



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ «Abbés LAGHROUR» DE KHENCHELA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE**



**Département de Génie Mécanique**

N° de série :.....

**Mémoire de fin d'études**

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

**Spécialité : Génie Mécanique  
Option: Construction Mécanique**

---

---

**Analyse métrologique de l'incertitude d'un  
système de mesure micrométrique**

---

---

**Dirigé par : Dr.bouali H.**

**Réalisé par :**

- riche abdelbaki
- dahmman charafeddin

**Présenté le .....**

# *Dédicaces*

*A*

- ✚ Ma famille; mes parents ;
- ✚ Tous mes frères ;
- ✚ Tous les étudiants de la promotion 2020/2021;
- ✚ Mon encadreur Dr. Bouali Hichem ;
- ✚ Tous mes amis et collègues ;
- ✚ À mon collègue qui nous a travaillé dur pour terminer ce travail  
Charafeddine Dahmane .

Je dédie ce modeste travail.

Riche AbdElbaki

# *Dédicaces*

## *A*

- ✚ Ma famille; mes parents ;
- ✚ Tous mes frères et sœurs ; ainsi que leurs enfants ;
- ✚ Tous les étudiants de la promotion 2020/2021;
- ✚ Mon encadreur Dr. Bouali Hichem ;
- ✚ À mon collègue qui nous a travaillé dur pour terminer ce travail  
Riche Abdelbaki ;
- ✚ Au tombeau de mes yeux Imane –M ;
- ✚ A ma A mon père qui m'a toujours soutenu et encouragé à étudier ;
- ✚ précieuse mère, Dieu prolonge sa vie et nous sauve ;
- ✚ Tous mes amis et collègues.

Je dédie ce modeste travail.

Dahmmane Charafeddine

# Remerciements

Au nom de Dieu clément et miséricorde Dieu le grand merci lui revient, pour son aide et la volonté qu'il nous a donné pour surmonter tous les obstacles et les difficultés durant cette année d'études et de nous avoir éclairé notre chemin afin de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont permis de mener à bien notre projet de master tant sur le plan scientifique que sur le plan personnel.

Nos remerciements s'adressent tout d'abord à notre directeur de thèse Monsieur : **Dr. Bouali Hichem** pour son aide et son encadrement sans faille et qui nous a permis de vivre une expérience très enrichissante à tous les niveaux, sans oublier ses judicieux conseils et son soutien constant tout au long du projet, Merci pour tout Mr.

Nous remercions vivement nos enseignants de département de Génie Mécanique.

Nous tenons fortement à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et pour leur temps qu'ils ont consacré pour évaluer ce travail.

Nous adressons aussi toutes nos gratitude au chef département de Génie Mécanique : Dr : berkia . pour son aide et ses conseils judicieux ;

Il nous est également important de remercier les différentes personnes que nous ont pu côtoyer durant cette année passée au département de Génie Mécanique et qui ont créé une ambiance chaleureuse et amicale.

Nos remerciements s'adressent également aux personnes chargées de l'administration.

A tous les professeurs et cadres qui ont contribué à notre formation de près au de loin ; Sans oublier nos amis et collègues de la promotion 2020/2021.

Riche abdelbaki & dahmman charafeddin

## Table des matières

Liste des figures .....	1
Index des Tableaux.....	4
Résumé.....	5
Introduction générale.....	8
<b>Chapitre I /</b>	
<b>Généralités sur la microscopie</b>	<b>12</b>
I.1. microscope optique .....	13
I.1.2. Types de microscopie optique.....	13
I.1.2.1.Types alternatifs de microscopie.....	16
I.1.3. Principe de fonctionnement du microscope optique.....	16
I.1.4. Résolution du microscope.....	18
I.1.4.1. Résolution et distance de travail .....	18
I.1.4.2. Grossissement du microscope.....	18
I.1.4.3. Résolutions théoriques des microscopes optiques.....	19
I.1.4.4. Vision microscopique.....	19
I.2. mesure par microscope optique.....	20
I.2.1. Mesure des longueurs.....	20
I.2.2. Mesure de profondeurs.....	21
I.2.3. Mesure de surfaces.....	21
I.3. mesure des objets microscopiques en microscopie photonique.....	21
I.3.1. Utilisation d'un micromètre objet et d'un micromètre oculaire.....	21
I.3.1.1. le micromètre oculaire.....	21
I.3.1.2. le micromètre objectif.....	22
I.4. Préparation d'échantillons.....	24
I.4.1. Lumière réfléchie.....	25
I.4.2. Lumière transmise.....	26
I.5. Images.....	26
I.6. L'optique ondulatoire.....	26
I.6.1. Spécificités de la gamme des ondes lumineuses.....	27
I.6.2. La difficulté pratique de l'approche électromagnétique.....	28
I.6.3. Interactions de la lumière avec la matière.....	28
I.6.4. L'optique quantique – le photon.....	29
I.7. Ondes électromagnétiques.....	29
I.7.1.Le champ électromagnétique.....	29
I.8. Utilisation du microscope optique.....	30
I.9. Fixation de l'échantillon sur le microscope classique.....	30
I.10. Lumière transmise.....	31
<b>Chapitre II / notions métrologique</b>	<b>32</b>
II.1. Introduction.....	33
II.2. Généralités.....	34

II.2.1. Mesurage.....	34
II.2.2. Grandeur mesurable.....	34
II.2.3. Dimension.....	34
II.2.4. Mesurande.....	34
II.2.5. Unité de mesure.....	34
II.2.6. Résultat de mesurage.....	35
II.2.7. Valeur vraie.....	35
II.2.8. Valeur conventionnellement vraie.....	35
II.3. Normes métrologique.....	36
II.3.1. Le bureau international des poids et mesures (BIPM).....	36
II.3.2. Vocabulaire International de Métrologie (VIM).....	37
II.3.3. Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM).....	38
II.4. Notions et définitions métrologique.....	38
II.4.1. Exactitude.....	38
II.4.2. Fidélité.....	39
II.4.2.1. Erreur systématique.....	39
II.4.3. Justesse.....	40
II.4.3.1. Erreur de justesse.....	40
II.4.4. Précision.....	42
II.4.5. Sensibilité.....	42
II.4.6. Répétabilité.....	43
II.4.7. Reproductibilité.....	43
II.4.8. Résolution.....	43
II.4.9. Etendue de Mesure (capacité).....	44
II.5. L'erreur et l'incertitude de mesure.....	44
II.5.1. Système de mesure.....	44
II.5.2. Les fautes.....	45
II.5.3. Les erreurs.....	45
II.5.4. Incertitude.....	46
II.5.4.1. Règles de présentation.....	47
II.5.4.2. Incertitude de type A (incertitude de répétabilité).....	47
II.5.4.3. Incertitude de type B.....	47
II.5.5. Recherche des causes d'erreurs.....	49
II.5.5.1. Incertitude de mesurage.....	49
II.6. Différents classes de métrologie.....	50
II.6.1. Métrologie scientifique.....	50
II.6.2. Métrologie industrielle.....	50
II.6.3. Métrologie légale.....	51
II.7. L'étalonnage.....	51
II.7.1. Etalonnage.....	51
<b>Chapitre III / Validation de la méthode de mesure</b>	
<b>des distances par microscope</b>	<b>53</b>
III.1. Etalonnage de l'oculaire d'un microscope.....	54
III.1.1. Présentation du matériel.....	54
III.1.2. Étalonner le micromètre de l'oculaire.....	54
III.1.3. L'oculaire micrométrique.....	56
III.1.4. La lame micrométrique.....	57
III.1.5. Protocole d'étalonnage.....	58

III.1.6. Mesures.....	59
III.1.6.1. Principe.....	60
III.1.7. Utilisation.....	60
III.1.7.1. En vision directe.....	60
III.1.7.2. Avec une caméra oculaire.....	61
III.2. Logiciel de caméra associé à un microscope.....	62
III.2.1. interface de travail de Logiciel de caméra.....	62
III.2.2. Barre latérale de la caméra.....	67
III.2.2.1. Groupe Liste de caméras.....	68
III.2.2.2. Groupe Capture et résolution Capturer.....	68
III.2.2.3. Groupe d'échantillonnage.....	69
III.2.2.4. Groupe Histogramme.....	70
III.2.3. Déposer.....	70
III.2.3.1. Ouvrir l'image.....	71
III.2.3.2. Enregistrer sous.....	71
III.2.3.2. Twain : Acquérir.....	71
III.2.4. View.....	72
III.2.4.1. Feuille de mesure.....	72
III.2.5. Installer.....	73
III.2.5.1. Filigrane vidéo.....	73
III.2.6. Capturer l'image.....	74
III.2.7. Image.....	74
III.2.7.1. Mode.....	74
III.2.7.2. Histogramme.....	76

## **Chapitre VI /le traitement de l'image pour un microscope** 77

VI.1. Traitement d'image.....	78
VI.1.2. Historique du traitement d'images.....	78
VI.1.3. Technique de traitement d'images.....	80
VI.1.3.1. Types de données manipulées.....	80
VI.1.4. Applications.....	81
VI.1.5. Quelques aspects du Traitement d'Image.....	82
VI.2. Image Numérique.....	84
VI.2.1. Principe de l'image numérique.....	85
VI.2.1.1. Echantillonnage.....	87
VI.2.1.2. quantification.....	88
VI.2.2. Quelques techniques de traitement d'image.....	89
VI.2.2.1. Histogramme.....	89
VI.2.2.2. Egalisation de l'histogramme.....	91
VI.2.2.3. Seuillage.....	92
VI.2.2.4. Le filtrage.....	93
VI.2.2.4.1. Types de Filtrage.....	94
VI.3. Reconnaissance des formes.....	99
VI.3.1. introduction.....	99
VI.3.2. Definition.....	100
VI.3.3. Exemple d' application de la RDF.....	101
VI.3.3.1. La vision artificielle.....	101

VI.3.4. Le schema de la reconnaissance des formes.....	102
VI.3.5. les Methodes de la RDF.....	104
VI.3.5.1. méthodes statistiques.....	104
VI.3.5.2. méthodes syntaxique.....	104
VI.3.5.3. combinison des classificateurs.....	105
<b>Conclusion</b> .....	107
<b>Liste des abréviations</b> .....	109
<b>Références bibliographiques</b> .....	110

## Liste des figures

Fig.I.1 .....	14
Fig.I.2 .....	14
Fig.I.3 .....	15
Fig.I.4 .....	16
Fig.I.5 .....	17
Fig.I.6 .....	17
Fig.I.7 .....	18
Fig.I.8 .....	20
Fig.I.9 .....	21
Fig.I.10 .....	21
Fig.I.11 .....	22
Fig.I.12 .....	22
Fig.I.13 .....	22
Fig.I.14 .....	23
Fig.I.15 .....	24
Fig.I.16 .....	31
Fig.I.17 .....	31
Fig.II.1 .....	37
Fig.II.2 .....	39
Fig.II.3 .....	40
Fig.II.4 .....	41
Fig.II.5 .....	41
Fig.II.6 .....	42
Fig.II.7 .....	43
Fig.II.8 .....	44
Fig.II.9 .....	45
Fig.II.10 .....	46
Fig.II.11 .....	48
Fig.II.12 .....	49
Fig.II.13 .....	50
Fig.III.1 .....	54
Fig.III.2 .....	55
Fig.III.3 .....	55
Fig.III.4 .....	56
Fig.III.5 .....	57
Fig.III.6 .....	57
Fig.III.7 .....	57
Fig.III.8 .....	58
Fig.III.9 .....	59
Fig.III.10 .....	59
Fig.III.11 .....	62
Fig.III.12 .....	63

