

Chapitre 1 : Mesure des épaisseurs et des longueurs

A/Notions fondamentales

I-1 COMPOSANTS FONDAMENTAUX

Un instrument de mesure est un dispositif destiné à relever la valeur numérique d'une grandeur. Généralement un instrument de mesure est composé d'un :

1.1.1 Élément révélateur : appareil sensible à la grandeur à mesurer. Typiquement l'élément révélateur interagit avec la grandeur en examen et il subit une modification dans une de ses caractéristiques. Parfois c'est aussi l'élément qui interagit avec la grandeur et la modifie.

Cela crée des problèmes à l'expérimentateur qui doit s'apercevoir de la modification introduite et consécutivement essayer de l'annuler ou de l'estimer à fin d'obtenir une mesure correcte.

1.1.2 Transducteur : partie de l'instrument qui transforme *l'information* obtenue par le révélateur en une grandeur plus facile à utiliser pour l'expérimentateur.

1.1.3 Dispositif de visualisation : composant qui fournit visiblement ou graphiquement le *résultat* de la mesure, *synthétisant* les opérations déroulées par le révélateur et le transducteur.

I- 2 DISTINCTION ENTRE INSTRUMENT ANALOGIQUE ET DIGITAL

1.2.1 Analogique : les processus de lecture, d'analyse et de sortie des données sont exécutés de façon analogique, c'est à dire en utilisant des dispositifs (amplificateurs, instruments mécaniques ou optiques, etc.) qui *opèrent de façon continue*.

1.2.2 Digital : les dispositifs de lecture (filtres), analyse et sortie opèrent une *discretisation* sur les *informations*.

Typiquement les processus de lecture et d'analyse sont plus fidèles en analogique tandis que la sortie de l'information est sûrement plus facile à lire et précise en digital. Les instruments modernes sont dotés d'interfaces de communication vers l'ordinateur : cela permet de transférer, stocker et analyser les données avec des moyens intégrés.

I-3 CARACTERISATION DE L INSTRUMENT DE MESURE

1.3.1 Stabilité, fiabilité : Capacité de l'instrument à fournir des mesures égales de la même grandeur. Egalement, robustesse de fonctionnement au cours du temps.

En pratique, l'instrument doit être bien isolé par rapport aux *effets de l'environnement*. Exclu, bien entendu, l'effet du à la grandeur mise en examen.

1.3.2 Temps caractéristique de réponse, rapidité : Temps de réponse nécessaire à une variation de la grandeur en examen. Rapidité de l'instrument à donner le résultat d'une mesure.

1.3.3 Sensibilité : Plus petite grandeur capable d'engendrer une révélation de mesure par rapport au début de l'échelle de mesure. Elle détermine la limite inférieure du champ de mesure de l'instrument.

1.3.4 Fond- échelle : limite supérieure de la grandeur que l'instrument peut relever.

1.3.5 Intervalle de fonctionnement : fond échelle – sensibilité.

1.3.6 Résolution : Sensibilité, mais définie le long de tout le champ de mesure.

En général, résolution = variation grandeur/variation mesure.

1.3.7 Précision : Erreur relative de mesure = erreur absolue /mesure.

I-4 GRANDEURS PHYSIQUES

1.4.1 Notion

Une grandeur physique est toujours issue d'un cadre théorique qui amène à sa définition, par nécessité, dans un but de vérifier, et d'éprouver le modèle imaginé. C'est le lien entre une théorie (le Modèle) et une expérience (le Phénomène).

Les grandeurs physiques déjà rencontrées sont nombreuses.....température, pression, longueur,....mais aussi quantité de chaleur, entropie, flux lumineux....

1.4.2 Mesure

Là encore, le cadre théorique fournit, en même temps que la grandeur physique « créée », la méthode pour l'évaluer et son unité (s'il y a lieu).

Faire une mesure, c'est comparer une grandeur physique (ou chimique ou biologique....) inconnue avec une grandeur de même nature prise comme référence à l'aide d'un instrument. Qui dit mesure, dit référentiel, donc unité.

Pour qu'une grandeur soit mesurable, il faut savoir déterminer le rapport de deux grandeurs de même nature.

1.4.3 Unités et système d'unités

Dans un ensemble de grandeurs de même nature, on appelle unité de mesure, une grandeur particulière, choisie arbitrairement comme grandeur de référence.

Le terme « arbitrairement » peut vouloir dire une habitude(historique, coutume...), un côté pratique(peu coûteux, facile à réaliser), une imposition légale(Commission, Etat,).Les anglo-saxons ont conservé le pied (0,3048 m), les astronomes utilisent l'année-lumière, dans la marine et l'aviation, le mille nautique est très souvent employé (1,852 km), mais ces trois unités de base servent à la mesure de la même grandeur physique « LONGUEUR ».

1.4.4 Le système international (MKS)

C'est vraiment le système de référence pour la plupart des pays, en tout cas du domaine industriel. Il repose sur sept (07) unités imposées, toutes les autres étant déduites de celles-ci (même si on leur donne un nom particulier comme le newton (N) qui est en fait du « kg.m/s² »).

