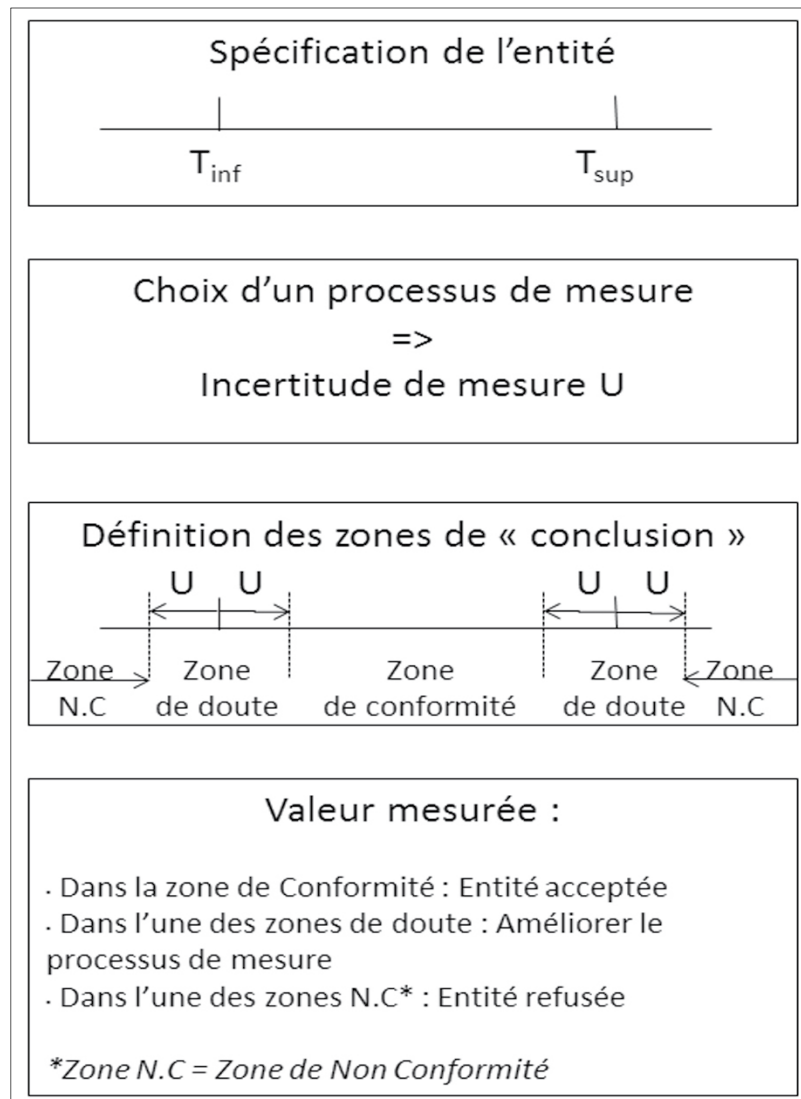


Figure 3 : Prise en compte des incertitudes de mesure suivant norme ISO 14253-1.

LA MÉTROLOGIE AU XXI^E SIÈCLE

Le futur est comme l'horizon, il fuit devant nous à chaque instant. Une seule chose est cependant certaine : le futur passe par notre présent... Celui que nous envisageons actuellement pour nos entreprises repose sur des évolutions qui remettent profondément en cause les pratiques héritées des siècles passés :

- la fabrication additive, forme contraire à l'usinage qui soustrait ;
- la cobotique qui fait cohabiter le robot avec les opérateurs alors qu'il est encore, de nos jours, enfermé dans une cage ;
- le big data et son caractère « *fact driven* » qui s'oppose à une approche historique orientée « *opinion driven* » ;

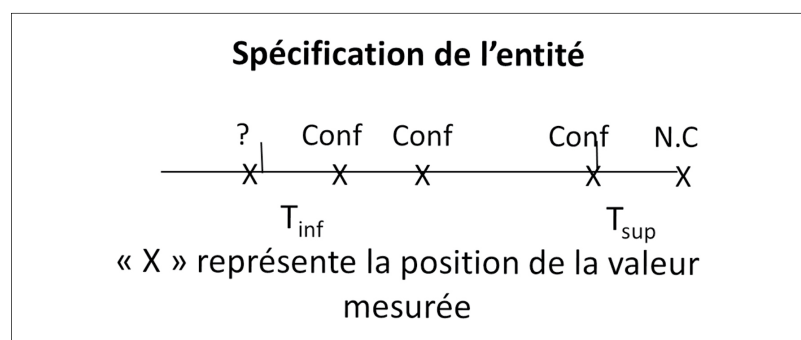


Figure 4 : Pratique constatée.

