

REPULIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

FACULTE DES SCIENCES D'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE

LA METROLOGIE ET SES TECHNIQUES
APPLIQUEES EN INDUSTRIE

Projet de Fin d'Etude en vue de l'obtention
Du diplôme des Etudes Universitaires Appliquées

Option : Propulsion

ZERROUK Farid
ZIANI Rabah

Promoteur : ALOUCHE Rachid USDB Chargé de cours

ANNEE UNIVERSITAIRE 2005/2006

REMERCIEMENT

Avant de présenter ce modeste travail, nous tenons à remercier sincèrement le bon Dieu de nous avoir aidé énormément et toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce mémoire plus particulièrement :

Notre promoteur M^RALOUCHE R, pour avoir suivi et dirigé notre travail, nous avons apprécié sa patience, son encouragement et ses conseils.

Pour cela, nous l'assurons de notre sincère gratitude, et notre profond respect.

Nous avons également une dette de reconnaissance envers tous les enseignants et enseignantes qui nous ont suivi durant nos études, le président et membre de jury.

Rabah et Farid.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en témoignage de ma reconnaissance, de mon amour, et de mon profond respect :

A ma très chère Mère qui a sacrifié sa noble existence pour bâtir la mienne, et qui est pour moi le symbole du courage et du sacrifice.

A mon très cher Père qui, par ses précieux conseils et soutient a su me guider vers la voie de la réussite.

A mes adorables frangins et frangines que j'aime beaucoup et a qui je pense tout le temps.

A mes adorables frères et sœurs que j'aime beaucoup et a qui je pense tout le temps.

A toute ma famille.

A tous mes amis (es) sans exception.

Rabah

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en témoignage de ma reconnaissance, de mon amour, et de mon profond respect :

A ma très chère Mère qui a sacrifié sa noble existence pour bâtir la mienne, et qui est pour moi le symbole du courage et du sacrifice.

A mon très cher Père qui, par ses précieux conseils et soutient a su me guider vers la voie de la réussite.

A mon adorable frère Riad et mes sœurs que j'aime beaucoup et a qui je pense tout le temps.

A ma très chère Amina.

A toute ma famille.

A tous mes amis (es) sans exception.

Farid

Résumé:

Notre projet parle de la métrologie en générale et de ses techniques d'application en industrie, comme la métrologie optique qui est très importante dans notre ère, et le contrôle des surfaces pour lui donner un erre mécanique. Et aussi les incertitudes et erreurs de mesure car il n'y a pas d'exactitude dans la mesure.

Le but de notre mémoire et de mettre en évidence l'importance de la métrologie dans l'industrie en générale et en aéronautique en particulier.

ملخص:

إن عملنا يتطرق إلى علم القياس عامة و مختلف التقنيات التطبيقية في الصناعة، مثل علم القياس البصري الذي هو مهم جدا في وقتنا هذا. و أيضا مراقبة أسطح القطع الميكانيكية لإعطائه صيغة ميكانيكية ثم الإرتيابات و الأخطاء في القياس حيث لا توجد الدقة في القياسات.

الهدف من مذكرتنا هو تسليط الضوء على أهمية علم القياس في الصناعة عامة و علم الطيران خاصة.

Abstract:

Our project speaks about metrology in general and its techniques of application in industry, as the optical metrology which is very significant in our era, and controls it surfaces to give him one wanders mechanical. And also uncertainties and errors of measurement because there is no exactitude in measurement.

The goal of our memory and to highlight the importance of metrology in industry in general and aeronautics in particular.



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....01

I- GENERALITES SUR LA METROLOGIE DIMENSIONNELLE ET (CAO):

I-1- Introduction.....	03
I-2- Unités et bases standard.....	03
I-2-1- Unités dérivées et mesures (subjectives).....	04
I-2-2- Procède de mesure.....	04
I-2-3- Mesure dans l'industrie et les laboratoires.....	05
I-3- Structure d'un système de mesure.....	06
I-3-1- Éclairage.....	06
I-3-2- Objectif.....	08
I-4- Domaines d'applications la mesure et l'instrumentation.....	08
I-4-1- Surveillance de processus.....	09
I-4-2 Commande de processus	09
I-4-3 Analyse expérimentale.....	10
I-5- Facteurs de qualité des mesures textes normatifs.....	12
I-6- Langage normatif et modèles.....	12
I-6-1- Tolérance ment normalise.....	13
I-6-2- Principe de l'indépendance.....	13
I-6-3 - Exigence entre dimensions et géométrie.....	14
I-6-3-1- Tolérances dimensionnelles.....	14
I-6-3-2- Tolérance géométriques.....	15
I-7- Limites métrologiques.....	16

II- LA MÉTROLOGIE OPTIQUE :

II-1- Introduction.....	16
II-2- Caractéristiques de la métrologie optique.....	17
II-3- Mesures par fibres optiques.....	18
II-3-1- Système de mesure.....	18
II-3-2- Mesures mécaniques.....	19

II-3-3 - Méthodes de mesure.....	20
II-3-4- Autres méthodes.....	20
II-5 - Les Capteurs.....	21
II-5-1- Introduction.....	21
II-5 -2 - Le rôle.....	22
II-5 -3 - L'information captée : (analogique, digitale ou graphique).....	22
II-5-4 Les capteurs dimensionnels.....	23
II-5-4-1 - De la mesure de longueur à la détection de position.....	23
II-5-4-2 - Les jauges de déformations.....	24
II-5-5- Les capteurs à fibres optiques.....	25
II-5-5-1- Fonctions.....	25
II-5-5-2- Capteur intrinsèque et capteur extrinsèque.....	26
II-5-5-3- Constitution d'un capteur à fibres optiques.....	26
II-5-5-4- Avantages des capteurs à fibres optiques.....	28
II-5-6- Différents types de capteurs à fibres optiques.....	30
II-5-6-1- Architecture des capteurs.....	30
II-5-6-2- Conception d'un système de mesure à fibres optiques.....	31
II-5-7- Jauge optique.....	32
II-5-8- Montage optique.....	32
II-5-9- Optique géométrique du microscope.....	33
II-5-9-1- Schéma du microscope simplifié.....	33
II-6- Les mesures optiques.....	34
II-6-1- Les interférences.....	34
II-6-2- Les lasers.....	35
II-6-3- L'interféromètre à laser.....	36
II-6-4- Le télémètre à laser.....	37
II-6-5- Spectrométrie par laser.....	37
II-6-6- L'avantage de spectrométrie à laser.....	39
II-7- Le laser n'est pas toujours indispensable.....	40

III- MÉTROLOGIE DES SURFACES DES PIÈCES :

III-1- Contrôle des surfaces des pièces	41
III-2- États de surface et écarts de forme.....	42

III-3- Fréquences spatiales à deux dimensions.....	45
III-4- Écarts de forme.....	46
III-4-1- Contrôles de circularité.....	47
III-4-2- Contrôles de rectitude.....	49
III-4-2-1- Méthode optique par lunette autocollimatrice.....	50
III-4-2-2- Mesure de rectitude par interférométrie	51
III-4-2-3- Planéité et rectitude.....	52
III-4-3- Contrôles de surfaces optiques par la lumière.....	54
III-4-4- Contrôle de surfaces optiques par interférométrie.....	55
III-4-5- Contrôle des plans optiques par l'interféromètre de Fizeau.....	56
III-5- Mesures de rectitude et de planéité indépendantes de la référence.....	59
III-6- Rugosité.....	61
III-6-1- Paramètres de rugosité.....	62
III-6-2 - Étalonnage des palpeurs pour la mesure des rugosités.....	62
III-7- Conclusion.....	63

IV-LES ERREURS ET INCERTITUDES DES MESURE:

IV-1- Introduction.....	65
IV-2- Erreur de précision.....	66
IV-2-1- Définition.....	66
IV-2-2 - Erreur de lecture.....	66
IV-2-3 - Erreur de mobilité.....	67
IV-2-4 - Erreur sur le zéro.....	67
IV-2-5 - Erreur de justesse.....	68
IV-2-6 - Erreur sur la grandeur de référence.....	69
IV-3 - Erreurs de forme et de position.....	70
IV-3-1- Éléments géométriques constitutifs d'une pièce.....	71
IV-3-1-1- Point :	71
IV-3-1-2 - Ligne :	72
IV-3-1-3 – Droite.....	72
IV-3-1-4 - Cercle :	72
IV-3-1-5 - Plan :	72
IV-3-1-6 - Cylindre :	72
IV-3-1-7 - Cône :	72

IV-3-1-8 - Sphère :	73
IV-3-1-9 - Surfaces quelconques :	73
IV-4- Divers aspects de l'élément.....	73
IV-4-1- Élément spécifié.....	73
IV-4-2- Élément réel.....	73
IV-4-3- Élément mesuré.....	73
IV-4-4- Élément optimisé.....	74
IV-4-5- Élément théorique.....	74
IV-4-6- Tolérance suivant l'ISO.....	75
IV-5- Classement des défauts.....	76
IV-5-1- Erreur de forme des éléments.....	77
IV-5-2- Erreur de position relative des éléments associés.....	77
IV-5-3- Erreurs de forme.....	79
IV-5-4- Erreur de rectitude.....	79
IV-5-5- Erreur de circularité.....	80
IV-5-6- Erreur de planéité.....	81
IV-5-7- Erreur de cylindricité.....	82
IV-5-8- Erreur de conicité : (cas particulier de la cylindricité).....	82
IV-5-9- Erreur de sphéricité : (cas particulier de surface quelconque).....	82
IV-5-10- Erreur de forme d'une ligne quelconque.....	83
IV-5-11- Erreur de forme d'une surface quelconque.....	83
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	85

- BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURE:

Figure 1-1: Extraction de la silhouette d'un objet.....	07
Figure 2-1 : visualiser plusieurs parties d'un objet0.....	07
Figure 3-1 : Formation d'image.....	08
Figure 1-2 : Système de mesure à fibres optiques.....	19
Figure 2-2 : Les capteurs.....	21
Figure 3-2 : Les jauges de déformations.....	24
Figure 4-2 : Schéma descriptif d'un microscope.....	33
Figure 5-2 : Le laser.....	35
Figure 6-2 : Application de speckle (Laser).....	36
Figure 7-2 : diagramme d'énergie de la laser par à port à longueur.....	38
Figure 1-3 : profil de surface.....	43
Figure 2-3 : écarts de forme.....	44
Figure 3-3 : ondulation.....	44
Figure 4-3 : Fréquences spatiales à deux dimensions.....	45
Figure 5-3 : Machine pour contrôle de circularité.....	47
Figure 6-3 : Enregistrements sur une machine de contrôle des défauts de circularité.....	48
Figure 7-3 : Auto étalonnage des défauts de rectitude d'une machine par retournement de la pièce étudiée.....	50
Figure 8-3 : Système interférométrique à laser pour le contrôle de rectitude.....	52
Figure 9-3 : Planéité et rectitude.....	53
Figure 10-3 : Écarts de planéité d'un marbre à partir de mesures d'écarts de rectitude.....	53
Figure 11-3 : Écarts de planéité d'un marbre ou d'un miroir par maillage triangulaire des écarts de rectitude.....	54
Figure 12-3 : Test de Foucault.....	55
Figure 13-3 : Interféromètre de Twyman et Green pour contrôler la forme des surfaces d'onde.....	56
Figure 14-3 : Atelier de polissage et de contrôle des grands miroirs astronomiques.....	57
Figure 15-3 : Franges d'interférence à deux ondes données par l'interféromètre de Fizeau du laboratoire de métrologie de l'Institut d'Optique.....	58

Figure 16-3 : Relevés sur un diamètre des écarts de rectitude d'un plan étalon du laboratoire de métrologie de l'Institut d'Optique.....	59
Figure 16-a-3 : calibre non fléchi supporté uniformément sur toute sa surface.....	59
Figure 16-b-3 : calibre fléchi supporté en trois points à 120°.....	59
Figure 17-3: Auto étalonnage des rectitudes de pièces optiques par la méthode des trois plans.....	60
Figure 18-3 : Étalons de rugosité pour étalonnage des rugosimètres	63
Figure 1-4 : Éléments géométriques.....	71
Figure 2-4 : Divers aspects de l'élément	74
Figure 3-4 : Cas général de la tolérance ment.....	75
Figure 4-4 : la restriction de tolérance.....	75
Figure 5-4 : Classement des défauts.....	76
Figure 6-4 : Erreur de forme des éléments	77
Figure 7-4 : Écart de position relative de deux éléments associés Perpendiculaires	78
Figure 8-4 : Rectitude	80
Figure 9-4 : Circularité	80
Figure 10-4 : Planéité	81
Figure 11-4 : Cylindricité.....	82
Figure 12-4 : Forme d'une ligne quelconque.....	83
Figure 13-4 : Forme d'une surface quelconque.....	84

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Le succès économique des nations dépend de leur capacité à fabriquer et à commercialiser des produits et des services mesurés et testés avec précision. La métrologie joue un rôle pivot pour les fabricants, les fournisseurs et les clients de biens et de services. Tous doivent avoir confiance dans l'exactitude et la fiabilité des mesures, à tous les niveaux de précision.

La métrologie est la science des mesures ; elle embrasse les mesures expérimentales et les développements théoriques, à tous les niveaux d'exactitude, et dans tous les domaines des sciences et des techniques. Les réseaux, complexes et quasi invisibles, de services, de fournisseurs et de communication, dont nous sommes tous dépendants, comptent tous sur la métrologie pour opérer de manière efficace et fiable.

Le métrologue s'intéresse à la qualité des mesures et en particulier à deux facteurs. Le premier de ces facteurs est de s'assurer du raccordement de la mesure à des étalons de référence. Le deuxième facteur de la qualité de la mesure est celui du calcul de l'incertitude. Le résultat de mesure peut être altéré par le Moyen, instrument de mesure, le milieu, l'environnement dans lequel la mesure est faite, la méthode utilisée, la matière ou ses propriétés mécaniques et la main d'œuvre, c'est-à-dire la personne qui mesure

Mesurer, c'est comparer une grandeur physique inconnue avec une grandeur de même nature prise comme référence, à l'aide d'un instrument. C'est exprimer le résultat de cette comparaison à l'aide d'une valeur numérique, associée à une unité qui rappelle la nature de la référence, et assortie d'une incertitude qui dépend à la fois des qualités de l'expérience effectuée et de la connaissance que l'on a de la référence et de ses conditions d'utilisation.

Les méthodes et conventions qui régissent la définition, l'évaluation et l'expression des résultats de mesure, unités et incertitudes sont parties intégrante du langage commun, à vocation universelle, de la métrologie.

En dehors des applications liées à l'engineering, la métrologie a des implications profondes dans de nombreux autres domaines des sciences et de la technologie. En matière de mesures du temps, les systèmes de navigation par satellite et la synchronisation internationale des échelles de temps permettent le positionnement exact : les avions peuvent même atterrir par faible visibilité ! Cela garantit aussi un bon fonctionnement des systèmes informatiques en réseau au niveau mondial.

Comme la métrologie est très importante dans l'industrie, nous avons essayé dans ce projet de définir la métrologie dimensionnelles ainsi que ces domaines d'applications et d'utilisations. Et définir aussi les incertitudes des instruments y compris les erreurs de mesure.

Alors pour présenter ce projet on a entamé le sujet suivant :
En premier chapitre, nous parlons des généralités de la métrologie, et des tolérances. Dans le deuxième, nous exposons la métrologie optique car c'est la plus utilisée. Le troisième parle sur la métrologie des surfaces des pièces et les applications des contrôles sur ces dernières.

En fin le quatrième, présente les incertitudes lors des mesures par l'instrument et les différentes erreurs commises lors de la lecture à travers l'instrument.



CHAPITRE I

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA METROLOGIE DIMENSIONNELLE ET (CAO) :

I-1- Introduction :

Dimensionnelle des pièces physiques par une vérification de sa conformité Avec la pièce théorique tolérance, Dans un temps très court, la définition géométrique s'est éloignée du stade de l'épure pour être projetée vers la culture et la définition du numérique au travers des modèles géométriques bidimensionnels, puis tridimensionnels, dans le monde de la conception assistée par ordinateur (CAO).

Cette accélération des événements a nécessité des modifications profondes du savoir-faire, Les épures étaient réalisées sur papier et les modèles géométriques de la (CAO) ont contraint les utilisateurs à la manipulation d'outils numériques. Les systèmes informatiques permettent une évolution dans le domaine de la qualité. [7], [6]

I-2- Unités et bases standard :

Toutes les mesures sont le résultat d'une évaluation d'un objet en comparaison à une unité de mesure. Les scientifiques et les ingénieurs effectuent actuellement leurs mesures en fonction du système international d'unités (SI), doté de six unités de base, et établi par décret en date du 1er janvier 1962.

La première Conférence générale des poids et mesures s'était tenue en 1889 à Paris, elle avait pour objectif principal de parvenir à une définition et à une harmonisation des mesures. À cette occasion, le mètre a été représenté par la distance des axes de deux traits parallèles inscrits sur le prototype international en platine iridié maintenu à une température de 0°C, conservé à Sèvres. Entre 1960 et 1983, le mètre était défini en fonction d'une des radiations émises par une lampe à

décharge contenant l'isotope 86 du krypton. Le mètre est actuellement défini comme la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant $1/299\,792\,458$ secondes.

C'est grâce au laser que l'on a pu déterminer de façon extrêmement précise la vitesse de la lumière. [4] .

I-2-1- Unités dérivées et mesures (subjectives) :

Les six unités de mesure SI servent de base pour toutes les autres mesures physiques que l'on peut établir ou déduire. Par exemple, la vitesse est mesurée en mètres par seconde, et la force est mesurée en kilogrammes mètres par seconde au carré ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$). Par ailleurs, il existe des paramètres, comme par exemple la tonalité d'un son, qui sont subjectifs et ne peuvent pas être véritablement définis par des mesures physiques du son.

La dureté d'un matériau, grandeur essentielle dans l'industrie du bâtiment, par exemple, est définie en fonction d'une échelle de résistance aux déformations permanentes. Il n'existe pourtant pas d'unité SI correspondante. Afin de la mesurer, une forme dentelée particulière agresse la surface du spécimen à tester, par application d'une force connue, dans des conditions spécifiées et contrôlées précisément. La taille de l'éraflure ou du trou est mesurée, puis comparée à celle créée dans les mêmes conditions sur un ou plusieurs matériaux de référence : c'est à l'aide de cette comparaison que l'on évalue la dureté de l'échantillon. Des formes spécifiques de dentelures sont utilisées en fonction des différents matériaux à caractériser (voir Matériaux, science et technologie).

I-2-2- Procède de mesure :

Le procédé de mesure, comme de nombreux procédés, permet d'obtenir un produit qui, dans ce cas particulier, est un résultat de mesure, dans ce cadre le rôle du laboratoire d'étalonnage est de s'assurer de la gestion des instruments de mesure dans l'entreprise, cependant il ne faudra pas oublier que de nombreux autres facteurs concourent à la qualité des mesures.

I-2-3- Mesure dans l'industrie et les laboratoires :

Dans les laboratoires ou sur les sites industriels, les mesures effectuées requièrent une précision qui dépend des différents paramètres.

Des mesures précises sont indispensables pour garantir le bon fonctionnement des procédés industriels complexes, comme l'assemblage et l'interchangeabilité des pièces mécaniques, le suivi de la fabrication, ainsi que le contrôle des réactions chimiques dans les hauts-fourneaux ou dans les centrales nucléaires par exemple.

La métrologie joue un rôle important dans le contrôle de la qualité, ainsi que dans celui des coûts de production, en participant notamment à la recherche d'un équilibre entre le coût des mesures (croissant en fonction de la précision requise), et le coût des dysfonctionnements, des pertes et des rebuts (dont l'augmentation en fonction de l'imprécision des mesures aux différentes étapes de la production).

Dans une chaîne de fabrication, chaque mesure d'une quantité particulière ou de contrôle d'un instrument de mesure est effectuée avec une précision, définie au préalable, qui lui est propre.

Afin de répondre à des critères de marché et de qualité, il est nécessaire que, tout au long de la chaîne de production, les mesures de routine soient adéquatement effectuées, que leur précision soit connue, et qu'elles puissent être rapportées à un choix de standards primaires nationaux et internationaux.

La traçabilité fournit les moyens de contrôler et de calibrer, dans un travail de construction formel, tous les instruments de mesure utilisés dans l'industrie, la science, la médecine.

Une métrologie précise participe de façon importante à une production industrielle de qualité, ainsi qu'à la protection de la vie humaine ou de

l'environnement, et elle est fondamentale pour le développement de la recherche scientifique.

Par ailleurs, l'emploi d'horloges atomiques (voir Horloges et montres) et d'instruments utilisant la supraconductivité ou le laser se démocratise, réduisant ainsi l'écart entre la précision des mesures des laboratoires scientifiques et celles des mesures industrielles. [1], [3]

I-3- Structure d'un système de mesure :

Un système de mesure dimensionnelle par vision se compose des éléments suivants:

- un équipement d'éclairage.
- un objectif (optique).
- une ou des caméras à capteur CCD.
- une carte d'acquisition.
- un micro-ordinateur, un module de traitement d'images et éventuellement un moniteur de visualisation d'images.

Les paragraphes suivants résument les principes de fonctionnement et les caractéristiques de ces éléments.

I-3-1- Éclairage :

L'éclairage est une étape fondamentale de mesure dimensionnelle. IL y a deux buts essentiels:

- Ressortir toutes les caractéristiques importantes de l'objet (paramètres de forme de l'objet).
- Simplifier le traitement d'image ultérieur (si les détails se distinguent par une intensité lumineuse contrastée par rapport au fond, les fonctions de traitement d'images seront plus simples).

La (Figure 1-1) montre deux exemples d'éclairage pour la visualisation de la silhouette d'un objet.

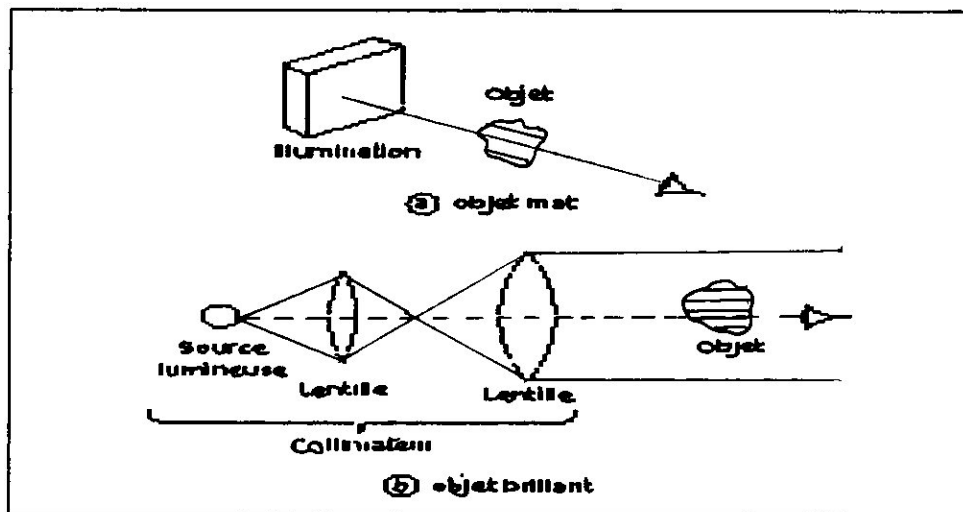


Figure 1-1 : Extraction de la silhouette d'un objet.

La (Figure 2-1) montre une configuration d'éclairage pour l'acquisition de plusieurs vues d'un objet.