Les 7 unités de base			
Grandeur		Unité	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
Longueur	l	mètre	m
Masse	m	kilogramme	kg
Temps	t	seconde	s
Courant électrique	i	ampère	A
Température	T	kelvin	K
Quantité de matière	n	mole	mol
Intensité lumineuse	I	candela	cd
Unités complémentaires sans dimension			
Angle plan	$\alpha, \theta, \dots$	radian	rad
Angle solide	$d\Omega, \Omega, \dots$	stéradian	sr

Tableau.1.1 :Les unités du système international

Mètre : Le mètre (m) est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde

Kilogramme : Le kilogramme (kg) est la masse du prototype en platine iridié qui a été sanctionné par la Conférence générale des poids et mesures tenue à Paris en 1889 et qui est déposé au Bureau international des poids et mesures

Seconde : La seconde (s) est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondent à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133

Ampère : L'ampère (A) est l'intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force de $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur.

Kelvin : Le kelvin (K) est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

Candela : La candela (cd) est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540,1012$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian

Mole : La mole (mol) est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans $0,012$ kilogramme de carbone 12.

Table de conversion unité SI et unité anglo-saxonne :

Distances	Volume	Masse	Puissance
pouce (inch) : 1 in. = 2,54 cm	US gallon : 1 USgal = 3,786 l	once (ounce) : 1 oz = 28,35 g	cheval vapeur (horsepower) : 1 hp = 0,746 kW
pied (foot) : 1 ft = 30,48 cm	US barrel (baril) : 1 bbi = 42 USgal = 159 l	livre (pound) : 1 lb = 0,454 kg	
mile (miles) = 1,609 km			

Tableau.1.2 :Conversion d'unités

B/ Instruments de Mesure des épaisseurs et des longueurs

I-5 INSTRUMENTS MÉCANIQUES

Ce sont des instruments de mesures d'usage courant et simples (règle, pied à coulisse..) ou basés sur des mécanismes simples d'ordre mécaniques (comparateur, palmer...)

1.5.1 Règle graduée: généralement en bois, en métal, en plexiglas ou en matériau composite souple (règles superflex). Les règles d'aujourd'hui se présentent sous forme d'une tige plate ou ruban avec graduation permettant la prise de mesures des dimensions linéaires ou longueurs par comparaison.

1.5.2 Pied à coulisse :

Appelé aussi calibre à coulisse ; le pied à coulisse (*vernier caliper*) est un instrument de mesure directe utilisé pour les prises de mesures internes, externes, ainsi que des profondeurs, sur une règle et un vernier ; sa précision est de 0,1 à 0,02mm..Un vernier comporte deux règles graduées, l'une fixe et l'autre mobile, se déplaçant sur la première pour la prise de mesure. Le relevé de la longueur est indiqué sur le vernier.

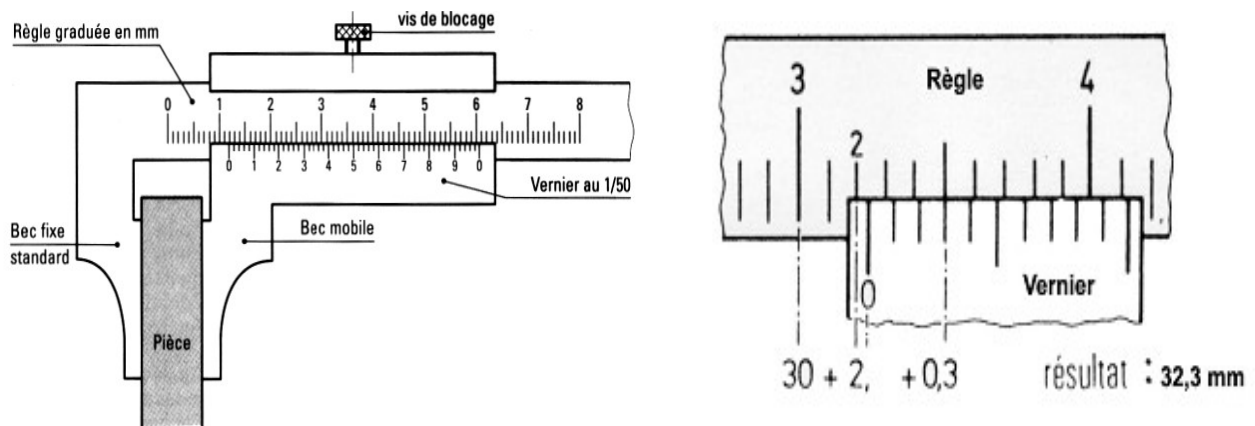


Fig.1.1 : Composants du pied à coulisse et Principe de mesure

1.5.3 Micromètre(Palmer) :

Le micromètre ou vis micrométrique est un instrument permettant de mesurer les dimensions linéaires intérieures et extérieures des pièces avec précision.

