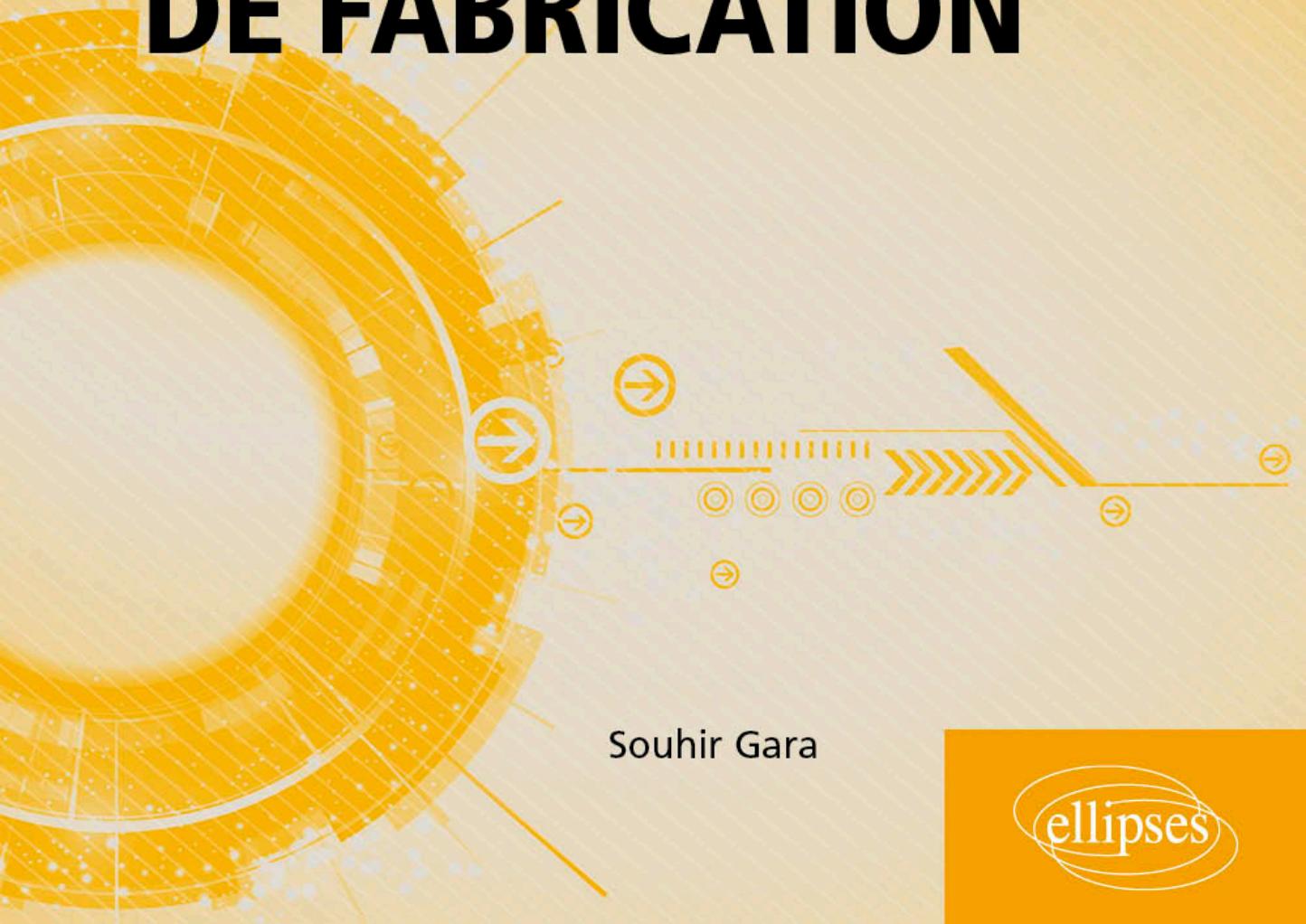


MÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE ET TRIDIMENSIONNELLE DE FABRICATION