Fig.III.13.....	64
Fig.III.14.....	66
Fig.III.15.....	66
Fig.III.16.....	66
Fig.III.17.....	68
Fig.III.18.....	68
Fig.III.19.....	69
Fig.III.20.....	69
Fig.III.21.....	70
Fig.III.22.....	71
Fig.III.23.....	72
Fig.III.24.....	73
Fig.III.25.....	73
Fig.III.26.....	73
Fig.III.27.....	74
Fig.III.28.....	75
Fig.III.29.....	75
Fig.III.30.....	76
Fig.III.31.....	76
Fig.VI.1.....	78
Fig.VI.2.....	79
Fig.VI.3.....	81
Fig.VI.4.....	82
Fig.VI.5.....	83
Fig.VI.6.....	83
Fig.VI.7.....	84
Fig.VI.8.....	85
Fig.VI.9.....	86
Fig.VI.10.....	86
Fig.VI.11.....	87
Fig.VI.12.....	87
Fig.VI.13.....	89
Fig.VI.14.....	90
Fig.VI.15.....	90
Fig.VI.16.....	90
Fig.VI.17.....	91
Fig.VI.18.....	92
Fig.VI.19.....	92
Fig.VI.20.....	93
Fig.VI.21.....	93
Fig.VI.22.....	95
Fig.VI.23.....	96
Fig.VI.24.....	96
Fig.VI.25.....	97

Fig. VI.26.....	98
Fig. VI.27.....	100
Fig. VI.28.....	101
Fig. VI.29.....	102
Fig. VI.30.....	102

## Liste des tableaux

Tab. I.1. ....	19
Tab. I.2. ....	23
Tab. II.1.....	35

---

---

## Résumé

---

---

---

# Résumé

---

Cette Mémoire a pour objectif de découvrir quelques-unes des dernières technologies en matière de traitement d'images et de vision par ordinateur. Par le traitement d'images, on assigne un ensemble d'opérations aux images numériques, qui transforment l'image en une autre image, ou en une autre primitive formelle. Et aussi la découverte de la métrologie, ses propriétés et standards, et le lien entre la métrologie et les techniques que nous avons évoquées. plus tôt qui profitent et facilitent les difficultés d'analyse métrologique dans le système de mesure Micrométrique où la vision par ordinateur fait référence à la compréhension d'une scène ou d'un phénomène à partir d'informations « image », par exemple une image d'un appareil mécanique tel qu'une horloge qui est sensible, il lie étroitement perception, comportement et contrôle. Les domaines couverts vont du traitement du signal à l'intelligence artificielle, nous ne pouvons donc pas prétendre être exhaustifs, mais nous visons à explorer un certain nombre de technologies importantes et actuelles. Les technologies de l'information et la vision sont des disciplines relativement récentes et en développement rapide. Il est en pleine expansion et donne lieu chaque année à un foisonnement de travaux académiques, technologiques et industriels.

Le système de mesure micrométrique nécessite parfois le microscope afin de travailler avec les techniques que nous avons évoquées plus haut dans le travail de vision par ordinateur car elles se complètent, elles passent par des étapes afin de faire la mesure micrométrique, il existe donc un programme de caméra spécial pour le microscope pour analyser les images prises après vision et en déduire des données, histogrammes, valeurs et autres unités et tout cela fonctionne au service de ce domaine mécanique.

Cette extravagance s'explique par la pénibilité du sujet : la complexité calculatoire due à l'énorme quantité de données, d'autre part l'engouement pour ces disciplines s'explique par la multiplication continue des applications et problématiques industrielles dans divers domaines et notamment en le domaine mécanique qui est important et lié à notre sujet donc toutes ces techniques contribuent au domaine mécanique de la métrologie à la micrométrie

# Abstract

In the micromechanical field, the sizing of micro-parts and micro-pattern is a very important quality requirement for engineers and MEMS manufacturers.

There are many methods for measuring positions in the micro world. Depending on the type of performance to be sought as a priority, it is possible to use resistive, piezoelectric, capacitive, inductive, optical sensors, etc.

One of the most popular sensors are non-contact sensors, such as so-called vision-image sensors. This sensor consists of two parts, the vision part which represents the image acquisition system, and the image processing part which represents the sizing system.

In this thesis, we have chosen to explore the path of measurement by vision, using a camera and an optical microscope. The goal is to acquire and compare multiple images of a specific object over a limited period of time. Comparing images allows us to extract important information about the movement and dimensions of our object.

Another problem addressed in our thesis is the quality of the images obtained from the acquisition system. Image quality can be affected by several environmental factors such as brightness and temperature. The human factor, the materials used and other factors are considered parameters of metrological influence on our measurement system.

Therefore, we devote a large part of our work to a metrological study. The evaluation of measurement uncertainty and the calibration of the vision system are the main points to study in this part.

Image processing is well detailed in this thesis, in particular, filtering, segmentation and pattern recognition. These image processing operations are carried out both at the level of processing software associated with the camera, and again at the level of external processing algorithms.

Fourier analysis is another subject dealt with in our thesis. Further to the importance of this method in the field of two-dimensional signal processing.

Finally, we can consider our work as an initiation to understand the field of artificial intelligence based on image processing, and especially in the study and sizing of microsystems.

---

---

# **Introduction générale**

---

---

---

## Introduction générale

---

Les techniques optiques sont aujourd'hui couramment utilisées pour mesurer les micro systèmes électromécaniques. Cet engouement s'explique largement par la disponibilité de logiciels de traitement sur PC, permettant d'obtenir des images très réalistes. Un système optique de mesures comporte une source de lumière, un ensemble de composants optiques (réfléchissant, réfractant, diffusant, diffractant, absorbant, polarisant ou dispersif), un ou plusieurs capteurs ainsi que des sous-systèmes mécaniques, électroniques et informatiques. Ces derniers assurent les liaisons et la compatibilité des différents éléments ainsi que l'acquisition et le traitement des mesures.

La microscopie est un ensemble des techniques permettant d'obtenir une image des structures à l'échelle microscopique. Le principe est dans tous les cas le même : une onde est envoyée sur la préparation ou émise par la préparation. Cette onde est captée par un objectif qui la concentre et passe par un oculaire qui crée une image observable. Cette image est soit observée à l'œil nu, soit photographiée, soit enregistrée par caméra CCD et stockée sur ordinateur pour retraitement.

L'image obtenue est beaucoup plus qu'un instantané de la préparation. Les techniques de révélation permettent aujourd'hui d'identifier de façon précise toutes sortes de molécules et les photographies (sur pellicules ou numériques) peuvent être analysées pour des études quantitatives (taille, nombre et emplacement des éléments observés).

Il n'y a pas une technique microscopie mais plusieurs dizaines aboutissant à des résultats différents. Il n'y a aucune comparaison entre les images plates et peu contrastées d'un microscope en contraste de phase, celles très fines d'un microscope électronique ou les reconstitutions multichromes en 3D d'un microscope confocal., toutefois seule la première technique permet de travailler sur des tissus vivants.

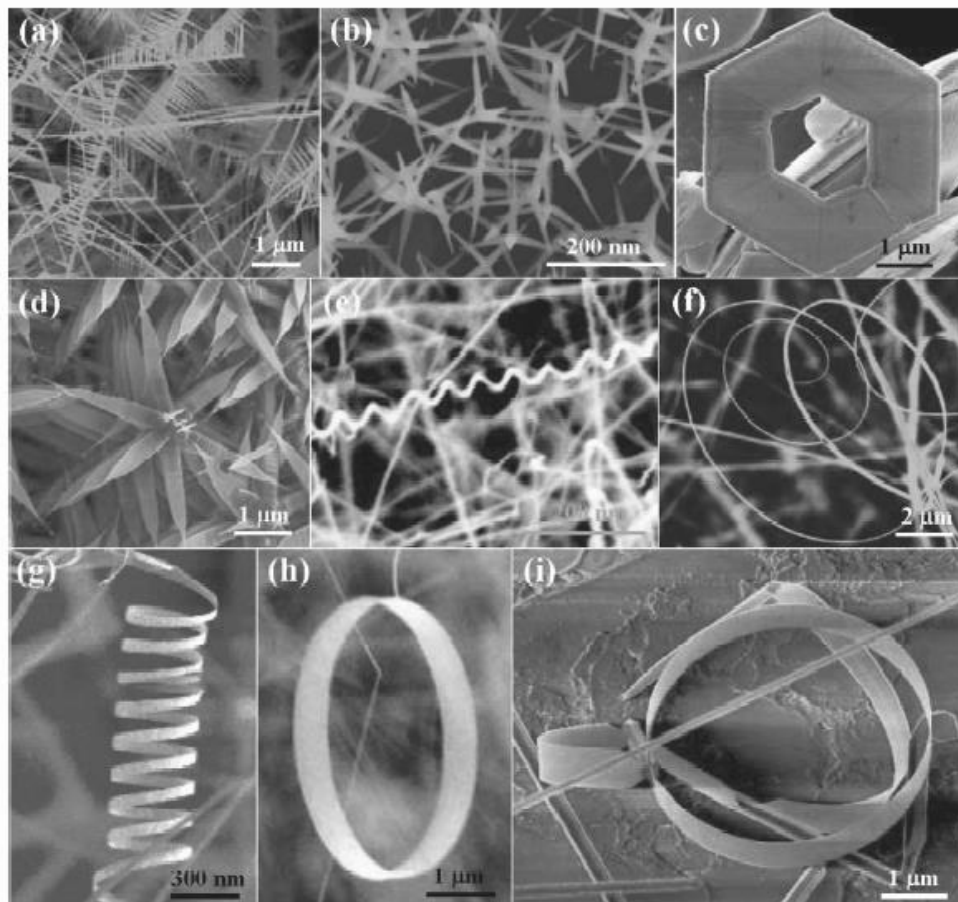
Aujourd'hui la microscopie est divisée en deux grands groupes, différents par la nature de la particule élémentaire impliquée :

- Le microscope optique : aussi appelé photonique, parce qu'il utilise des photons.
- Le microscope électronique : qui utilise des électrons pour étudier l'objet.
- Le microscope à champ proche : qui utilise la force atomique et l'effet tunnel.

On s'intéresse dans notre thèse sur l'étude métrologique d'un système de mesure par vision, un microscope optique muni d'une caméra numérique sert à l'acquisition d'une image. Cette image sera transmise en vue de la présenter sur une interface d'un logiciel de traitement. Des nombreuses opérations de traitement d'image nous permettent l'obtention des informations

sur l'objet visionné, Les dimensions et les déplacements des objets microscopiques sont extraites à partir de plusieurs images traitées.