Dans sa configuration habituelle, un micromètre est constitué d'un corps en "U" doté d'une touche fixe et d'une touche mobile actionnée par un tambour. Le principe de lecture est là aussi très simple. Il suffit d'amener la touche mobile au contact de la pièce, et de relever la valeur.

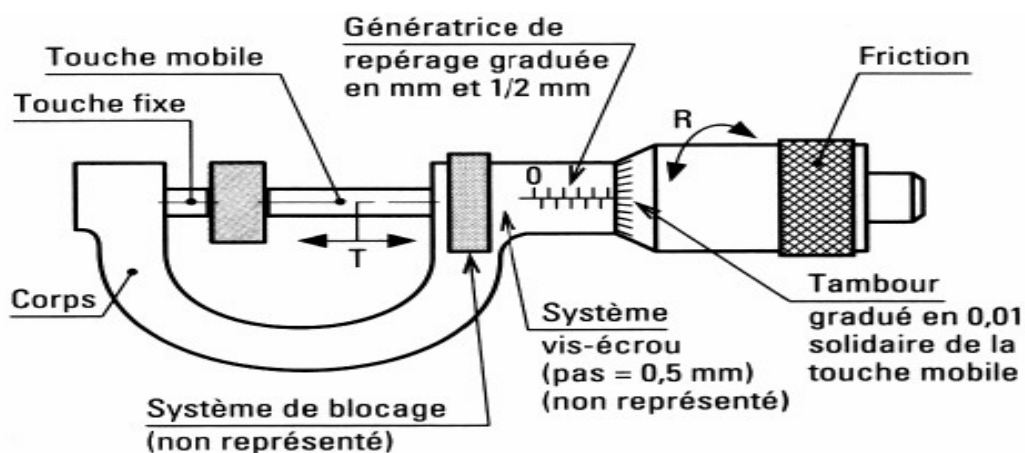


Fig.1.2 : Micromètre

❖ Principe du mécanisme de la vis micrométrique

La vis micrométrique permet un déplacement précis et très fin. Le principe repose sur le fait que lorsqu'on visse un écrou sur une tige filetée, celui-ci avance d'une longueur

égale au pas de la vis lorsqu'on il a fait un tour sur lui-même. Plus le pas de la vis est fin et régulier, plus l'avance est fine et précise. Si le pas est de 0,5mm, 1/50 de tour correspond à un déplacement de 10µm. Les vis micrométriques sont utilisées pour les réglages précis dans le domaine de l'optique.

1.5.4 Comparateur

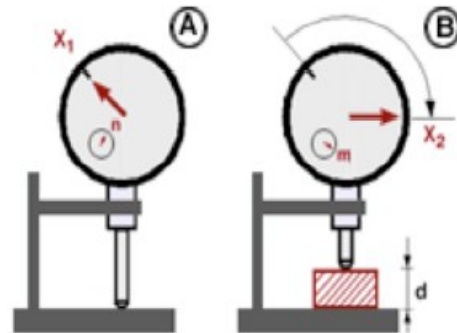
Le comparateur à cadran est constitué d'une tige coulissante qui entraîne une aiguille tournant sur un cadran gradué en 100 divisions. Une petite aiguille indique le nombre de tours (1 tour correspond à 1mm) parcouru par la grande.

La précision est de 10µm.

La mesure se fait en deux temps :

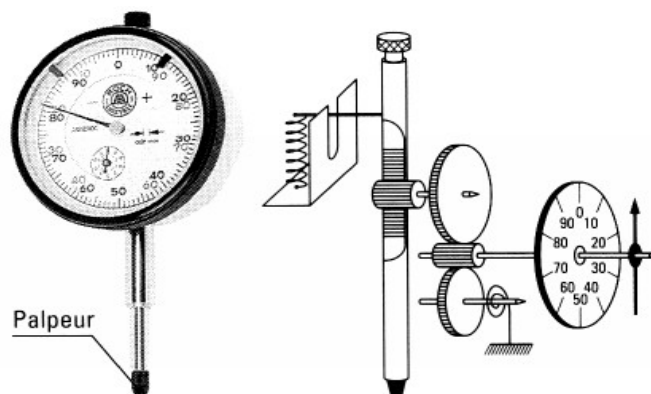
- Le comparateur est posé sur une surface de référence et on repère l'indication des aiguilles.
- On insère l'objet à mesurer et on repère à nouveau l'indication des aiguilles.

La mesure est égale à la différence des deux repérages :



$$d = [(m - n) + (X2 - X1) / 100] \text{ mm}$$

C'est un instrument très utilisé en mécanique pour vérifier les cotes de pièces ou les centrages. Certains comparateurs ont un cadran pivotant ce qui permet d'ajuster le 0 en face de l'aiguille lors du premier relevé de valeurs.



