

AVANT PROPOS

La fin du 20^{ème} siècle a été marquée par des évolutions importantes de la mesure. Celle-ci s'est adaptée aux besoins d'une industrie plus exigeante en matière de qualité et d'efficacité. Les moyens de mesure se sont diversifiés et leurs performances se sont accrues. D'abord fixes et à contact, les machines 3D industrielles se sont ouvertes vers le sans contact et la mobilité. Ces deux nouveaux paramètres constituent un tournant dans les modes d'utilisation de ces outils. Travaillant sans cesse sur leur miniaturisation, améliorant systématiquement leur ergonomie et offrant des « erreurs de mesure » de plus en plus réduites, les fabricants proposent aujourd'hui des catalogues très garnis, dans lesquels il est facile de se perdre. Ce foisonnement de technologies est une chance et ouvre un large horizon de possibilités mais peut compliquer la tâche de l'investisseur.

La traçabilité des résultats issus de ces moyens constitue un véritable enjeu et nécessite une formation permanente des professionnels. Aujourd'hui, le raccordement des nouvelles technologies relève souvent de la seule compétence du fabricant. La complexité des systèmes est telle qu'il est souvent le seul à proposer un étalonnage, une vérification et si nécessaire, une maintenance du produit vendu. Les travaux normatifs en cours apporteront une réponse au moins en termes de vérification.

Le contexte est fixé. Comment établir un cahier des charges adapté aux besoins ? Vers quel outil se tourner pour le respecter tout en conjuguant performance, qualité, prix et perspective d'évolution du besoin dans le futur ?

Il existe un document « FD E11-157 Décembre 1997 » (« Machines à mesurer tridimensionnelles - Guide pour l'élaboration d'un cahier des charges ») édité par l'AFNOR ; bien qu'intéressant, il se limite aux machines à mesurer tridimensionnelles.

La portée du guide que nous vous proposons ici est plus large. Son objectif est ambitieux, balayer l'ensemble (ou presque) des technologies 3D et les mettre en perspective les unes par rapport aux autres pour vous aider à choisir le moyen adapté à vos besoins.

Le Collège Français de Métrologie vous invite à découvrir ce guide, fruit d'un groupe de travail composé d'universitaires, de laboratoires, de fabricants de matériel de mesure et d'exploitants/utilisateurs. Cet outil d'aide à la décision, premier de la série des guides « Technologies de Mesure 3D » sera un précieux atout pour vous permettre de vous poser les bonnes questions et de faire les bons choix.

Bonne lecture.

Ont participé à la rédaction de ce guide

Fahd BOUDAOUINE – IMQ / TVT (co-animateur)

Marine ESCUILLIE – CFM (co-animatrice)

Jean-Jacques BALAGUER – HEXAGON Manufacturing Intelligence

Pierre CARREAUD – SITES

Thierry COOREVITS – ENSAM

Mohamed DAMAK – GEOMNIA

Louis GONZALEZ – RENISHAW

Jean-Louis GRZESIAK – RENISHAW

François HENNEBELLE – UNIVERSITE DE BOURGOGNE

Jean-Marc PRAS – EUROTEK

Stéphane RAYNAUD – INSA LYON Labo MIP2

Stéphane ROUSSEL – CARL ZEISS

Ont participé à la relecture de ce guide

Anne-Lise ROINAC – NIKON

Jean-Marc LE BRIS – RENAULT

SOMMAIRE

1. LA MESURE 3D EN QUELQUES MOTS	1
1.1. LA MESURE 3D D'HIER À AUJOURD'HUI	1
1.2. LE MARCHÉ DE LA 3D	3
1.3. LA VALEUR AJOUTÉE DE LA MÉTROLOGIE	3
2. COMMENT FAIRE SON CHOIX ?	5
2.1. CONDITIONS D'EXPLOITATION D'UN MOYEN DE MESURE	5
2.1.1. Les exigences environnementales (machine fixe ou portable).....	6
2.1.2. Cas des mesures longue distance (> 10m) ou en extérieur	6
2.1.3. La température.....	7
2.1.4. L'humidité.....	7
2.1.5. Vibrations	7
2.1.6. Poussières	8
2.1.7. Pression	8
2.2. NOTION DE BOUCLE MÉTROLOGIQUE	8
2.3. CRITÈRES DE CHOIX	9
2.3.1. Géométrie de la pièce	9
2.3.2. Caractéristiques à mesurer	13
2.3.3. Performance	13
2.3.4. Budget	15
2.4. MATRICE D'AIDE AU CHOIX.....	15
3. TECHNOLOGIES EXISTANTES	17
3.1. TYPOLOGIE DE MACHINES	17
3.1.1. Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT)	17
3.1.2. Machines de mesures portables.....	19
3.1.2.1. Bras de mesure.....	19
3.1.2.2. Système de poursuite.....	20
3.1.2.3. Systèmes de numérisation libre	22
3.1.3. Machines de mesures à base robots.....	22
3.1.3.1. Concepts métrologiques d'une cellule robotisée.....	23
3.1.3.2. Modes de mesure dans une cellule robotisée	24
3.1.4. Autres systèmes.....	28
3.1.4.1. Tomographie RX	28
3.1.4.2. Laser Radar	29
3.1.4.3. Porteurs originaux.....	29
3.2. TECHNOLOGIES DE CAPTEURS	30