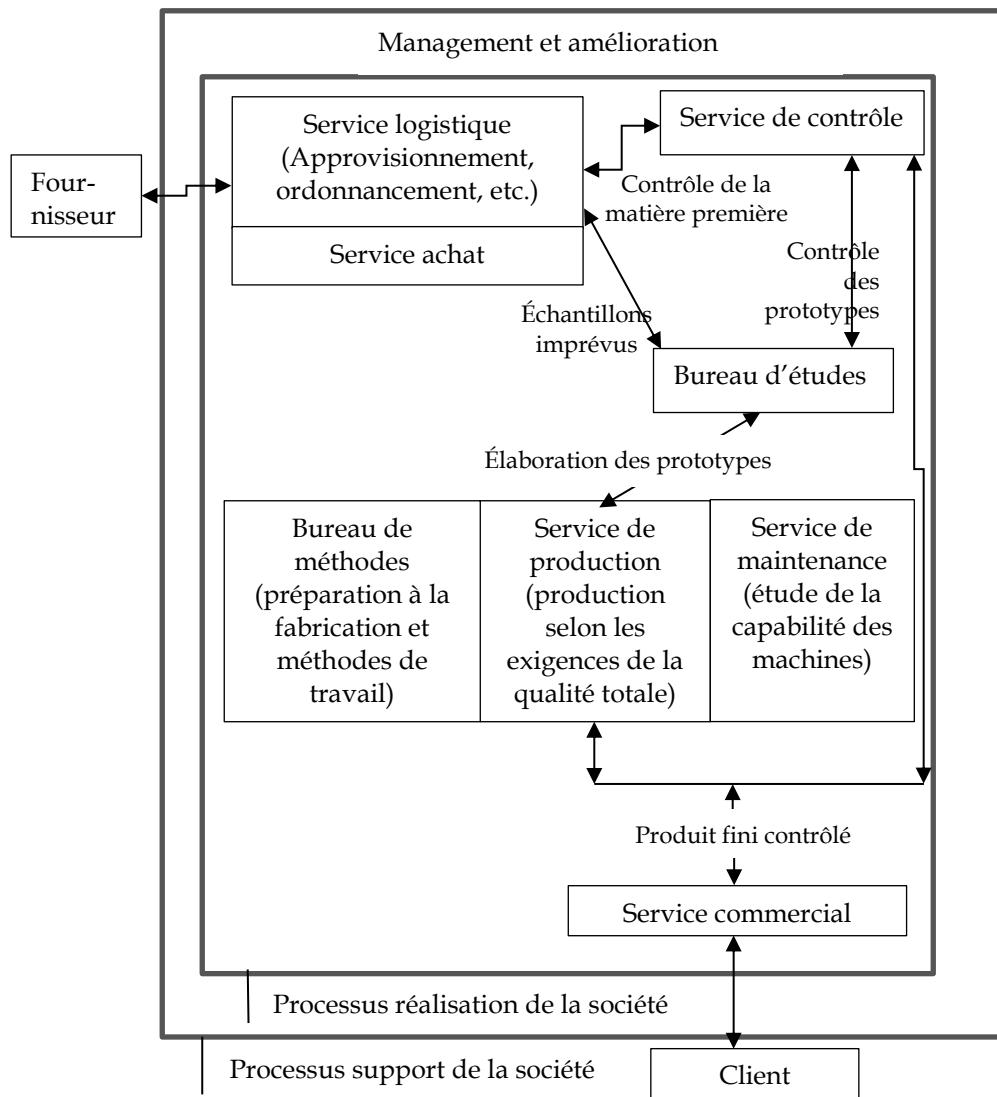
Souhir Gara



Chapitre 1- Métrologie et qualité

I. Architecture d'une entreprise

Toute société de production est la combinaison d'un processus support ayant pour objectif la gestion des informations qui se déroulent entre les services et d'un processus réalisation qui comporte les services en liaison directe avec le produit fini. Les unités qui composent les deux processus doivent collaborer afin de satisfaire les exigences de la qualité totale.



En cas d'une société de fabrication de pièces mécaniques, le service de contrôle, nommé encore service de contrôle qualité, comporte un laboratoire de métrologie et l'agent qui le dirige est désigné par « métrologue ». La tâche essentielle de l'agent de contrôle est la vérification de la matière première (contrôle des caractéristiques mécaniques et