**Fig.1.3 : Comparateur à cadran
et son mécanisme de base**

❖ Principe du mécanisme du comparateur :

Pour un déplacement de 1mm du palpeur lié à la crémaillère, l'aiguille liée au pignon terminal de la chaîne cinématique fait 1 tour. Le cadran étant divisé en 100 graduations, chaque graduation est égale à : 1mm / 100, soit 0,01.

I-6 INSTRUMENTS PNEUMATIQUES

1.6.1. Principe de la métrologie pneumatique

Le débit d'air sortant d'un gicleur de sortie G_s face à une paroi est proportionnel à la distance séparant le bord du gicleur et cette paroi. L'air à la pression initiale constante P_H , s'écoule à travers le gicleur d'entrée.

La pression qui règne entre le gicleur d'entrée G_e et le gicleur de sortie G_s dépend du rapport de leurs sections.

Si G_e a une section constante et G_s a une section variable, la valeur de P_H diminue quand la section de sortie augmente et inversement, (la section de sortie $S = \pi \cdot d \cdot e$).

Les variations de P_H correspondent aux variations de e . Ainsi, la variation du débit d'air entraîne une variation de pression dans l'appareil qui affiche la dimension à mesurer.

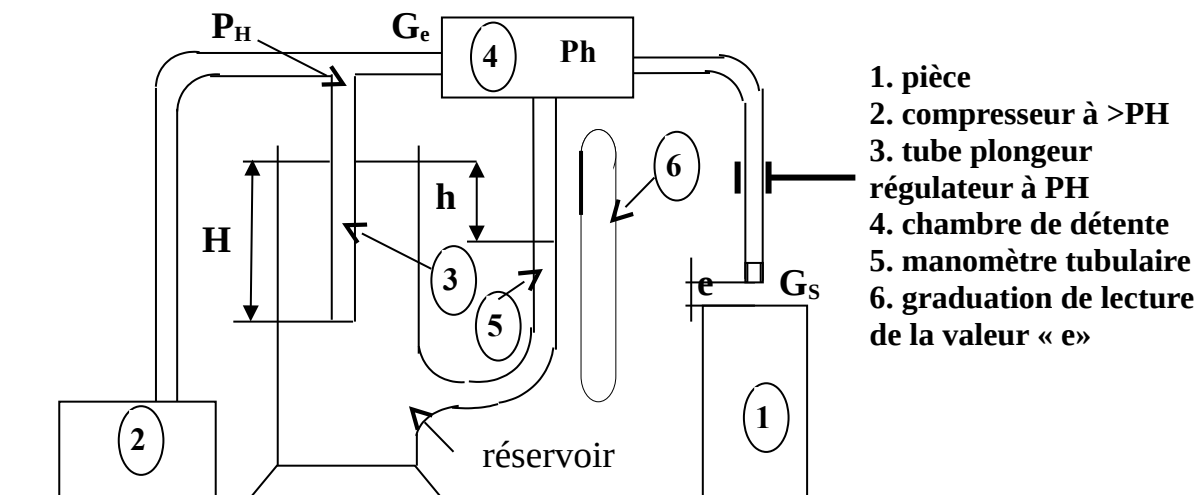


Fig.1.4 : L'appareil Solex

1.6.2. Description de l'appareil

L'appareil Solex (fig.1.4) comprend, d'une part, le réservoir à pression constante, le gicleur d'entrée G_e , le tube manométrique 5 donnant la pression P_H et une graduation de lecture, placée à côté du tube. L'air sous pression venant d'un compresseur (une pression de quelques mètres d'eau) arrive en G_e , se détend dans la chambre de détente 4.

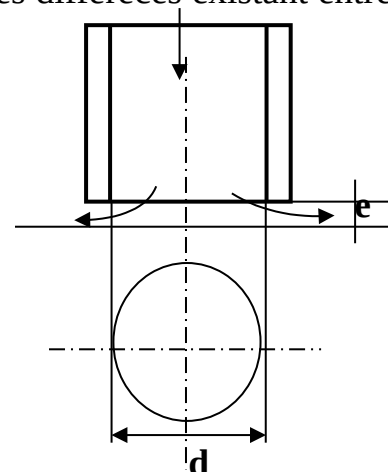
Si la pression dépasse P_H , l'excès de pression produit un départ d'air à travers l'eau. La pression est donc toujours égale à P_H dans le tube plongeur 3. Le débit du gicleur de la sortie S dépend de la distance e qui varie suivant les différences existant entre les cotes de la pièce à mesurer.

La lecture du niveau de l'eau sur le tube manométrique donnera en 1/100 ou 1/1000 de millimètre.

Les appareils construits pour $H = 0.5m$ sont tels que 1/100 de mm correspond à un déplacement de liquide de 100mm ; on peut donc apprécier facilement le millième de mm.

1.6.3. Dispositifs mesureurs

Dans tous les procédés, l'air s'échappe entre un



gicleur de sortie et une paroi qui peut être :

- Soit la surface de la pièce ;
- Soit la touche d'une pièce intermédiaire ;

d'où deux types de palpeurs de pièces :

a) Palpeur à laminage direct de l'air à la sortie

Les mesures sont faites sans contact entre le palpeur et la pièce à mesurer. Pour un même écart de mesure, la section d'écoulement varie selon la forme de la pièce située en regard.