3.2.1.	Contact.....	30
3.2.1.1.	Déclenchement	30
3.2.1.2.	Mesurant	35
3.2.2.	Sans contact	40
3.2.2.1.	Télémétrie	41
3.2.2.2.	Interférométrie Laser	43
3.2.2.3.	Photogrammétrie/stéréovision	43
3.2.2.4.	Triangulation	46
3.2.2.5.	Variation Focale	48
3.2.2.6.	Capteur confocal	48
3.2.3.	Autres capteurs	48
4.	RÉCEPTION, VÉRIFICATION ET SUIVI PÉRIODIQUE.....	51
5.	CHOIX DU LOGICIEL DE MESURE	57
5.1.	FLEXIBILITÉ DU LOGICIEL	57
5.1.1.	Compatibilité avec le matériel.....	57
5.1.2.	Import/export des données numériques issues d'une CAO	58
5.1.3.	Import/export de données denses : nuages de points denses et maillages	58
5.2.	BUT DU LOGICIEL.....	59
5.2.1.	Complexité et ergonomie.....	59
5.2.2.	Tolérancement et inspection	59
5.2.3.	Inspection avec nuages de points denses	60
5.2.4.	Rétroconception	61
5.3.	INTÉGRATION AU PARC INFORMATIQUE	62
6.	TERMINOLOGIE - VIM3	63

1. LA MESURE 3D EN QUELQUES MOTS

1.1. LA MESURE 3D D'HIER À AUJOURD'HUI

La mesure d'hier, la mesure d'aujourd'hui : qu'est ce qui les sépare ? Tant d'années d'évolutions rapides et d'innovations technologiques au service de la mesure tridimensionnelle. Les outils ont évolué et de nouvelles technologies sont arrivées mais l'objectif reste le même... le quel ?

Retour sur les évolutions et moments clés de l'histoire de la mesure 3D.

La question principale n'est pas seulement de savoir mesurer mais aussi : que doit-on mesurer, à quel moment et dans quelles conditions.