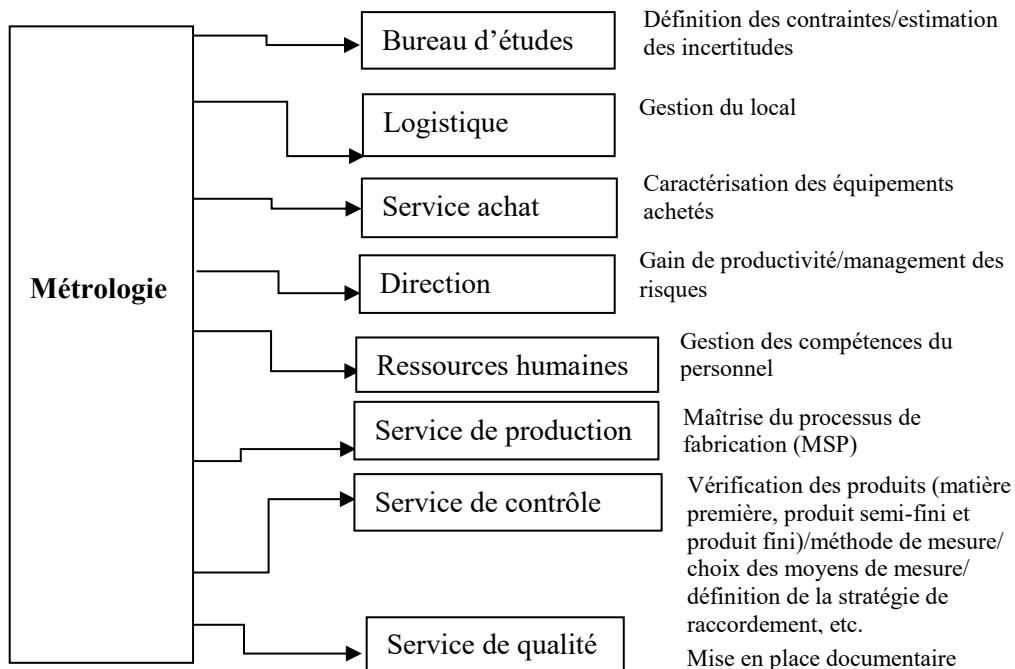
mesure ou contrôle dimensionnel) et la mesure de pièces au cours du processus de production (après chaque poste de travail) qui se résume en une vérification (contrôle ou mesure) des contraintes dimensionnelles et de certaines contraintes géométriques (perpendicularité au moyen d'une équerre métallique, etc.).

La fonction du métrologue est :

- l'étude des spécifications à vérifier (contraintes dimensionnelles linéaires, contraintes dimensionnelles angulaires, contraintes géométriques et contraintes de rugosités) depuis le dessin de définition,
- le choix du vérificateur approprié (instrument de contrôle ou instrument de mesure),
- le choix du montage de contrôle ou de mesure à utiliser en fonction des contraintes à examiner,
- la définition du processus de vérification adéquat en fonction de la complexité de la forme de la pièce, la cadence de production et le matériel disponible dans le laboratoire (élaboration de la gamme de contrôle, de la gamme de mesure et/ou du contrat de phase de contrôle),
- la mesure de la (des) pièce(s) finie(s),
- la rédaction d'un rapport détaillé qui comporte les résultats des mesures en vue de prendre les décisions nécessaires à temps sur l'avancement de la production dans l'atelier en cas d'une dispersion,
- la vérification de l'état des instruments de contrôle et des instruments de mesure (réglage et étalonnage par rapport à des équipements certifiés liés à des étalons reconnus à une échelle nationale ou internationale),
- le raccordement des instruments et des équipements aux étalons nationaux et internationaux, la précision de la périodicité d'étalonnage de chacun d'eux et le suivi de la procédure correspondante,
- la réception de nouveaux matériels du laboratoire (instruments, appareillages, bancs d'essais ou montages de contrôle) et la décision de leur acceptation ou refus,
- l'inventaire et le rangement systématique des instruments de mesure et des instruments de contrôle ainsi que la rédaction des dossiers adéquats (fiches de vies, certificats d'étalonnage, etc.),
- la vérification de l'état des pièces étalons et la rédaction des rapports convenables pour garder la traçabilité,
- l'assistance à l'installation des machines-outils dans l'atelier et la vérification des caractéristiques qui lui sont liées (parallélisme, planéité, etc., de certains composants par rapport à d'autres ou par rapport au sol),
- la vérification de l'état des machines-outils périodiquement et la rédaction des rapports correspondants pour garder la traçabilité,
- le contrôle statistique des performances de chaque machine-outil figurant dans l'atelier de fabrication,
- la formation du personnel sur les données de base de la métrologie et la sensibilisation des responsables en cas de besoin,
- la vérification des conditions climatiques du laboratoire (température, pression, taux d'humidité, etc.).