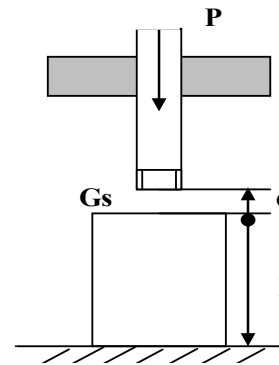


Fig.1.5

b) Palpeur à laminage indirect

Sur les pièces à mesurer de formes variées, la section d'écoulement dépend de ces formes et de la position du gicleur, mais n'est pas en accord avec 'e'. On utilise alors de préférence le laminage indirect avec l'aide d'un palpeur intermédiaire qui produira exactement en 'e' les variations de mesure quelque soit la forme géométrique de la pièce à mesurer par contact.

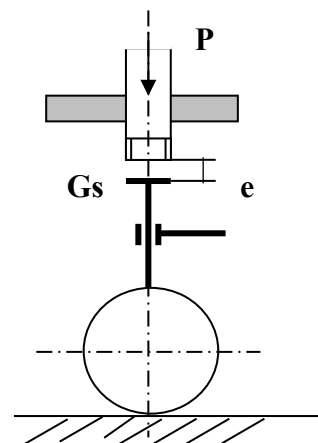


Fig.1.6

1.6.4. Applications de l'appareil contrôle et mesure par comparaison

La dimension de la pièce est comparée à celle d'un étalon après choix de l'équipement : appareil, pression d'air, sensibilité, diamètre des gicleurs.

- **Dimension externe entre éléments parallèles (figure 1.7) :**

La hauteur P de la pièce est donc comparée à la hauteur E de l'étalon, avec un palpeur à gicleur en laminage direct.

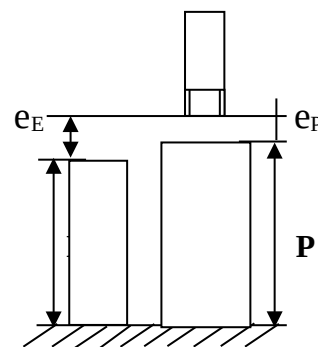


Fig.1.7

- **Dimension d'un cylindre (figure 1.8):**

Même dispositif, mais avec laminage indirect. La figure indique le mesureur à fourche possédant deux gicleurs dont l'épaisseur des lames d'air e_1 et e_2 s'additionnent.

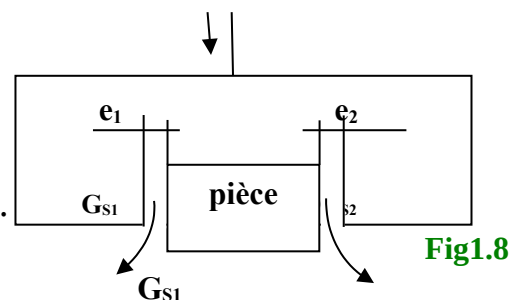


Fig.1.8

- **Diamètre d'un alésage (figure 1.9):**

le tampon possède deux gicleurs pour donner la même somme si le tampon n'est pas centré dans l'alésage.

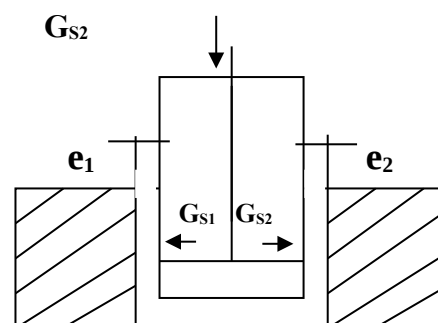


Fig.1.9

$$e = e_1 + e_2$$

I-7 INSTRUMENTS OPTIQUES

1.7.1. Notions

On sait que l'oeil ne peut percevoir, à 15cm, que des détails dont les dimensions sont supérieures à 45 microns. Pour voir des détails plus petits, on utilise des instruments d'optique qui donnent de l'objet une image virtuelle dont le diamètre apparent est beaucoup plus grand que celui de l'objet.

Un *instrument d'optique* est un instrument formant une image d'un objet. C'est généralement l'association de plusieurs *systèmes optiques* (ex.: *objectif* et *oculaire*).

En général, on désigne par « instrument optique » tout instrument utilisant l'optique dans son fonctionnement. C'est-à-dire les systèmes optiques reposent sur l'envoi d'un faisceau lumineux sur la surface de l'échantillon à analyser et sur l'enregistrement du faisceau réfléchi.

Les instruments d'optique ont pour but d'améliorer l'observation des objets en leur substituant des images.

Par ailleurs l'optique offre comme toutes les méthodes sans contact, l'intérêt de pouvoir contrôler des pièces fragiles ou déformables. Le contrôle s'effectue aussi à une vitesse élevée.