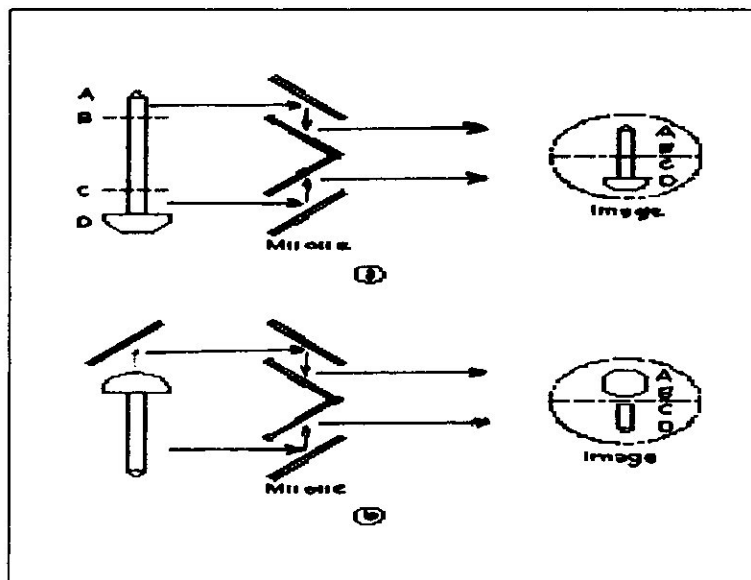


Figure 2-1 : visualiser plusieurs parties d'un objet.

I-3-2- Objectif :

Un objectif, composé d'une ou de plusieurs lentilles, forme, à partir d'un objet, une image dont la position et la taille peut être calculées selon les lois de l'optique géométrique (Figure 3-1) :

$$1/f=1/u+1/v \quad (1)$$

$$M=v/u \quad (2)$$

Avec: f : la distance focale.

U : la distance objet lentille.

v : la distance image lentille.

M : le facteur d'agrandissement.

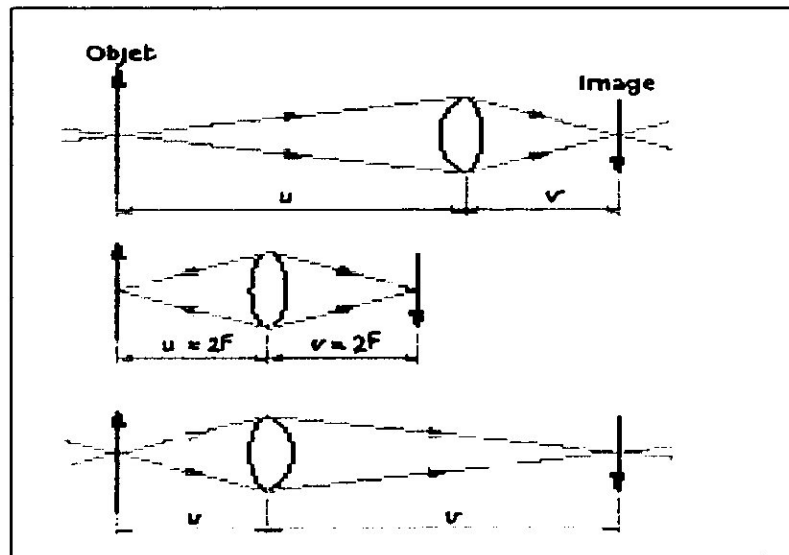


Figure 3-1 : Formation d'image

I-4- Domaines d'applications la mesure et l'instrumentation :

Avant d'aborder l'étude détaillée des systèmes de mesure et de leurs caractéristiques, il est peut être utile de définir de manière générale les diverses utilisations de ces systèmes. Les applications sont classées selon le découpage suivant :

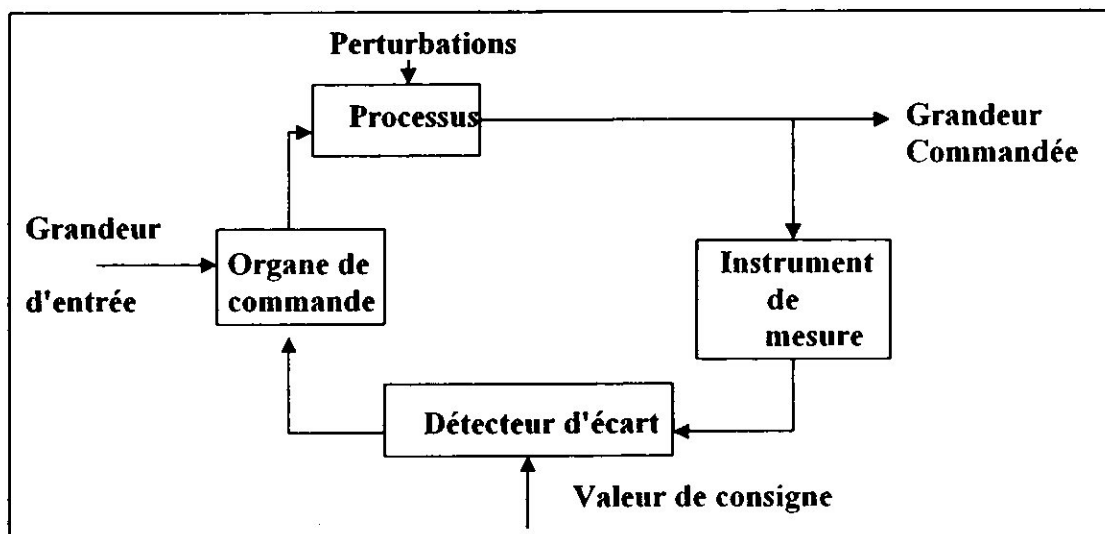
- surveillance de processus.
- Commande de processus.
- Analyse expérimentale.

I-4-1- Surveillance de processus :

Une grande partie de l'utilisation des appareils de mesure se situe dans le domaine de la surveillance de processus. Par exemple, les thermomètres, baromètres, anémomètres utilisés en métrologie n'ont pas d'autre but que d'indiquer les conditions locales et instantanées et leurs indications ne peuvent être utilisés pour agir en vue de modifier les conditions atmosphériques. De la même façon les compteurs d'eau, gaz ou électricité à usage domestique ou industriel permettent d'enregistrer les quantités consommées pour pouvoir calculer le coût d'utilisation de ces sources. [5]

I-4-2 Commande de processus :

Un autre type d'utilisation très répandu concerne les applications dans lesquelles l'instrument de mesure constitue un élément d'un système plus complexe de commande automatique. Un tel système peut-être représenté par le schéma fonctionnel suivant :



Ce schéma fait apparaître une structure "bouclée " dans laquelle il est indispensable de mesurer la grandeur que l'on désire réguler.

Les exemples de ce type sont infinis et peuvent être très simple (thermostat d'ambiance d'une installation de chauffage) ou très complexes (pilote automatique, conduite d'unités de production) faisant appel à des nombreuses informations nécessitant la présence d'un nombre important d'instruments de mesure.

I-4-3 Analyse expérimentale :

La résolution des problèmes posés à l'ingénieur peut-être envisagée selon deux approches : l'une théorique, l'autre expérimentale.

En fait les deux méthodes sont souvent employées simultanément, les données expérimentales recueillies sur une installation particulière pouvant servir de données de base pour l'élaboration des modèles théoriques plus généraux décrivant, sous forme mathématique, le fonctionnement d'une famille de processus.

Les traits essentiels des deux approches sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	Approche théorique	Approche expérimentale
1	Donne des résultats à caractère Général.	Donne des résultats particuliers relatifs au seul système étudié. Possibilités de généralisation (P.ex. analyse dimensionnelle)
2	Nécessité d'hypothèse simplificatrices on n'étudie pas le système réel, mais un "modèle" mathématique.	Analyse du comportement du système réel.
3	Formulations mathématiques souvent complexes → utilisation d'outils de calcul puissants mais pouvant être également affectés à d'autres tâches.	Nécessité d'effectuer des mesures précises pour saisir le comportement exact → quantité importante de matériel spécialisé et coûteux.
4	Lorsque le modèle est bâti, possibilité d'études paramétriques "immédiates".	Modifications des matérielles parfois importantes pour études paramétriques.

La classification adoptée ci-dessus ne conduit pas toujours à une distinction très nette. Un même type de mesure pourra en effet être classé dans l'une ou l'autre des catégories d'applications suivant le point de vue de l'expérimentateur.

Ainsi, les données météorologiques entrent pour la plupart d'entre nous dans la catégorie surveillance des processus.

Mais pour un producteur agricole par exemple ces données peuvent être considérées comme faisant partie d'un système de commande lui permettant de protéger ses cultures en cas de prévision de gel. Quelle que soit la nature de l'application, la sélection et l'utilisation de l'instrumentation de mesure dépendent d'une connaissance suffisamment étendue des moyens disponibles et de la façon dont les performances des équipements peuvent répondre au problème posé.

Cette connaissance repose sur certain nombre concepts généraux, mathématiques et physiques ainsi que sur un savoir technologique minimal sans lesquels la définition et la mise en œuvre d'un système de mesure, ainsi que l'interprétation des données fournies ne peuvent être réalisées de façon correcte.

I-5- Facteurs de qualité des mesures textes normatifs :

Si l'on tente de caractériser la qualité d'un résultat de mesure, on peut définir ce que nous appellerons une qualité intrinsèque et une qualité extrinsèque. La qualité intrinsèque correspond à la validité physique de notre résultat de mesure et elle pourrait se caractériser par l'incertitude.

En effet, l'incertitude est un indicateur, une mesure de la qualité de notre résultat.

La qualité extrinsèque du résultat de mesure correspondrait à l'adéquation entre le résultat de mesure et l'objectif de la mesure, c'est-à-dire sa pertinence (a-t-on mesuré la grandeur vraiment utile à l'utilisateur, l'incertitude du résultat est-elle adaptée à l'objectif : ni trop performante, ni insuffisante). Il faut se souvenir que l'incertitude est généralement directement liée au coût du procédé de mesure, d'où la nécessité d'optimiser ce paramètre.

Ayant défini les caractéristiques de la qualité d'un résultat de mesure, nous pouvons examiner quelles sont les actions à entreprendre pour établir puis maintenir cette qualité.

I-6- Langage normatif et modèles :

Une norme correspond à un consensus qui garantit la qualité des travaux d'une entreprise et d'un langage commun. « Véritable arme stratégique, outil de pénétration du marché: c'est ainsi que nos collègues d'outre-rhin ont toujours considéré la normalisation.

Frein à l'innovation, banalisation, contrainte... sont les clichés les plus répandus en France]. Les industriels français, au travers de l'Union de normalisation de la mécanique (UNM) prennent part aux travaux de normalisation sur des sujets nouveaux ainsi que sur des révisions des normes, dans l'optique d'être des acteurs industriels en harmonie avec cette normalisation plus qu'en désaccord.

Le tolérance ment normalisé constitue un langage déclaratif des spécifications dimensionnelles et géométriques.

I-6-1- Tolérance ment normalise :

Les éléments de définition sont des éléments géométriques parfaits, appelés les éléments nominaux ; ils sont représentatifs de la pièce théorique et parfaite et utilisés pour représenter les zones de tolérance des spécifications géométriques, qui ont des éléments caractéristiques des éléments de situation, qui peuvent être confondus avec les éléments nominaux. Les éléments réels sont des ensembles des points appartenant à une pièce physique ou réelle, extraits de cette pièce qu'ils discrétisent, obtenus par extraction (ou pal page) pendant les phases de mesure ou construits à partir d'autres points réels extraits (appelés alors points réels extraits construits).

Les éléments associés sont des éléments géométriques parfaits obtenus à partir d'un ou de plusieurs éléments géométriques réels par l'application de critères d'association.

I-6-2- Principe de l'indépendance:

Le tolérance ment normalisé s'articule autour du principe de l'indépendance, toutes les spécifications de dimension, de forme, d'orientation et de position (sur un élément géométrique ou sur un groupe d'éléments de la pièce) sont indépendantes.

IL y a indépendance entre les dimensions des éléments et leur géométrie (position, orientation, forme.

Les notions d'ordre et de procédures n'interviennent pas dans le langage normalisé, qui constitue un langage de représentation déclaratif.

I-6-3 - Exigence entre dimensions et géométrie :

Les exigences entre les dimensions et la géométrie sont de deux types : l'exigence de l'enveloppe et les exigences du maximum et du minimum de matière.

I-6-3-1- Tolérances dimensionnelles:

Ces tolérances permettent de limiter les défauts locaux. Deux distinctions permettent de subdiviser les tolérances dimensionnelles : les tolérances linéaires et les tolérances angulaires. Cependant, il s'agit d'indiquer les limites minimales et maximales des dimensions. Ce type de tolérance est également qualifié de tolérance dite « en \pm », qui s'applique soit à une surface réelle unique, soit à un couple d'éléments réels.

Les tolérances dimensionnelles linéaires ne peuvent être exprimées que sur des surfaces ou entre des surfaces possédant des dimensions locales (généralement sur des cylindres et entre deux plans nominalement parallèles et suffisamment distants).

Pour une spécification sur une surface nominalement cylindrique (respectivement de $d \pm e$, entre deux plans nominalement parallèles), les valeurs représentant les dimensions locales de la surface réelle (respectivement entre les deux surfaces planes réelles).

I-6-3-2- Tolérance géométriques :

Les tolérances géométriques ont pour objectif de délimiter des espaces dans lesquels doivent se situer les éléments tolérances par rapport aux références spécifiées, pour respecter la spécification de tolérance.

Elles permettent donc de limiter les défauts d'un élément réel ou d'un élément associé (dans le cas des tolérances projetées), par rapport à des caractéristiques nominales, sans tenir compte de la dimension de l'élément (ISO 8015).

La tolérance ment géométrique est basé sur quatre types d'éléments : l'élément tolérance, la zone de tolérance, la référence spécifiée (qui peut être une surface de référence ou un système de références spécifiées), (ISO 5459), l'élément de référence, représentatif du réel. Le tolérance ment géométrique est quatre types : forme, orientation, position, battement. [7]

I-7- Limites métrologiques:

Dès que l'on entreprend de mesurer l'infiniment petit, l'infiniment grand ou le très lointain, des problèmes spécifiques surviennent. En effet, on peut dire que nous sommes confrontés à un changement d'échelle par rapport à notre perception directe, qui implique que nous ne pouvons avoir de connaissance des ordres de grandeur, de vitesse ou de poids que grâce à une sophistication extrêmement poussée des modèles, des processus et des instruments de mesure. Tel est le cas pour la détermination de la masse des atomes et des particules subatomiques, ou de la distance qui nous sépare des galaxies lointaines, ou encore de la masse totale de l'Univers. Ces résultats sont inhérents au processus même de mesure, qui est un processus « relatif » : il dépend des paramètres utilisés.

Des progrès considérables ont été néanmoins réalisés au cours de ces dernières décennies, laissant espérer de nouvelles avancées quant à la précision de nombreuses mesures. Par exemple, le fait de parvenir à atteindre le zéro absolu permettra une nouvelle évaluation des paramètres thermiques et quantiques utilisés dans les modèles actuels ; vice versa, une plus grande précision métrologique permettra probablement de nouvelles découvertes.



CHAPITRE II

CHAPITRE II : LA MÉTROLOGIE OPTIQUE

II-1- Introduction :

Nous allons à présent examiner de plus près les principales méthodes utilisées en métrologie optique.

Plutôt que d'en dresser un catalogue, nous allons les regrouper en fonction du concept optique sous-jacent, nous espérons mettre ainsi en évidence la profonde unité et la permanence des méthodes dont elles sont issues, par-delà l'évolution rapide des progrès de la technologie.

Un exemple remarquable nous est fourni par la mise au point du laser. Depuis plus de trente ans, nous assistons à une floraison d'appareils dont cette source constitue l'élément fondamental. Or, pour la plupart d'entre eux, le laser n'a apporté qu'une commodité de mesure, la méthode elle-même étant connue depuis fort longtemps.

Nous nous bornerons à des allusions sporadiques, car tel n'est pas notre propos, mais l'union de l'optique et de l'électronique se fait chaque jour plus étroite, au point que certains ont cru bon de rebaptiser photonique la vieille science de Huyghens et de Fresnel. [6]

Ainsi le développement fulgurant des dispositifs à transfert de charges, plus communément appelé capteurs CCD, est à l'origine d'une multitude d'applications nouvelles dont la partie « grand public », le caméscope, n'est que la plus voyante.

II-2- Caractéristiques de la métrologie optique :

Au même titre que les autres parties de l'optique, la métrologie se sert des divers modèles mis au point pour rendre compte du comportement de la lumière, aussi allons-nous en rappeler, en quelques mots, les caractéristiques essentielles.

Le modèle du rayon lumineux pose que la lumière se propage le long de lignes, au sens mathématique du terme : les rayons lumineux.

Ces lignes sont des droites ou, très exceptionnellement, des courbes. Nous lui rattacherons les alignements, les mesures d'angles et de distances par triangulation, comme celles de Delambre et Méchain qui, au plus fort de la tourmente révolutionnaire, ont permis d'établir le nouvel étalon de longueur, le mètre.

Plus élaboré, le modèle ondulatoire figure la lumière comme une onde, variation périodique d'un « vecteur lumineux » ou « vecteur de Fresnel », perpendiculaire à la direction de propagation.

Dans sa formulation la plus simple (approximation scalaire de Fresnel et Kirchhoff), il permet d'interpréter les mesures interférométries, les plus précises que nous sachions réaliser, et montre dans quelle mesure la diffraction restreint l'exactitude des mesures.

La prise en compte, enfin, de son caractère vectoriel justifie les méthodes basées sur la mesure des variations de l'état de polarisation de la lumière.

Nous classons un peu à part un ensemble de méthodes utilisant la vitesse de propagation de la lumière et dont l'essor récent est lié aux progrès des dispositifs de mesure du temps.

Cet ensemble regroupe les diverses mesures de télémétrie, y compris le lidar, équivalent lumineux du radar.

Les deux modèles permettent, à des niveaux d'exactitude différents, d'interpréter la formation d'images, utilisées par exemple pour les mesures de distances par pointés longitudinaux ainsi, bien entendu, que dans tous les instruments d'optique stricto sensu, tels les dispositifs de lecture.

Une aide inappréciable aux mesures est apportée par les procédés de filtrage, optique ou plus communément numérique. Éliminant les informations superflues, ils permettent de mettre en relief les résultats importants, comme en témoignent les splendides images obtenues à partir des messages reçus des sondes spatiales ou des satellites d'observation terrestres.

À côté des dispositifs utilisant la propagation de la lumière, une partie importante de la métrologie optique repose sur l'estimation et si possible la mesure de l'énergie transportée dans chaque domaine spectral.

Ajoutons que la construction optique est l'une des plus exigeantes en matière d'exactitude : les dimensions des lentilles d'un objectif d'appareil photographique ou de microscope doivent être usinées avec un écart ne dépassant pas une dizaine de micromètres, tandis que leur surface ne doit pas présenter de défauts supérieurs à quelques nanomètres.

Ces lentilles, au même titre que n'importe quel autre composant, sont mises en place à l'aide de supports pour lesquels les tolérances mécaniques admissibles ne doivent pas être trop différentes de celles exigées des pièces optiques, ce qui implique une très étroite liaison entre les industries de l'optique et de la mécanique de précision. [6] [7]

II-3- Mesures par fibres optiques :

II-3-1- Système de mesure :

Un système de mesures par fibres optiques comporte plusieurs constituants : la partie active est constituée de la source et du détecteur ; la partie électriquement

passive est formée du sous système de transmission par fibres optiques et du capteur à fibres optiques.

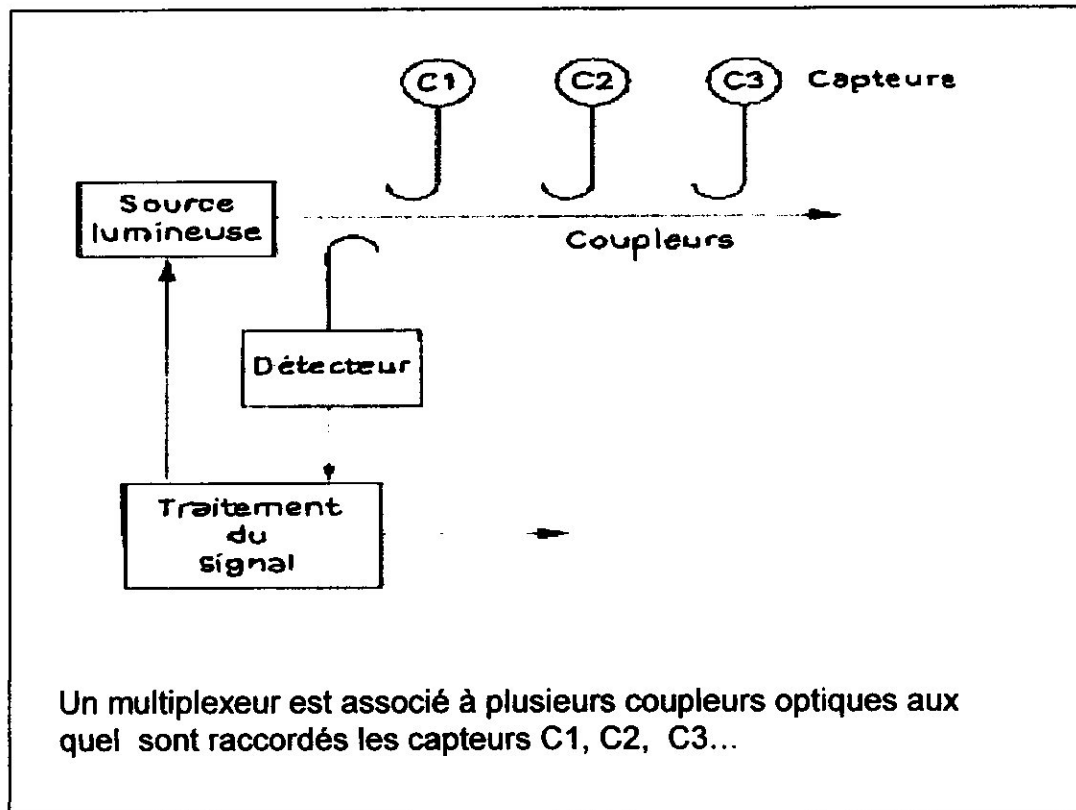


Figure 1-2 : Système de mesure à fibres optiques.

Le capteur module le signal émis par la source, le sous-système de transmission véhicule la lumière vers la zone sensible, puis l'information vers le détecteur.

II-3-2- Mesures mécaniques :

Les capteurs de déplacement, de position et de proximité constituent un marché important pour les capteurs à fibres optiques.

Ils servent notamment dans des applications industrielles, dans le domaine du conditionnement et de l'emballage. On apprécie particulièrement leur faible

encombrement, leur sécurité intrinsèque, et leur compatibilité avec les autres systèmes électroniques de mesure.

II-3-3 - Méthodes de mesure :

Nous n'en examinerons ici que le principe ; on se référera aux normes pour une description plus complète de chaque cas, Deux grands types de méthodes normalisées sont mis en œuvre, les unes faisant appel à des positions fixes des microphones, les autres à un balayage de la surface de mesure par les microphones.

II-3-4- Autres méthodes :

L'ensemble des méthodes précédentes fait apparaître des exigences relatives à l'environnement de l'essai, qui conditionne en grande partie la précision des résultats.

On peut citer deux méthodes visant à supprimer cet inconvénient.

La mesure directe du produit pv qui permet, en principe, l'emploi de n'importe quelle surface de mesure entourant la source, qui élimine l'influence du champ proche, ainsi que celle des sources parasites situées hors de la surface de mesure, et qui rend inutile la correction due au champ réverbéré : on notera que les difficultés liées à l'échantillonnage de la surface de mesure subsistent.

L'obtention directe du produit pv pose encore toutefois divers problèmes de capteurs et d'instrumentation, qui limitent la méthode à des applications particulières n'ayant pas encore fait l'objet d'une normalisation (localisation des sources, étude du rayonnement acoustique des parois, etc.).

L' utilisation d'une source de référence : ces méthodes font appel à une source acoustique dite de référence dont la puissance, le spectre et la directivité sont connus et sont invariants par rapport à l'environnement.

On substitue alors une telle source à celle dont on veut déterminer la puissance et l'on réalise des mesures de niveau sonore dans chaque cas, dans les mêmes conditions.