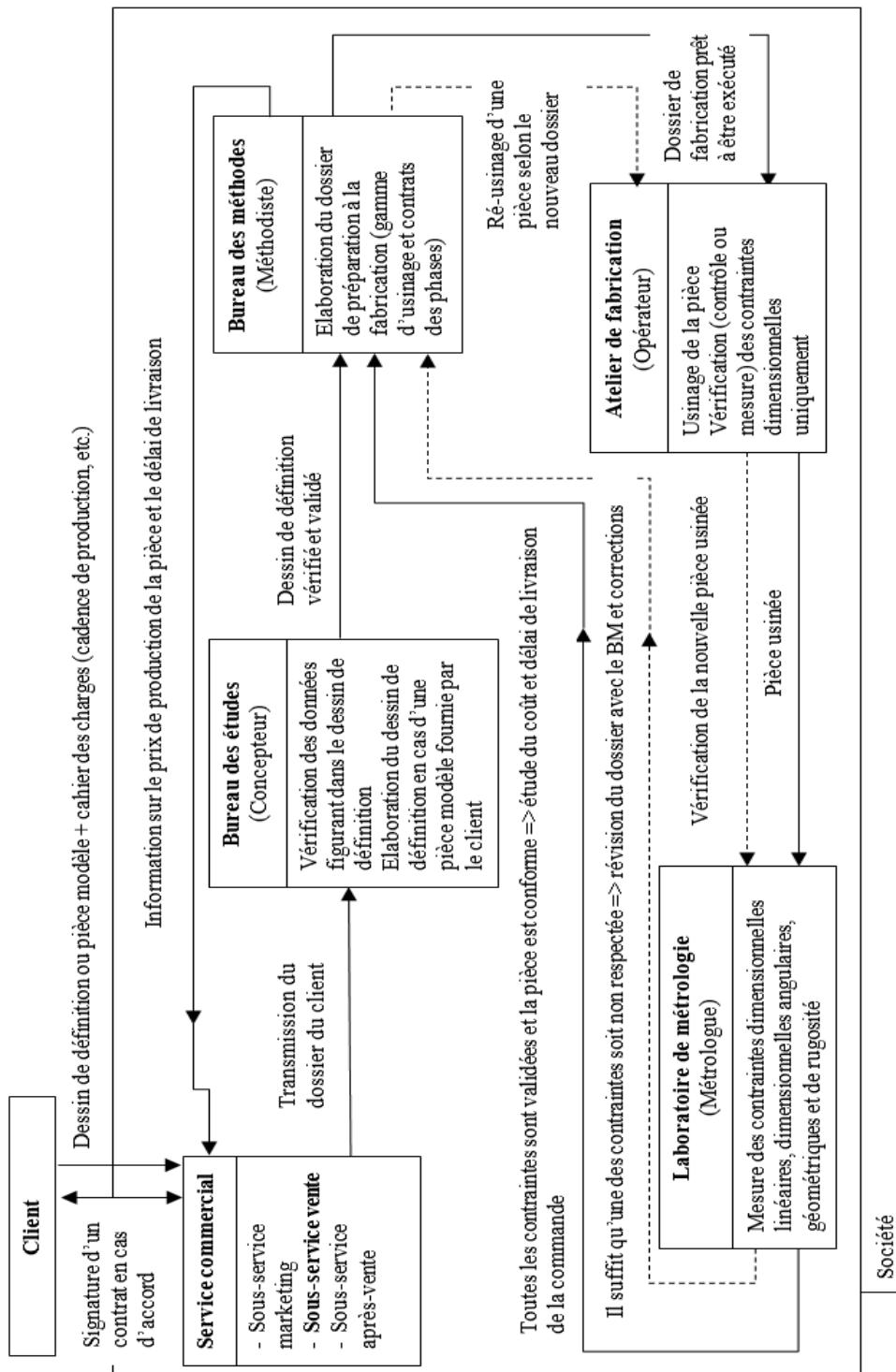
Toutefois, il peut se produire un chevauchement entre les deux fonctionnalités où le métrologue exécute les tâches d'un agent de contrôle dans l'atelier et vice-versa. En fait, la fonction métrologie, matérialisée par le laboratoire de métrologie et chapeautée par le métrologue est une partie intégrante du système de management de la qualité. Elle vise la maîtrise du processus de fabrication, la vérification et l'évaluation de la conformité des produits aux spécifications techniques et réglementaires, le contrôle de la qualité des produits, la vérification de l'exactitude des résultats analytiques, l'assurance de la loyauté des échanges commerciaux et la protection des intérêts du consommateur, la sûreté de la protection de la santé et de la sécurité des employés ainsi que l'affirmation de la préservation et la protection de l'environnement.