Les instruments optiques peuvent être classés en deux catégories ; on distingue :

- **Les instruments objectifs** ou de projection, qui donnent de l'objet une image réelle reçue sur un écran ou une plaque photographique.

Ex : objectifs photographiques, appareils de projection, lanternes de projection...

- **Les instruments subjectifs** ou oculaires qui sont associés à l'oeil pour faciliter l'observation. Ils donnent de l'objet une image virtuelle que l'oeil examine.

Exemple : miroir, périscope, endoscope, loupe, microscope, lunette...

1.7.2. Modèle optique de l'oeil

1.7.2.1. Quelques éléments d'anatomie de l'oeil

L'oeil est un système optique centré. En optique on retiendra le rôle des trois éléments suivants :

l'iris, qui permet de contrôler la quantité de lumière incidente

le cristallin, qui peut être assimilé à une lentille convergente de distance focale réglable

la rétine, sur laquelle se forme l'image, et recouverte de cellules photosensibles

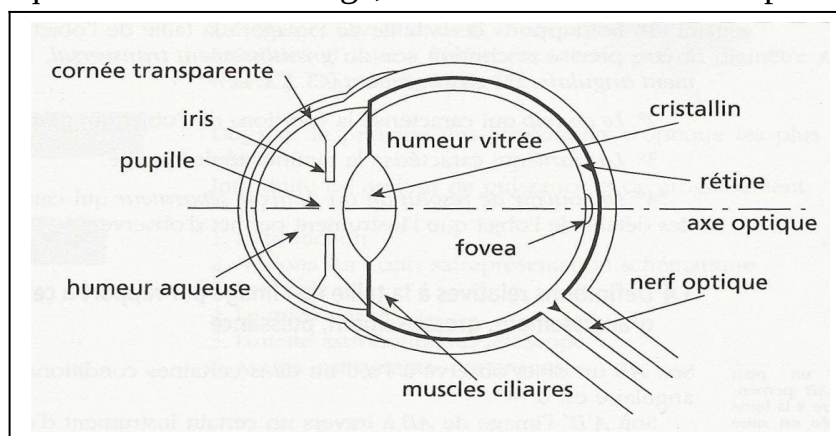


Fig 1.10 : éléments constitutants de l'oeil

Que peut-on voir à l'oeil nu ?

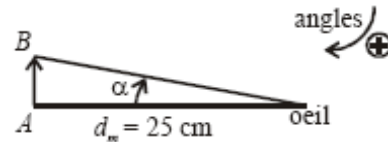
- $AB_{\min} = 125 \mu\text{m}$
- $\theta_{\min} = 5.10^{-4} \text{ rad}$

(limite angulaire de résolution)

- $d_{\min} = 250\text{mm}$

(distance minimale d'accommodation)

⇒ nécessité d'un instrument optique qui grossit



1.7.2.2. Phénomène d'accommodation

- **La vergence** du cristallin peut varier : en se bombant, il devient plus convergent. Cela nous permet (*heureusement*) de voir nets des objets situés à des distances différentes. C'est ce que l'on appelle le phénomène d'accommodation.

Il est intéressant de connaître la distance minimale au-delà de laquelle on peut voir net, ainsi que la distance maximale en deçà de laquelle on peut voir net.

- **Punctum remotum PR** (point éloigné) : c'est le point (distance) le plus éloigné que l'on peut voir net. Pour voir net au PR, l'oeil est *au repos*, il n'a pas besoin d'accommoder.

Pour un « oeil normal », le PR se trouve à *l'infini*. Au repos, l'oeil voit net à l'infini : le plan focal image du cristallin se trouve alors sur la rétine.

- **Punctum proximum PP** (point proche) : c'est le point (la distance) le plus proche que l'on peut voir net. Pour voir net au PP, l'oeil accommode au maximum.

Pour un oeil « normal », le PP est de l'ordre de *25 cm*.

Accommoder est fatigant. C'est pourquoi les instruments d'optique qui aident l'oeil « à mieux voir » (lunette astronomique, télescope, microscope) fournissent de l'objet initial une image à l'infini. Cette image est un objet pour l'oeil, situé au PR de l'oeil normal, et peut donc être observé sans accommoder, sans fatigue.

1.7.3. Les lentilles

Les lentilles sont les éléments essentiels des instruments d'optique, en les associant, on observera aussi bien le proche microscopique que le lointain astronomique. Une lentille mince est caractérisée par trois points singuliers et deux grandeurs :

O : centre optique

F : foyer principal objet

F' : foyer principal image, symétrique

F par rapport à O.

f' (m) : Distance focale :

$$f'(\text{m}) = \overline{FO} = \overline{OF'} > 0$$

Vergence :

$$C(\delta) = \frac{1}{f'} > 0$$

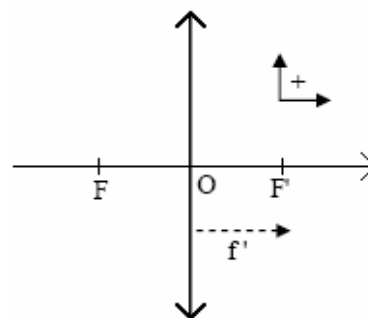


Fig 1.11 :Représentation

Les lentilles sont définies comme un système optique constitué d'un milieu réfringent (qui réfracte la lumière), transparent limité par des surfaces sphériques. Généralement, les lentilles sont en flint-glass (indice de réfraction: 1.6 à 1.7) ou en crown-glass (indice de réfraction: 1.5). On distingue deux catégories de lentilles : les lentilles convergentes et les lentilles divergentes.