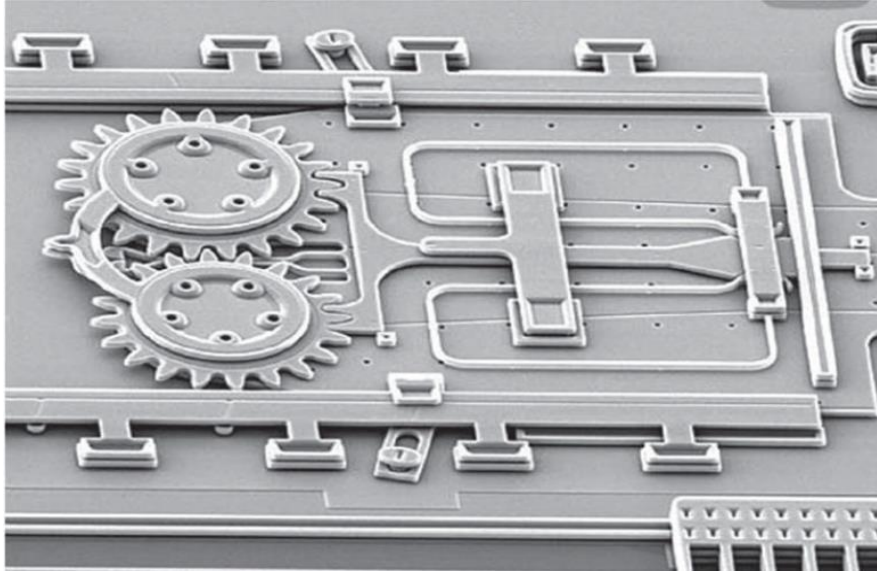
Le domaine de traitement d'image et de vision artificielle est largement utilisé pour la caractérisation du monde micro et nanométrique (Figure I.2 ). Généralement, les couleurs des images sont en gris (image par microscope électronique), ce qui prouve l'exigence d'un traitement spécial pour extraire les informations désirées.



**Fig.** Nanostructures de ZnO synthétisées par évaporation thermique de poudres solides. (a) nanocombes (b) tétrajambe (c) disques hexagonaux (d) nanohélices (f) nanospirale (g) nanoressorts (h) nanoanneau monocristallin (i) combinaison de tiges, arc et anneau [Wils 2007]

Le domaine le plus réponde a cette technique est le domaine des micro-système électromécanique (MSEM).Un microsysteme électromécanique est un microsysteme fabriqué à partir de matériaux semi-conducteurs. Il comprend un ou plusieurs éléments mécaniques et utilise l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur ou d'actionneur, avec au moins une structure présentant des dimensions micrométriques ; la

fonction du système étant en partie assurée par la forme de cette structure Le terme systèmes microélectromécaniques est la version française de l'acronyme anglais MEMS (Microelectromechanical systems).



**Fig.** A microscopic clutch manufactured from MEMS components. *Source: Sandia National Laboratories.*

En vue de faire une étude générale sur cette technique on divise notre travail en quatre chapitre. Le premier chapitre, est un aperçu général sur le système d'acquisition d'images. On a choisi le microscope optique et on montre les différents types et différentes techniques d'observation et d'acquisition d'image par cet outil.

On présente dans le deuxième chapitre la science de mesure (métrologie) comme un outil essentiel sert à calculer et évaluer les incertitudes et les erreurs de mesure commises durant notre processus de mesure. Les lois de la probabilité et de statistique sont bien détaillés dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est consisté à présenter la technique d'acquisition et de traitement des images par une caméra et un logiciel de traitement associé.

Un dernier chapitre, montre les différentes techniques et étape de traitement des images on mathématique surtout, et avec des algorithmes implanter à un système de traitement (algorithmes de filtrage de stockage et de présentation... ). On utilise le Matlab comme un logiciel de traitement et d'analyse des différentes images.

Une conclusion générale, pour montrer les intérêts de la vision artificielle et les perspectives de notre travail dans les prochaines études intéressées par le domaine de l'inélegance artificielle.

---

**Chapitre I /  
l'optique et la mesure microscopique**

---

### I.1. microscope optique

Le microscope optique ou microscope photonique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise sa puissance optique) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain, Il est utilisé en biologie, pour observer les cellules, les tissus, en pétrographie pour reconnaître les roches, en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage , La microscopie optique permet de visualiser des objets ou des détails invisibles pour nos yeux .

Similaire à un appareil photo, le microscope optique utilise un objectif fait de plusieurs lentilles et un oculaire. Il grossit plus ou moins l'image tout en séparant les détails pour être observable à l'œil. Il existe aujourd'hui plus d'une dizaine de types de microscopes optiques dont les meilleurs ont un grossissement x2000.

#### I.1.2. Types de microscopie optique

La technique de microscopie optique est la plus ancienne utilisée Elle est également celle dont il existe le plus de variantes, Le principe est le suivant, la préparation est éclairée par une lampe,Les molécules à observer vont interagir avec la lumière de plusieurs façons :

- soit en absorbant certaines longueurs d'onde de la lumière. C'est la microscopie en lumière directe.
- soit en provoquant un déphasage des différents rayons lumineux. C'est la microscopie en contraste de phase.
- soit en émettant de la lumière à une autre longueur d'onde que celle d'origine. C'est la microscopie à fluorescence.

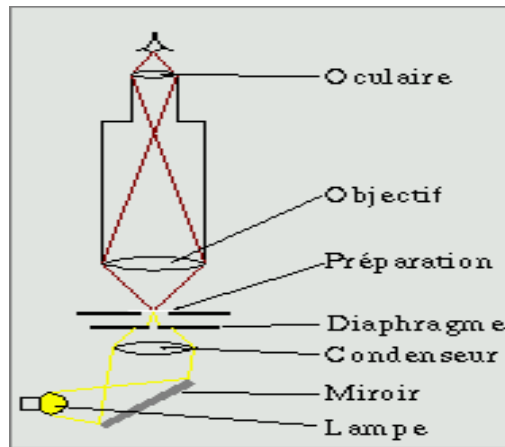
Donc il existe trois types de la microscopie optique :

- La microscopie en lumière directe
- La microscopie en contraste de phase
- La microscopie à fluorescence

##### (a) La microscopie en lumière directe

C'est le cas le plus simple. Les structures à observer sont colorées, soit qu'elles le soient naturellement, soit que ce soit le résultat d'un marquage. La lumière blanche émise par une lampe est concentrée sur la préparation et la traverse. Selon l'intensité de la coloration, la lumière sera plus ou moins absorbée et l'endroit apparaîtra plus ou moins sombre, les zones peu marquées restant relativement claires. La coloration est due soit à un colorant qui se fixe

de façon préférentielle à une molécule particulière ou une famille de molécules, soit à un précipité sombre (voir Fig.I.1).



**Fig.I.1.** Schéma

### **(b) La microscopie en contraste de phase**

Cette technique permet d'observer les cellules sans préparation ni coloration dans leur milieu d'origine. C'est donc l'une des rares qui permet d'observer des cellules vivantes. Elle est ainsi très utilisée en ingénierie cellulaire. Le principe est basé sur le fait que les structures biologiques sont transparentes, mais qu'elles ont un indice de réfraction différent. Les rayons lumineux vont donc subir des déviations en passant d'un milieu à un autre, cela se traduit par un déphasage entre les rayons. En supprimant les rayons lumineux en fonction de leur déphasage, on obtient une image en niveau de gris qui visualise tous les changements de milieu à l'intérieur de l'objet observé. En pratique, on supprime ces rayons déphasés en plaçant des diaphragmes qui bloquent la lumière dans l'axe de l'objectif, mais laissent passer ceux de la périphérie.



**Fig.I.2.** La microscopie en contraste de phase

### (c) La microscopie à fluorescence

Cette variante exploite la capacité qu'ont certaines molécules d'émettre de la lumière quand on les éclaire avec une lumière de longueur d'onde supérieure, Dans son principe, la lumière émise par une source de lumière blanche est filtrée pour isoler la longueur d'onde qui va exciter la préparation puis focalisée sur la zone d'observation par l'objectif. La lumière émise est captée par l'objectif, filtré pour isoler les longueurs d'ondes parasites qui pourraient brouiller le signal (comme la longueur d'onde d'excitation par exemple) puis observée. L'image obtenue est inverse de celle obtenue en lumière directe, les objets observés se détachent en lumineux sur le fond sombre, le contraste final étant alors beaucoup plus élevé.



**Fig.I.3.** La microscopie à fluorescence

Il y a beaucoup de types de microscopes optiques, Ils peuvent varier d'un modèle très fondamental à une complexité élevée qui offre plus de haute résolution et le contraste. Certains des types de microscopes optiques comprennent ce qui suit :

- **Microscope simple** : une lentille unique pour magnifier l'image de l'échantillon, assimilée à une loupe.
- **Microscope composé** : une suite de lentilles pour magnifier l'image d'échantillon à un plus de haute résolution, généralement utilisée dans la recherche moderne.
- **Microscope de Digitals** : peut avoir les lentilles simples ou composées, mais les utilisations un ordinateur de concevoir l'image sans besoin d'un oculaire de voir l'échantillon.
- **Microscope stéréo** : fournit une image stéréoscopique, qui est utile pour des dissections.
- **Microscope de comparaison** : tient compte de la vue simultanée de deux échantillons différents, un dans chaque oeil.
- **Microscope inversé** : voit l'échantillon provenant de dessous, qui est utile pour examiner les cultures cellulaires liquides.

### I.1.2.1. Types alternatifs de microscopie

Il y a plusieurs autres types de microscopie qui peuvent être employés comme solutions de rechange à la microscopie optique, Celles-ci comprennent :

- Microscopie électronique de lecture
- Microscopie électronique de boîte de vitesses
- Microscopie atomique de force
- Microscopie de conductibilité d'ion de lecture
- Microscopie de balayage de perçage d'un tunnel
- Microscopie ultra-violette
- Microscopie de rayon X

À la différence de la microscopie optique, ces types de microscopie n'emploient pas la lumière visible pour voir l'échantillon.

### I.1.3. Principe de fonctionnement du microscope optique

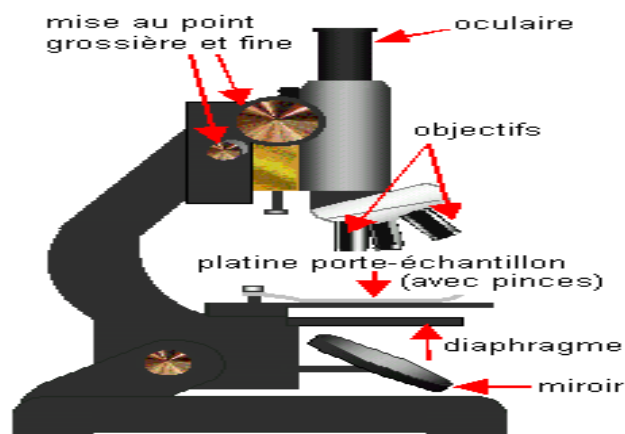
Le microscope optique nous permet d'observer des échantillons invisibles à l'œil humain ou difficilement observables. Il se base sur les lentilles pour obtenir une image agrandie de ces échantillons.