II-5 - Les Capteurs :

II-5-1- Introduction :

Tout être vivant doté de sens qui lui permettent d'être renseigné sur certains éléments du milieu extérieur de nature physique (vue, audition, toucher) ou chimique (goût, odorat).

Mais si nos sens sont à même de fournir des informations qualitatives sur les éléments du milieu extérieur (il fait chaud, c'est lourd, silence!, les données quantitatives) qui nous sont fournies manquent bien souvent de précision.

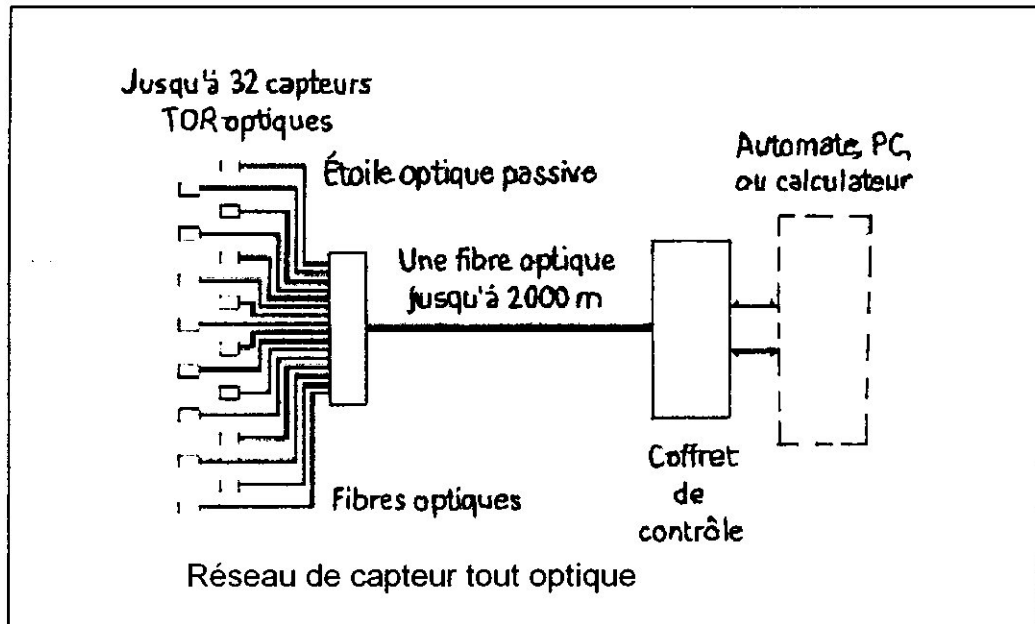


Figure 2-2 : Les capteurs.

IL adonc fallu créer des outils capables de détecter de manière spécifique, certaines grandeurs physique, puis de traduire celles-ci en une information directement exploitable.

II-5 -2 - Le rôle :

Le rôle de ces capteur ou traducteurs consiste par conséquent à transformer une forme d'énergie (potentielle, cinétique, thermique,...), difficile à exploiter directement, en une autre forme, utilisable cette fois.

Au lieu de détecter, on peut bien entendu chercher à amplifier des grandeurs de trop faible niveau ou atténuer celles des grandeurs de trop faible niveau ou atténuer celles des grandeurs qui, à l'inverse des précédentes, sont trop puissantes.

C'est ainsi que depuis bien longtemps, les déplacement sont amplifiés au moyen d'engrenages de multiplicateurs, de leviers et de fléaux, néanmoins, tout amplificateur mécanique de déplacement possède une inertie qui l'empêche de suivre fidèlement les phénomènes à évolution rapide ; en outre, une très haute précision ne peut être garantie avec une amplification mécanique, en particulier en raison des interactions entre le système à mesurer et le système de mesures : la masse de ce dernier, sa souplesse vont influencer la mesure; les frottements en dissipant de l'énergie, vont causer la perte d'une fraction de l'information qui l'on désire saisir.

Les capteurs ont pour la plupart une présence physique : ce sera un thermocouple ou une jauge de contrainte dont l'inertie n'est jamais nulle ; chaque capteur sera donc caractérisé par un temps de réponse qui sera d'autant plus faible que le capteur est plus petit.

II-5 -3 - L'information captée : (analogique, digitale ou graphique) :

L'information contenue dans une mesure a essentiellement un caractère analogique : une longueur, une vitesse, une pression ou une température peut prendre n'importe quelle valeur, dans des limites raisonnables bien entendu.

Pour contre l'information traitée par un ordinateur est de nature digitale : elle est représentée par une succession de (bits), unités élémentaires d'information pouvant prendre les seules valeurs 0 et 1. Dans certains cas, une mesure pourra

avoir un caractère digital : ainsi, lorsqu'on analyse une image interférométrique au moyen d'un capteur optoélectronique, la présence d'une frange d'interférence optique engendrera en sortie du capteur, un créneau de courant électrique.

II-5-4 Les capteurs dimensionnels :

Le 16 septembre 1975, un décret a été promulgué, qui réglemente les mesures (matérialisées) de longueurs ; il s'applique ainsi aux instruments comportant des repères dont les distances sont indiquées en unités légales de longueur, en tissu ou en matière plastique, des règles plates ou à biseau, des équerres, ainsi que des instruments de mesures de longueurs inférieures à 0,5 mètre. Ce décret s'applique par conséquent essentiellement à décret s'applique par conséquent essentiellement à l'instrumentation industrielle.

La longueur nominale de la mesure de longueur est représentée par la distance entre deux repères, l'échelle de la mesure de longueur est constituée par l'ensemble des repères qu'elle comporte.

Lorsque les repères principaux sont deux surfaces, la mesure de longueur est dite à bouts ; elle est à traits lorsque les repères principaux sont deux traits, trous ou marques ; lorsque l'un des repères principaux sont deux traits, trous ou marque ; lorsque l'un des repères principaux sont deux surfaces, la mesure de longueur est dite à bouts ; elle est à traits lorsque les repères principaux sont deux traits, trous ou marques ; lorsque l'un des repères principaux est une surface, et l'autre un trait, un trou ou une marque, la mesure de longueur est dite mixte. [3]

II-5-4-1 - De la mesure de longueur à la détection de position :

A coté des multiples dispositifs mécaniques de mesures de longueurs, figurent des systèmes électromécaniques permettant de déterminer la position d'organes mécaniques ; par comparaison entre les différentes positions prises par un même organe en différents instants, il est possible d'évaluer la distance et la direction du déplacement de cet organe, ainsi que la vitesse et l'accélération de celui-ci.

De nombreuses techniques peuvent être utilisées pour la détection de position : techniques magnétiques, magnétorésistances... Dans la première d'entre celles-ci, un aimant permanent est utilisé avec les organes mobiles : une force électromotrice est induite dans un enroulement de spires conductrices lorsque celui-ci subit des variations du champ magnétique qui l'entoure.

II-5-4-2 - Les jauges de déformations :

Sous sa forme la plus rudimentaire, une jauge de déformation est constituée d'un simple fil fin, de longueur l et de section droite S .

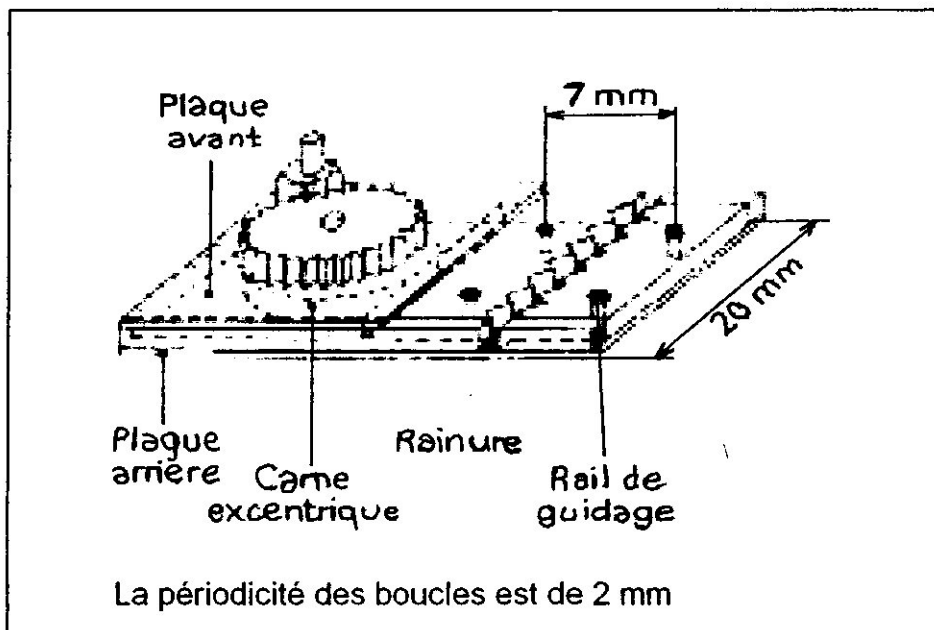


Figure 3-2 : Les jauges de déformations.

Les extensomètres mesurent le comportement, au sens dimensionnel, des pièces effectuant un travail ou supportant un effort. De cette connaissance des déformations subies localement, on déduit des informations sur les taux locaux de contraintes; on peut aussi mesurer des forces, des couples, des pressions. De plus la rapidité de réponse des jauges permet l'étude des phénomènes dynamiques rapides : fréquence, phase, amplitude des vibration dans les structures par exemple. Les déformations des solides sont faibles et réversibles tant que les sollicitations

restent elles-ci augmentent, il arrive un moment où apparaissent des déformations non réversibles : celles-ci peuvent entraîner la rupture du solide.

II-5-5- Les capteurs à fibres optiques :

Selon la définition normalisée, un capteur à fibre optique (ou à fibres optiques) est :

IL permet de recueillir des informations représentatives des grandeurs mesurées sans autre apport d'énergie que celui des phénomènes observés et ou des ondes lumineuses circulant dans la ou les fibres.

Le chemin optique n'est donc pas passif, contrairement à une liaison optique où l'information est simplement transmise de l'entrée de l'émetteur vers la sortie du récepteur.

Cette définition exclut du champ d'investigation des capteurs à fibres optiques, les assemblages comportant un capteur conventionnel et un système de transmission par fibres optiques.

Toutefois, l'élément optique sensible à la grandeur à mesurer peut être la fibre elle-même ou bien un élément insérer dans le chemin optique. [3] [7]

II-5-5-1- Fonctions :

Les capteurs peuvent assurer quatre fonctions différentes :

— l'acquisition d'un paramètre externe au système (saisie externe d'informations pour un automatisme fonctionnant en boucle ouverte).

— La surveillance du système par acquisition d'un paramètre interne (saisie interne, boucle ouverte).

— La stabilisation de ce système (saisie interne, boucle fermée).

— L'asservissement du système à un paramètre externe (saisie externe, boucle fermée).

II-5-5-2- Capteur intrinsèque et capteur extrinsèque :

Cette classification peut être jugée incomplète dans la mesure où il existe des zones intermédiaires, par exemple celle où la mesure s'effectue à l'interface entre la fibre et le milieu externe.

Dans les capteurs intrinsèques, c'est la fibre optique qui forme elle-même le transducteur : le phénomène à mesurer modifie une caractéristique de la propagation de la lumière (état de polarisation, biréfringence...), Ils permettent de réaliser des mesures dans les zones d'accès difficiles, en environnement très bruyé, Ils sont appréciés pour leur faible invisibilité et la possibilité d'une mesure répartie.

Une même fibre peut transporter plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes : elle autorise à ce titre le multiplexage optique.

Le multiplexage optique de plusieurs zones sensibles de la fibre est possible : il s'effectue en repérant ces zones au moyen d'un marquage optique (réseau d'indice) inscrit par exemple dans le cœur de la fibre par un procédé optique.

Les capteurs extrinsèques mettent en jeu des fibres optiques pour transmettre la lumière entre une source optique et un instrument de mesure.

II-5-5-3- Constitution d'un capteur à fibres optiques :

D'une façon générale, un capteur à fibres optiques est un dispositif comportant une ou plusieurs fibres permettant de recueillir des informations représentatives de grandeurs mesurées.

La fibre optique est le plus souvent en silice, bien qu'elle puisse être en matière plastique.

Les fibres couramment utilisées ont une enduction extérieure en époxy acrylate : la technologie relative à ce polymère est bien maîtrisée, de sorte que les fibres multi modes comme monomodes peuvent être obtenues avec une excellente précision sur le diamètre (valeur standard : 125 μm , à $\pm 0,5 \mu\text{m}$), qualité essentielle dès lors que la fibre doit être introduite dans un dispositif de maintien (férules des connecteurs).

Leur température d'emploi dépend essentiellement de leur conditionnement: la silice a un point de fusion à 1 850 °C, et peut transmettre la lumière sans problème jusqu'à 600 à 700 °C ; des problèmes d'atténuation forte, éventuellement de ramollissement apparaissent à plus haute température.

Pratiquement, c'est l'époxy acrylate qui limite la température d'emploi de ces fibres entre - 30 °C et + 60 °C. D'autres enductions polymères permettent au capteur de fonctionner à des températures supérieures :
Le poly imide par exemple tient jusqu'à 400 °C environ.

Des capteurs intrinsèques exploitent ces fibres préalablement bobinées sur un mandrin de diamètre relativement faible (25 à 30 mm) qui dépend de la tenue mécanique de la fibre (résistance à la traction : jusqu'à 4 à 5 GP a). Ils sont utilisés dans tous les milieux liquides, mais aussi les milieux solides à condition de disposer d'une bonne transduction entre la fibre et le solide par l'intermédiaire d'une pâte ou d'un liquide.

Le bobinage de la fibre optique sur un faible diamètre engendre une contrainte de courbure, du fait de la différence de longueur de la circonférence entre la partie interne et la partie externe de la fibre.

Cette contrainte se transmet en contrainte de traction sur la peau extérieure de la fibre, et en contrainte de compression sur la peau intérieure.

IL en résulte des effets pervers : les microfissures présentes au sein de la fibre auront tendance à s'ouvrir. Si le milieu est poreux, les ions d'hydroxyle vont pénétrer dans les microfissures, les creuser par effet de potentiel chimique renforcé, et conduire à l'atténuation (fibres optiques multi modes) ou à la détérioration tant mécanique qu'optique (fibres monomodes).

Les fibres optiques destinées à être utilisées en capteurs bobinés doivent par conséquent faire l'objet d'une enduction hermétique à base de carbone, de Un dispositif dans lequel l'information est créée dans le chemin optique par réaction de la lumière à la grandeur à mesurer, avant d'être acheminée vers le récepteur optique par l'intermédiaire d'une ou de plusieurs fibres optiques.

Le capteur à fibres optiques sera dit intrinsèque lorsque l'élément sensible est constitué par une ou plusieurs fibre(s) optique(s) dont une ou plusieurs caractéristiques de transmission, de réflexion ou d'émission de la lumière sont fonction de la ou des fibre(s) optique(s).

Le capteur à fibres optiques sera dit extrinsèque lorsque les caractéristiques de la lumière sont modifiées par la grandeur à mesurer à l'extérieur de la ou des fibre(s) optique(s).

Le transducteur optique est un dispositif qui reçoit de l'information sous forme d'une grandeur physique et la transforme en information sous forme d'une grandeur optique.

II-5-5-4- Avantages des capteurs à fibres optiques :

- L'intérêt porté aux capteurs à fibres optiques est lié aux propriétés intrinsèques de ces fibres, ainsi qu'à l'architecture du capteur lui-même. Ce capteur a des avantages décisifs :

-IL ne perturbe pas son environnement, IL peut notamment être employé en environnement explosif.

- Son insensibilité électromagnétique est parfaite (très hautes tensions, parasites électromagnétiques).

- Sa dimension transversale est très faible, ce qui lui ouvre la voie aux applications en médecine humaine notamment.

- Sa légèreté (associée à l'absence de conduction de la chaleur) constitue un atout supplémentaire.

- Sa dimension axiale est grande : le capteur peut être positionné à grande distance, sans perte du signal.

- À ces principaux atouts, uniques dans le domaine des capteurs, s'ajoutent d'autres avantages spécifiques à certains capteurs à fibres optiques :

- Plus grande sensibilité et plus grande dynamique que les capteurs traditionnels : les montages interférométriques permettent d'atteindre des résolutions relatives de 10^{-6} de l'étendue de mesure.

- Grande souplesse de configuration géométrique : le capteur autorise notamment des mesures sans contact sur des objets en mouvement, ou dans des milieux interdisant tout contact physique entre l'unité sous test et les sondes de mesure.

- Isolation électrique entre le processus et l'instrumentation : les matériels délicats sont protégés des risques électriques résultant de différences de potentiel.

- Grande fiabilité : possibilité de fonctionner à hautes températures, bonne résistance aux rayonnements nucléaires ainsi qu'à l'impulsion électromagnétique qui serait due à une explosion nucléaire.

- La combinaison de la fiabilité et de la tenue à l'environnement justifie l'emploi du capteur à fibres optiques dans le domaine militaire.

- Capacité de multiplexer les signaux dans un petit volume autorisant la mise en œuvre d'une technologie redondante : elle constitue un autre attrait pour certaines applications militaires critiques.
- Sécurité intrinsèque généralement assurée par le faible niveau d'énergie lumineuse mise en jeu dans les capteurs à fibres optiques.
- Bonne adaptation à toute mesure à distance: le capteur à fibres optiques se prête à la télétransmission pour le contrôle des processus industriels mettant en œuvre des matières toxiques ou dangereuses ou encore des mesures par des moyens optiques (colorimétrie, réfractomètre, spectrophotométrie).
- Capacité d'effectuer des mesures au moyen de capteurs répartis sur toute la longueur d'une même fibre optique: le développement des réseaux de communication de terrain ouvre la voie à l'exploitation cohérente de réseaux de capteurs chargés de la saisie de données dans les processus industriels.
- Possibilité de fabriquer des capteurs à usage unique (capteurs à jeter) avec un bon rapport performances/prix : les capteurs à fibres optiques acquièrent une position intéressante dans le domaine médical.

II-5-6- Différents types de capteurs à fibres optiques :

II-5-6-1- Architecture des capteurs :

L'architecture d'un capteur à fibres optiques comporte les sous-ensembles suivants:

— un émetteur de lumière, constitué d'une ou de plusieurs sources lumineuses monochromatiques, cohérentes ou non, continues ou pulsionnelles : les sources les plus employées sont les diodes électroluminescentes, les diodes lasers et les diodes super luminescentes.

— un guide d'onde optique : la fibre optique (monomode ou multi mode) qui peut être soit standard (mode) qui peut être soit standard effectuer une mesure dans un contexte particulier, ou un guide d'onde intégré sur un substrat en semi-conducteur. Des équipements annexes (coupleurs et connecteurs optiques) doivent lui être adjoints.

— un élément sensible à la grandeur physique à mesurer : c'est le transducteur qui donne la correspondance entre la valeur de cette grandeur et la valeur prise par l'une des grandeurs caractéristiques de la lumière.

— éventuellement, des fonctions complémentaires de modulation de lumière, de polarisation...

— un récepteur de lumière : photodiode(s) suivie(s) d'un étage électronique d'amplification.

— un démodulateur, chargé d'extraire les informations sur la grandeur mesurée.

— des circuits d'alimentation en énergie.

II-5-6-2- Conception d'un système de mesure à fibres optiques :

Les fibres optiques utilisées éventuellement dans le sous-système de transmission ne doivent pas introduire de perturbations au signal véhiculé.

En revanche, les fibres optiques de l'élément sensible (le modulateur) offrent nécessairement la sensibilité maximale aux variations de la grandeur mesurée. Certains auteurs suggèrent d'employer une fibre sensible de forte atténuation, afin d'augmenter la sensibilité du capteur et d'améliorer sa résolution spatiale.

- Ce sont les propriétés mécaniques et thermiques de la gaine qui déterminent les diverses fonctions des fibres optiques : selon les caractéristiques thermomécaniques

du matériau constitutif de cette gaine, principalement son module d'Young et son coefficient de Poisson, la fibre est plus ou moins bien protégée de l'extérieur.

II-5-7- Jauge optique :

L'utilisation des interféromètres a été étendue sous la forme d'une rosette comportant un bras de référence et trois bras de mesure orientés différemment (par exemple, -45° , 0° , $+45^\circ$) de façon à obtenir des informations sur l'évolution des sollicitations suivant ces directions particulières. Ce type de jauge optique pour la mesure de contraintes mécaniques a été utilisé pour détecter les dommages aux impacts sur une aile d'avion.

II-5-8- Montage optique :

Le plus simple pour la mesure du courant est de type polarimétrique : la polarisation de la lumière issue de la fibre plongée dans le champ magnétique est analysée par un système optique séparateur de polarisation. On a obtenu de la sorte des mesures d'intensité électrique entre 50 et 1 200 A à 0,24 % près, avec un rapport signal sur bruit de 85 dB à 1 000 A.

Toutefois, si cette technique d'analyse par polarimétrie donne satisfaction lorsque le milieu soumis à l'effet Faraday est un cristal de quelques centimètres, il n'en va pas de même pour les fibres monomodes pour lesquelles les imperfections intrinsèques limitent fortement la sensibilité de la mesure ; même si certains artifices comme la torsion de la fibre permettent de surmonter les défauts inhérents à ce milieu, l'importante sensibilité de la biréfringence aux perturbations extérieures (température, vibrations) provoque une dérive diminuant nettement les performances attendues d'un tel système.

II-5-9- Optique géométrique du microscope :

II-4-9-1- Schéma du microscope simplifié :

Le microscope simplifié (Figure 4-2) est constitué de l'objectif Ob et de l'oculaire Oc , assimilés à des lentilles minces convergentes, et des diaphragmes et respectivement pupille de sortie de l'objectif et diaphragme de champ de l'oculaire placés dans l'espace intermédiaire situé entre objectif et oculaire.

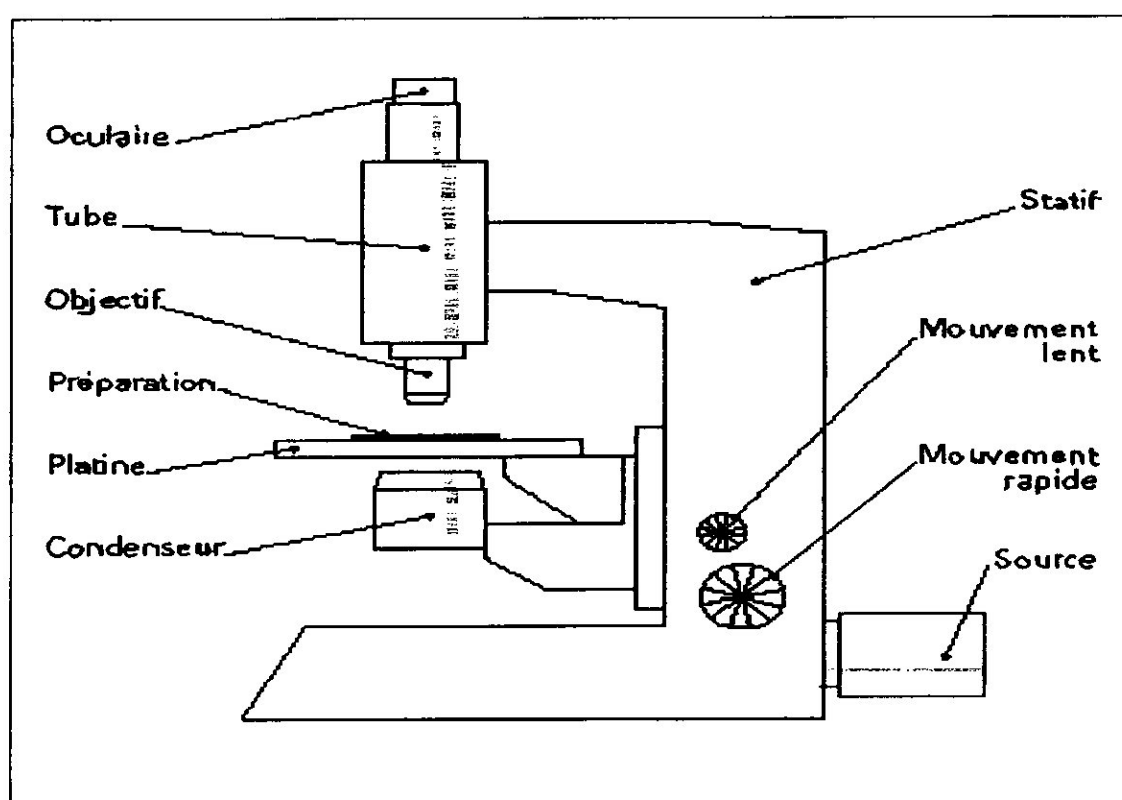


Figure 4-2 : Schéma descriptif d'un microscope.