Nous ne considérerons ici que des **lentilles minces** (on néglige l'épaisseur de la lentille) et que des rayons lumineux faiblement inclinés sur l'axe principal, ce qui permet des approximations au premier ordre.

Les propriétés des lentilles minces sont:

1. *Tout rayon lumineux passant par le centre optique d'une lentille mince ne subit aucune déviation*
2. *Tout rayon lumineux parallèle à l'axe principal d'une lentille se réfracte en passant réellement ou virtuellement par le foyer.*

1.7.4.Construction d'image

Soit à construire l'image d'un point A formée par la lentille convergente (Fig.3.2a). Nous connaissons les trajectoires de trois rayons lumineux issus du point A. L'intersection de deux de ces trajectoires suffit à déterminer la position de A', point image de A. Le rayon AO passant par le centre optique O ne subit pas de déviation. Le rayon parallèle à l'axe optique passe, après réfraction, par le foyer F. Le rayon, qui passe par le foyer image F', devient parallèle à l'axe optique après réfraction par la lentille. Le point A', qui est à l'intersection de ces rayons réfractés, est l'image du point A, et l'image de la flèche AB est la flèche A'B'.

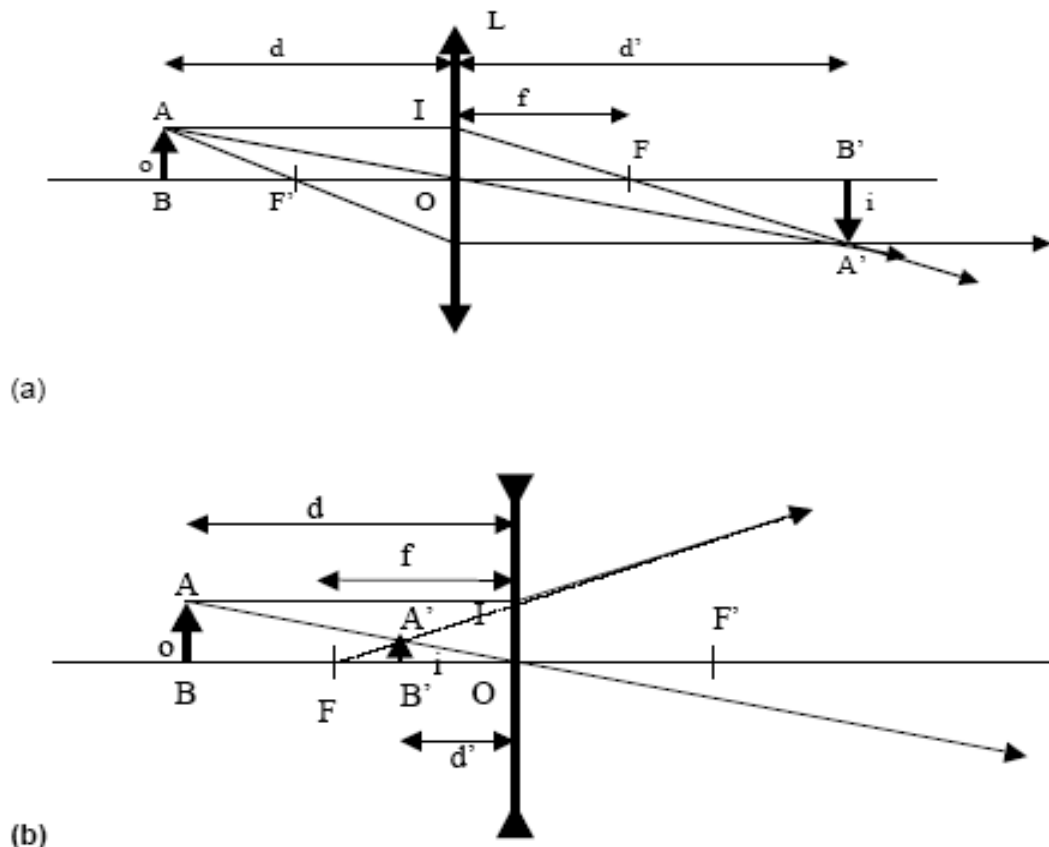


Fig 1.12: Image d'un objet donnée par une lentille convergente (a) et divergente (b).

La construction géométrique de l'image d'un point formée par une lentille divergente est analogue à celle de la lentille convergente en remarquant toutefois que ce sont les prolongements des rayons réfractés qui convergent au point image (Fig. 3.2b). Dans le cas de la Fig2b, l'image de AB est virtuelle (ne peut pas être projetée sur l'écran).