- l'entreprise libérée ou responsabilisante contre l'ancien modèle hiérarchique.

La métrologie peut, elle aussi, faire sa révolution en sortant d'un modèle qui n'est finalement pas le sien. Le modèle de la métrologie légale l'a entraînée vers une métrologie « *des instruments* » qui, comme nous venons de le voir, a des conséquences négatives incontestables. Pour se protéger des erreurs de



mesure, les industriels ont, souvent sans s'en rendre compte, demandé plus qu'il ne le faut pour se prémunir des aléas. Avec les outils et les connaissances actuelles, il est temps que la métrologie fasse elle aussi son aggiornamento.

• *Du « pire des cas » à l'efficience : l'espoir du big data*

Depuis des décennies, nos exigences relèvent plus de nos croyances que de la réalité du besoin. Il est par exemple d'usage, en mécanique, de prévoir la fabrication de tous les bouchons plus grands que les stylos pouvant leur être associés. Cette approche, dite « *au pire des cas* », est sous-tendue par l'idée que n'importe quel bouchon doit fonctionner avec n'importe quel stylo. Or, tous les appariements ne seront pas réalisés ! De même, la « *chaîne de côtes* » qui permet d'allouer les tolérances de différents éléments participant à un ensemble repose sur cette vision « *du pire des cas* ». On prévoit en effet que si tous les éléments sont au maximum, ou au minimum, de leur tolérance respective, ils fonctionneront ensemble. On ne tient pas compte des probabilités qui font qu'il est très peu probable qu'un cas aussi défavorable se réalise.

Le Big Data s'intéresse aux couples « *Bouchon/Stylo* » réellement formés, ou aux ensembles d'éléments réellement constitués dans la réalité et notamment à ceux qui fonctionnent ! Ici, le hasard des assemblages est considéré et le besoin fonctionnel peut alors s'exprimer au plus juste.

• *L'inférence bayésienne : dans les pas de la norme NF ISO/CEI Guide 98-4*

La très récente norme NF ISO/CEI Guide 98-4 marque un tournant dans les pratiques de la métrologie. Les spécialistes la décrivent comme étant d'obédience « *bayésienne* » et cette vision bouleverse profondément les choses. Si tout métrologue s'est déjà trouvé dans la situation de se dire « *Tiens... cette mesure est étrange* », il n'a pas encore vraiment exploité ce que cela signifie. En trouvant une mesure étrange, il reconnaît qu'il s'attendait à autre chose, qu'il avait donc un **a priori**. Et c'est bien normal ! Les industriels

mesurent rarement des paramètres totalement inconnus. La mesure est souvent faite pour confirmer ou infirmer, voire réviser ce fameux *a priori*. En le connaissant, il permet d'améliorer significativement la fiabilité d'un résultat de mesure et cette fiabilité est essentielle désormais, comme nous l'avons vu ci-dessus dans le cadre des approches Big Data.

Cette théorie de l'inférence bayésienne permet de déterminer la valeur vraie la plus « fiable » sachant la valeur mesurée, l'incertitude de mesure et l'a priori sur la valeur vraie. En connaissant l'a priori et l'incertitude de mesure, il est en effet possible de calculer la probabilité de chaque couple valeur vraie/erreur de mesure qui construit la valeur mesurée et de réviser la valeur mesurée pour obtenir la loi dite *a posteriori* (figure 5).

Même si ces calculs peuvent paraître compliqués, voire ésotériques, la difficulté n'est pas là. A l'époque où chacun dispose de moyens de calcul particulièrement performants, il s'agit seulement d'accepter de changer de croyance pour progresser.