L'objectif donne de l'objet une image réelle agrandie examinée par l'oculaire jouant le rôle de loupe. Pour que cet agrandissement soit suffisamment appréciable, l'objet AB doit être placé très près en avant du foyer objet F_{ob} de l'objectif.

Néanmoins pour limiter l'encombrement de l'instrument tant pour des raisons de stabilité que d'ergonomie (l'observateur doit placer l'œil derrière l'oculaire et

pouvoir déplacer manuellement l'objet sur la platine), ce grandissement nécessite que la distance focale de l'objectif soit la plus courte possible.

L'objet très proche de son foyer objet est donc à une distance de la lentille voisine de sa distance focale et, dans le cas réel, très proche de la face avant de l'objectif. La distance de l'objet au premier dioptré de l'objectif ou distance frontale est très faible.

Il limite le champ de pleine lumière et a aussi pour effet de supprimer la lumière parasite engendrée par la lumière diffusée par la partie de l'objet située hors de ses limites. [6], [7]

II-6- Les mesures optiques :

II-6-1- Les interférences :

Le laser résulte d'un principe vieux de soixante ans, formulé par Albert EINSTEIN : un atome, ou une molécule, peut être stimulé et libérer l'énergie qu'il contenait sous forme de rayonnement électromagnétique. Cet effet a donné naissance à deux types de dispositifs :

Le **MASER**, acronyme de (**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation), et :

Le **LASER**, acronyme de (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation).

Un processus découvert en 1950 par ALFRED KASTLER, le pompage optique, allait permettre de mettre au point lasers et masers à la fin des années 1950.

L'intérêt du laser est multiple : la lumière qu'il émet est intense, directionnelle, monochromatique et cohérente ; ce sont les trois premières de ces propriétés de ces propriétés qui ont ouvert aux lasers les portes des industries : soudage, découpage, perçage, ajustage grâce aux lasers de grande puissance :

télécommunications et traitement de l'information par lasers directionnels et traitement de l'information par lasers directionnels et monochromatiques. Les applications spatiales et militaires sont aussi fort importantes.

II-6-2- Les lasers :

C'est en 1960 que A. JAVAN, Jr, et D.R.HERRIOTT ont fait fonctionner le premier laser à gaz en excitant du néon : le laser était constitué par un tube long de 1m, rempli d'un mélange d'hélium et de néon à des pressions partielles de 0,9 et 0,1 torr. Le tube était fermé par deux miroirs plans à haut pouvoir de réflexion et présentant une légère transmission ; l'excitation du gaz était fournie par un générateur de signaux à haute fréquence (27 MHz).

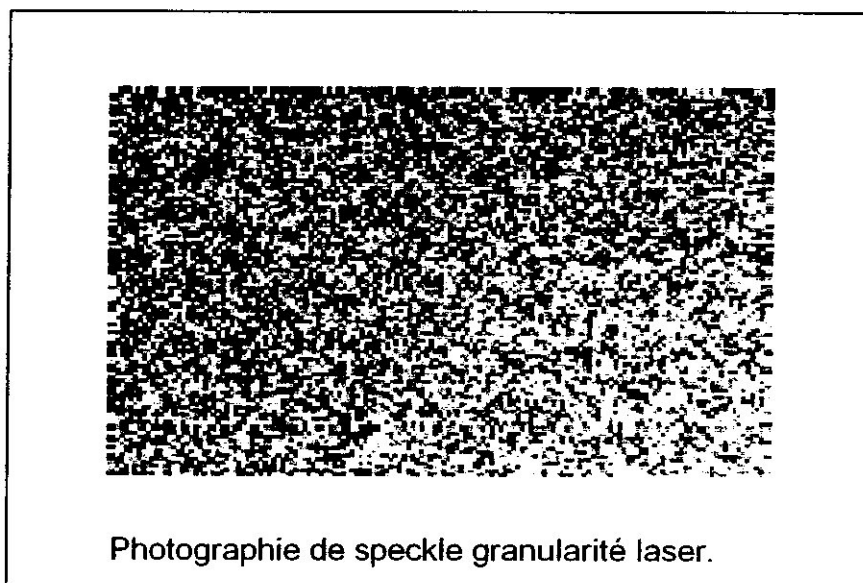


Figure 5-2 : Le laser.

Les laser à gaz ont peut évolué par rapport à ce schéma. D'ailleurs le laser à hélium néon est actuellement le laser le plus répandu : il est en effet devenu suffisamment fiable et bon marché pour être utilisé dans de nombreuses applications industrielles et commerciales : le prix de certains lasers est de quelques centaines de francs: la durée de vie des laser à hélium néon est estimée à 20000 heures. ces lasers trouvent d'ores et déjà des applications (grand public) : les premières caisses enregistreuses à laser sont apparues, le vidéodisque à laser fait l'objet de développement chez THOMSON-CSF et PHILIPS ; d'autres

applications en reprographie, en télécopie, en informatique...lui sont autant de marchés nouveaux. Les mesures et contrôles industriels se feront aussi par laser à hélium néon, de préférence aux autres laser.

II-6-3- L'interféromètre à laser :

L'interféromètre à laser est d'abord constitué d'un système générant une référence de fréquence : un miroir semi réfléchissant dévie partiellement le faisceau lumineux vers un analyseur qui transmet une lumière à polarisation linéaire dont le sens de polarisation tourne à une fréquence moitié de la différence des deux fréquences se trouve derrière l'analyseur et génère un signal électrique de fréquence $(f_1 - f_2)$: il est utilisé en signal de référence.

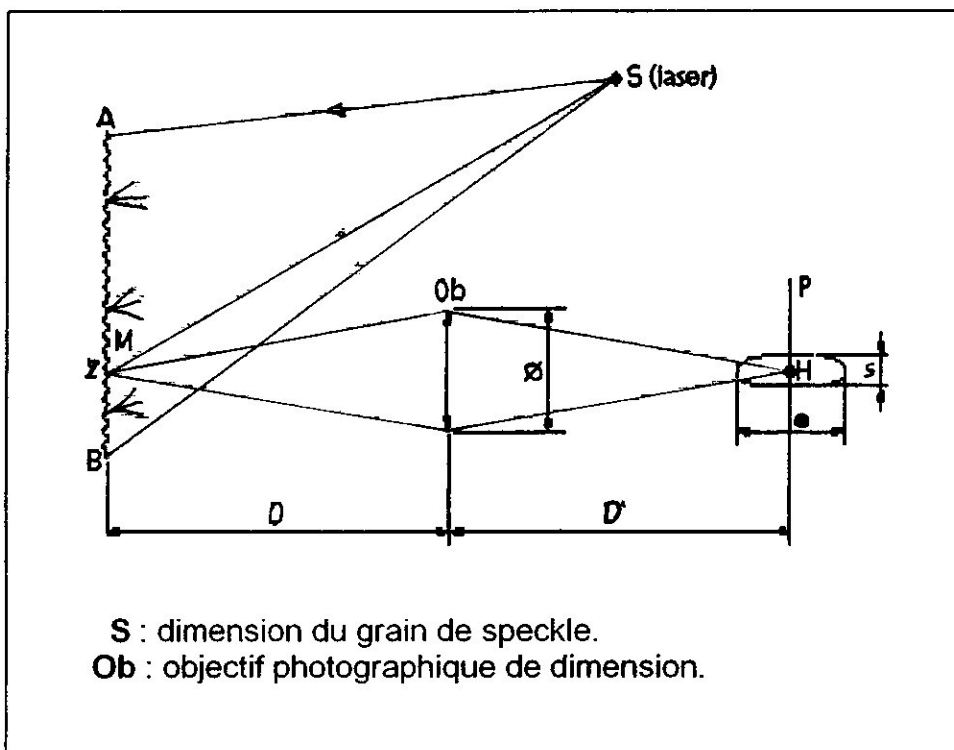


Figure II-6 : Application de speckle (Laser).

L'interféromètre proprement dit est souvent un interféromètre MICHELSON. Le faisceau non dévié par le miroir semi réfléchissant traverse une lame (quart d'onde) qui transforme chacune des deux composantes à polarisation circulaire en une onde à polarisation linéaire; les sens de polarisation des deux composantes sont maintenant perpendiculaires.

Celles-ci frappent un composantes équivalent au miroir semi réfléchissant (c'est un nicol) qui va séparer les deux composantes en deux faisceaux ayant des directions différentes : l'un servira de faisceau de référence, l'autre de faisceau de mesure. Chacun des faisceaux est réfléchi par un miroir et renvoyé vers le nicol.

Chacun des faisceaux est réfléchi par un miroir et renvoyé vers le nicol. Pour que celui-ci renvoie les deux composantes vers le photo détecteur de mesure, des lames quart d'onde sont placées sur les parcours des deux faisceaux, afin d'en modifier le sens de polarisation. Un analyseur génère un faisceau de fréquence égale à la fréquence de battement ($f_1 - f_2$): il est utilisé en signal de référence.

II-6-4- Le télémètre à laser :

Les mesures des distances importantes peuvent mettre à profit d'autres caractéristiques du faisceau laser que celles utilisées en interférométrie : par exemple, la très faible divergence du faisceau laser. L'énergie lumineuse ne se disperse pas, même lorsque les trajets optiques sont importants.

En télémétrie par laser, l'impulsion lumineuse émise par le laser se propage à la vitesse de 300000 Km/s; elle éclaire la cible sur laquelle elle a été dirigée. Une partie de la lumière diffusée par la cible revient vers le point de départ et est captée par une photo détectrice intégrée dans le télémètre.

Le dispositif récepteur est constitué d'un filtre interférentiel qui ne laisse passer qu'une faible bande de longueurs d'onde centrée sur la longueur d'onde émise par le laser, de façon à diminuer l'influence de la lumière ambiante, et d'un récepteur photoélectrique (tubephto-multiplicateur).

II-6-5- Spectrométrie par laser :

Les lasers ont profondément changé, d'abord dans les laboratoires, puis sur le marché de l'instrumentation, les données de certains problèmes spectrométriques.

Les lasers ne sont pas des sources beaucoup plus puissantes que les sources classiques, mais leur apport à la spectrométrie vient de propriétés essentielles de leur rayonnement : la cohérence spatiale qui confine la puissance du laser (entre quelques mW et quelques watts) dans une étendue de faisceau élémentaire égale à λ^2 , et la cohérence temporelle qui donne au rayonnement laser une finesse spectrale inégalée.

Ces propriétés permettent de faire avec les lasers des études spectrométriques à très grand pouvoir de résolution, et avec une excellente sélectivité spatiale.

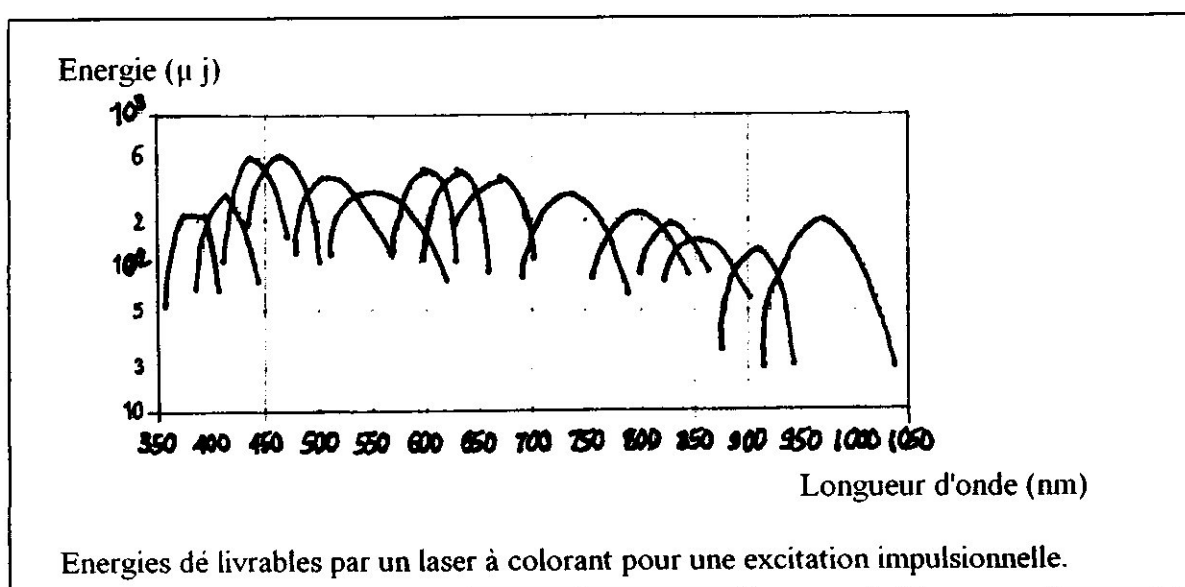


Figure 7-2 : diagramme d'énergie de la laser par à port à longueur.

IL n'est pas question dans ce paragraphe de décrire toutes les techniques de spectrométrie mises en œuvre grâce au laser et nous renvoyons le lecteur à des articles plus spécialisés pour ce qui concerne les différents domaines : spectrométrie de fluorescence, d'absorption par laser accordable, spectrométrie de haute résolution par absorption à deux photons, par absorption saturée, spectrométrie Raman et ses applications à l'imagerie spectrale, spectrométrie

Raman cohérente DRASC (Diffusion Raman Anti Stokes cohérente ou CARS, Cohérent Anti Stokes Raman Scattering), spectrométrie hétérodyne.

Les lasers à colorants couvrent une grande partie du spectre visible mais nécessitent l'emploi de nombreux colorants, chacun couvrant un domaine allant de quelques dizaines à une centaine de nm.

Les lasers à semi-conducteurs permettent de travailler avec de meilleurs rendements sur des intervalles plus larges, mais leur domaine est encore limité au proche infrarouge et à une étroite bande du visible.

Les développements sont toutefois très rapides (progrès en puissance, en élargissement du spectre, en nombre de matériels disponibles sur le marché).

II-6-6- L'avantage de spectrométrie à laser :

L'avantage fondamental du rayonnement laser en spectrométrie d'absorption est sa très grande finesse spectrale.

La largeur spectrale des radiations en émission ou en absorption classiques est essentiellement déterminée par l'agitation thermique des atomes et des molécules qui émettent ou absorbent le rayonnement.

L'effet Doppler Fizeau, qui est associé à cette agitation, donne une limite inférieure à la limite de résolution accessible avec les sources classiques.

Cette largeur va de quelques centaines de MHz, avec des atomes de krypton refroidis à 63 K, jusqu'à plusieurs GHz pour des molécules légères à la température ordinaire. Il résulte de la finesse spectrale d'un rayonnement laser que seuls les atomes et les molécules qui voient la bonne fréquence par effet Doppler Fizeau entrent en résonance et absorbent l'énergie électromagnétique.

L'absorption a donc lieu pour des classes de vitesses des atomes et des molécules qui ont tous la même composante de vitesse dans la direction de propagation de la lumière.

Cette sélection des vitesses permet d'atteindre la largeur naturelle des résonances atomiques ou moléculaires, et de réaliser des études de structure hyperfines ou de déplacements isotopiques avec une limite de résolution très inférieure à la largeur Doppler.

II-7- Le laser n'est pas toujours indispensable :

Bien entendu, le laser n'est nullement indispensable à toutes les mesures optiques dimensionnelles. Comme indiqué précédemment la mesure d'angles de rotation peut très bien être réalisée au moyen d'un disque codé fixé par une succession de trous dans le disque ou de marques gravées ou imprimées sur sa surface.

Celle-ci est éclairée par une diode électroluminescente : un photo détecteur capte alors la lumière traversant le disque ou diffusée (ou réfléchi) par les marques.

La précision de la mesure dépend essentiellement du pas de perçage ou de gravure du disque.



CHAPITRE III

CHAPITRE III

MÉTROLOGIE DES SURFACES DES PIÈCES :

III-1- Contrôle des surfaces:

La surface d'un solide est un domaine à deux dimensions où se situent les interactions du solide avec le monde extérieur. La physique des surfaces a beaucoup progressé en cette deuxième moitié du vingtième siècle, et de nombreux domaines d'activités industrielles sont directement concernés par cette discipline. C'est à la surface d'un solide que se produisent les réactions chimiques qui la font évoluer et que se manifestent les phénomènes de frottements, d'usure, des adsorptions de contaminants divers.

Depuis la métrologie des masses jusqu'au fonctionnement des paliers, depuis les états rectifiés des surfaces mécaniques jusqu'au super poli des surfaces optiques, la métrologie des surfaces joue un rôle essentiel dans le contrôle de composants mécaniques, optiques ou électroniques.

C'est pourquoi l'expérience est essentielle pour pouvoir déduire des observations la réponse à la question : la surface remplira-t-elle correctement ses fonctions ?

Dans la plupart des normes qui traitent des surfaces, l'examen visuel et tactile est souvent la première cité. Quoique qualitatif, il représente souvent une synthèse de paramètres difficilement quantifiables par d'autres moyens : texture, teinte, aspects en lumières diverses, sensations mécaniques et thermiques.

Comme pour un médecin qui sait voir dans une radiographie ou un scanner les éléments qui lui permettront de déterminer son diagnostic, l'expérience seule permet à un ingénieur ou à un technicien de tirer des images directes ou indirectes

mises à notre disposition par l'instrumentation moderne, les conclusions sur la conformité de la surface à un cahier des charges particulier. Nous analyserons dans cet article diverses méthodes qui permettent de caractériser les surfaces par leurs propriétés géométriques macroscopiques (forme : rectitude, planéité ou circularité), et microscopiques (rugosité). [7]

III-2- États de surface et écarts de forme :

Pour caractériser la géométrie d'une surface, on s'intéressera aux variations de la cote $z(x, y)$ localement normale à la surface moyenne en fonction des paramètres x et y de position sur la surface, à différentes échelles.

À l'échelle de la globalité de la pièce, on s'intéresse aux écarts de la surface moyenne par rapport à une surface idéale de forme simple : plan, sphère, cylindre ou cône par exemple.

Dans cette étude des écarts de forme, on fera abstraction de la rugosité en définissant une surface moyenne locale.

À une échelle microscopique (quelques micromètres ou quelques dizaines de micromètres en x et y), il s'agira de ce que l'on appelle la rugosité, que l'on n'étudiera généralement pas sur toute la surface, mais sur quelques échantillons judicieusement distribués.

Cela pourra être un élément de surface dont on donnera une image à deux dimensions ou une ligne analysée suivant une dimension. On voit là une difficulté fondamentale dans l'étude des périodes des défauts pris en compte. Les écarts à une surface simple idéale sont variables suivant que l'on prend ou non en compte des défauts de période spatiale particulière.

On appellera écarts de forme les écarts de la surface réelle localement lissée, par rapport à la surface idéale.

On appellera rugosité les écarts par rapport à une surface lisse mais qui suit les écarts de forme de la surface réelle. Et entre les défauts de rugosité qui ne prennent en compte que les défauts de courtes périodes spatiales, et les écarts de forme qui ne prennent en compte que les défauts de grandes périodes spatiales, c'est-à-dire de petites fréquences spatiales, on distingue ce que l'on appelle l'ondulation (en anglais « waviness ») qui rassemble les défauts dont les périodes spatiales sont comprises entre quelques centaines de micromètres et quelques millimètres.

Rugosité et ondulation traduisent ce que l'on appelle l'état de surface.

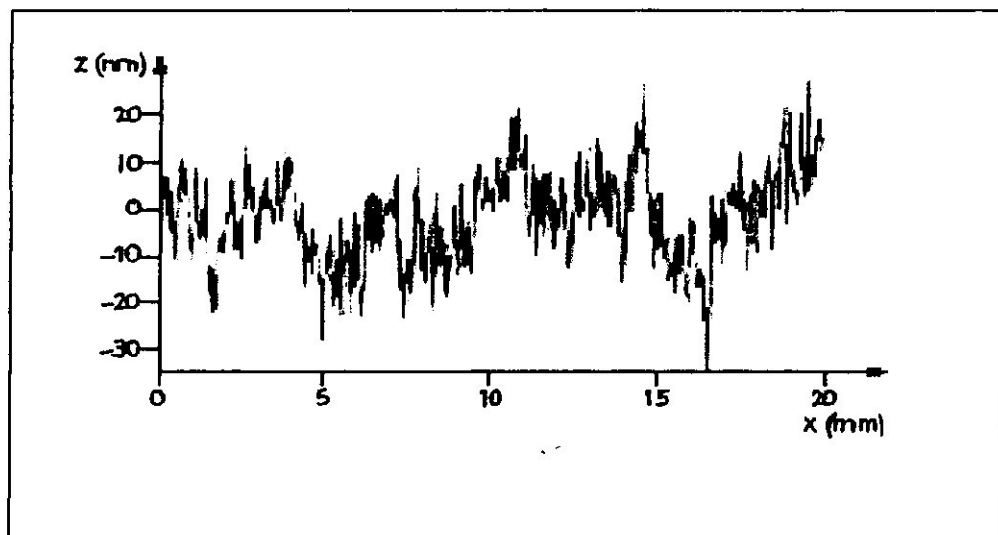


Figure 1-3 : profil de surface.

On trouve le profil de surface enregistré par palpeur mécanique suivant une ligne droite. Les écarts de forme par rapport à une droite sont donnés par l'enregistrement de la (Figure 2-3).

On y a supprimé toutes les fréquences spatiales supérieures à $0,5 \text{ mm}^{-1}$, c'est-à-dire toutes les périodes spatiales inférieures à 2 mm.

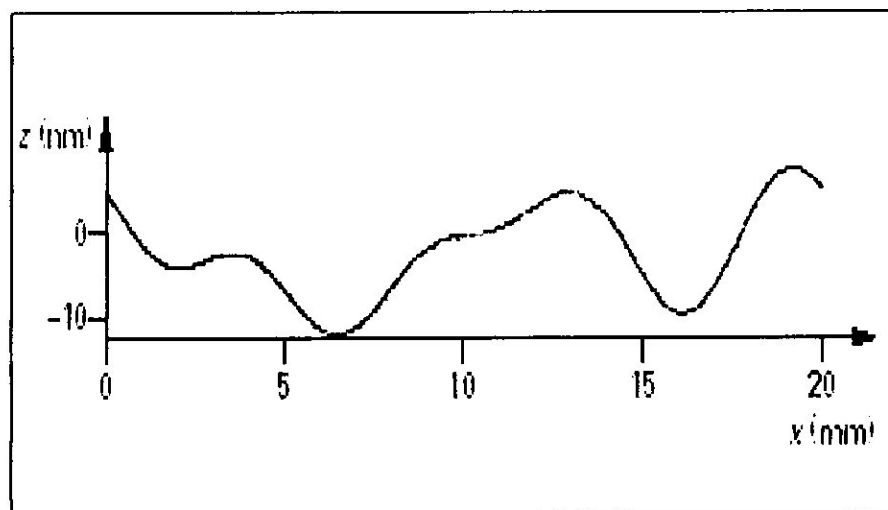


Figure 2-3 : écarts de forme

L'enregistrement de la (Figure 2-3) est au contraire celui d'où l'on a éliminé toutes les variations dont la fréquence spatiale est inférieure à 3 mm^{-1} , c'est-à-dire toutes les périodes spatiales plus grandes que 333 mm . Il met en évidence la rugosité de la surface.

L'ondulation est la courbe donnée par la (Figure 3-3) du profil de surface d'où sont éliminés par un filtre passe-bande entre $0,5$ et 2 mm^{-1} les écarts de forme et la rugosité.