Le microscope optique est composé de deux lentilles :

- [1] l'objectif: l'image est plus grande que l'objet s'il est situé à une distance focale inférieure au double de la distance focale de l'objectif. Cette lentille fonctionne donc comme une lentille convergente.
- [2] l'oculaire: il est placée de façon à avoir un meilleur confort visuel.

Le microscope optique possède donc deux lentilles :

- **La première: l'objectif**, sert à grossir l'image et fonctionne comme une lentille convergente.
- **La deuxième: l'oculaire**, sert à former une image qui ne nécessite pas d'effort pour l'œil humain.



**Fig.I.4.** Schéma du microscope

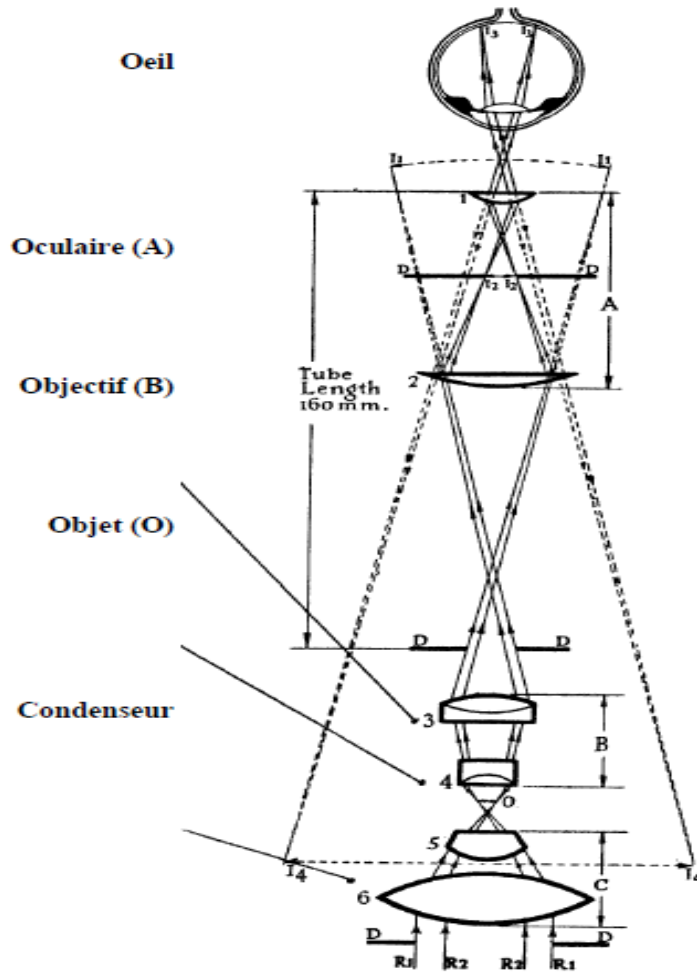


Fig.I.5 Schéma de principe du microscope optique

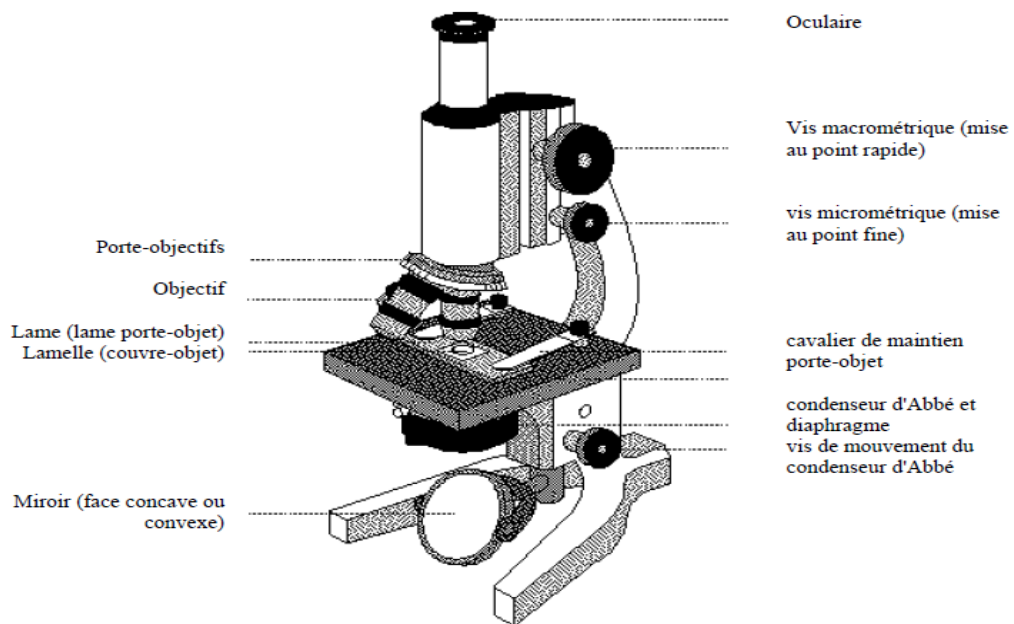
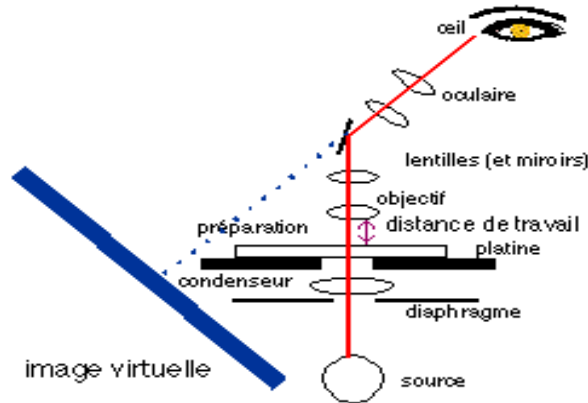


Fig.I.6. microscopeoptique

Des instruments supplémentaires permettent de régler la quantité de lumière (le diaphragme) ou la mise au point (molettes liées à un système de crémaillère) pour affiner l'observation de l'échantillon placé sur la platine porte-échantillon.



**Fig.I.7.** ce schéma correspond à un microscope dont le tube oculaire est incliné

### I.1.4. Résolution du microscope

#### I.1.4.1. Résolution et distance de travail

La résolution est la plus petite distance séparant deux objets que l'on peut distinguer à l'aide du microscope: elle dépend de la qualité des lentilles et de la nature même de la lumière: elle est au maximum de  $0,2 \mu\text{m}$ . On peut l'augmenter en plaçant une goutte d'huile à immersion (huile incolore dans laquelle la lumière se propage à la même vitesse que dans le verre)

**sur la préparation:** on réalise alors une observation "à l'immersion", l'huile remplaçant l'air entre l'objet et l'objectif.

La distance de travail est la distance entre l'objectif et l'objet: elle doit être d'autant plus petite que le grossissement recherché est fort.

La résolution du microscope dépend de l'ouverture numérique ON de l'objectif :

$$\text{ON} = n \sin \alpha$$

- $n$  = index de réfraction du milieu le moins réfringent dans le trajet optique .
- $\alpha$  = angle de déviation du faisceau par rapport à l'axe optique .

#### I.1.4.2. Grossissement du microscope

Le grossissement d'un objet est le produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire.

Le grossissement peut être défini de façon approchée par :

$$\frac{\text{ON maximum du microscope}}{\text{ON minimum de l'oeil}} = \frac{1,4}{0,002} = 700 \text{ X}$$

$$\frac{\text{limite de résolution de l'oeil}}{\text{limite de résolution du microscope}} = \frac{0,15 \text{ mm}}{0,002 \text{ mm}} = 750 \text{ X}$$

750 X : optimum théorique .

En pratique, à partir de 1000 x ON, on n'augmente plus la résolution de l'appareil du fait des limites physiologiques de l'œil.

### I.1.4.3. Résolutions théoriques des microscopes optiques

On utilise le résultat de la théorie d'Abbe .

$$d = \frac{\lambda}{ON}$$

- d: résolution théorique

si  $\lambda \downarrow$   $d \downarrow$

**Tab.I.1** : Résolutions théoriques du microscope optique.

Type	Grandissement	Résolution théorique d ( $\mu m$ )	Profondeur de champ ( $\mu m$ )	Distance focale (mm)	ON
oeil seul	1 X	150	--	250	0,002
loupe	10 X	10	42	25	0,10
microscope immersion air	100 X	5	25	32	0,10
	250 X	2	3,8	16	0,25
	500 X	1	0,86	8	0,5
	1000 X	0,52	0,083	4	0,95
microscope immersion huile. Visible(500 nm)	1500 X	0,36	--	3	1,38
UV (270 nm)	2000 X	0,2	0,04	3	1,38

### I.1.4.4. Vision microscopique

✚ **Le microscope binoculaire** est conçu pour regarder les objets et liquides en trois dimensions. Cet appareil possède deux oculaires donc nous regardons avec les deux yeux, il n'y a aussi que deux grossissements, Le binoculaire ne possède qu'une vis d'ajustement, Nous pouvons voir un liquide, bouillon de culture etc.... qui est conservé dans un bocal, à différentes profondeurs du liquide. Il n'est pas nécessaire que l'objet soit translucide parce qu'il est possible d'avoir deux sources lumineuses et à ce moment lorsque l'objet est opaque nous avons alors une vision de surface.

✚ **Le microscope monoculaire** quant à lui est pourvu de plusieurs objectifs, il peut-être à un, deux ou trois oculaires. Si vous utilisez un microscope à un oculaire il faut que

vous regardiez par cet oculaire avec un œil seulement et l'autre est fermé. Le microscope possède deux vis d'ajustement une macrométrique et l'autre micrométrique. Cet appareil est beaucoup plus dispendieux, à cause de sa précision et du nombre d'objectif. Les objets doivent être translucides et le plus mince possible car avec le microscope on voit à travers et la source lumineuse vient du dessous. On peut regarder des objets beaucoup plus petits et avec plus de précision. Avec le microscope on peut voir presque à l'infiniment petit.