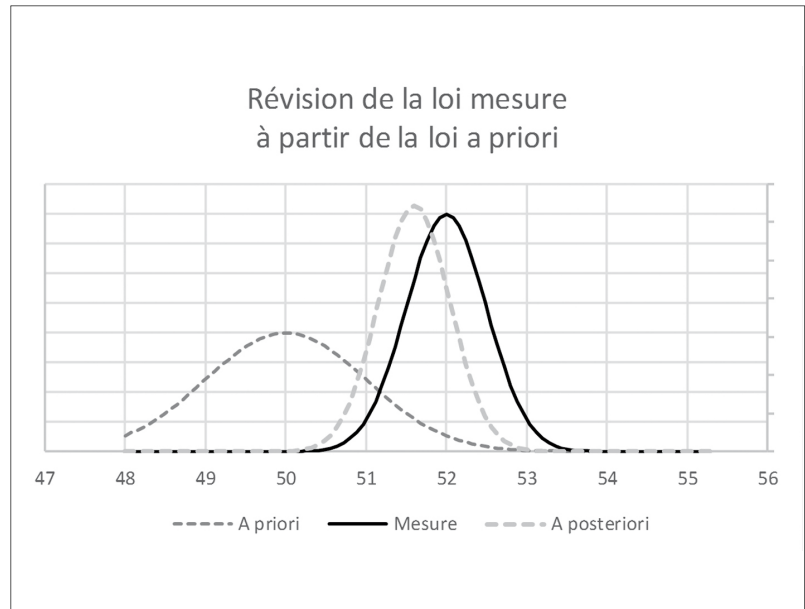


Figure 5 : Révision de la loi Mesure, la loi a posteriori

• *Métrologie et instruments connectés : la technologie au service de la fiabilité et de l'efficacité*

Les technologies « du Futur » ouvrent un nouveau champ des possibles, en métrologie comme en tout autre domaine. De nos jours encore, un instrument de mesure est en quelque sorte inerte. Il ne sait pas où il est, ce qu'il fait et pourquoi il le fait. Avec les Objets Connectés, les choses peuvent évoluer.

Dans le cas simple d'une balance, chacun doit se souvenir qu'elle ne mesure pas une masse, mais un poids, c'est-à-dire le produit de la masse par le coefficient local de la pesanteur. Or, ce coefficient est fonction de la latitude et de l'altitude de l'endroit où la mesure est faite. La balance ne le sachant pas utilise un coefficient moyen pour traduire le poids qu'elle subit en masse. Avec un simple positionnement GPS par exemple, la balance pourrait en savoir plus sur les conditions de la mesure, donc améliorer la qualité du résultat.

Par ailleurs, et comme l'a écrit Archimède, « *Tout corps plongé dans un fluide reçoit de la part de celui-ci une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé* ». Un homme qui se pèse est dans l'air, donc il déplace ledit air avec son corps. Le poids de cet air déplacé vient en diminution du poids vu par la balance. Or, la masse volumique de l'air dépend de plusieurs facteurs (température, hygrométrie, ...) et la balance ne sait rien de tout cela ... En revanche, avec une sonde météo, elle pourrait faire la correction, sous réserve de connaître également ce qu'elle mesure, la masse volumique du plomb n'étant pas égale à celle de l'eau ou du corps humain. De même, si elle connaissait l'a priori, elle pourrait réviser la mesure et donner la valeur vraie la plus probable plutôt que la valeur mesurée ... Cet exemple, très éloigné des problématiques industrielles, illustre néanmoins la difficulté générale des mesures car tous les processus de mesure présentent des difficultés liées à des réalités physiques.

Il est indispensable que tous les industriels concernés par des résultats de mesure se saisissent de la métrologie, ils ont beaucoup à y gagner ...

Il n'est pas possible ici de dresser tous les cas de figure où la mesure pourrait être améliorée grâce à la technologie des objets connectés. En fait, tous les processus de mesure, quel que soit le domaine considéré, sont concernés par l'incertitude de mesure, donc par son amélioration potentielle. Tout comme les véhicules automobiles sont désormais munis d'un GPS intégré, on peut imaginer que les instruments de mesure du Futur auront eux aussi une fonctionnalité connectée pour améliorer leurs performances ...