1.7.5. Les instruments optiques

1.7.5.1. La loupe

Une **loupe** est un [instrument d'optique](#) *subjectif* constitué d'une [lentille convexe](#) de petite **distance focale** (quelques centimètres), permettant d'obtenir d'un objet une image agrandie - L'objet à examiner est placé entre **la lentille et son plan focal objet**. La figure suivante indique la construction de l'image.

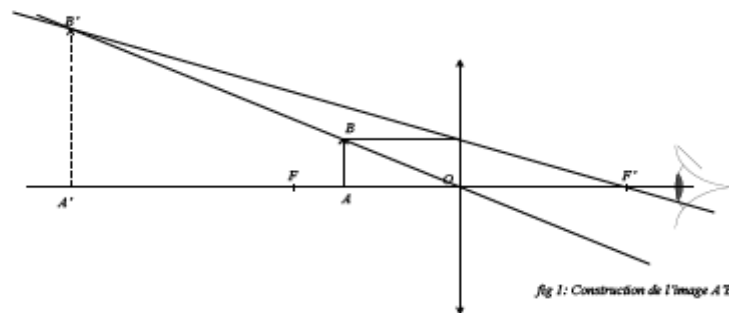


Fig1.13 : construction de l'image A'B'

1.7.5.2. Le Microscope

Un microscope est constitué de deux lentilles minces convergentes, celle proche de l'objet, L1, très convergente, est l'**objectif**, celle proche de l'oeil, L2, est l'**oculaire**, et d'un système d'éclairage élaboré complété d'un [condenseur](#) de lumière rendant le fond uni sans image parasite, et qui répond à la définition de *système dioptrique centré*. L'intervalle optique est la distance :

$$\Delta = \overline{F'_1 F_2} .$$

D'un objet plan AB, l'objectif donne une image intermédiaire A₁B₁, réelle, qui sert d'objet pour l'oculaire qui en donne l'image définitive A₂B₂, virtuelle.

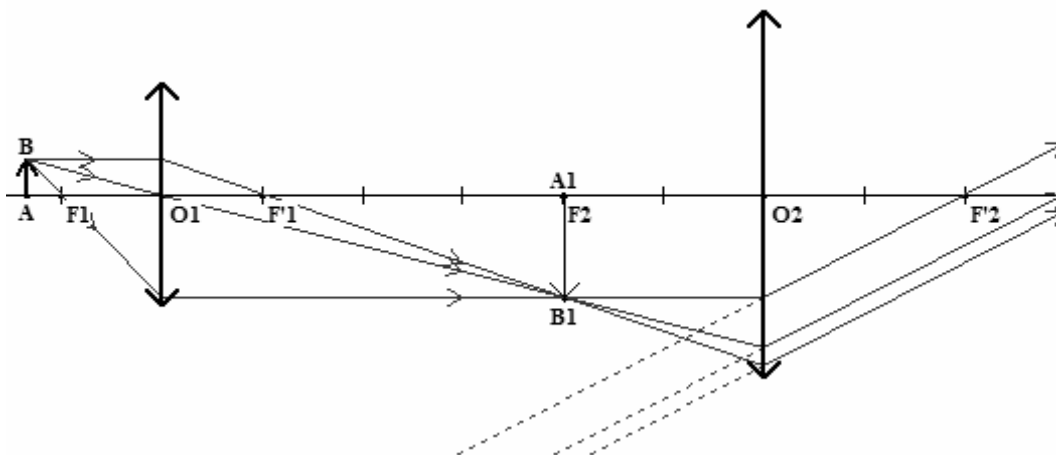


Fig1.14 : microscope : construction de l'image

1.7.5.3. Le projecteur de profil

❖ Définition

Le **Projecteur de Profil** est un instrument d'établi conçu et fabriqué pour inspecter une grande variété de produits d'ingénierie tels que les outils de coupe, les pièces d'usinage de précision, les pièces embouties engrenages, les vis sans fin, etc.

Ce matériel optique se compose des éléments suivants : une **source lumineuse**, un **condenseur**, une **lentille**, des **miroirs réfléchissants** et un **écran**.

❖ Comment utiliser l'appareil :

- 1) Activer l'interrupteur (**ON**).
- 2) Placer l'échantion sur le poste de travail.
- 3) Laisser le sélecteur en position **DUAL** et activer les variateurs électroniques d'intensité (**ON**).
Régler le contraste entre l'éclairage diascopique (de **Profil**) et épiscopique (de **Surface**) en tournant les boutons dans le sens horaire ou antihoraire.
- 4) Faire la mise au point par rapport au composant en tournant le volant de mise au point dans le sens horaire/antihoraire afin de monter/descendre la table X-Y.
- 5) Pour modifier le grossissement, tourner la tourelle jusqu'au clic de mise en place de la lentille suivante.



Fig 1.15 :Projecteur