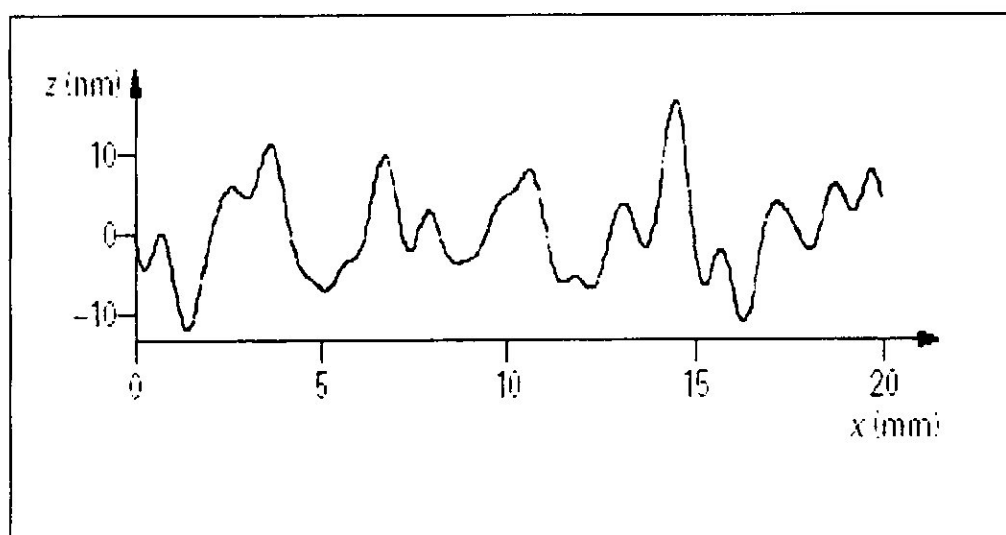


Figure 3-3 : ondulation.

Ces périodes et ces fréquences spatiales ont été choisis ici arbitrairement. Les valeurs limites des fréquences spatiales sont susceptibles de changer en fonction des applications, mais le principe de ces filtrages est fondamental pour comprendre et caractériser un profil de surface. Nous faisons dans le paragraphe suivant quelques rappels sur ces notions, compliquées ici par le fait que nous sommes dans un monde à deux dimensions.

III-3- Fréquences spatiales à deux dimensions :

La notion de fréquences spatiales est très utile pour comprendre la structure géométrique d'une surface. Cette notion est compliquée par le fait que nous sommes à deux dimensions, et deux fréquences de même période peuvent différer par leur direction suivant la figure ci-dessus :

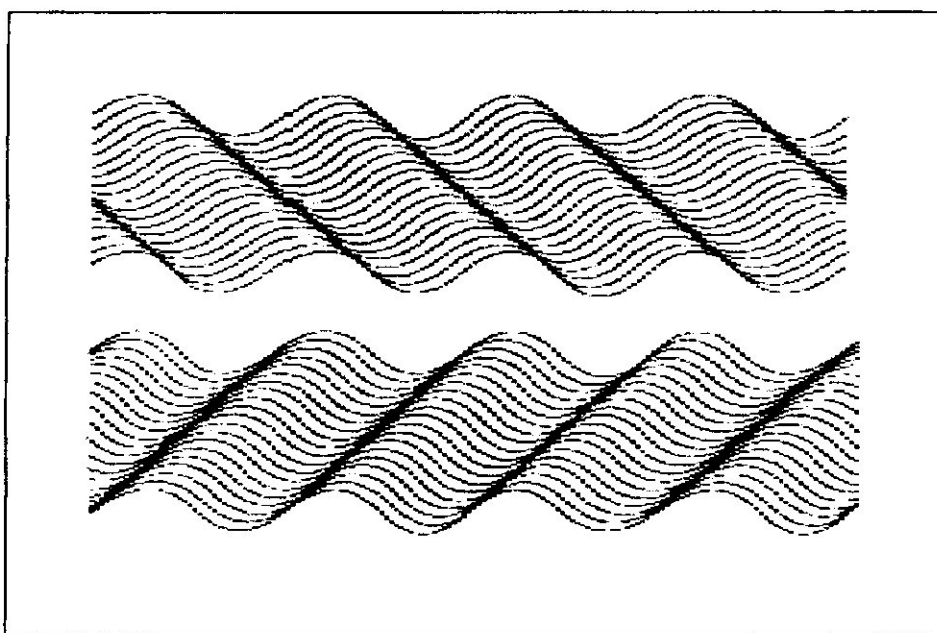


Figure 4-3 : Fréquences spatiales à deux dimensions.

La représentation d'une fonction à deux dimensions par son spectre est moins intuitive que celle d'un signal temporel, mais le formalisme mathématique de la transformation de Fourier est tout à fait comparable.

Les notions de fonction d'auto corrélation et de densité spectrale de puissance, bien connues pour les signaux temporels à une dimension, sont

directement transposables à la caractérisation géométrique d'une surface à deux dimensions. Une description complète de la morphologie d'une surface passe donc par la densité spectrale de puissance de ses écarts à la surface idéale, qui est donnée par la transformée de Fourier de sa fonction d'auto corrélation.

Nous verrons une méthode d'analyse des états de surface par diffusion de la lumière qui, dans certaines conditions, donne directement la densité spectrale de puissance des rugosités dans un domaine bien défini de fréquences spatiales.

Les exemples donnés sur la (Figure 1-3) sont obtenus par filtrage numérique, c'est-à-dire que les fonctions de transfert sont connues exactement. Les signaux enregistrés dans la pratique sont traités par des filtres analogiques, mécaniques ou électriques, et n'existent pas si le processus de lecture n'est pas linéaire. C'est bien plus que l'étalonnage des capteurs utilisés pour mesurer les très petits écarts $z(x, y)$, la raison essentielle des désaccords dans les comparaisons sur les états de surface et les écarts de forme. [5], [7], [8]

III-4- Écarts de forme :

Deux types de formes sont essentiellement contrôlés en optique et en mécanique : les plans d'une part, les sphères et les cylindres de révolution ou tampons et bagues d'autre part. Ces formes donnent lieu à deux types de mesures : les mesures de rectitude et de planéité d'une part, les mesures de circularité d'autre part.

Les tampons et les bagues lisses utilisés comme références en mécanique donnent lieu à des mesures de circularité autour de leur axe et à des mesures de rectitude le long de leurs génératrices.

III-4-1- Contrôles de circularité :

Les contrôles de circularité sont indispensables pour les pièces mécaniques à symétrie de révolution, en particulier pour les bagues et les tampons étalons, dont on ne mesure que quelques diamètres.

La mesure de ces diamètres jointe à une étude des défauts de circularité donne une connaissance beaucoup plus complète de ces étalons.

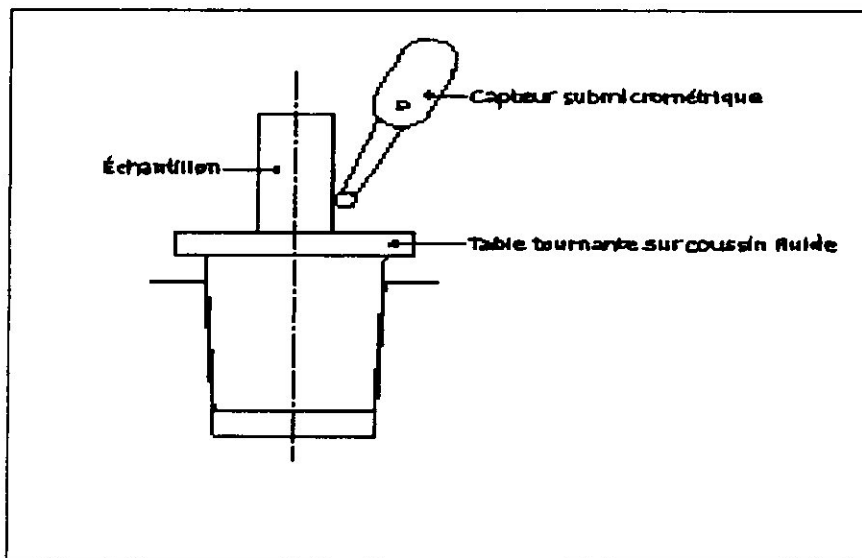


Figure 5-3 : Machine pour contrôle de circularité.

Dans une mesure de circularité, on fait tourner la pièce ou un palpeur de grande sensibilité autour d'un de ses axes de révolution, et on vérifie avec le palpeur que la cote étudiée reste constante (Figure 5-3). Les palpeurs ont une sensibilité de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, mais une dynamique généralement restreinte (quelques dizaines ou centaines de micromètres). Une des difficultés de ce type de contrôle est d'assurer la coaxialité de l'axe de rotation de la machine avec l'axe de révolution de la pièce.

C'est une sphère de silice qui permet de déceler les défauts de rotation des machines de contrôle. En faisant tourner la pièce par rapport à la machine, ce contrôle permet de corriger ces défauts, avec une précision limitée par la répétitivité de la mise en place de la pièce sur la machine et par les fluctuations des défauts de rotation de la machine. Ceux-ci se combineront au hasard avec

les défauts de circularité des pièces étudiées, tantôt en s'y ajoutant, tantôt en bien s'en retranchant, ce qui se traduit en moyenne par une addition quadratique des défauts de circularité de la pièce étudiée et des défauts de rotation de la machine de contrôle.

Prenant en compte les défauts des machines, ceux des sphères étalons, et l'étalonnage des palpeurs, le contrôle des défauts de circularité des pièces mécaniques s'effectue avec des incertitudes de l'ordre de quelques dixièmes de micromètre sur des diamètres allant jusqu'à quelques centaines de millimètres.

Le résultat d'une mesure de circularité apparaît généralement sur un enregistrement graphique qui n'est pas toujours facile à interpréter dans la figure suivant :

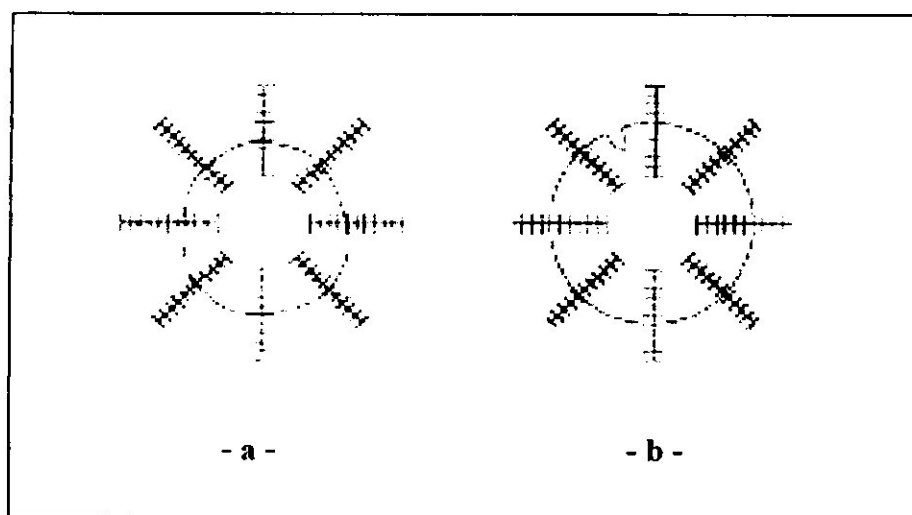


Figure 6-3 : Enregistrements sur une machine de contrôle des défauts de circularité.

En effet le rayon de la pièce est soustrait pour ne faire apparaître que les variations de rayon avec une sensibilité suffisante. Pour étalonner le capteur, on fait parfois usage d'un cylindre à méplat, qui engendre un défaut d'amplitude connue. Sur la (Figure 6-3) on voit ainsi l'enregistrement d'une pièce avec ses défauts (Figure 6-a-3) et celui d'un cylindre méplate présentant un méplat de 0,25 mm. À cause de l'amplification d'échelle sur la mesure du défaut, l'allure du méplat n'a

rien à voir avec son aspect réel (Figure 6-b-3). Sur les instruments actuels, l'enregistrement graphique est accompagné d'un traitement numérique des données qui permet de déterminer les cercles inscrits et exinscrits d'où seront extraits les paramètres caractérisant les écarts de circularité.

IL est à noter que dandéfauts de courte période spatiale comme les rayures ou les poussières pose les mêmes problèmes que pour distinguer la rugosité, les ondulations et les écarts de rectitude. C'est un filtrage exprimé ici en nombre d'ondulations par tour qui permettra de comparer différents contrôles de circularité.

III-4-2- Contrôles de rectitude :

Les défauts de rectitude sont également étudiés par palpeur avec une machine qui définit elle-même une translation rectiligne pour le palpeur. Mais ici nous allons voir que les défauts de la machine peuvent être déterminés et corrigés, et cela sans même qu'il soit nécessaire de disposer d'une référence de rectitude.

En effet supposons que la translation du palpeur sur la longueur L de la pièce à contrôler soit entachée d'un défaut $z_0(x)$ en fonction du déplacement de longueur variant de (0) à L. La pièce est elle-même entachée d'un défaut de rectitude caractérisé par un écart $z_1(x)$.

- Le défaut mesuré par la machine sur la pièce sera la somme $z_0(x) + z_1(x)$ et sera enregistré sous la forme d'un signal $s_1(x)$.

- Si nous effectuons sur la même pièce la même mesure de rectitude après retournement du palpeur et de la pièce par rapport à la machine, sans toucher au dispositif de translation, on s'aperçoit que les défauts de la machine jouent en sens inverse, c'est-à-dire avec la même valeur mais avec le signe contraire, sur les défauts de la pièce (Figure 7-3).

On enregistre un deuxième signal $s_2(x)$ qui est cette fois la différence

$$z_0(x) - z_1(x).$$

De ces deux mesures on voit que l'on extrait, indépendamment de toute référence de rectitude, les valeurs du défaut $z_0(x)$ de la machine et du défaut $z_1(x)$ de la pièce étudiée :

IL restera comme incertitude sur l'évaluation du défaut de rectitude de la pièce l'incertitude due aux défauts de justesse du palpeur, aux incertitudes sur la mesure de x et aux défauts de répétitivité de la machine.

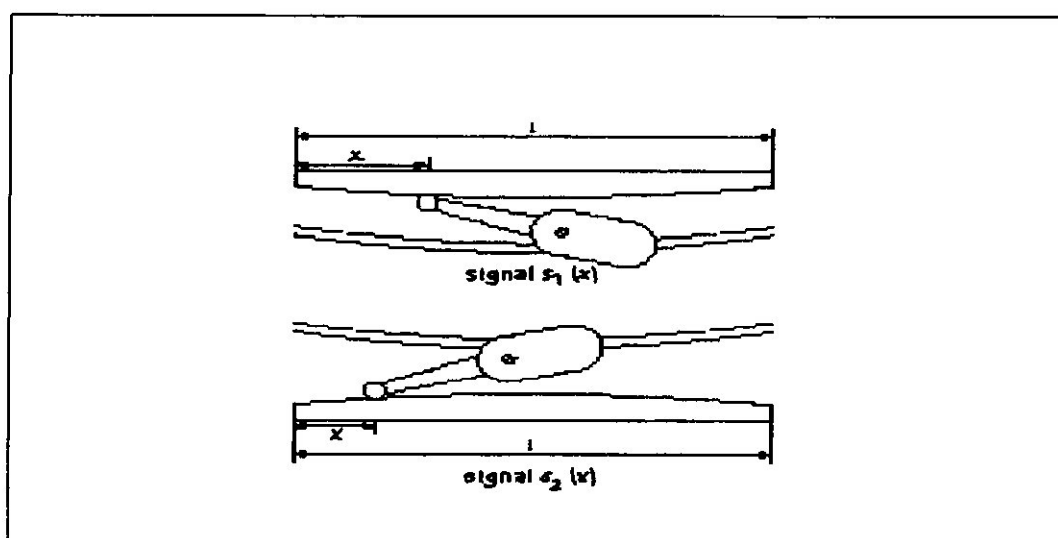


Figure 7-3 : Auto étalonnage des défauts de rectitude d'une machine par retournement de la pièce étudiée

Toutefois, cette méthode ne permet pas de corriger la flexion de la pièce qui change de signe lorsque la pièce est retournée.

Cette flexion sera minimisée par un support adapté à la longueur étudiée, ou par une répartition uniforme de la force d'appui. Elle pourra éventuellement être corrigée par le calcul, si l'on connaît les paramètres mécaniques du matériau.

III-4-2-1- Méthode optique par lunette autocollimatrice :

Une technique très puissante pour évaluer les défauts de rectitude d'un banc ou d'une glissière met en jeu une lunette autocollimatrice qui forme à l'infini l'image

d'un objet ponctuel (croisée de fils) que l'on observe avec la même lunette par réflexion sur un miroir plan dont le support se déplace sur le banc ou la glissière.

Les variations de pente locale du banc ou de la glissière sont ainsi détectées avec une sensibilité qui ne dépend que du diamètre du faisceau et de la longueur d'onde de la lumière.

C'est la diffraction de la lumière par l'objectif de la lunette (ou par le miroir si celui-ci ne couvre pas l'objectif) qui impose une limite fondamentale à la sensibilité de la mesure :

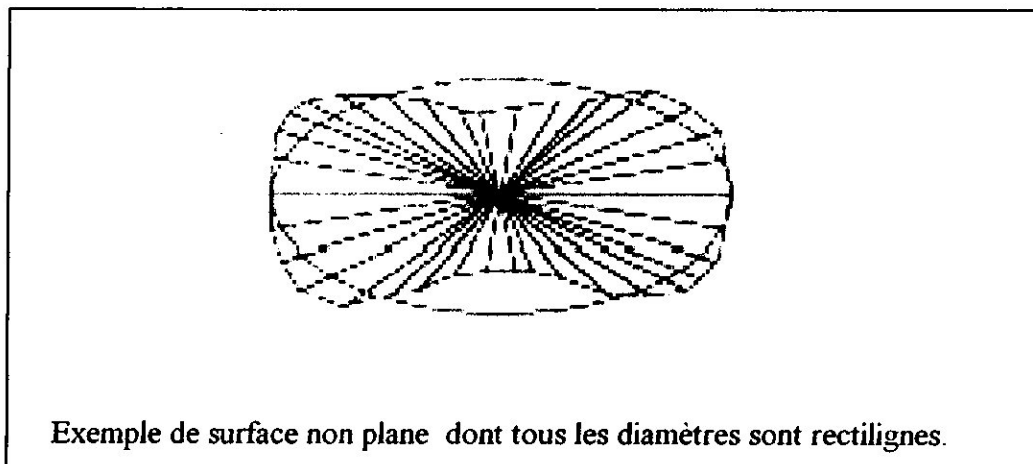
— un miroir rectangulaire de hauteur D uniformément éclairé par un faisceau lumineux de longueur d'onde moyenne λ donne une tache de diffraction dont la largeur angulaire à mi-hauteur est à peu près égale à λ / D .

— un miroir de section circulaire de diamètre D , éclairé par un faisceau lumineux de longueur d'onde moyenne λ donne une tache de diffraction dont la largeur angulaire à mi-hauteur est à peu près égale à $1,22 \lambda / D$.

Ces largeurs sont la distance entre le maximum de la tache de diffraction et le premier zéro, c'est à peu près le diamètre de la tache lumineuse à la moitié de son intensité maximale. Un diamètre de 50 mm dans le jaune donne une largeur angulaire égale à 5.10^{-5} rad, soit $10''$, que l'on peut pointer assez facilement au dixième de sa largeur ($1''$) par pointé visuel, plus difficilement au centième de cette largeur avec une lunette équipée d'un détecteur d'image (barrette ou matrice de diodes).

III-4-2-2- Mesure de rectitude par interférométrie laser :

Sur le même principe que la lunette autocollimatrice , mais avec une sensibilité un peu meilleure, l'interférométrie à laser permet de mesurer le basculement d'un ensemble de deux coins de cube dont les sommets sont distants de D .



Exemple de surface non plane dont tous les diamètres sont rectilignes.

Figure 9-3 : Planéité et rectitude.

Pour contrôler la planéité d'un marbre, plusieurs techniques s'appuient sur des mesures multiples de rectitudes.

On peut mesurer les défauts de rectitude sur les quatre côtés, les deux diagonales et les deux médianes suivant le schéma de ce que l'on appelle le drapeau britannique ou « l'Union Jack » (Figure 10-a-3).

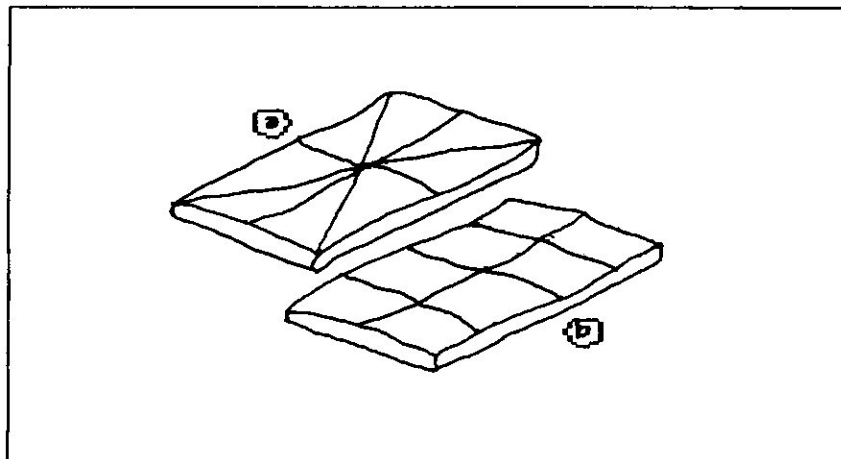


Figure III-10 : Écarts de planéité d'un marbre à partir de mesures d'écart de rectitude

D'autres préfèrent tracer un quadrillage dont la maille est plus ou moins serrée (Figure 10-a-3). D'autres encore préfèrent une maille à 60° constituée par une série de triangles équilatéraux suivant la figure ci-dessus:

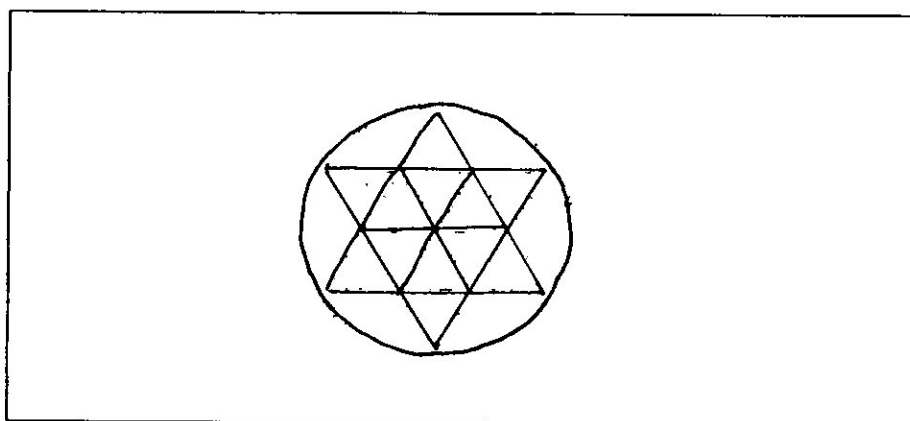


Figure 11-3 : Écarts de planéité d'un marbre ou d'un miroir par maillage triangulaire des écarts de rectitude.

La mesure sera d'autant meilleure que les lignes sont nombreuses et se recourent, introduisant une redondance dans l'information et la possibilité d'évaluer les erreurs de mesures par un résidu lorsque plusieurs évaluations sont possibles d'un défaut en un même point du marbre. Il ne faut pas oublier que, dans la mesure d'une rectitude, deux paramètres restent indéterminés qui sont la hauteur moyenne et la pente moyenne sur chaque ligne balayée. [1], [5]

III-4-3- Contrôles de surfaces optiques par la lumière :

L'optique est une discipline à la fois très exigeante sur la géométrie des surfaces, et bien pourvue en moyens très divers pour le contrôle de ces surfaces.