Pour éviter la fatigue visuelle en travaillant avec un microscope monoculaire il faut respecter les principales règles de sécurité:

- garder les deux yeux ouverts
- changer d'oeil
- pas d'observations prolongées (supérieures à 3 min)

il y a un risque du syndrome de l'oeil microscope :

- perte de la sensibilité à l'intensité lumineuse
- amélioration de la faculté de perception des détails

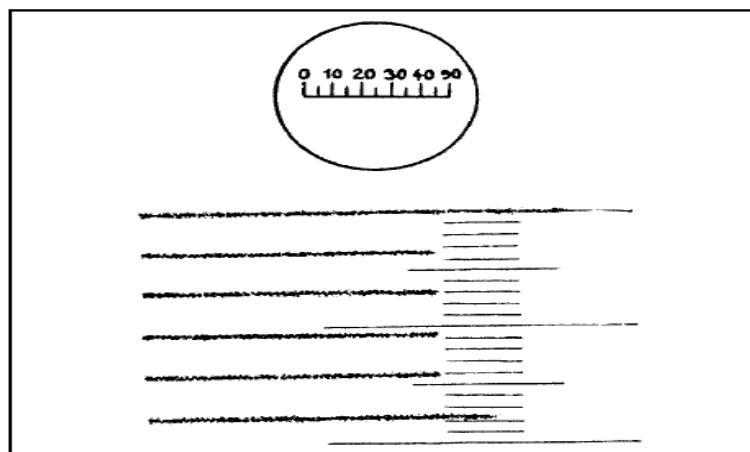
### I.2. mesure par microscope optique

#### I.2.1. Mesure des longueurs

Les microscopes permettent de mesurer les dimensions des échantillons analysés, Les règles statiques installées à l'intérieur d'un oculaire permettent de choisir le grossissement et de calculer la taille des objets. Les exemples de choix de grossissement pour les objets de taille différente :

- Objet de taille inférieure à  $10\ \mu\text{m}$  : 1000 X
- Objet de taille inférieure à  $100\ \mu\text{m}$  : 100X
- Objet de taille voisine du mm : 10 X

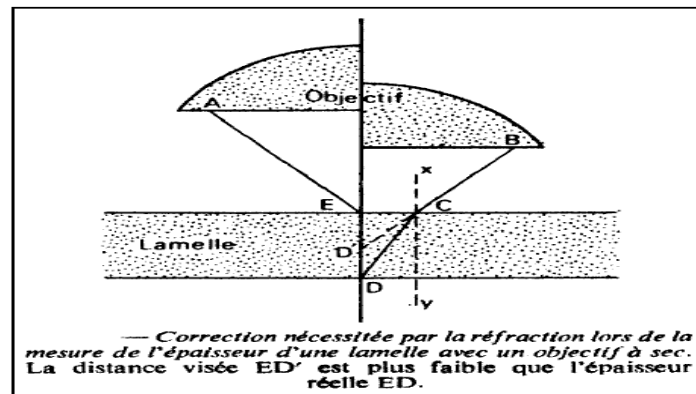
L'exemple d'une échelle micrométrique dans un oculaire est présenté sur l'image (**Fig.I.7**) .



**Fig.I.8.** Micromètres oculaire et objet

### I.2.2. Mesure de profondeurs

Les profondeurs peuvent être également mesurées par un microscope. La profondeur est une épaisseur de l'objet le long de l'axe optique. En focalisant le microscope sur les faces différentes de l'objet et en analysant la différence des distances focales des positions des lentilles, on peut calculer la distance visuelle entre les deux surfaces  $ED'$ . Pour savoir une vraie distance  $ED$  entre deux plans il faut faire la correction due à la réfraction (**voir Fig.I.8.**).



**Fig.I.9.** Mesure de profondeur par microscopie

### I.2.3. Mesure de surfaces

Meilleure méthode: analyse d'image (en mesurant les longueurs de l'objet).

## I.3. mesure des objets microscopiques en microscopie photonique

### I.3.1. Utilisation d'un micromètre objet et d'un micromètre oculaire

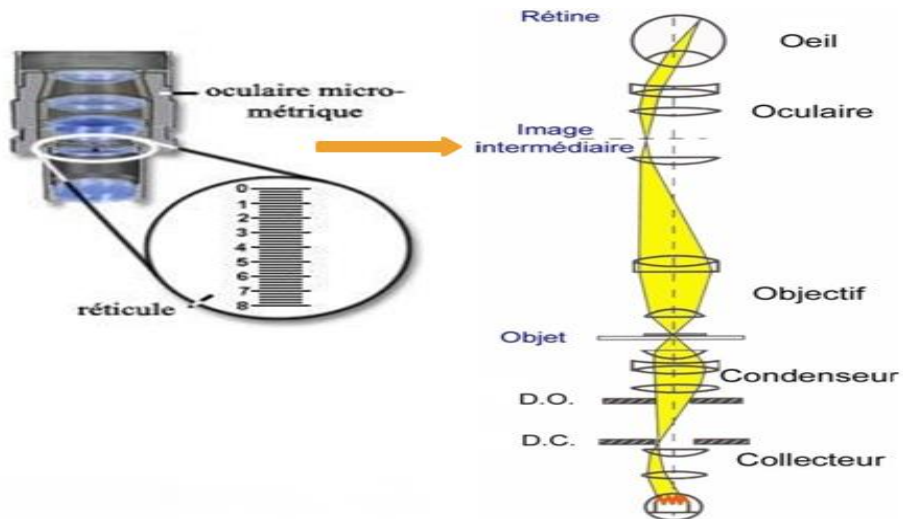
#### I.3.1.1. le micromètre oculaire

le micromètre oculaire est un oculaire possédant un disque transparent portant une échelle munie de 100 graduations équidistantes mais d'ecartement inconnu .



**Fig.I.10.** le micromètre oculaire

Cette échelle se trouve positionnée dans le plan de l'image intermédiaire de l'objet microscopique formée par l'objectif et acheminée vers l'oculaire par le tube, L'image projetée sur la rétine sera donc confondue avec l'échelle quelque soit l'objectif utilisé pour l'observation (**voir figure I.10.**).



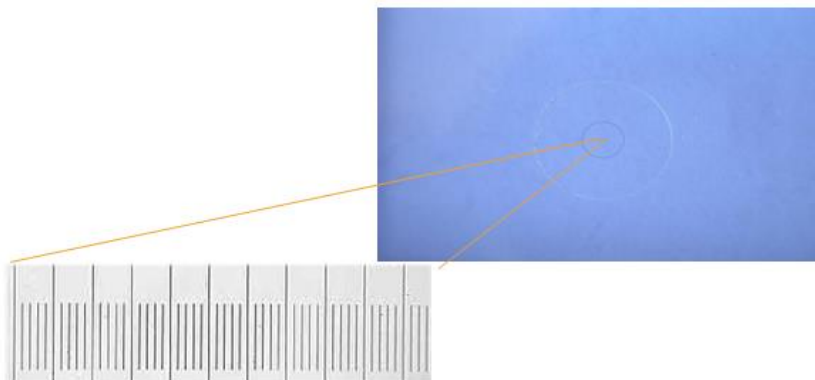
**Fig.I.11.** le plan de l'image intermédiaire de l'objet microscopique

### I.3.1.2. le micromètre objectif

le micromètre objectif est une lame de verre sur laquelle sont imprimées des graduations de 1/100 mm .



**Fig.I.12.** le micromètre objectif



**Fig.I.13.** graduations de micromètre objectif

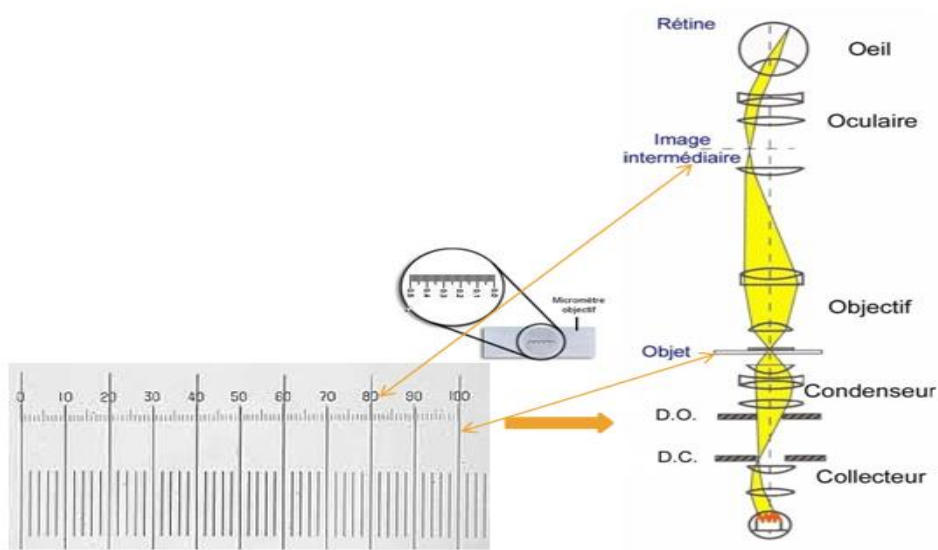
**c'est un objet fragile et coûteux !**

**Remarque :** Classiquement on trouve au centre de la lame micrométrique une échelle graduée de 2 mm avec pour 1 mm une centaine de graduations.

Il y a donc 10  $\mu\text{m}$ , entre 2 graduations successives du micromètre objet d'où l'indication courante « graduations en 1/100 mm ».

❖ **Pour l'étalonnage de l'oculaire micrométrique à l'aide du micromètre objet :**

On Pose sur la platine le micromètre objet de dimension connue, Puis pour chaque objectif on détermine la valeur en micromètre des intervalles du réticule de l'oculaire en superposant ce dernier à l'échelle micrométrique du micromètre objet.



**Fig.I.14.** schéma Pour l'étalonnage de l'oculaire micrométrique à l'aide du micromètre objet

❖ **Taille d'un objet vu au microscope**

$$Taille = \frac{\text{taille observée}}{\text{grandissement}}$$

Taille observée = taille apparente sous le microscope

Grandissement = grandissement de l'oculaire x grandissement de l'objectif

**Tab.I.2 :** la relation entre grandissement de l'oculaire et grandissement de l'objectif.

<i>objectif</i>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>40</b>
<i>oculaire</i>			
<b>x 10</b>	40	100	400
<b>x 12</b>	48	120	480

**Exemple :**

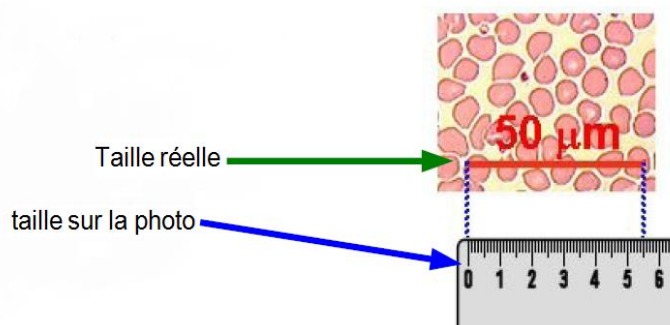
L'objet observé mesure 1 cm sous le microscope avec l'objectif x40 et l'oculaire x10.

$$\text{taille réelle} = \frac{1 \text{ cm}}{40 \times 10} = 0.002 \text{ cm} = 20 \mu\text{m}$$

❖ **Taille d'un objet photographié**

Il faut connaître l'échelle de la photo :

$$\text{Echelle} = \frac{\text{Taille réelle}}{\text{taille sur la photo}}$$



**Fig.I.15.** l'échelle de la photo

**Exemple :** échelle =  $50 / 5,5 = 9,1 \mu\text{m}/\text{cm}$

Chaque cm sur la photo représente donc **9,1 μm** en réalité.

Ensuite, utiliser l'échelle pour calculer la taille de l'objet observé:



**Exemple :** taille de l'objet =  $0,8 \times 9,1 = 7,3 \mu\text{m}$

**I.4. Préparation d'échantillons**

Nous pouvons voir la vraie structure des matériaux uniquement si on examine les échantillons correctement préparés Habituellement, il est nécessaire de couper les échantillons puisque le microscope n'est pas conçu pour travailler avec des gros objets et la préparation

des gros échantillons est extrêmement difficile. La préparation des surfaces pour l'examen microscopique des matériaux différents est discutée dans les sous-chapitres suivants.