CONCLUSION

Ce Livre Blanc de manufacturing.fr a pour objectif de faire découvrir le domaine de la métrologie. Puisqu'il faut savoir d'où l'on vient pour savoir où l'on va, nous avons donné des éléments d'histoire de ce métier, histoire qui explique ses pratiques, mais aussi ses limites. La métrologie industrielle n'est pas uniquement le métier consistant à vérifier des dates sur des étiquettes.

Il est difficile de prévoir ce qu'il adviendra dans le futur. Ce que nous savons, en revanche, c'est qu'il passe par le présent. Nos technologies actuelles, matures ou très avancées, lui ouvrent de nombreuses perspectives. Et cet avenir, ce n'est pas aux seuls métrologues de le construire. Il est indispensable que tous les industriels concernés par des résultats de mesure se saisissent de ce sujet, ils ont beaucoup à y gagner ...

3 QUESTIONS À...



DOMINIQUE FOUCARD, MICHELIN :

« LA MÉTROLOGIE, UNE FONDATION DE PLUS EN PLUS ESSENTIELLE DU SYSTÈME DE PRODUCTION »

Que représente la métrologie chez Michelin ?

La métrologie est un élément clé de notre système de production. Bien au-delà des besoins de conformité des appareillages aux normes, réglementations ou requis des différents audits systèmes et clients constructeurs, il s'agit d'abord de donner à chacun dans l'entreprise, quelle que soit sa position, les moyens de prendre les décisions justes, à partir de mesures fiables. Plus nous allons vers la responsabilisation et la prise de décision au plus près du terrain, plus il est nécessaire de mettre à disposition de chacun des moyens de mesure sur lesquels il peut compter sans hésiter.

Quels sont les écueils à éviter ?

Nous devons apprendre à bien tenir la métrologie en équilibre entre deux tentations : d'une part celle de la perfection. Nous risquons de tomber là dans des abîmes de complexité, à la recherche d'un Graal inaccessible, en tous cas peu utile. D'autre part, la tentation de l'à-peu-près. Nous pouvons parfois, en mesurant un phénomène, ne mesurer que l'incertitude de notre appareil de mesure. Cela nous arrive encore, sans que nous nous rendions compte du coût de cet à-peu-près : rétrécissement des tolérances pour tenir compte de l'incertitude du moyen de mesure, complexité des moyens de contrôle du processus, production déclarée mauvaise à tort voire, pire, risque de livraison à tort d'un produit bon. Il y a là un terrain permanent d'amélioration de notre efficacité et de notre garantie.



Quels avantages procure la digitalisation des données ?

La digitalisation en cours permet de regrouper de plus en plus d'informations, toujours issues de mesures, d'une façon ou d'une autre, et cela renforce encore la nécessité de la justesse de ces informations, car l'utilisateur de l'information peut être de plus en plus éloigné de son producteur, et donc de moins en moins capable de recul par rapport à la donnée.

3 QUESTIONS À...



**FRANÇOIS DAUBENFELD,
MAÎTRE EXPERT MÉTROLOGIE CHEZ PSA GROUPE :**

**« LA FIABILITÉ ET LA QUALITÉ DES MESURES
DEVIENNENT FONDAMENTALES »**

Quelles nouvelles stratégies développez-vous pour satisfaire vos clients ?

Il faut faire preuve de créativité afin de trouver la meilleure solution en mode collaboratif. La lean métrologie doit s'ouvrir sur l'extérieur et utiliser toutes les informations disponibles. Il n'est pas rare de trouver, dans une usine, des postes de contrôle décorrelés les uns des autres. La mutualisation de ces données de mesure pourrait permettre une bien meilleure efficacité en matière de conformité du produit, en optimisant le dispositif de surveillance mis en place et en assurant un retour d'expérience de qualité pour améliorer les spécifications du produit et obtenir des tolérances au juste nécessaire.



Quels outils avez-vous déployés dans ce cadre ?