Le plus simple des contrôles est le test de Foucault sur une surface sphérique qui, sans donner la valeur de son rayon de courbure, détecte les écarts de forme par rapport à une sphère parfaite à l'aide d'un simple trou et d'un couteau. Un faisceau de lumière est concentré sur un trou dont le diamètre, inférieur à ce qui peut être résolu par le miroir, donne une surface d'onde incidente sphérique parfaite. On observe l'image de retour formée sur le point source après avoir dévié la lumière par une lame semi réfléchissante, seul élément susceptible de détériorer les surfaces d'onde, mais qui est de faibles dimensions et de peu de conséquences sur le faisceau si on la place à proximité du point de focalisation.

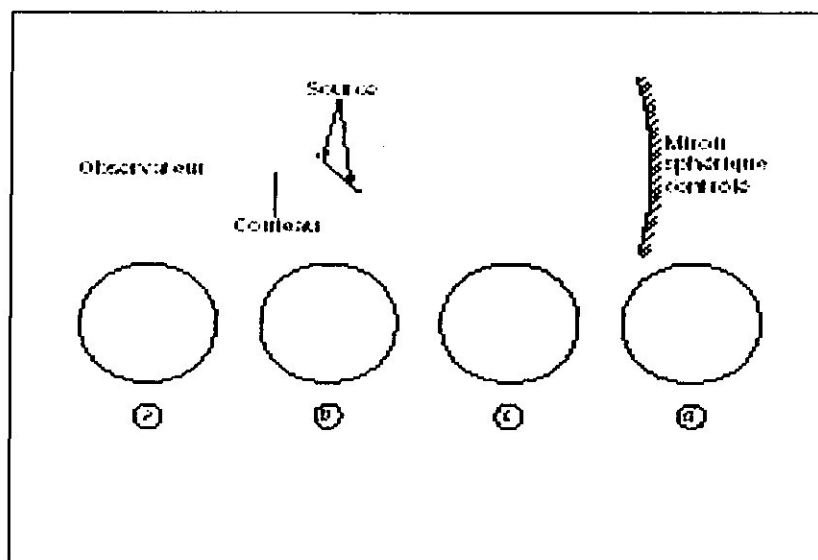


Figure 12-3 : Test de Foucault.

Un couteau coupe latéralement le faisceau au voisinage de son point de focalisation : si le couteau est placé après le point de focalisation (sens de propagation de la lumière), on voit une ombre se déplacer dans le champ dans le sens inverse du déplacement du couteau (Figure 12-a-3) ; si le couteau est placé avant le point de focalisation, on observe une ombre qui se déplace dans le champ dans le même sens que le couteau (Figure 12-c-3). Si le couteau est au point de focalisation et si le miroir est une sphère parfaite, on voit le champ s'éteindre uniformément (Figure 12-b-3). Les opticiens savent reconnaître les principaux défauts d'une surface sphérique aux aspects pris par le champ de lumière au voisinage de l'extinction. La (Figure 12-d-3) donne l'exemple d'une aberration sphérique correspondant à un rayon de courbure qui augmente sur les bords du miroir.

III-4-4- Contrôle de surfaces optiques par interférométrie :

L'interférométrie est un moyen puissant d'étude des surfaces optiques par comparaison à une surface de référence. L'interféromètre de Michelson a été modifié par Twyman et Green (Figure 13-3) pour étudier les surfaces planes et sphériques avec une sensibilité égale à quelques fractions de longueurs d'onde.

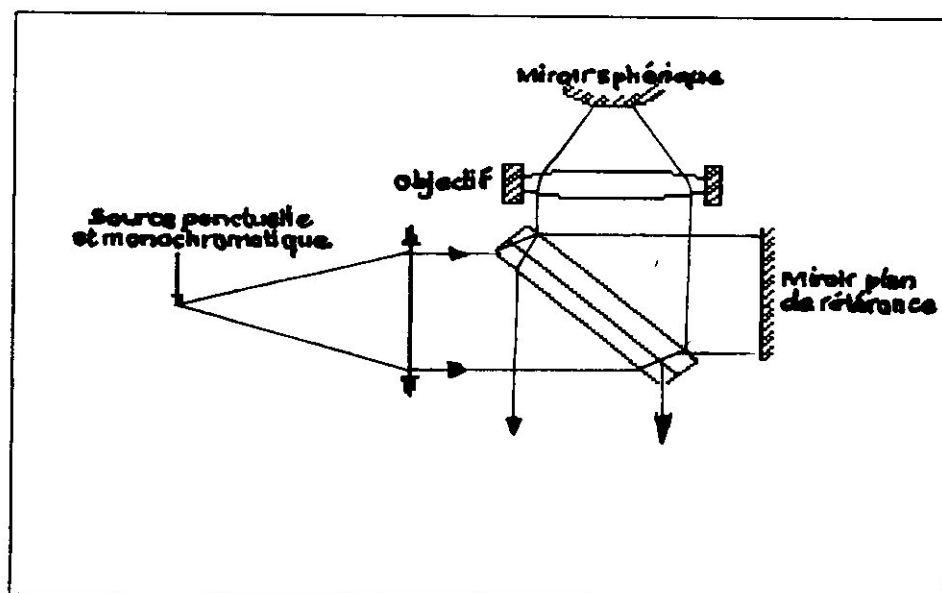


Figure 13-3 : Interféromètre de Twyman et Green pour contrôler la forme des surfaces d'onde.

On trouvera une illustration très spectaculaire de ces techniques dans la référence bibliographique [1] où sont photographiés plusieurs systèmes de franges d'interférences donnés par les aberrations les plus classiques de l'optique : aberration sphérique, astigmatisme, coma.

III-4-5- Contrôle des plans optiques par l'interféromètre de Fizeau :

Pour l'étude des surfaces planes, l'interféromètre de Fizeau (Figure 14-3) est particulièrement bien adapté parce qu'il réduit considérablement l'influence des turbulences atmosphériques en mettant la surface de référence et la surface étudiée très proches l'une de l'autre. Nous décrivons le montage en activité depuis plusieurs dizaines d'années à l'Institut d'Optique qui, bien que fonctionnant toujours avec des prises de vues photographiques et dépouillement manuel des clichés, a été optimisé du point de vue interférométrique pour atteindre les meilleures exactitudes.

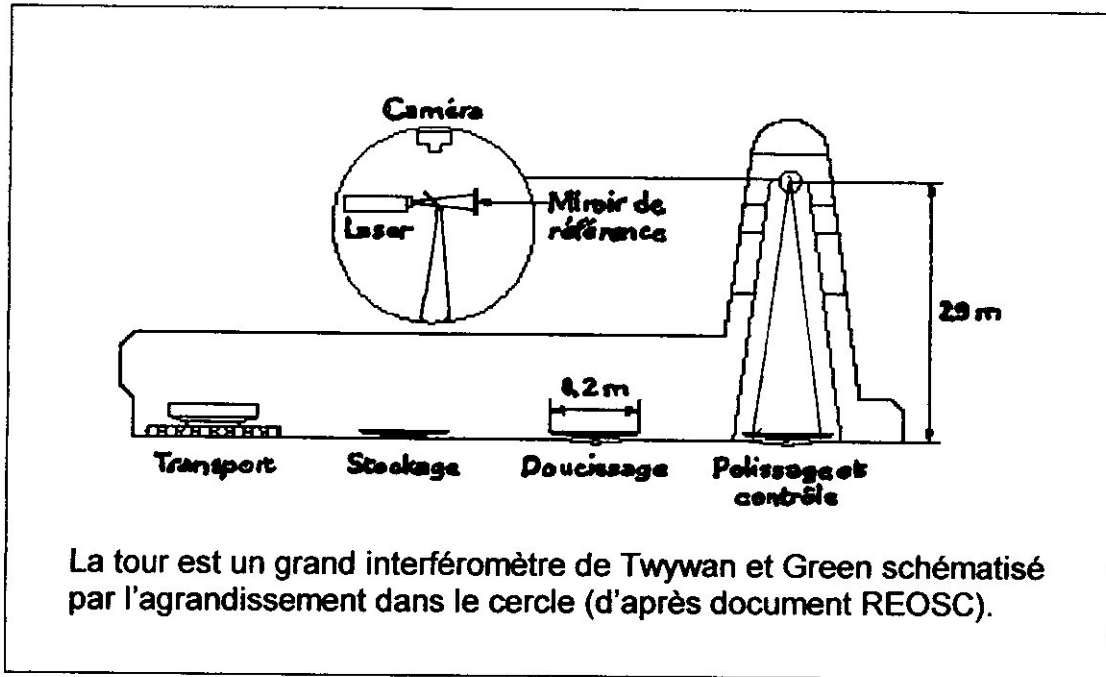


Figure 14-3 : Atelier de polissage et de contrôle des grands miroirs astronomiques.

Deux plans en silice se font face, avec un intervalle entre les plans aussi faibles que possible pour éviter toute instabilité et toute perturbation atmosphérique. L'intervalle de quelques dixièmes de millimètre est défini par des cales en papier taillées en biseau pour permettre un ajustement de la direction des franges et de leur espacement.

L'interféromètre est éclairé sous incidence normale par une lampe à vapeur de mercure en basse pression qui garantit la valeur de la longueur d'onde à quelques millièmes de nanomètre près.

Ce sont les écarts de rectitude de la frange sombre qui déterminent les défauts de rectitude de l'un des plans si l'on suppose que l'autre est parfait. Pour que l'exactitude de la mesure soit à la hauteur de la sensibilité, il faut être sûr que les franges sont bien localisées sur le miroir étudié et il faut limiter en conséquence les angles d'incidence admis par le diaphragme.

Le montage exige donc une excellente stabilisation thermique pour que les différences de marche ne varient pas sur cette période de plus de un centième de

frange. La surexposition de la pellicule permet un affinement artificiel des franges très utile pour un dépouillement visuel des interférogammes (Figure 14-3).

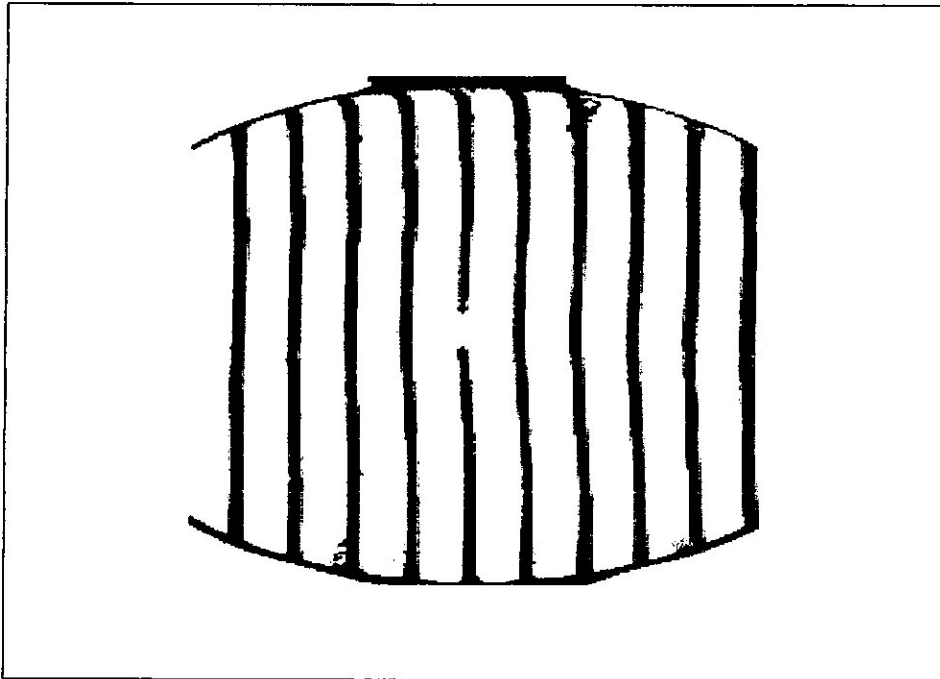


Figure 15-3 : Franges d'interférence à deux ondes données par l'interféromètre de Fizeau du laboratoire de métrologie de l'Institut d'Optique.

A cette échelle (le centième d'interfrange représente 3 nm sur les surfaces optiques), il faut tenir compte des déformations élastiques des miroirs soumis à la pesanteur.

On verra une différence entre un miroir supporté en trois points d'appui et fléchi sous l'effet de son poids (Figure 16-b-3) et un miroir uniformément soutenu sur toute sa surface (Figure 16-a-3). Pour être sûr qu'il n'est pas déformé dans cette dernière configuration, le miroir inférieur est supporté par huit couches de papier velours dont la souplesse permet d'admettre une uniformité de la pression exercée.

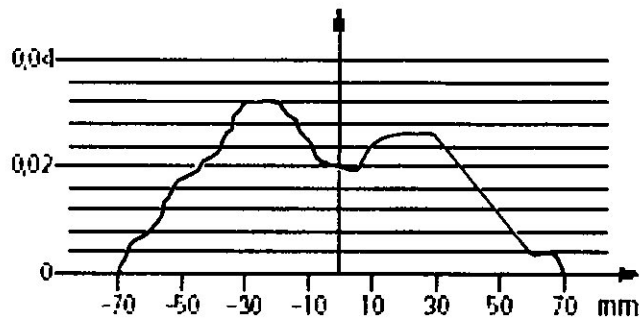


Figure 16-a : calibre non fléchi supporté uniformément sur toute sa surface.

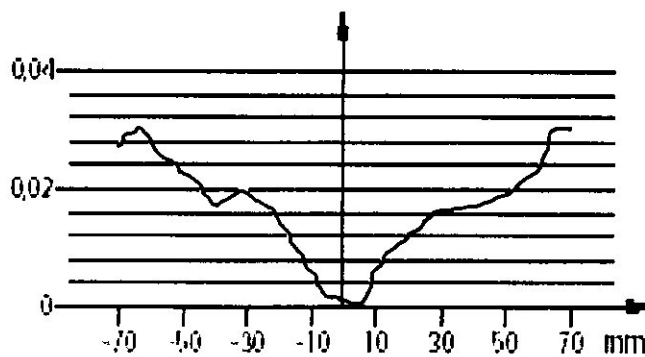


Figure 16-b : calibre fléchi supporté en trois points à 120°.

Figure 16-3 : Relevés sur un diamètre des écarts de rectitude d'un plan étalon du laboratoire de métrologie de l'Institut d'Optique.

III-5- Mesures de rectitude et de planéité indépendantes de la référence :

Comme pour les méthodes mécaniques, les défauts de rectitude de la pièce de référence peuvent aussi être compensés, mais la symétrie des rôles joués par les deux miroirs rend la manipulation un peu plus compliquée. En effet, on ne peut observer les franges d'interférence entre une surface et l'autre surface retournée, parce qu'il y aurait l'épaisseur de la lame entre les deux surfaces, ce qui dénaturerait complètement les franges d'interférence. Grâce à un ensemble de trois lames, nous allons pouvoir faire des interférences avec retournement de manière indirecte.

Supposons (Figure 17-3) trois miroirs dont les défauts algébriques de rectitude sur un diamètre particulier sont $z_1(x)$, $z_2(x)$ et $z_3(x)$. En plaçant le miroir 1 sur le miroir 2 on enregistre un signal, après dépouillement des franges, qui est égal à :

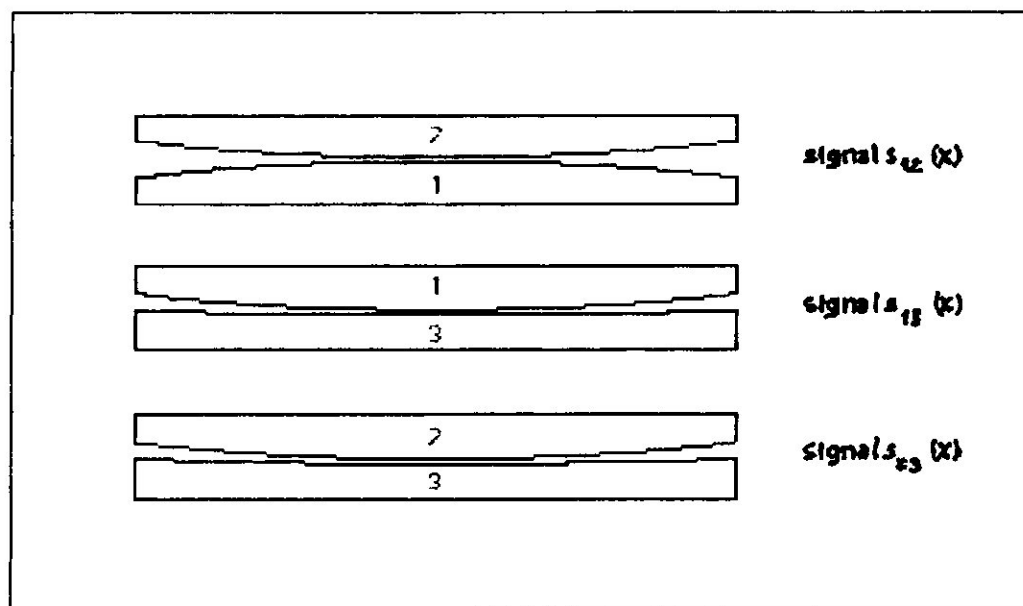
$$s_{12}(x) = z_1(x) + z_2(x).$$


Figure 17-3: Auto étalonnage des rectitudes des pièces optiques par la méthode des trois plans.

On étudie ensuite la déformation des franges entre le miroir 1 et le miroir 3, puis enfin entre le miroir 2 et le miroir 3. Les trois signaux s'écrivent :

- $s_{12}(x) = z_1(x) + z_2(x)$.
- $s_{13}(x) = z_1(x) + z_3(x)$.
- $s_{23}(x) = z_2(x) + z_3(x)$.

Notons que tous ces signaux $s_{12}(x)$, $s_{13}(x)$, $s_{23}(x)$, $z_1(x)$, $z_2(x)$, et $z_3(x)$ ne sont définis qu'à une constante près et un terme linéaire en x près. On définit la constante en annulant la valeur moyenne sur chaque diamètre et la pente en minimisant l'écart quadratique.

Une surexposition de la pellicule dont la réponse est fortement non linéaire donne une finesse artificielle aux franges sombres, très utile pour un dépouillement visuel.

Moyen sur chaque diamètre. De ces trois informations on tire les défauts de rectitude individuels de chacun des miroirs :

Cette méthode exige donc la disposition d'un ensemble de trois miroirs plans de qualités à peu près équivalentes pour déterminer dans l'absolu les défauts de rectitude de l'un quelconque de ces plans qui servira ensuite de référence pour la mesure des défauts de rectitude d'un plan inconnu.

Comme on le voit, la mesure des défauts de rectitude qui consiste en la vérification de la stabilité d'un angle nul, n'exige aucun raccordement à un étalon particulier, mais permet, par l'emploi d'une procédure appropriée, un auto étalonnage sur un instrument dont les propriétés de sensibilité et de répétabilité sont suffisantes.

III-6- Rugosité :

On désigne par rugosité les aspérités et les creux d'une surface mesurés par rapport à la surface moyenne assimilée localement à un plan. La caractérisation géométrique de ce paramètre est délicate parce qu'il s'agit d'un paramètre statistique qui ne peut être défini par une seule mesure, et parce qu'il s'agit d'une variable dépendant de deux dimensions, en général analysée suivant une seule dimension.

Comme tout paramètre statistique, son évaluation sera d'autant plus sûre qu'elle sera faite sur un domaine étendu, mais on se heurte alors aux défauts de forme de la surface qui ne permettent plus d'assimiler la surface moyenne à un plan. La norme internationale ISO 4287 actuellement soumise à enquête probatoire définit les différents paramètres permettant de caractériser la rugosité d'une surface. Sans être exhaustifs, rappelons que ce sont les hauteurs des saillies et les profondeurs des creux, les largeurs des éléments du profil qui sont une image très simplifiée du spectre des fréquences spatiales...

III-6-1- Paramètres de rugosité :

La hauteur maximale du profil peut être mesurée sur le profil de surface (Pz), sur le profil de rugosité (Rz) ou sur le profil d'ondulation (Wz). Il en est de même pour la hauteur totale, somme de la plus grande hauteur et de la plus grande profondeur (Pt , Rt) ou Wt . Mais les paramètres les plus significatifs sont des moyennes arithmétiques (Pa , Ra , Wa) de l'écart à la surface de référence ou les moyennes quadratiques (Pq , Rq , Wq) de $z(x)$.

Dans l'étude de ce paramètre spatial, c'est en fait la distribution des amplitudes des défauts en fonction de leur période qu'il faut caractériser et, tout comme pour les mesures de bruit, c'est la largeur de bande des fréquences spatiales prises en compte qui caractérise la micro géométrie d'une surface.

Dans les inters comparaisons, c'est la définition de ces spectres de fréquences spatiales observables qu'il est difficile de préciser.

III-6-2 - Étalonnage des palpeurs pour la mesure des rugosités :

L'étalonnage de ces palpeurs est essentiel. Il existe plusieurs types d'étalons permettant de faire cet étalonnage dans de bonnes conditions (Figure 18-3), offrant des défauts d'amplitudes et de périodes variées et connues, dont la forme peut être très différente d'un étalon à l'autre (sinusoïdes définissant un défaut de fréquence spatiale unique, arcs de cercle présentant des points anguleux, donc de hautes fréquences spatiales, spectre de rugosité uniforme analogue au bruit blanc des détecteurs électroniques, échelons de profondeurs variées). Il n'est pas possible de travailler sur des cales d'épaisseur de quelques micromètres.

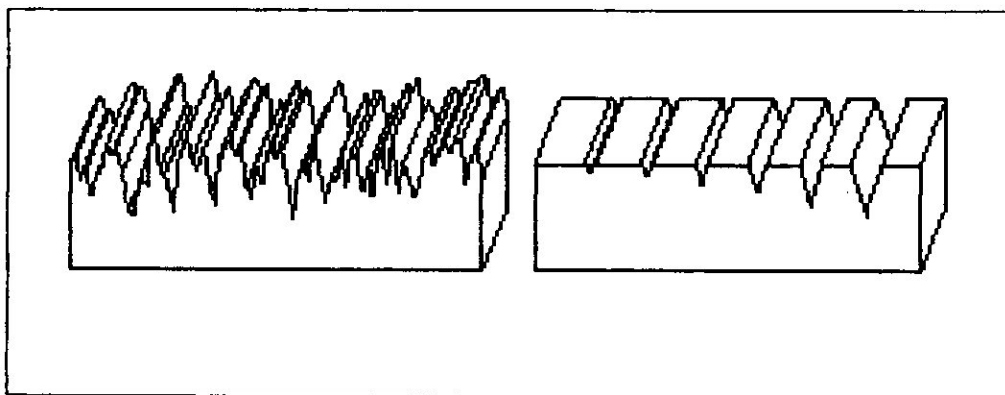


Figure 18-3 : Étalons de rugosité pour étalonnage des rugosimètres.

Les boîtes de cales des ateliers de mécanique comportent une série de cales de faible épaisseur (1 mm) dont les épaisseurs sont en progression régulière par pas de 1 ou 2 mm. On étalonne un capteur sur quelques micromètres en contrôlant la différence des épaisseurs d'un couple de ces cales.

III-7- Conclusion :

Le rôle des surfaces dans les technologies modernes justifie le nombre très important d'instruments nouveaux apparus pour les étudier. Caractériser les surfaces d'un point de vue purement géométrique est chose complexe. Les outils de traitement des signaux à une dimension (filtres, analyseurs de spectres) ont trouvé leurs équivalents pour les grandeurs bidimensionnelles, et pour les surfaces isotropes, l'analyse unidimensionnelle d'un profil est suffisante pour apporter une bonne connaissance de la surface. À l'étalonnage des sondes et des capteurs qui servent à dresser la carte d'une surface, il faut adjoindre la connaissance des bandes passantes des fonctions de transfert de l'instrumentation mise en oeuvre.

Cette dernière condition est souvent la plus difficile à remplir pour comparer des résultats obtenus par des voies différentes.