### I.4.1. Lumière réfléchie

#### (a) Cas des matériaux solides

##### ❖ Les échantillons peuvent être préparés par une des méthodes suivantes :

- broyage et polissage mécanique
- polissage électrolytique
- polissage chimique
- microtomie (polymères), rarement

##### ❖ Coupe des échantillons :

- Pour certaines expériences il est nécessaire de tailler les échantillons en les coupant à la scie.
- Parfois l'étude de la section d'un échantillon cristallin exige une coupe selon ses plans cristallins – dans ce cas on fait la coupe à l'aide d'une pointe de diamant.

##### ❖ Imprégnation avec de la résine :

Le collage des échantillons, La préparation de lames minces nécessite souvent de pouvoir coller et décoller les préparations pour pouvoir polir les deux faces de la coupe. Pour ce faire, il faut utiliser des plaques chauffantes thermostatées et de la colle thermofusible qui fond à 150 °C.

##### ❖ Le polissage des échantillons :

Le polissage des échantillons consiste en deux étapes : le polissage préliminaire le rodage (les grains de polissage sont assez gros) et le polissage fin.

#### 1) Le rodage des échantillons :

Lors des observations au microscope électronique ou à la microsonde électronique, une planéité parfaite des préparations est requise. L'abrasif utilisé est le carbure de silicium de grain 9 microns, Le rodage est également réalisé manuellement ou grâce à la polisseuse avec du papier abrasif adéquat (grain 400, 800 ou 1200 correspondant approximativement à des grains de 35, 25 et 16 microns).

#### 2) Polissage fin suivant la nature de l'échantillon :

Le polissage des échantillons peut être réalisé de différentes manières : manuellement ou avec une polisseuse. Les abrasifs utilisés sont les suspensions diamantées aqueuses (du grain 9 microns à 0.3 microns) ou des poudres d'alumines calcinées.

### (b) Cas des matériaux pulvérulents

- ❖ Coupe de grains de poudre:
  - imprégnation de la résine sous vide
  - polissage doux des échantillons pour éviter les arrachements
  - attention aux ultra-sons
- ❖ Observation directe des grains de poudre:
  - la poudre est disposée sur une lame de verre
  - suivant le type de microscope, on l'observe à travers la lame de verre ou directement

### I.4.2. Lumière transmise

L'étude d'un objet à la lumière transmise demande l'amincissement de l'échantillon jusqu'à une épaisseur voulue. Dépendamment du matériau analysé l'épaisseur requise peut diminuer jusqu'aux dizaines de nanomètres, Pour la réalisation d'une lame mince pour rendre l'échantillon transparent il existe des techniques différentes telles que le polissage fin, la gravure chimique, la gravure par plasma, Cette technique est essentiellement utilisée en pétrographie, Les lames minces ainsi réalisées sont observées à l'aide d'un microscope polarisant en général, Pour l'observation des échantillons à la lumière réfléchie et transmise on peut utiliser deux types de microscope (réflexion et transmission) .

### I.5. Images

Un microscope optique peut produire d'un micrographe utilisant les appareils-photo sensibles à la lumière normaux. Le film photographique a été traditionnellement employé pour saisir les images, Des développements techniques ont maintenant permis à des images numériques d'être prises avec le CMOS et les appareils-photo de dispositif (CCD) de charge-couples pour les microscopes optiques. Comme résultat, l'image peut être projetée sur un écran d'ordinateur en temps réel d'examiner un échantillon avec ces microscopes digitaux. Ceci augmente la commodité de l'utilisation pendant que des oculaires ne sont nécessaires plus, Le pouvoir de l'agrandissement d'un microscope optique composé dépend de l'oculaire et des lentilles objectives. Il est égal au produit des pouvoirs de ces lentilles (par exemple pour une lentille 10x oculaire et la lentille 100x objective utilisées ensemble, l'agrandissement final est 1000x.)

### I.6. L'optique ondulatoire

La lumière est une onde électromagnétique

Grâce à James Clerk Maxwell (1831–1879) et Heinrich Hertz (1857–1894), on sait depuis la seconde moitié du XIXe siècle que la lumière est une onde électromagnétique, dans le domaine de longueurs d'onde s'étendant de 350 nm à 750 nm environ, qu'on appelle le domaine visible (voir l'appendice pour la relation avec la notion de couleur). Ceci correspond au domaine de fréquences s'étendant de  $0,35 \cdot 10^{15}$  Hz à  $0,85 \cdot 10^{15}$  Hz. Une grande partie de ce qui sera traité ici pourra s'appliquer à des longueurs d'onde un peu en dehors de ce domaine (même si cela correspondra alors à des radiations que l'œil ne perçoit pas), que ce soit dans l'infra-rouge ( $\lambda \gtrsim 750$  nm) ou l'ultra-violet ( $\lambda \lesssim 350$  nm). Revenons sur les deux points fondamentaux de la première affirmation : la lumière est une onde électromagnétique.

Tout d'abord, la lumière est une onde. Elle correspond à une quantité qui varie dans le temps et dans l'espace. Ceci semble contradictoire avec l'expérience quotidienne, selon laquelle la lumière qui nous parvient d'une lampe allumée ne montre pas de variation périodique. Ces variations sont bien présentes mais se produisent sur des échelles de temps et d'espace bien trop petites pour que nos sens les perçoivent, comme en attestent les ordres de grandeur donnés dans le paragraphe précédent. Nous verrons au cours de cet ouvrage comment l'aspect ondulatoire peut malgré tout être mis en évidence. Nous verrons aussi pourquoi il n'entre pas en contradiction avec des propriétés qui semblent plutôt corpusculaires, comme la propagation en ligne droite.

Ensuite, cette onde est de nature électromagnétique. Elle est donc constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique variables. Sa propagation est déterminée par les équations de Maxwell, si l'on se limite à une description non quantique. L'électromagnétisme classique fournit alors un cadre naturel pour faire de l'optique. De fait, on peut dans une certaine limite démontrer les lois de l'optique géométrique en s'appuyant sur l'électromagnétisme, et ainsi préciser leur domaine de validité.

### I.6.1. Spécificités de la gamme des ondes lumineuses

Les équations de Maxwell sont très générales et permettent de décrire des phénomènes très différents. Cette généralité se paie par une certaine complexité, parfois au prix fort, au point qu'il peut être impossible de résoudre ces équations dans certaines situations spécifiques. Il faut alors faire des approximations, en s'appuyant sur la spécificité de la situation qui nous intéresse. Les approximations pertinentes ne sont pas les mêmes quand on étudie les ondes radio, le rayonnement gamma, ou le domaine optique. Par exemple, le

rayonnement radio est souvent dû à l'oscillation cohérente d'un grand nombre de sources microscopiques dont on sait contrôler la phase : une antenne fait intervenir la vibration d'une multitude d'électrons synchronisés. La cohérence des différents points de la source a une influence majeure sur les caractéristiques de l'onde émise, Ce n'est pas le cas pour la lumière : la plupart des rayonnements sont dûs à une multitude de sources indépendantes (le laser constitue une exception importante), dont on ne contrôle pas la phase. L'indépendance des sources permet de simplifier considérablement les calculs dans beaucoup de cas pratiques. De plus, la fréquence est si élevée par rapport au temps de réponse de la plupart des détecteurs disponibles que les quantités observables sont essentiellement des quantités moyennées sur un grand nombre de périodes et non des quantités instantanées.

### **I.6.2. La difficulté pratique de l'approche électromagnétique**

À ce stade, on pourrait se dire qu'il suffit d'étudier l'électromagnétisme pour couvrir le domaine de l'optique, et penser que pour comprendre le fonctionnement d'un télescope ou la propagation de la lumière à la sortie d'une fente fine, il suffise de résoudre les équations de Maxwell en imposant des conditions aux limites correspondant au système étudié.,C'est malheureusement irréalisable en pratique car dans la plupart des cas (même parmi les plus simples), la résolution des équations de Maxwell est extrêmement difficile. Il se trouve qu'on dispose en optique d'un ensemble d'approximations qui sont bien justifiées dans beaucoup de situations, et qui ne font pas intervenir explicitement les équations de Maxwell (même si la justification, elle, repose bien sûr sur ces équations). Tout d'abord, on peut dans beaucoup de situation oublier le caractère vectoriel des ondes électromagnétiques, on parle alors d'approximation scalaire. Ensuite, la plupart des phénomènes liés à la propagation de la lumière, y compris ceux d'interférence et de diffraction, s'expliquent en s'appuyant sur le principe de Huygens-Fresnel.

### **I.6.3. Interactions de la lumière avec la matière**

Dans beaucoup de situations, on a besoin de savoir comment la lumière interagit avec la matière qu'elle rencontre. L'électromagnétisme fournit une réponse claire à cette question : d'un point de vue classique (non quantique), la lumière interagit avec les charges électriques. Elle est absorbée en les mettant en mouvement par la force de Lorentz, et elle est émise sous une forme différente (avec un déphasage et dans des directions différentes) par les charges mises en mouvement. L'onde est donc transformée au cours de son passage dans la matière. Ceci permet de comprendre de façon détaillée les phénomènes de réfraction et de réflexion,

ainsi que ceux, moins simples, de biréfringence, de polarisation rotatoire, etc. L'approche électromagnétique permet en particulier de comprendre l'origine de l'indice optique dans les milieux, ainsi que ses propriétés, notamment sa dépendance en fréquence.

### I.6.4. L'optique quantique – le photon

Le monde dans lequel nous vivons obéit aux règles de la physique quantique, et les phénomènes lumineux ne font pas exception. Dans la plupart des situations expérimentales usuelles la description quantique coïncide presque exactement avec la description électromagnétique classique, mais pas toujours. Il existe des phénomènes optiques qui ne peuvent se comprendre que dans un cadre quantique.

Dans l'approche quantique de l'électromagnétisme, les ondes électromagnétiques se manifestent sous la forme de quanta. Ceci signifie par exemple que pour une onde monochromatique de fréquence  $f$ , l'énergie ne peut être absorbée, émise, ou affectée de quelque manière que ce soit, que par paquets élémentaires  $\Delta E = hf$  où  $h$  désigne la constante de Planck. On appelle photon d'énergie  $E$  une excitation du champ électromagnétique ayant cette énergie. On lit parfois que l'onde électromagnétique est un ensemble de photons, mais il convient d'être très prudent avec ce type d'interprétation. En effet un champ quantique est un objet beaucoup plus complexe et aux propriétés plus subtiles qu'une assemblée de corpuscules. Le photon est une particule, ce qui en physique fondamentale désigne un objet qui n'est ni un corpuscule, ni une onde, même si dans certaines situations expérimentales, il peut présenter des caractéristiques semblables à l'un ou à l'autre.