Son emplacement dans le système de management de la qualité peut être schématisé dans le graphe suivant et la chaîne qui résume le parcours d'une pièce mécanique du dessin de définition à sa livraison au client est définie dans le graphe d'après :



Les mesures prises dans l'atelier ou dans le laboratoire aident à prendre des décisions liées au produit fabriqué et/ou au processus de travail. La précision de ces activités nécessite des agents qualifiés et un local qui satisfait certaines caractéristiques, entre autres un :

- local situé dans un endroit calme loin des machines qui génèrent un bruit gênant et des vibrations excessives (presse, machine-outil, scie mécanique, etc.),
- éclairage à la lumière du jour avec orientation au nord afin d'éviter l'ensoleillement excessif,
- sol recouvert d'une matière souple pour éviter tout choc pouvant générer un endommagement d'un instrument ou d'une pièce,



- local comportant un climatiseur chaud et froid pour régler la température à $20^{\pm 0,5} \text{ }^{\circ}\text{C}$ toute l'année. En fait, le CETIM (CEntre Technique des Industries Mécaniques) annonce qu'une variation de $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ d'une pièce en acier ayant un coefficient de dilatation de $11.10^{-6} \text{ K}^{-1}$ génère une dilatation de $5,5\mu\text{m}$ sur une longueur de 100mm et une variation de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ engendre une contraction de $55\mu\text{m}$ sur une longueur de 1000mm,
- local ne contenant pas de la poussière : il se trouve parfois qu'il est mis en légère surpression pour éviter l'entrée des déchets ou de la poussière,
- local comportant un mesureur de champ magnétique (il faut éviter d'installer les sources électromagnétiques auprès de l'endroit de mesure, sinon il faut procéder à une démagnétisation au moyen d'un démagnétiseur),
- local d'hygrométrie HR% (à taux d'humidité de) $55\% \pm 5\%$ qui correspond à une pression de vapeur d'eau de 1333Pa et une pression atmosphérique de 1bar.

II. Types de métrologies

Les mesures permettent à l'utilisateur d'accepter ou de refuser un produit en comparant les résultats obtenus à un ensemble de spécifications. La métrologie constitue l'opération permettant de définir la valeur d'une grandeur avec une précision plus ou moins grande, selon les moyens de mesures utilisés et les conditions de travail. En fonction du secteur d'intérêt, elle est classifiée en trois types.

1. Métrologie légale

Elle concerne les exigences réglementaires (activités organisant les relations entre l'état et les citoyens) entre autres les mesures du volume du carburant d'une station de service, les mesures des rejets de polluants des véhicules, la mesure de la masse du bagage à monter dans un avion, la mesure de l'énergie électrique consommée, etc.

2. Métrologie fondamentale

Nommée encore métrologie de laboratoire ou métrologie scientifique, elle s'intéresse à réaliser des recherches pour créer de nouvelles références métrologiques et vise le développement et le maintien des étalons de références reconnues. A un niveau international, ce type de métrologie a pour mission de définir les unités de mesure, de réaliser les étalons, de les comparer entre les régions, de les conserver et de les diffuser dans les pays membres. C'est en fait le rôle du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) et des Laboratoires Nationaux de Métrologie (LNM).