Nous avons vu des dispositifs très variés, dont certains mesurent une cote verticale, certains une différence de cotes entre points voisins ou éloignés, d'autres

mesurent une pente locale, et d'autres enfin mesurent une variation de pente entre deux points voisins, c'est-à-dire une courbure locale. Ces différents procédés sont évidemment caractérisés par leur sensibilité, mais aussi et surtout par leur fonction de transfert des fréquences spatiales qui traitent différemment écarts de forme, ondulation et rugosité.

C'est l'exploitation complète mais prudente de ces instruments qui conduira, dans chaque discipline, à établir les procédures pour atteindre tel ou tel paramètre caractéristique d'une surface. Les recoupements de résultats d'origines diverses sont souvent le meilleur moyen de se prémunir contre les artefacts insoupçonnables d'une technologie particulière. Les méthodes optiques et les palpeurs mécaniques, les microscopies à effet tunnel, à force atomique ou en champ proche sont des techniques très différentes dont aucune n'est absolument meilleure que les autres. Elles sont toujours plus ou moins complémentaires.



CHAPITRE IV

CHAPITRE IV

LES ERREURS ET INCERTITUDES DES MESURE :

IV-1- Introduction :

Les imperfections en général présentées par un processus de mesure occasionnent une inexactitude sur le résultat de mesure.

La différence (algébrique) entre le résultat du mesurage et la valeur (conventionnellement) vraie de la grandeur est appelée erreur de mesure. Comme la valeur vraie (ou la valeur conventionnellement vraie) d'une grandeur n'est pas connue, le concept d'erreur est idéal et les erreurs ne peuvent être connues exactement.

Traditionnellement, on considère qu'une erreur possède une composante aléatoire appelée erreur aléatoire et une composante systématique, appelée erreur systématique.

L'erreur aléatoire est due principalement aux variations temporelles et spatiales stochastiques des grandeurs d'influence. Les effets aléatoires de ces variations entraînent des variations pour les observations répétées de mesure. L'erreur aléatoire, qui ne peut être compensée par une correction, peut être réduite en augmentant le nombre d'observations.

L'erreur systématique, comme l'erreur aléatoire, ne peut pas être éliminée mais peut, elle aussi, être réduite le plus souvent. L'effet reconnu d'une grandeur d'influence qui produit une erreur systématique sur un résultat de mesure est appelé effet systématique. Il peut souvent être quantifié et, s'il est significatif par rapport à l'exactitude envisagée pour le mesurage, on peut appliquer une correction au résultat de mesure.

L'erreur de mesure s'exprime parfois par son rapport à la valeur (conventionnellement) vraie de la grandeur. On parle alors d'erreur relative, par opposition à l'erreur absolue qui est l'erreur de mesure de départ. À noter que l'erreur absolue est une grandeur algébrique à ne pas confondre avec son module, la valeur absolue de l'erreur.

IV-2- Erreur de précision :

IV-2-1- Définition :

L'erreur de précision est l'erreur qui entache chaque mesure, abstraction faite de l'erreur de finesse (réaction) et de l'erreur de rapidité (retard) qui fait l'objet d'analyses distinctes. Le cadre suivant, qui comprend sept divisions principales, permet une bonne analyse de l'erreur de précision.

IV-2-2 - Erreur de lecture :

La sûreté de lecture est caractérisée par l'erreur de lecture, erreur que l'on peut craindre (en plus ou moins) dans le repérage de la position de l'organe indicateur par un opérateur moyen dans les conditions normales d'emploi.

Dans un appareil bien construit et bien employé, cette erreur de lecture doit rester faible vis-à-vis des autres erreurs ; on l'exprime parfois en unités de la grandeur à mesurer, surtout lorsque la courbe de graduation est voisine d'une droite ; c'est le quotient de l'erreur de lecture en unités de la graduation par le coefficient de sensibilité.

Cette erreur peut elle-même se subdiviser en erreurs élémentaires dont, après estimation, on fera la somme suivant la règle des carrés ; ce sont :

Le pouvoir séparateur de l'œil et du système optique qu'il utilise dans l'instrument,

- a- L'erreur possible de parallaxe pratiquement annulée par l'usage d'un bon "miroir de parallaxe",
- b- L'erreur possible d'interpolation,

- c- Le "bruit de fond" qui se traduit par un tremblement plus ou moins désordonné de l'aiguille, ou du spot lumineux, ou de la trace inscrit sur la bande d'enregistrement.

Pour l'estimation du pouvoir séparateur de l'œil, on admet que l'œil de l'opérateur moyen conventionnel possède un pouvoir séparateur de $0,001 d$ à la distance d . pour une lecture faite dans les meilleures conditions, il atteint $0,0003$ alors qu'un opérateur devant lire rapidement avec un éclairage défectueux ne distinguera avec sécurité que deux repères séparés par $0,003 d$. [6]

IV-2-3 - Erreur de mobilité :

On dit qu'un instrument est d'autant plus mobile qu'il suffit d'une variation plus petite de la grandeur à mesurer pour modifier son état d'équilibre.

L'imperfection de mobilité est caractérisée par le seuil de mobilité ou erreur de mobilité, plus petite variation de (x) qui peut être appréciée avec certitude, en supposant les moyens de lecteurs parfaits ; on peut dire mieux encore que c'est la plus petite variation de (x) qui entraîne un déplacement de l'organe indicateur.

Les principales causes de l'erreur de mobilité sont les frottements solides, les jeux mécaniques et les discontinuités (spires d'un potentiomètre). La se trouve la source du phénomène appelé parfois "traînage" dans l'examen superficiel d'un instrument : l'instrument donne des indications différentes suivant qu'il atteint la grandeur à mesurer en croissant ou en décroissant. Dans un instrument à circuits électriques ou électroniques, on rencontre l'analogie d'un jeu mécanique si un circuit partiel présente un seuil de fonctionnement. Le cas est fréquent dans les dispositifs à asservissements.

IV-2-4 - Erreur sur le zéro :

Dans l'emploi courant d'un instrument, chaque lecture destinée à une mesure est entachée de la somme des erreurs que nous venons de passer en revue : cette

somme s'appelle erreur d'indication. En général, lors d'une mesure, l'erreur que l'on commet n'est pas seulement l'erreur d'indication ; il y a lieu de tenir compte de l'incertitude sur la graduation ou sur la courbe d'étalonnage : l'analyse de cette incertitude conduit à distinguer l'erreur sur le zéro, l'erreur dans la réalisation de la graduation (erreur de justesse) ou de la courbe d'étalonnage, et l'erreur sur l'étalon ou la grandeur de référence.

Une mesure est presque toujours, explicitement ou implicitement, la différence entre deux lectures dont l'une est souvent celle du zéro.

IL y a erreur sur le zéro lorsque l'une des hypothèses faites sur le zéro ou la lecture de référence cesse d'être vérifiée. Cela ne correspond pas forcément au fait que l'aiguille ne revient pas au zéro dans les conditions de la mesure (2) : ainsi, pour un voltmètre dans lequel l'influence de la température sur le ressort spiral est notable autour du zéro et dont la fidélité a été étudiée en admettant que le zéro a été réglé à + 20 °C et n'a pas été réglé de nouveau en cours d'expérimentation, par exemple au cours des essais à 0° ou à + 40 °C, il n'y a pas à tenir compte de ces déplacements systématiques du zéro. Ici l'hypothèse sur le zéro est que le réglage à la disposition de l'opérateur a été fait en sorte que l'aiguille revienne au zéro aux valeurs nominales des grandeurs d'influence ; si le zéro ainsi compris présente une incertitude notable, il est correct de retenir cette incertitude sous le nom d'erreur sur le zéro.

IV-2-5 - Erreur de justesse :

La compréhension de ce paragraphe et du suivant exige une description préalable de l'opération d'étalonnage. Cette opération a pour objet de déterminer la relation qui existe entre l'indication (u) ou la mesure (y) fournie par un instrument donné et la valeur correspondante (x) de la grandeur à mesurer. Si l'instrument est prototype, la courbe d'étalonnage obtenue (x, y) peut constituer pour les instruments de série la courbe de graduation. L'étalonnage se fait schématiquement selon l'une des procédures suivantes :

- a- utilisation d'un étalon : lorsqu'on dispose d'un étalon, c'est-à-dire d'un corps possédant une caractéristique déclarée égale à une valeur donnée G de la grandeur envisagée, on présente cet étalon à l'instrument et on lit l'indication fournie (u ou y). on a ainsi un point d'étalonnage (G, y) et avec plusieurs étalons, on obtient les points permettant de tracer la courbe d'étalonnage (x, y).
- b- utilisation d'une grandeur de référence : il arrive souvent que l'on ne puisse pas disposer d'étalon. Ainsi , pour les intensités de courant électrique, pour les pression, pour les températures..., il est nécessaire de créer le courant électrique, la pression ou la température, et de mesurer cette grandeur simultanément avec l'instrument à étalonner et avec un instrument réputé plus précis qu'on appelle instrument étalonner pour la circonstance. Telles sont les grandes lignes de l'opération d'étalonnage.

L'instrument est d'autant plus juste que les indications qu'il donne sont plus voisines de la valeur vraie, les mesurages étant exécutés en vue d'éliminer les erreurs de lecture et de fidélité. La justesse est mesurée a contrario par l'erreur de justesse ; l'étalonnage est la détermination expérimentale de cette erreur de justesse au long de l'étendue de mesure.

IV-2-6 - Erreur sur la grandeur de référence :

Lorsqu'on utilise un "étalon" pour étalonner un instrument de mesure, on choisit normalement un étalon réalisé avec une précision bien meilleure que la précision que peut donner l'instrument ; l'erreur provenant de l'imperfection de l'étalon est négligeable ; il n' y a pas à retenir "d'erreur sur l'étalon". Lorsqu'on ne dispose pas d'un étalon, on utilise une grandeur de référence, sur laquelle on peut commettre deux erreurs : cette grandeur n'est pas toujours absolument constante et l'instrument "étalon" qui a servi à la mesurer n'est pas parfait.

L'erreur possible sur la grandeur de référence est l'incertitude avec laquelle on réalise cette grandeur de référence. Elle se compose de la variation que l'on peut

craindre pour cette grandeur de référence (par exemple entre l'instant de la lecture sur l'instrument étalon et l'instant de la lecture sur l'instrument à étalonner) et de l'erreur résultante de l'instrument étalon.

On notera qu'entre "erreur sur l'étalon" et "erreur sur la grandeur de référence" il y a une différence d'ordre de grandeur, mais non pas différence de nature.

On notera aussi que, dans certains cas, la répétition des opérations d'étalonnage peut réduire l'importance de l'erreur introduite par les variations de la grandeur de référence et l'influence de l'erreur résultante de l'instrument étalon. Il est bien entendu qu'ici, comme dans toutes les questions relatives aux calculs d'erreurs, le bon sens et l'honnêteté de l'expérimentateur joue un rôle important.

IV-3 - Erreurs de forme et de position :

Les erreurs de forme et de position relative des éléments géométriques sont dues aux imperfections des outils de production qui les génèrent, aux efforts de coupe, aux contraintes induites par les dispositifs de préhension des pièces, aux échauffements, etc.

L'examen des défauts d'une surface réelle peut permettre de déterminer les faiblesses de son processus d'élaboration. Aussi la recherche des défauts sur les pièces mécaniques a-t-elle été longtemps orientée dans le sens de la mise en évidence des erreurs géométriques probables, en fonction du procédé d'élaboration.

Par exemple, le serrage d'une pièce circulaire de faible épaisseur dans un mandrin de tour à 3 mors de serrage entraîne une déformation élastique qui se libérera lors de l'ouverture du porte pièce après usinage, faisant apparaître une déformation permanente en forme de triangle curviligne.

Les moyens de mesure actuels, associés aux chaînes de mesures électroniques et informatiques permettent de contrôler les formes réelles par rapport

à des formes de référence très précises, quasi-parfaites, et même à définition mathématique.

Grâce à la diffusion croissante des moyens de mesure élaborés, telles les machines à mesurer tridimensionnelles à logiciels mathématiques intégrés, il est possible de déterminer rapidement, par numérisation, les erreurs de forme et de position des éléments, sur les pièces mécaniques notamment.

IV-3-1- Éléments géométriques constitutifs d'une pièce :

IV-3-1-1- Point : (Figure IV-1) :

En général, le point n'a pas de représentation matérielle sur les pièces mécaniques, en raison de la fragilité des matériaux, qui ne permet pas de garantir l'acuité absolue des arêtes. Au contraire, on abat volontairement les angles des pièces et l'on chanfreine les arêtes, afin d'éliminer à la fois leur agressivité et les risques d'ébréché.

Pourtant, le point intervient souvent comme élément fictif dans les objets.

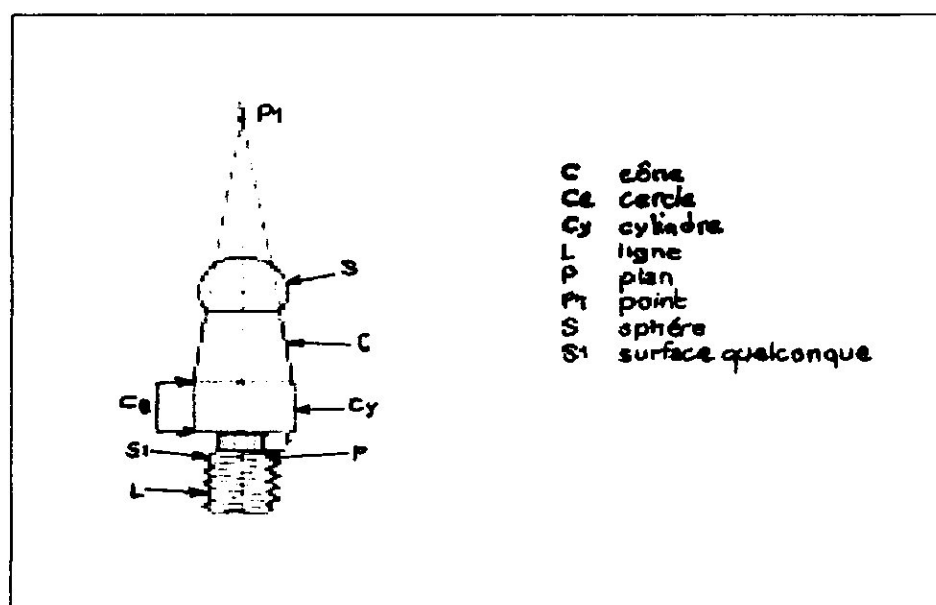


Figure 1-4 – Éléments géométriques.

Des points élémentaires, disposés selon un maillage approprié, servent à la définition des surfaces par numérisation.

IV-3-1-2 - Ligne :

La ligne résulte de l'intersection de deux surfaces ; elle a également un caractère fictif, pour les raisons indiquées ci-dessus.

IV-3-1-3 - Droite :

La droite est une ligne particulière résultant de l'intersection de deux plans.

IV-3-1-4 - Cercle :

Le cercle est un élément fictif, résultant de l'intersection d'une surface de révolution (cylindre, cône, sphère) avec un plan perpendiculaire à l'axe, ou avec une autre surface de révolution et de même axe. Le cas le plus fréquent sur les pièces mécaniques est l'intersection cylindre plan.

IV-3-1-5 - Plan :

Le plan est un élément réel et fréquent obtenu par divers moyens d'élaboration : fraisage, rectification, dressage, rodage, etc.

Le marbre en est la représentation la plus parfaite ; il est réalisé le plus parfaite ; il est réalisé le poli.

IV-3-1-6 - Cylindre :

Le cylindre est obtenu par génération, en tournage, alésage, rectification ; c'est une surface très fréquente, facile à obtenir avec une erreur de forme inférieure à 0,01 mm.

IV-3-1-7 - Cône :

Le cône est aussi un élément réel que l'on trouve sur les pièces mécaniques. On l'obtient plus facilement par tournage (suivi, au besoin, par diverses opérations de finition : rectification, rodage,...), mais on peut également le réaliser par fraisage.

IV-3-1-8 - Sphère :

La sphère est une forme utilisée dans les articulations dites liaisons sphériques. Elle a toujours un débattement limité.

IV-3-1-9 - Surfaces quelconques :

Ce sont toutes les surfaces que l'on peut trouver sur une pièce mécanique et qui n'appartiennent pas aux catégories citées précédemment. [7]

IV-4- Divers aspects de l'élément :

IV-4-1- Élément spécifié :

C'est celui qui résulte du choix du concepteur au bureau d'étude. Il réalise une fonctionnalité partielle de la pièce. Son choix exprime à la fois une nécessité fonctionnelle et une possibilité de réalisation par les moyens de mise en œuvre connus (usinage, moulage, etc.).

IV-4-2- Élément réel :

L'élément réel résulte de l'usinage ou, plus généralement, du procédé d'élaboration. C'est la « peau » de la pièce. L'élément réel n'est jamais connu avec exactitude, en raison de la limite des moyens d'appréhension et, éventuellement, de la complexité géométrique des surfaces dessinées. On en donne la meilleure image possible par la mesure, et l'on admet, le plus souvent, que l'élément réel est l'élément mesuré.

IV-4-3- Élément mesuré :

C'est l'image de l'élément réel donnée par les moyens de mesure. Cette reproduction se présente sous la forme d'un enregistrement, d'un fichier de points, d'une image numérique ou optique, suivant le type de capteur utilisé.

Dans tous les cas, l'élément mesuré est défini par un nuage de points dont la position dans un repère fixe est connue avec un « halo » d'incertitude dépendant du système de mesure utilisé.

IV-4-4- Élément optimisé :

L'élément optimisé résulte du nuage de points définissant l'élément mesuré. Les points étant définis individuellement par leurs coordonnées dans un repère de mesure connu, un traitement mathématique d'optimisation permet de déterminer l'élément parfait représentatif du nuage de points.

Les outils mathématiques utilisés le plus couramment sont l'optimisation par la méthode des moindres carrés et la méthode des torseurs des petits déplacements.

IV-4-5- Élément théorique :

C'est un élément mathématique construit géométriquement à partir d'un ou de plusieurs éléments optimisés. Les divers aspects de l'élément sont représentés sur la figure suivant :

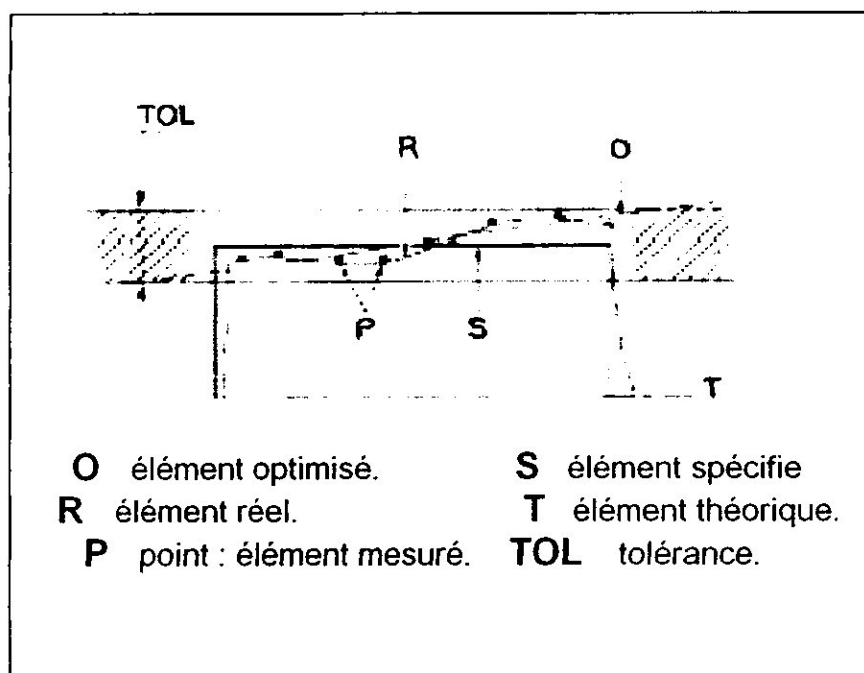


Figure 2-4 – Divers aspects de l'élément.

IV-4-6- Tolérance suivant l'ISO :

La tolérance est la zone de l'espace autorisée à l'élément réel (Figure 3-4) ; elle est géométriquement parfaitement définie. La tolérance s'applique à toute la longueur ou toute la surface de l'élément (Figure 3-4), sauf restriction indiquée suivant la figure sous dessus :

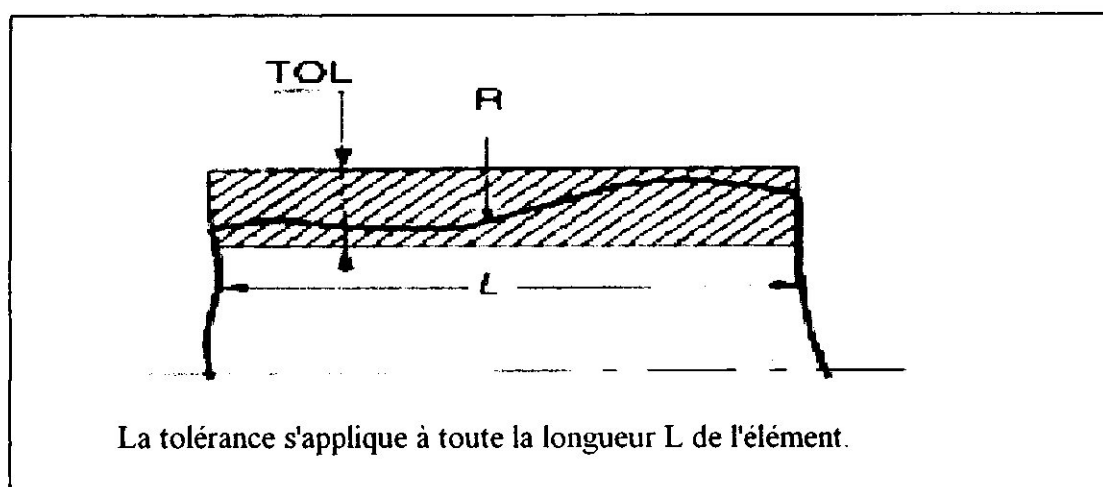


Figure 3-4 : Cas général de la tolérance ment.

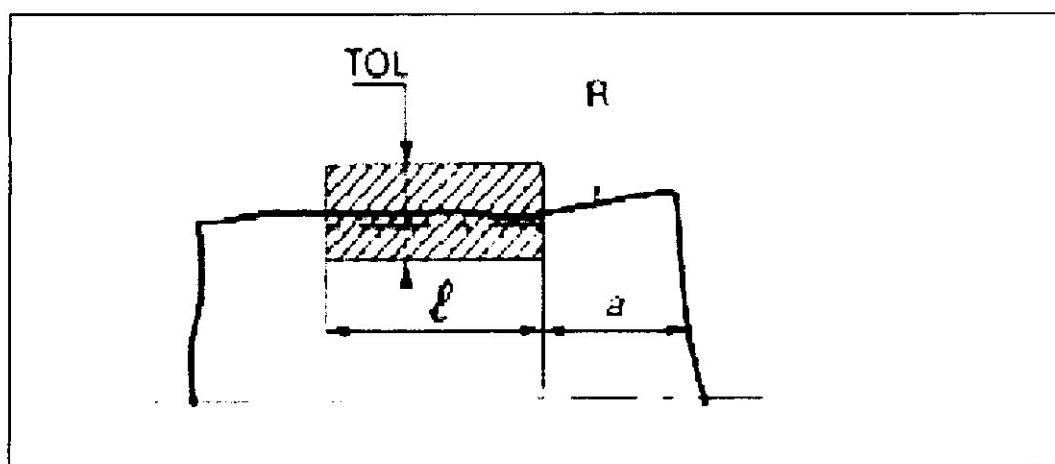


Figure 4-4 : la restriction de tolérance.

La tolérance exprime, en millimètres, l'épaisseur, la largeur, le diamètre, suivant le cas, de la zone. Dans la réalité, lors du contrôle, on vérifiera que l'élément mesuré voire optimisé, est à l'intérieur de la zone.