L'aspect corpusculaire se manifeste plus aisément aux hautes fréquences qu'aux basses, car d'une part le quantum d'énergie est y plus élevé, et d'autre part il se trouve que les photons émis par les sources de relativement basse fréquence sont plutôt émis en paquets cohérents qui se comportent collectivement comme une onde. Dans le domaine des ondes radio, la notion de photon n'intervient que dans quelques situations expérimentales très particulières, alors que dans le domaine des rayons gamma elle est omniprésente. Le domaine optique constitue, de manière intéressante, une frontière assez naturelle entre ces deux régimes.

## I.7. Ondes électromagnétiques

### I.7.1. Le champ électromagnétique

L'électromagnétisme est la discipline de la physique consacrée aux phénomènes électriques et magnétiques. Ses objets fondamentaux sont des vecteurs, le champ électrique  $E(r, t)$  et le champ magnétique  $B(r, t)$ . Le mot « champ » signifie que les caractéristiques de ces vecteurs (direction et norme) dépendent de la position. En chaque point, la direction et la norme de ces vecteurs peuvent aussi varier au cours du temps. Ces champs ont un effet sur la matière : ils sont notamment responsables de la force de Lorentz qui s'écrit :

$$F = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Les champs sont créés par les charges électriques, les courants mais aussi par les variations des champs eux-mêmes. Leur évolution est décrite par un système d'équations différentielles couplées qu'on appelle les équations de Maxwell. Il y a plusieurs façons de présenter ces équations, la plus répandue faisant appel à des opérateurs différentiels (divergence et rotationnel) qui permettent de simplifier les notations et les manipulations de ces équations. Malheureusement, la familiarité avec ces opérateurs demande un peu de temps et de pratique, et l'étudiant qui débute dans le domaine peut buter sur cette difficulté purement technique, qui n'a rien à voir avec la physique. Nous prenons ici le parti d'utiliser ces opérateurs en rappelant simplement leur définition et quelques propriétés en appendice

### I.8. Utilisation du microscope optique

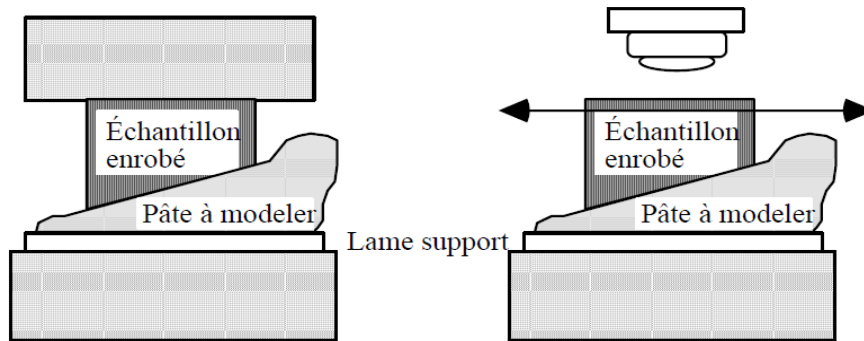
Le microscope optique permet de visualiser des objets vivants (bactéries, levures, organismes unicellulaires) ou fixés (coupes de tissus) à l'échelle cellulaire. Il s'applique aussi à la physique des matériaux ou à la géologie. Les objets illuminés deviennent très clairs et il est souvent nécessaire de procéder à des colorations des tissus afin de les observer. Ces techniques de coloration permettent aussi de distinguer des objets précis, ou de différencier deux organismes proches (coloration de Gram pour les bactéries), car tous les tissus ne fixent pas la coloration de la même façon. De nombreuses variantes basées sur la microscopie optique sont aujourd'hui utilisées (contraste de phase, fond noir, lumière polarisée, fluorescence, confocal...).

### I.9. Fixation de l'échantillon sur le microscope classique

Pour s'assurer que l'échantillon est installé perpendiculairement à l'axe optique du microscope il est nécessaire de le fixer sur le porte-échantillon avec de la pâte à modeler. Un

morceau de pâte est mis sur une lame de support. L'échantillon est fixé sur le support à l'aide d'une lame parallèle au porte-échantillon. L'exemple d'une fixation à pâte est sur l'image ci-dessous.

**Remarque :** il faut assurer un montage à l'échantillon qui assure sa planéité.



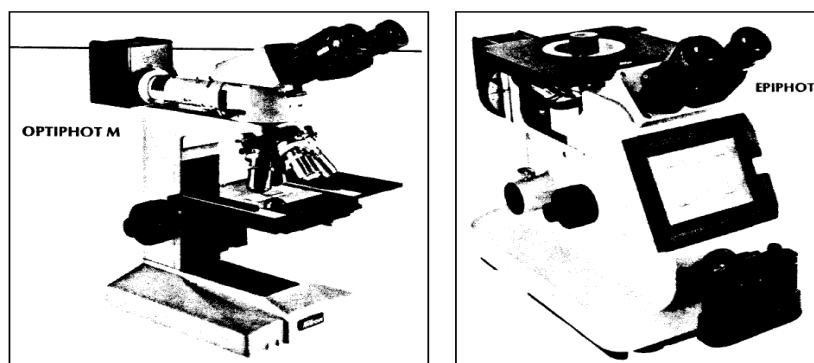
**Fig.I.16.** Montage et observation par microscope classique

### I.10. Lumière transmise

L'étude d'un objet à la lumière transmise demande l'amincissement de l'échantillon jusqu'à une épaisseur voulue. Dépendamment du matériau analysé l'épaisseur requise peut diminuer jusqu'aux dizaines de nanomètres.

Pour la réalisation d'une lame mince pour rendre l'échantillon transparent il existe des techniques différentes telles que le polissage fin, la gravure chimique, la gravure par plasma etc, Cette technique est essentiellement utilisée en pétrographie.

Les lames minces ainsi réalisées sont observées à l'aide d'un microscope polarisant en général, Pour l'observation des échantillons à la lumière réfléchie et transmise on peut utiliser deux types de microscope (réflexion et transmission) présentés sur l'image ci-dessous.



**Fig.I.17.** Microscope traditionnel (réflexion + transmission) et Microscope métallographique

---

# Chapitre II

## notions métrologique

---

### II.1. Introduction

Le savant D. Mendeleev a écrit « La science commence là où commence la mesure » ; cela signifie que nous n'avons pas de science sans mesure. La mesure est un processus de connaissance qui grâce à l'expérience physique nous donne une information quantitative (valeur) du rapport entre la grandeur mesurable et une grandeur de même nature prise comme unité. La métrologie au sens étymologique du terme se traduit par Science de la mesure. Dans le langage courant des « métrologues », on entend souvent dire mesurer c'est comparer !

La «fonction métrologie» est définie comme étant la fonction qui a la responsabilité administrative et technique de définir et de mettre en œuvre le système de management de la mesure. Aussi elle est la science et technique de la mesure, elle permet de s'adapter aux exigences changeantes des marchés tout en respectant des règles de plus précises sur les caractéristiques du produit et de sa fabrication. On trouve deux types de technique de mesure :

- Mesurage dimensionnel
- Mesurage géométrique.

L'incertitude est un indicateur de la qualité d'un résultat de mesure, l'objectif de toute mesure est d'essayer d'obtenir des résultats "justes". L'incertitude doit donc inclure une composante liée la justesse. Justesse (ex : tarage d'une balance), En toute rigueur, le métrologue doit corriger tous les effets systématiques en appliquant des corrections, il reste alors à prendre en compte dans l'évaluation de l'incertitude du

résultat l'incertitude sur les corrections. Quand le métrologue décide de ne pas appliquer de correction, l'incertitude sur le résultat est bien plus grande.

La métrologie recouvre trois principales activités :

- La définition des unités de mesure, acceptées internationalement, par exemple le mètre ;
- La réalisation des unités de mesures au moyen d'expériences scientifiques, par exemple la réalisation du mètre au moyen de sources lasers ;
- L'établissement d'une chaîne de traçabilité des mesurages ; La traçabilité est la propriété du résultat d'un mesurage tel qu'il puisse être relié à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées.

### II.2. Généralités

La métrologie est la science de la mesure Elle définit l'ensemble des opérations permettant de déterminer la ou les valeurs des grandeurs à mesurer qui peuvent être fondamentales (par exemple : une longueur, une masse, un temps, un courant, une quantité de matière, une température, intensité lumineuse) ou dérivées des grandeurs fondamentales (comme par exemple : une surface, un volume, une vitesse, une pression, puissance, la fréquence, l'énergie,.....).

C'est la science des mesures et ses applications. Elle comprend tous les aspects théoriques et pratiques des mesurages, quels que soient l'incertitude de mesure et le domaine d'application.

#### II.2.1. Mesurage

C'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur, Il consiste à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur.

#### II.2.2. Grandeur mesurable

Attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.

#### II.2.3. Dimension

L'unité de mesure est le mètre. L'unité de mesure utilisée dans les domaines de la micromécanique est le millimètre est ses sous-multiples :

- Le millimètre (mm) : 1mm ;
- Le dixième  $1/10$  mm : 0,1mm ;
- Le centième  $1/100$  mm : 0,01mm ;
- Le millièmme  $1/1000$  mm : 0,001mm.

#### II.2.4. Mesurande

Le mesurande est la grandeur que l'on veut mesurer ou Grandeur particulière soumise au mesurage.

#### II.2.5. Unité de mesure

C'est une grandeur particulière, définie et adoptée par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement par rapport

à cette grandeur. (Tab . II .1)

**Tab.II.1 :** Unités de base.

<b>Grandeur</b>	<b>Unité</b>		
	<b>Nom</b>	<b>Symbole</b>	<b>Symbole</b>
Longueur	L	Mètre	M
Masse	M	Kilogramme	Kg
Temps	t	Seconde	S
Courant électrique	i	Ampère	A
Température	T	Kelvin	K
Quantité de matière		Mole	Mol
Intensité lumineuse	I	Candela	Cd

### **II.2.6. Résultat de mesurage**

Valeur attribuée à un mesurande, obtenue par mesurage. Le résultat de mesure est généralement exprimé par une valeur mesurée unique et une incertitude de mesure. Si l'on considère l'incertitude de mesure comme négligeable dans un certain but, le résultat de mesure peut être exprimé par une seule valeur mesurée. Dans de nombreux domaines, c'est la manière la plus usuelle d'exprimer un résultat de mesure.

### **II.2.7. Valeur vraie**

La valeur vraie d'une grandeur de référence est sa valeur considérée comme unique et, en pratique, impossible à connaître C'est le cas des étalons dont l'incertitude est négligeable par rapport à l'incertitude de mesure du mesurande .

### **II.2.8. Valeur conventionnellement vraie**

Valeur attribuée à une grandeur particulière et reconnue, parfois par convention, comme le représentant avec une incertitude appropriée pour un usage donné. Cette valeur est parfois appelée :

- Valeur assignée ;
- Meilleure estimation ;
- Valeur convenue ;
- Valeur de référence.

Cette valeur est retranscrite dans le certificat d'étalonnage (le certificat d'étalonnage fait référence à des conditions particulières pour l'étalonnage). C'est cette valeur qui doit ensuite

être prise en compte lors des mesures. Il convient de corriger la valeur vraie avec cette valeur conventionnellement vraie.