Une autre clé est l'optimisation de notre besoin, notamment dans le cadre de la gestion des équipements de mesure, de contrôle et d'essai. Les outils d'optimisation comme Océan chez PSA, les comparaisons inter-instrument (C2I) ou les surveillances moyens/produit permettent de penser processus. Il faut exploiter toutes les données métrologiques afin d'anticiper les risques et de ne faire des raccordements qu'au juste nécessaire. L'outil de gestion de parc informatique doit pour cela répondre directement à la stratégie de l'entreprise.

Comment percevez-vous le big data ?

Le big data s'impose de manière inévitable avec de nouveaux métiers : data analyst, data scientist ou data architect. Mais la matière première de ces nouveaux métiers reste en très grande majorité des résultats de mesure. De fait, la fiabilité et la qualité de ces mesures deviennent fondamentales. La métrologie est au cœur de cette exigence de fiabilité, bien au-delà des vérifications périodiques des équipements de mesure.

3 QUESTIONS À...



**TAHAR MELLITI, DIRECTEUR GÉNÉRAL
DE L'ALLIANCE POUR L'INDUSTRIE DU FUTUR :**

**« SANS MESURE, IL EST IMPENSABLE D'AMENER
UNE TECHNOLOGIE À MATURITÉ »**

Quelles sont les missions de l'Alliance pour l'Industrie du Futur ?

L'Alliance Industrie du Futur (AIF), association loi 1901, rassemble et met en mouvement les compétences et les énergies d'organisations professionnelles, d'acteurs scientifiques et académiques, d'entreprises et de collectivités territoriales pour assurer le déploiement du plan Industrie du Futur. Elle organise et coordonne, au niveau national, les initiatives, projets et travaux tendant à la modernisation et à la transformation de l'industrie en France.

Qu'est-ce qui amène l'AIF sur le sujet de la mesure ?

Nous abordons cette notion, certes indirectement, à travers l'ensemble des technologies nouvelles que nous essayons de promouvoir. Il est impensable d'imaginer amener à maturité une technologie (cobotique, fabrication additive, réalité augmentée) et son déploiement, si cette notion de mesure n'est pas abordée. Le lien entre la réalité physique et son appropriation par des actions humaines, industrielles en particulier, relève de la mesure. Par ailleurs, le CETIM, l'un des fondateurs de l'Alliance, est très sensible aux métiers de la métrologie, au cœur de ses activités.

Quelle est l'importance de la mesure dans le domaine émergent du big data ?

Le numérique est l'une des technologies phares de l'entreprise du futur. Les données cachent des informations que n'avions pas vraiment les capacités d'explorer jusqu'à récemment. De nos jours, grâce à la capacité des ordinateurs, ces informations deviennent source de valeur. Dans ce nouveau cadre, les données représentent un véritable « *or numérique* », un gisement à partir duquel de véritables progrès peuvent être espérés, notamment dans le cadre du dimensionnement, donc du coût.



QUELQUES DÉFINITIONS IMPORTANTES

Les termes utilisés en métrologie sont définis dans un guide publié sous l'égide du B.I.P.M. (Bureau international de la métrologie) appelé V.I.M (Vocabulaire international de la métrologie). La dernière édition de ce guide date de 2008, quelques corrections mineures ayant été apportées en 2012.

Étalonnage, m (2.39)

Opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les **valeurs** et les **incertitudes de mesure** associées qui sont fournies par des **étalons** et les **indications** correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un **résultat de mesure** à partir d'une indication.

NOTE 1 : Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un **diagramme d'étalonnage**, d'une **courbe d'étalonnage** ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.

NOTE 2 : Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec **l'ajustage d'un système de mesure**, souvent appelé improprement « *auto-étalonnage* », ni avec la vérification.

NOTE 3 : La seule première étape dans la définition est souvent perçue comme étant l'étalonnage.

Vérification, f (2.44)

Fourniture de preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées.

EXEMPLE 1 : Confirmation qu'un **matériau de référence** donné est bien, comme déclaré, homogène pour la valeur et la procédure de mesure concernées jusqu'à des prises de mesure de masse 10 mg.

EXEMPLE 2 : Confirmation que des propriétés relatives aux performances ou des exigences légales sont satisfaites par un **système de mesure**.