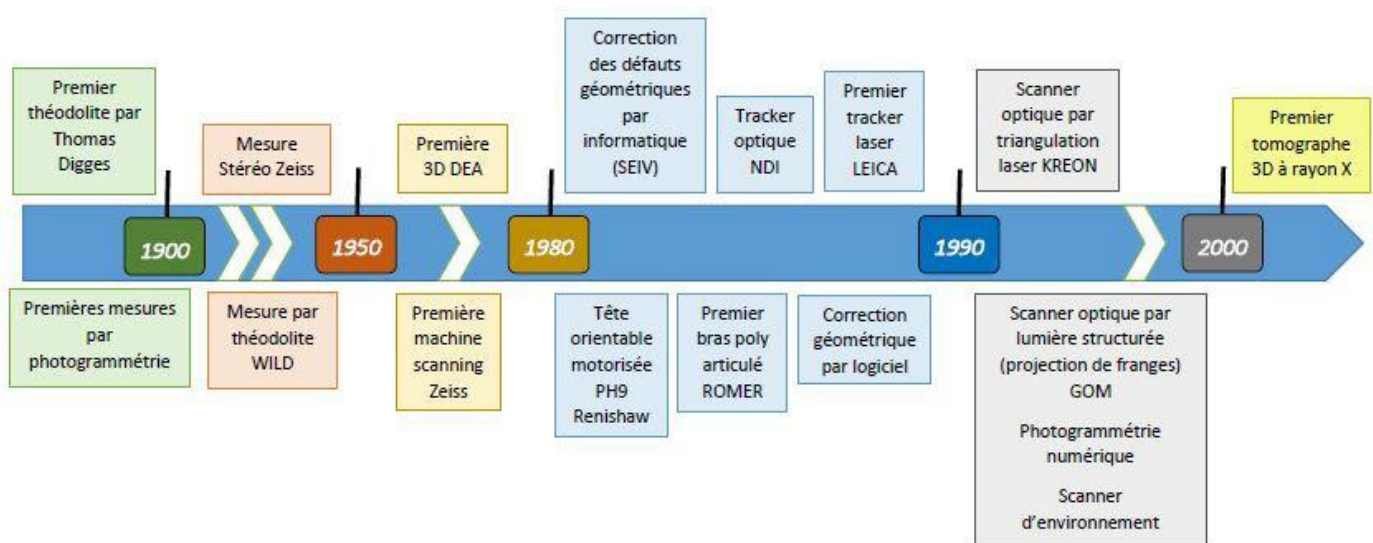


Figure 1 – Frise de chronologique sur les moments clés de l'histoire de la mesure 3D

Les moyens de contrôle se développent pour s'adapter aux demandes et contraintes des utilisateurs. Il faut étudier le processus de mesure en analysant les coûts ce qui permet d'optimiser le cycle de fabrication et garantir la qualité géométrique du produit.

Les non-conformités doivent être décelées le plus tôt possible. Il a donc fallu développer des moyens 3D pouvant fonctionner en atelier et permettre plus de réactivité dans le contrôle des processus de fabrication.

La vérification de caractéristiques complexes telles que la simple distance entre deux alésages conduit à mobiliser des moyens coûteux tels que des montages de vérification accompagnés d'étalons spécifiques, la permanence de la qualité dimensionnelle de ces outils étant difficile à garantir.

D'autre part, ces moyens ne sont pas adaptables à des évolutions dans la conception des pièces qui accompagnent toujours l'évolution des performances des systèmes fabriqués. Le contrôle se pratiquait avec un échantillonnage relativement lâche et la réponse en cas de doute sur une caractéristique particulière pourrait demander un délai d'une demi-journée, alors que le temps de cycle de fabrication est d'une durée inférieure à la minute. Cette situation était profondément insatisfaisante.

Certaines machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) correspondent à l'union d'un système de repérage facilement vérifiable et d'un logiciel qui supprime le « mur des montages de contrôle » et

dématérialise les référentiels réalisés par simple construction géométrique. Ces machines, ont permis à la fois d'automatiser la vérification de pièces réalisées en séries modestes, comme dans la construction aéronautique, et d'enrichir le contrôle réalisé sur pièces de grande série, comme dans l'industrie automobile, permettant une détection des défauts en temps presque réel.

La MMT est apparue dans la configuration que nous connaissons actuellement au début des années 1970. L'évolution de l'informatique a permis de démocratiser les MMT avec des logiciels de plus en plus performants et ergonomiques. Les corrections par logiciel des défauts de géométrie des machines sont proposées dans les années 1980 et les évaluations des incertitudes par la méthode de Monte Carlo dans les années 1990. Les machines à mesurer tridimensionnelles ont alors permis de mesurer avec une résolution du dixième de micromètre avec des incertitudes de l'ordre du micromètre.

Les MMT sont donc progressivement devenues la référence en termes de mesures dimensionnelles. Les améliorations actuelles concernent essentiellement les capteurs. Il faut pouvoir mesurer plus et plus vite. Les têtes mesurantes, par exemple, intègrent à ce jour de la mesure par scanning, le stylet reste en contact avec la surface à contrôler et prend les mesures à la volée. Malheureusement, les MMT fixes ne permettent de mesurer que dans leur volume alors que les machines portables peuvent se déplacer autour de la pièce.

Au niveau des dispositifs portables, Romain GRANGER (ROMER) est à l'origine du concept du bras de mesure polyarticulé. Le premier bras à être commercialisé date de 1986. L'objectif est d'avoir la possibilité d'amener le moyen de mesure vers la pièce. Il est alors possible de contrôler en atelier ou sur site à un coût relativement réduit. A ces porteurs, on peut aujourd'hui associer différents types de capteurs (statique, dynamique, nappe laser ou dispositifs spécifiques). Les dispositifs à contact restent les plus convaincants au niveau de la qualité de la mesure.

Les besoins de l'industrie ont évolué. Les mesures de pièces de grands volumes demandent plus d'exigences. C'est pour cette raison que le tracker laser (dispositif de mesure longue portée composé d'une source laser intégrée à une station permettant de mesurer les coordonnées d'un réflecteur) a conquis une place importante dans l'industrie.