IV-5- Classement des défauts :

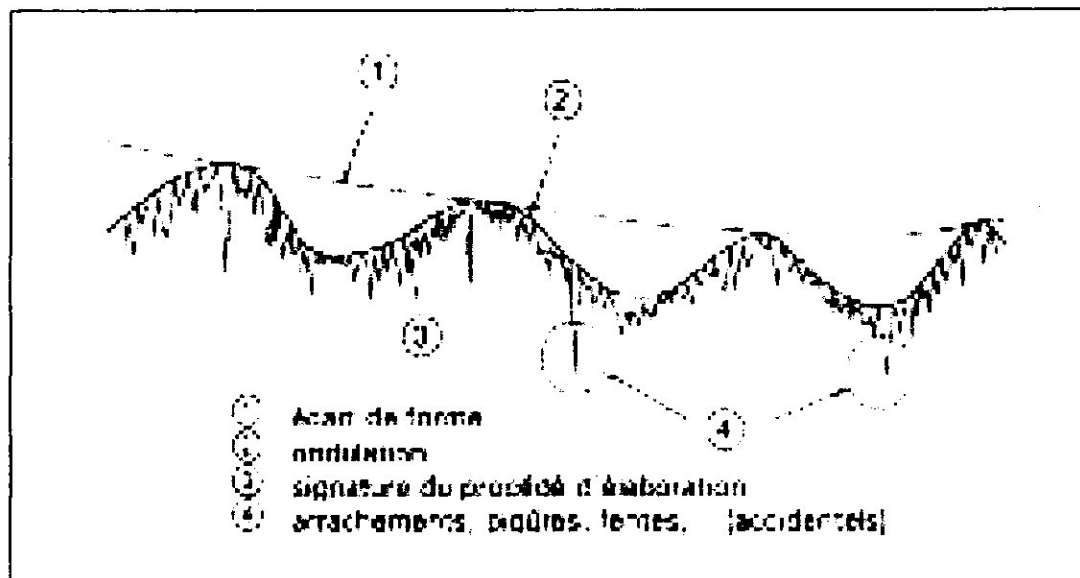


Figure 5-4 : Classement des défauts.

La (Figure 5-4) représente l'aspect réel de la surface d'une pièce obtenue par usinage.

On retrouve les quatre principaux types de défauts, d'ordre macro ou micro géométrique :

- 1 : écarts de forme et de position.
- 2 : ondulations (défaut périodique).
- 3 : signature du procédé d'élaboration : stries, sillons (défaut périodique ou pseudopériodique).
- 4 : défauts accidentels.

IV-5-1- Erreur de forme des éléments :

L'erreur de forme est l'écart total de l'élément réel par rapport à la forme théorique définie par optimisation des points déterminés sur la surface réelle.

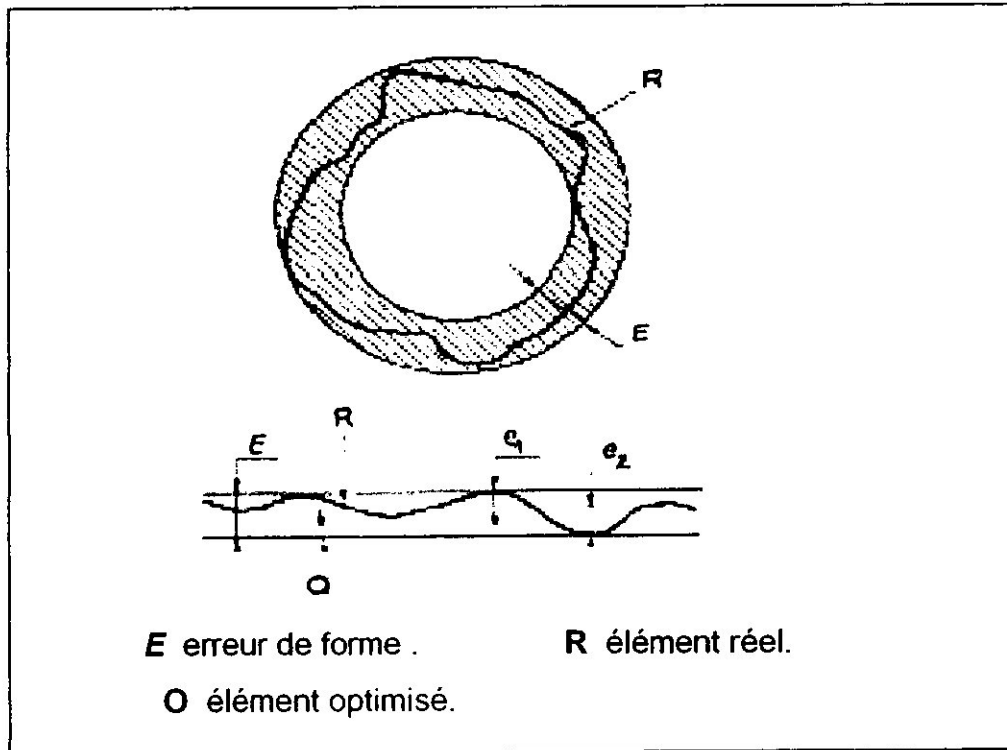


Figure 6-4 : Erreur de forme des éléments.

La position de cette forme théorique est choisie de façon à ce que la distance du point réel le plus éloigné soit minimale (**Figure 6-4**).

IV-5-2- Erreur de position relative des éléments associés :

Un élément étant défini comme référence, sa représentation optimisée parfaite sert à tracer la position théorique de l'élément spécifié.

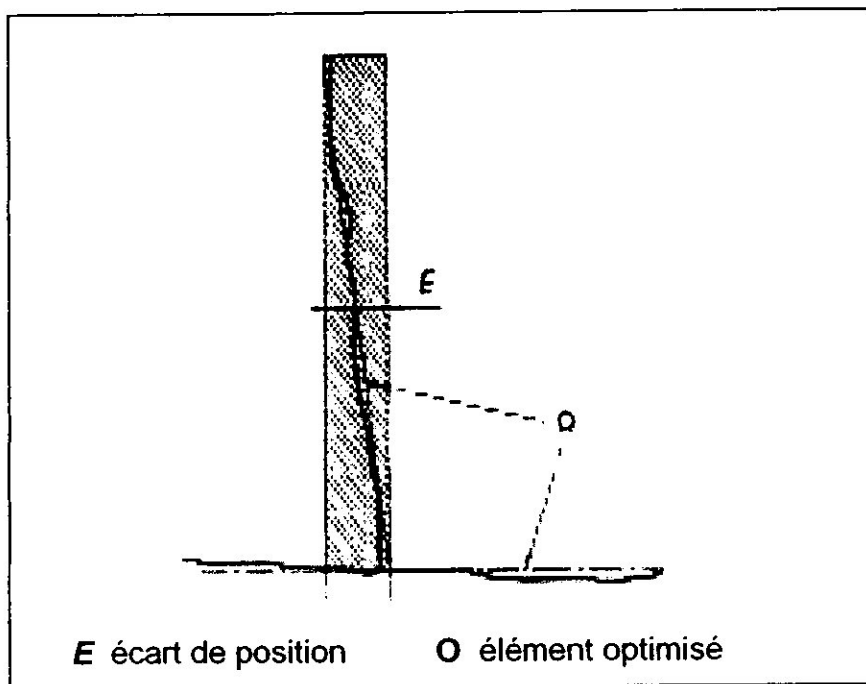


Figure 7-4 : Écart de position relative de deux éléments associés Perpendiculaires.

L'erreur de position est l'écart maximal de l'élément réel par rapport à l'élément théorique défini précédemment (Figure 7-4).

IV-5-3- Erreurs de forme :

La norme NF E 04-552 a retenu 6 cas repérés chacun par un symbole (Tableau 1-4).







	Tableau 1 - Symboles des formes (d'après NF E 04-552 (ISO 1101))
	Rectitude (<i>straightness</i>)
	Planéité (<i>flatness</i>)
	Circularité (<i>circularity</i>)
	Cylindricité (<i>cylindricity</i>)
	Forme d'une ligne quelconque (<i>profile of any line</i>)
	Forme d'une surface quelconque (<i>profile of any surface</i>)

Tableau 1-4 : Symboles des formes.

IV-5-4- Erreur de rectitude :

L'élément spécifié est l'axe du cylindre (Figure 8-4). L'élément réel que l'on détermine lors du contrôle doit se situer à l'intérieur d'un petit cylindre théorique de diamètre t (t étant la valeur de la tolérance), dont la longueur est égale à la zone de tolérance est rectangulaire dans le cas où l'on ne souhaite imposer la rectitude que dans un plan.

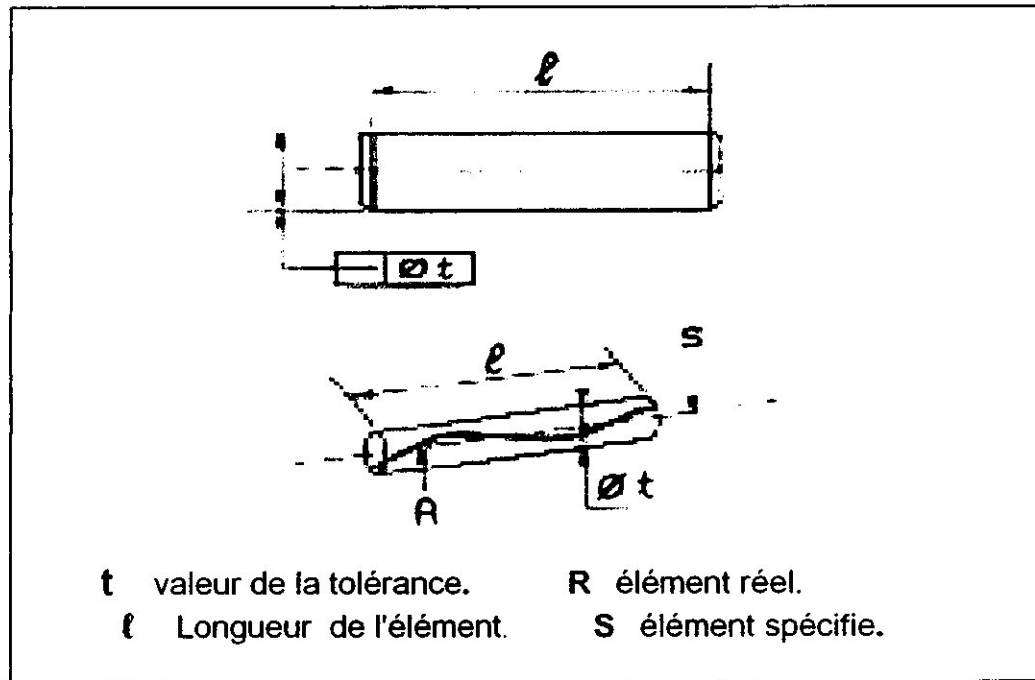


Figure 8-4 : Rectitude.

IV-5-5- Erreur de circularité :

L'élément spécifié est une section droite quelconque de la pièce (Figure 9-4).

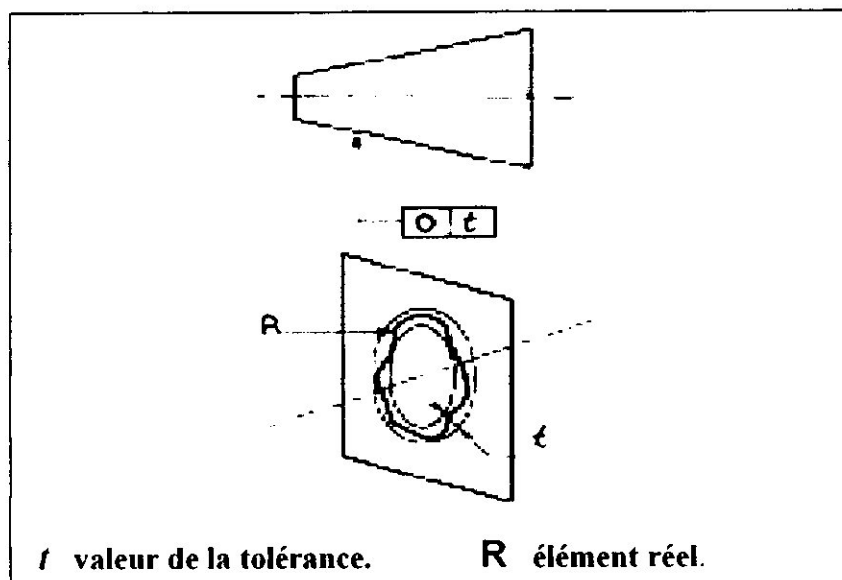


Figure 9-4 : Circularité

L'élément réel doit être compris entre deux cercles concentriques dont la différence des rayons est égale à la tolérance (t) La couronne formée par les deux cercles représente la zone de tolérance.

IV-5-6- Erreur de planéité :

L'élément spécifié est la surface plane d'une pièce (remarque : on peut également spécifier une portion de plan, ou effectuer un maillage de la surface, les mailles relevant d'une tolérance particulière de valeur inférieure à la tolérance de l'ensemble).

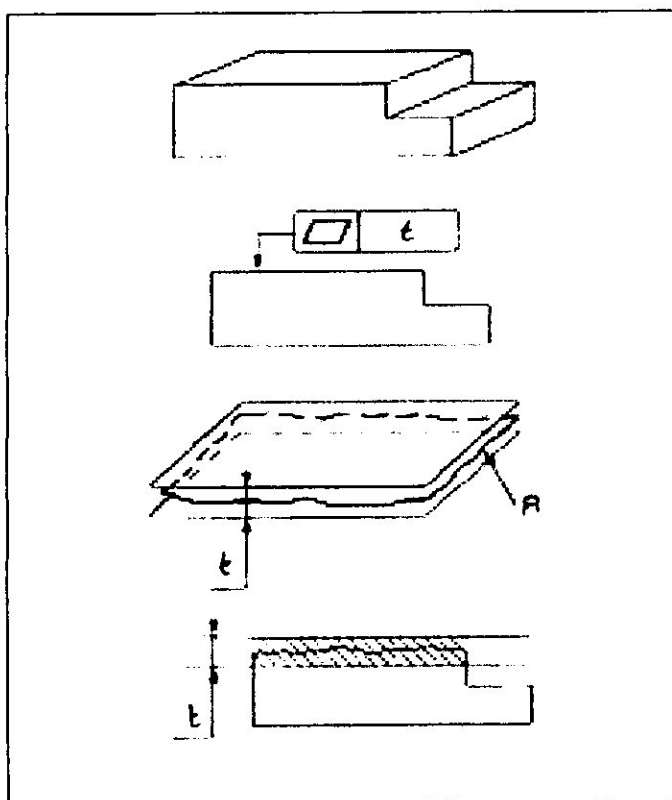


Figure 10-4 : Planéité.

L'élément réel doit être compris entre deux plans parallèles théoriques, distants de la valeur (t) de la tolérance (Figure 10-4).

IV-5-7- Erreur de cylindricité :

L'élément spécifié est le cylindre de longueur (Figure 11-4). L'élément réel doit être compris entre deux cylindres de longueur espacés de la valeur de la tolérance t .

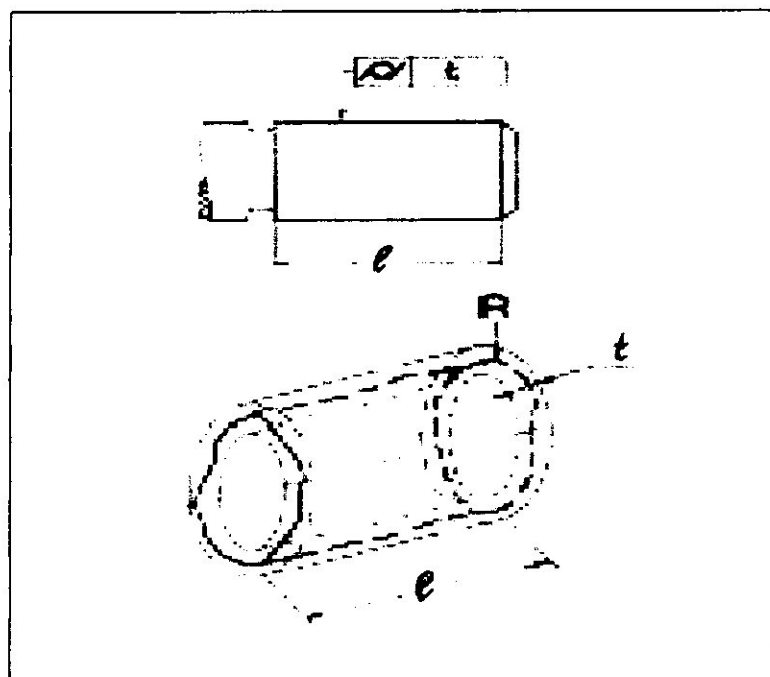


Figure 11-4 : Cylindricité.

L'espace entre les deux cylindres représente la zone de tolérance.

IV-5-8- Erreur de conicité : (cas particulier de la cylindricité) :

La spécification suit le même principe que pour la cylindricité. L'élément doit se trouver entre deux cônes théoriques et coaxiaux dont la distance normale est égale à la tolérance.

IV-5-9- Erreur de sphéricité : (cas particulier de surface quelconque)

La sphère réelle doit être comprise entre deux sphères théoriques, Concentriques et dont la différence de rayons représente la tolérance pour l'erreur de sphéricité.

IV-5-10- Erreur de forme d'une ligne quelconque :

L'élément spécifié est une ligne particulière (Figure 12-4 : profil d'une Pièce, par exemple)

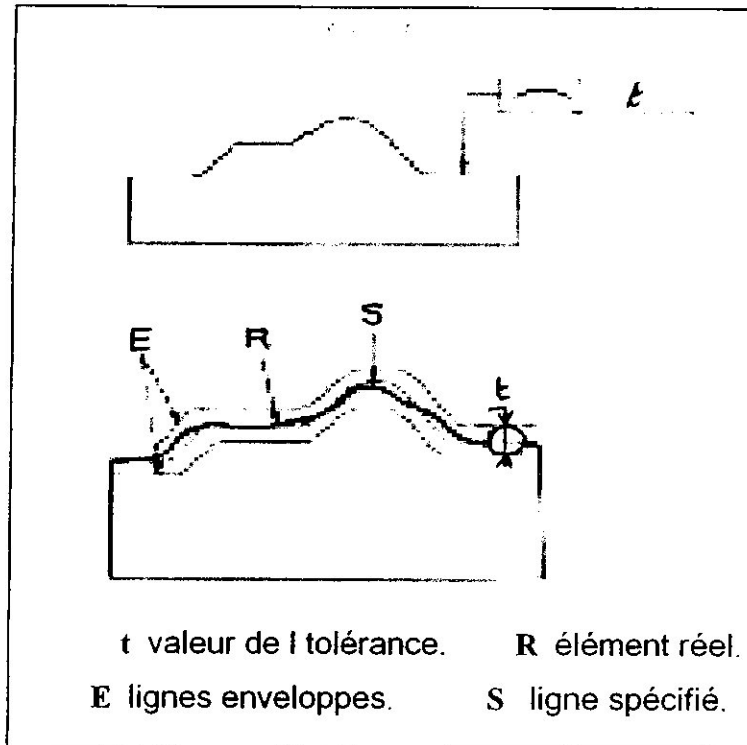


Figure 12-4 : Forme d'une ligne quelconque.

L'élément réel doit être compris entre les deux lignes enveloppes d'un cercle, de diamètre égal à la tolérance, dont le centre se déplace sur la ligne théorique parfaite. La zone autorisée est comprise entre ces deux lignes enveloppes.

IV-5-11- Erreur de forme d'une surface quelconque :

L'élément spécifié est une surface de géométrie quelconque (ce n'est pas une des surfaces déjà étudiées). L'élément réel R doit être compris entre deux surfaces enveloppes (Figure 13-4).

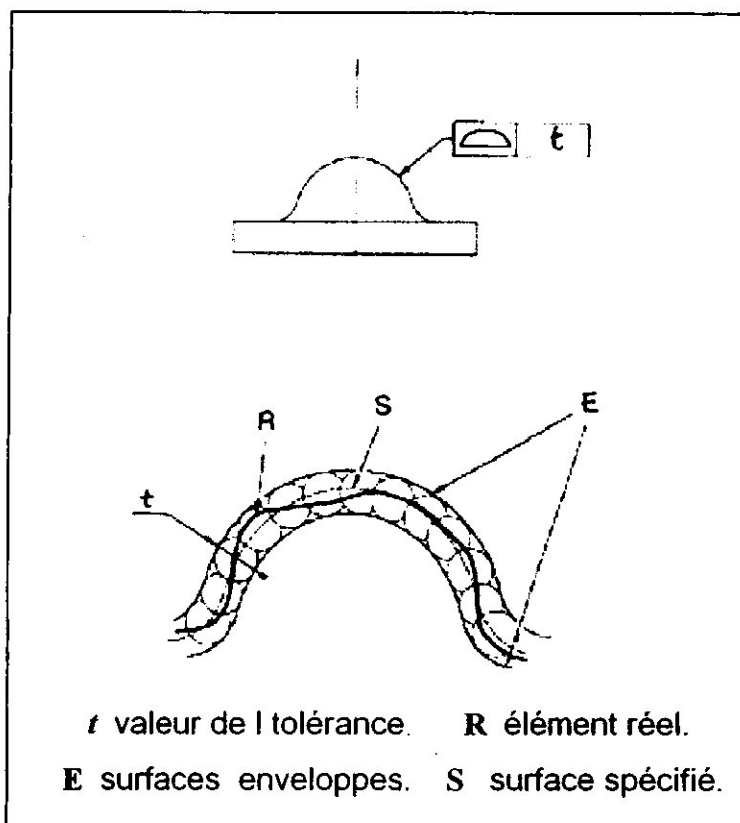


Figure 13-4 : Forme d'une surface quelconque.

Cette fois, les deux surfaces délimitant la zone de tolérance sont constamment tangentes à une sphère de diamètre t dont le centre parcourt la surface théorique spécifiée S .

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Faire une thèse sur la métrologie nous a permis d'élargir considérablement nos connaissances de la mesure dans les différents domaines et d'approfondir notre savoir dans les contrôles industriels.

Notre projet consiste à donner un aperçu sur la métrologie. Cette dernière est une science qui existe depuis l'antiquité avec l'apparition des premiers outils de mesure rudimentaire, depuis, les appareils et les outils se sont avidement améliorés, et les grandes entreprises de fabrication savent maintenant si leurs produits sont efficaces ou non.

Aujourd'hui, la métrologie est une discipline essentielle, dont les ministères de l'économie, des finances et de l'industrie veulent faire une force de compétitivité industrielle et du rayonnement des pays sur la scène internationale. Cela se traduit par un renforcement de la métrologie fondamentale, par la diffusion de la métrologie dans les industries, par une diffusion de la culture métrologique à tous les niveaux, par une participation de toutes les administrations à cette mission, par une mise en cohérence et une simplification des réglementations.

Il faut noter que nous avons rencontré un grand nombre de problèmes, comme le manque de la documentation et les lieux de stage. On aurait aimé faire une partie pratique pour mieux élucider les principes de la métrologie et bien expliquer notre sujet.

En conclusion, nous espérons que notre objectif a été atteint et que le travail ainsi réalisé est le point de départ pour les futurs travaux orientés dans ce domaine.

Bibliographique :

- [1] **J.C. Corde et P. Castellani.** « Essais et mesures dans les turbo machines ». -1987-
- [2] **Bernard Barthélemy.** « Notions pratiques de mécanique de la rupture ». -1980-
- [3] **Midrra .** « Les caractéristiques métrologiques d'un instrument de mesure». -1974-
- [4] **MARC FERRETTI.** « Mesures et contrôle industrielles » . 20 sept 1977-
France.
- [5] **Liousse.** « Systèmes de mesure et capteurs ».
- [6] **P.-A. PARATTE / P. ROBERT.** « Systèmes de mesure » .- nov. 1986
France.
- [7] **Technique d'ingénieur.**
- [8] **charles. M. Gilware.** « Appareil de mesure », Traduit par **Léon collet.**
1983 canada.