EXEMPLE 3 : Confirmation qu'une **incertitude cible** peut être atteinte.

NOTE 1 : S'il y a lieu, il convient de prendre en compte **l'incertitude de mesure**.

NOTE 2 : L'entité peut être, par exemple, un processus, une procédure de mesure, un matériau, un composé ou un système de mesure.

NOTE 3 : Les exigences spécifiées peuvent être, par exemple, les spécifications d'un fabricant.

NOTE 4 : La vérification en métrologie légale, comme définie dans le VIML (Vocabulaire International de la Métrologie Légale), et plus généralement en évaluation de la conformité, comporte l'examen et le marquage et/ou la délivrance d'un certificat de vérification pour un système de mesure.

NOTE 5 : Il convient de ne pas confondre la vérification avec **l'étalonnage**. Toute vérification n'est pas une **validation**.

NOTE 6 : En chimie, la vérification de l'identité d'une entité, ou celle d'une activité, nécessite une description de la structure ou des propriétés de cette entité ou activité.

Traçabilité métrologique, f (2.41)

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

NOTE 1 : La référence mentionnée dans la définition peut être une définition d'une **unité de mesure** sous la forme de sa réalisation pratique, une **procédure de mesure**, qui indique l'unité de mesure dans la cas d'une grandeur autre qu'une **grandeur ordinale**, ou un **étalon**.

NOTE 2 : La traçabilité métrologique nécessite l'existence d'une **hiérarchie d'étalonnage**.

NOTE 3 : La spécification de la référence doit comprendre la date où cette référence a été utilisée dans l'établissement d'une hiérarchie d'étalonnage, ainsi que d'autres informations métrologiques pertinentes concernant la référence, telles que la date où a été effectué le premier étalonnage de la hiérarchie.

NOTE 4 : Pour des **mesurages** comportant plus d'une seule **grandeur d'entrée dans le modèle de mesure**, chaque **valeur** d'entrée devrait être elle-même métrologiquement traçable et la hiérarchie d'étalonnage peut prendre la forme d'une structure ramifiée ou d'un réseau. Il convient que l'effort consacré à établir la traçabilité métrologique de chaque valeur d'entrée soit proportionné à sa contribution relative au résultat de mesure.

NOTE 5 : La traçabilité métrologique d'un résultat de mesure n'assure pas l'adéquation de l'incertitude de mesure à un but donné ou l'absence d'erreurs humaines.

NOTE 6 : Une comparaison entre deux étalons peut être considérée comme un étalonnage si elle sert à vérifier et, si nécessaire, à corriger la valeur et l'incertitude attribuées à l'un des étalons.

NOTE 7 : L'ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*) considère que les éléments nécessaires pour confirmer la traçabilité métrologique sont une **chaîne de traçabilité métrologique** ininterrompue à un **étalon international** ou un **étalon national**, une incertitude de mesure documentée, une procédure de mesure documentée, une compétence technique reconnue, la traçabilité métrologique au SI et des intervalles entre étalonnages (voir ILAC P-10 : 2002).

NOTE 8 : Le terme abrégé « *traçabilité* » est quelquefois employé pour désigner la traçabilité métrologique, ainsi que d'autres concepts tels que la traçabilité d'un spécimen, d'un document, d'un instrument ou d'un matériau, où intervient l'historique (la trace) d'une entité. Il est donc préférable d'utiliser le terme complet « *traçabilité métrologique* » s'il y a risque de confusion.

BIBLIOGRAPHIE

- **NF EN ISO/CEI 17025** : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais
- **FD X 07-014** : Métrologie - Optimisation des intervalles de confirmation métrologique des équipements de mesure
- **NF EN ISO/CEI Guide 98-4** : Incertitude de mesure - Partie 4 : rôle de l'incertitude de mesure dans l'évaluation de la conformité
- Livre « **Smart Metrology, de la métrologie des instruments à la métrologie des décisions** », de Jean-Michel Pou et Laurent Leblond, AFNOR 2016



 **MANUFACTURING.FR**

12, place Georges Pompidou 93167 Noisy-le-Grand cedex

Tél. : 01 45 92 96 96 – www.manufacturing.fr