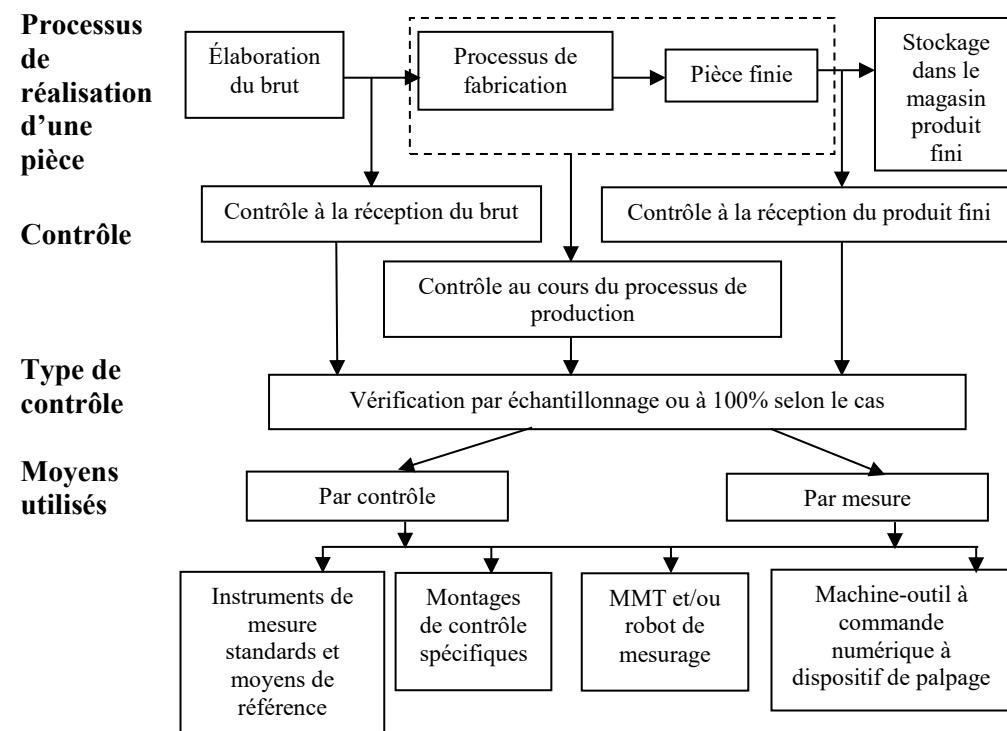
3. Métrologie industrielle

Elle joue le rôle d'intermédiaire entre les laboratoires nationaux de métrologie et les utilisateurs des instruments de mesure (industriels, formateurs, artisans, etc.). Elle garantit le raccordement aux étalons nationaux favorisant à l'utilisateur d'avoir des étalons de référence et de les faire comparer à des références nationales par l'intermédiaire des laboratoires d'étalonnage accrédités. Elle procure les mesures d'un processus de fabrication dans le cadre d'un contrôle qualité et englobe deux sous-types de métrologies, nommés métrologie dimensionnelle et tridimensionnelle qui peuvent être exécutés dans une société dans des conditions climatiques spécifiques (température ambiante de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, pression de 1bar, absence de poussière, etc.).

○ *Métrie dimensionnelle*, nommée encore métrologie traditionnelle, métrologie conventionnelle ou métrologie au marbre, elle consiste en un mesurage unidirectionnel ou un contrôle par des instruments standards (tel que le pied à coulisse, le micromètre extérieur, le comparateur, le tampon fileté entre n'entre pas, etc.) et/ou par des montages de contrôle utilisant des éléments de référence (tel qu'un marbre, une barre sinus, des cales étalon, etc.). Les manipulations sont longues et délicates vu qu'elles nécessitent des montages de contrôle spécifiques, une habileté et un savoir-faire de la part du métrologue. Les incertitudes de mesurage sont fonction des dispersions de tout l'appareillage de mesure mis en jeu.

○ *Métrie tridimensionnelle*, nommée encore métrologie par coordonnées, elle se produit sur machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), bras de mesure poly-articulé, laser de poursuite, appareils de photogrammétrie ou autres. Elle garantit le mesurage par palpation dans trois directions sans démontage de la pièce et se trouve utilisée dans le cas d'une mesure serielle, une forme complexe ou une précision importante de la pièce sujet d'étude.

La métrologie de fabrication mécanique, que ce soit dimensionnelle ou tridimensionnelle, s'intéresse à la mesure des contraintes dimensionnelles linéaires et angulaires, des contraintes géométriques et des contraintes de rugosités qui figurent dans un dessin de définition. Les moyens utilisés sont comme indiqué dans la chaîne suivante :



Chaîne des moyens utilisés en fonction du processus réalisation

III. Normes et consignes à respecter

Afin d'exécuter son travail correctement dans le laboratoire de métrologie, un métrologue doit maîtriser les unités de mesures internationales, la chaîne d'étalonnage normalisée des vérificateurs (instruments de mesure et/ou de contrôle) et des étalons (cales, cylindres, piges, etc.), les documents figurant dans le dossier de chaque commande et le concept GPS, abréviation de Spécification Géométrique des Produits (*Geometrical Product Specification*), permettant de savoir le processus de mesure à adopter selon la norme ISO et connaître l'impact des grandeurs d'influence sur le processus de mesure ou de contrôle.