Au début, les mesures étaient peu ergonomiques, car il ne fallait en aucun cas interrompre la mesure (toute coupure du faisceau laser faisant perdre les références). L'utilisation de ces dispositifs n'était donc pas très conviviale mais les nouveaux trackers laser sont devenus plus portables, flexibles dans leur utilisation, leur associant d'autres dispositifs (mesures de points cachés, scans lasers, localisation automatique des réflecteurs...).

Certes les mesures par contact sont assez bien maîtrisées mais elles ne répondent pas forcément à tous les besoins. En effet, si l'on souhaite mesurer des surfaces avec un grand nombre de points et très rapidement, les dispositifs à contact sont généralement limités. Il faut donc se tourner vers de la mesure sans contact.

Ce type de mesure se démocratise pour plusieurs raisons. Il est devenu possible, grâce à l'amélioration des outils de calculs, de travailler sur un grand nombre de points (plusieurs millions) ce qui permet d'avoir une représentation complète de la pièce et une meilleure appréhension des résultats.

1.2. LE MARCHÉ DE LA 3D

Aussi vaste qu'il soit, le marché de la mesure 3D ne cesse de s'étendre. Appuyé par la concurrence et poussé par les avancées technologiques, les outils 3D se répandent chaque jour dans les mains de nouveaux opérateurs. Mais à quels besoins répondent-ils ? Quels sont les secteurs porteurs de la mesure ? Quel est l'avenir de la mesure 3D ?

La métrologie dimensionnelle se retrouve de manière forte sur l'ensemble des secteurs de l'industrie comme le transport, l'aéronautique, le BTP, l'électronique, l'énergie...

Après de nombreuses années de faibles évolutions (jusque dans les années 90), les technologies de mesure ont profité d'une forte poussée liée aux développements des systèmes informatiques et à l'arrivée de nouveaux moyens.

L'importante diminution des temps de traitement des données de mesure par exemple, a permis l'avènement en zone de production, de nombreux produits de numérisation. Cette mutation, a permis une augmentation du niveau de qualité, en fournissant un nombre important d'informations permettant non seulement un affinement des analyses, mais également un meilleur suivi des procédés. De plus, des nouveaux produits s'appuient désormais sur des moyens tels que les robots ou les systèmes embarqués basés sur l'optique : laser, lumière structurée, caméra, etc.

Cette tendance s'accélère. La demande des industriels, tous secteurs d'activités confondus, s'oriente de plus en plus vers des contrôles en ligne de fabrication. De nouveaux outils de mesure 3D se développent pour répondre à ce besoin.

Productivité et qualité, deux termes souvent vus comme antagonistes, ouvrent paradoxalement de nouvelles perspectives d'évolution au secteur de la métrologie tridimensionnelle.

Des secteurs tels que l'aéronautique, la construction navale, les ouvrages d'art, et autres producteurs d'éléments de grandes dimensions sont tous demandeurs de moyens de mesure et de numérisation adaptés aux larges volumes. En cela, certains produits (laser de poursuite, photogrammétrie, scanner laser...) ont conquis une part importante du marché pour leur capacité à mesurer des volumes importants tout en garantissant exactitude de mesure, automatisation, portabilité et fiabilité.

On retrouve aussi de nouveaux systèmes de tomographie RX industrielle pour le contrôle métrologique interne des pièces unitaires ou assemblées. Après avoir séduit le secteur de l'électronique, cette technologie non destructive, arrive sur le marché des pièces mécaniques.

Des moyens de métrologie en ligne de fabrication et sur pièces de larges volumes sont développés à la demande, voire sous la 'pression' des utilisateurs. Ces solutions intègrent des évolutions et des concepts nouveaux, à la périphérie de la métrologie conventionnelle. Ils promettent de nouveaux développements qui nous réserveront certainement des surprises.

1.3. LA VALEUR AJOUTÉE DE LA MÉTROLOGIE

La métrologie est trop souvent considérée comme une terre aride sur laquelle pousse péniblement des étiquettes, des procédures, des déclarations de conformité...

Certes, il faut bien assurer la traçabilité documentaire des matériels, leurs vérifications périodiques ou non (vaste sujet), évaluer les incertitudes et les mettre en rapport avec les tolérances et les résultats de mesure pour prononcer la conformité du produit. Toutes ces tâches sont nécessaires mais ne résument pas la métrologie, loin s'en faut.