1. Système international d'unités

Depuis l'antiquité, les mesures concernaient :

- *les longueurs* et les unités adaptées étaient le pouce, la paume, le coudée, le pied, le pas, etc. ;
- *les surfaces* et les unités utilisées étaient la toise carrée, le pied carré, le pouce carré, la verge, l'acre, etc. ;
- *les capacités* et les unités accordées étaient le litron, le boisseau « creux de la main », etc. ;
- *les poids* dont les principales unités étaient l'once, le quarteron, le grain (53 mg, soit 0,053 g), le quintal (100 livres, soit 48,95 kg), le millier (1 000 livres, soit 489,5 kg), le tonneau de mer (2 000 livres, soit 979 kg), etc.

Étant donné que ces unités varient d'un individu à un autre (pouce, pied, creux de la main, etc.) et génèrent des problèmes de conversation et d'échanges commerciaux des biens entre les gens et les régions, après la révolution française, plus précisément le 9 mai 1790, l'Assemblée nationale a décrété la suppression des unités anciennes et leur unification. Elle a créé un système métrique, en France, qui est devenu ensuite le système international vu qu'il a été adopté par de nombreuses nations, suite à la signature de la convention du mètre le 20 mai 1875.

Le Système International d'unités (abrégé en SI) est désormais, le système le plus utilisé dans le monde. Il s'agit d'un système décimal d'unités (le passage d'une unité à ses multiples ou sous-multiples se produit à l'aide des puissances de 10) sauf pour la mesure du temps. C'est la conférence générale des poids et mesures, rassemblant des délégués des états membres de la convention du mètre, qui décide de son évolution tous les quatre ans à Paris. Il propose sept symboles indépendants au point de vue dimensionnel.

a. Unité du temps

Symbolisée « s » et nommée seconde, elle « est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du cézium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de cézium 133 non perturbé égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1} ». Avant le 20 mai 2019, la seconde était « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de cézium 133 » à la température du zéro absolu. La seconde était à l'origine définie à partir de la durée du jour terrestre, divisée en 24 heures de 60 minutes, chacune d'entre elles durant 60 secondes (soit 86 400 secondes pour une journée).

b. Unité de longueur

Symbolisée « m » et nommée mètre, il s'agit de la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde. Historiquement, la première définition officielle et pratique du mètre (1791) se référait à la circonférence de la Terre et valait $1/20\,000\,000$ d'un méridien géographique. Auparavant, le mètre, en tant que proposition d'unité décimale de mesure universelle, était défini comme étant la longueur d'un pendule qui oscille avec une demi-période d'une seconde.

Conventionnellement, dans le domaine de la mécanique, on utilise le millimètre symbolisé « mm ».

c. Unité de masse

Symbolisée « kg » et nommée kilogramme, c'est la masse du prototype international du kilogramme. A l'origine, il était nommé grave et défini comme étant la masse d'un décimètre cube (dm^3) d'eau équivalent à un litre. Le gramme était considéré comme la masse d'un centimètre cube d'eau à la température de 4°C qui correspond à un maximum de masse volumique.

d. Unité du courant électrique

Symbolisée « A » et nommée ampère, c'est l'intensité d'un courant constant qui, maintenue dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance d'un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur.

e. Unité de température thermodynamique

Symbolisée « K » et nommée kelvin, il s'agit d'une unité de température thermodynamique. Elle est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Il est aussi utilisé la température en degré Celsius (de symbole « t ») calculée à partir de l'expression $t = T - T_0$

Où $T_0 = 273,15\text{K}$ par définition et la correspondance entre degré Celsius et kelvin se produit par l'intermédiaire de l'expression : $K = {}^\circ\text{C} + 273,15$

f. Unité de quantité de matière

Symbolisée « mol » et nommée mole, c'est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans $0,012$ kilogramme de carbone 12. Une mole contient $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ entités élémentaires. Cette valeur est appelée nombre d'Avogadro. Lorsque la mole est utilisée, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.

g. Unité d'intensité lumineuse

Symbolisée « Cd » et nommée candela, c'est l'intensité lumineuse d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ Hertz dans une direction donnée et dont l'intensité énergétique dans cette direction vaut $1/683$ watt par stéradian.

h. Grandeur supplémentaires

A ces sept unités principales, s'ajoutent deux grandeurs supplémentaires purement géométriques.