### II.3. Normes métrologique

Si la gestion de la fonction métrologique dans les entreprises reste accessible, elle demande un minimum de connaissances relatives à son vocabulaire, sa terminologie et encore aux mathématiques. Il ne s'agit pas ici de revenir sur les concepts mathématiques, mais de définir les principales notions employées lorsque l'on évoque la fonction métrologique. L'un des prérequis pour appréhender la métrologie et ses concepts est de se familiariser avec le vocabulaire. Ce dernier et les notions employées ici suivent les préconisations du **BIMP** (Bureau International des Poids et Mesures) précisées dans des documents du **VIM** (Vocabulaire International de Métrologie) et **GUM** (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement). Pour une éventuelle spécialisation en métrologie il faut étudier de manière approfondie ces deux documents et un cours de spécialiste en statistiques.

La Fonction Métrologie est une composante de l'assurance qualité de Un organisme tel qu'une entreprise fabrique, teste contrôle des produits (ou service) à partir de processus de fabrication, d'essais, d'analyse, etc, Les produits doivent satisfaire aux attentes exprimées des clients, donc être conformes à des exigences normes Dans ce qui suit sont définies les normes métrologique :

#### II.3.1. Le bureau international des poids et mesures (BIPM)

est une des trois organisations internationales établies pour maintenir le système international d'unités (**SI**) sous les termes de la convention du Mètre.

Selon le site officiel :

- Le BIPM a pour mission d'assurer l'uniformité mondiale des mesures et leur traçabilité au Système international d'unités (SI).
- Il travaille sous l'autorité de la convention du Mètre, qui est un traité diplomatique conclu entre cinquante et une nations. Il exerce son activité avec l'aide d'un certain nombre de Comités consultatifs, dont les membres sont des laboratoires nationaux de métrologie des États membres de la convention du Mètre, et par son travail de laboratoire.

- Le BIPM effectue des recherches liées à la métrologie. Il organise ou participe à des comparaisons internationales d'étalons nationaux de mesure et effectue des étalonnages pour les États membres<sup>3</sup> .
- Le BIPM a aussi pour mission de maintenir le Temps atomique international (TAI) et le Temps universel coordonné (UTC), qui sont les échelles de temps à partir desquelles les fréquences de référence et les signaux horaires sont disséminés de manière coordonnée dans le monde.

Les autres organismes de référence sont :

- la Conférence générale des poids et mesures (CGPM)
- le Comité international des poids et mesures (CIPM)



**Fig.II.1.** Logo du Bureau international des poids et mesures (BIPM)

### II.3.2. Vocabulaire International de Métrologie (VIM)

En général, un vocabulaire est un dictionnaire terminologique contenant des désignations et des définitions tirées d'un ou plusieurs domaines particuliers (**ISO 1087-1:2000, 3.7.2**), Le présent Vocabulaire concerne la métrologie, « science des mesurages et ses applications ». Il couvre aussi les principes de base régissant les grandeurs et unités. Le domaine des grandeurs et unités peut être traité de différentes manières. La deuxième édition du Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie (VIM) a été publiée en 1993. Le besoin de couvrir pour la première fois les mesures en chimie et en biologie médicale, ainsi que celui d'inclure des concepts relatifs, par exemple, à la traçabilité

métrologique, à l'incertitude de mesure et aux propriétés qualitatives, ont conduit à cette troisième édition.

Son titre est devenu Vocabulaire international de métrologie Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (**VIM**), afin de mettre en évidence le rôle primordial des concepts dans l'élaboration d'un vocabulaire.

- Dans la VIM (Vocabulaire Int. De Metrologie), le concept et le terme sont retenus, compte tenu de leur usage fréquent et de l'importance du concept.
- Vocabulaire des termes fondamentaux et généraux de la métrologie (VIM) Repris en NF X 07-001 décembre 1994

### II.3.3. Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM)

**Le GUM** une convention internationale

- Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (**GUM**) Repris en NF ENV 13005 d'août 1999 .
- GUM : Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (1993)  
Une norme ISO (International Standardisation Organisation).
- GUM : Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (1993).
- Version française : Norme Française X 07- 020 AFNOR Août 1999.

Dans **le GUM**, le concept de valeur vraie est retenu pour décrire l'objectif des mesurages, mais l'adjectif « vraie » est considéré comme étant redondant.

- Généralisation des formules du GUM dans le cas où le mesurand n'est pas unique.
- Prise en compte de l'incertitude dans les déclarations de conformité.
- Utilisation des moindres carrés.

## II.4. Notions et définitions métrologique

### II.4.1. Exactitude

Étroitesse d'accord entre le résultat d'une mesure et la valeur attendue (CIBLE ou valeur réputée vraie). Une méthode est réputée juste quand la moyenne d'un grand nombre de mesures est confondue avec la valeur  $X$  du mesurand, quelle que soit la dispersion. L'erreur de justesse  $J$  est définie par :

$$J = \bar{X} - X$$

L'exactitude d'une mesure est l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'une mesurande. L'exactitude peut être déterminée à partir d'une série de mesures, donnée par des laboratoires participants et réceptionnée par des organismes d'inter-comparaison. Cette expérience inter-laboratoire est appelée expérience d'exactitude. L'exactitude correspond à la somme de l'erreur systématique (Justesse) et l'erreur aléatoire (Fidélité).

### II.4.2. Fidélité

La fidélité est la qualité d'un instrument de mesure dont les erreurs sont faibles. L'écart-type est souvent considéré comme l'erreur de fidélité. C'est l'étroitesse de l'accord entre les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet dans des conditions spécifiées. La fidélité définit la dispersion des résultats. Si on effectue un ensemble de mesures d'une grandeur G, on obtient une valeur maximum ( $V_{max}$ ) et une valeur minimum ( $V_{min}$ ). Les erreurs limites de fidélité sont alors :

$$F_{min} = -\frac{V_{max} - V_{min}}{2}$$

$$F_{max} = +\frac{V_{max} - V_{min}}{2}$$

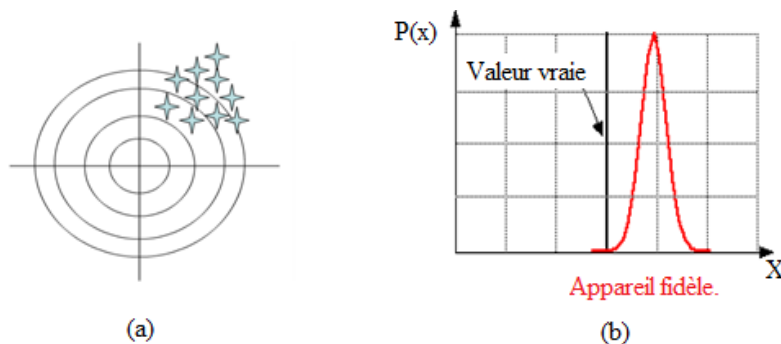


Fig.II.2. Représentation de la fidélité, a) schématisique, b) graphique.

#### Exemple :

Des mesures répétées avec un voltmètre donnent :

- $U_{max} = 100,2 \text{ V}$
- $U_{min} = 99,7 \text{ V}$

$$F = \pm \frac{100,2 - 99,7}{2} = \pm \frac{0,5}{2} = \pm 0,25 \text{ V}$$

#### II.4.2.1. Erreur systématique

C'est une erreur qui reste constante pour des mesures effectuées dans des conditions identiques, Une erreur est systématique lorsqu'elle contribue à toujours surévaluer (ou toujours sous-évaluer) la valeur réelle. Il s'agit d'une déviation, par rapport à la valeur la plus précise pouvant être mesurée.

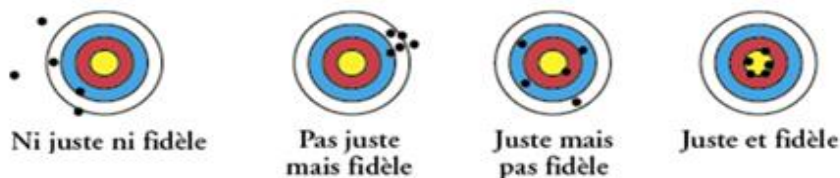
L'erreur systématique comprend des phénomènes comme l'erreur d'échantillonnage, l'erreur de préparation, l'erreur de lecture sur les appareils analogiques. Ces problèmes peuvent introduire une dispersion statistique ou bien un décalage des résultats si l'erreur commise est toujours la même

### Remarque :

Les appareils dérivent avec le temps, ce qui rend nécessaire leur réétalonnage régulier. On peut avoir une très faible dispersion statistique, et avoir toutefois un résultat faux.

### Sources de l'erreur systématique

- L'appareil de mesure ;
- Le mode d'utilisation de l'appareil ;
- La présence d'un facteur non prévu.



**Fig.II.3.** Représentation schématique des notions de fidélité et de justesse.

### II.4.3. Justesse

Elle se définit comme étant la différence entre la valeur de la moyenne arithmétique d'un grand nombre de mesurages et la valeur vraie conventionnelle de la grandeur à mesurer. C'est l'étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence. La détermination de la justesse d'une méthode de mesure est possible quand une valeur vraie est disponible pour la propriété mesurée. La justesse est la capacité d'un instrument à donner des mesures dont la moyenne est proche de la valeur vraie. Elle est représentée la reproductibilité d'un instrument.

#### II.4.3.1. Erreur de justesse

C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique. Elle dépend de la qualité de fabrication de l'instrument : C'est la composante systématique de l'erreur d'un instrument de mesure (paramètre de position). (Fig.II.4)

$$\mathbf{J} = \mathbf{M} - \overline{\mathbf{M}} \text{ Avec } \overline{\mathbf{M}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \mathbf{M}_i$$

- J : erreur de justesse
- M : moyenne arithmétique des n valeurs mesurées  $M_i$ .
- M : valeur conventionnellement vraie

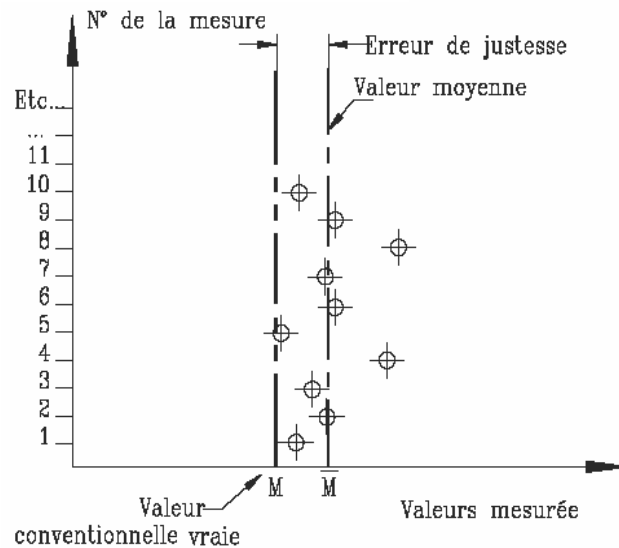


Fig.II.4. Erreur de justesse après plusieurs prises de mesure.

Si l'on effectue une représentation en deux dimensions en considérant la valeur vraie comme l'origine on peut considérer l'erreur de justesse comme la distance d. le barycentre de l'ensemble des mesures et l'origine.( Fig.II.5)

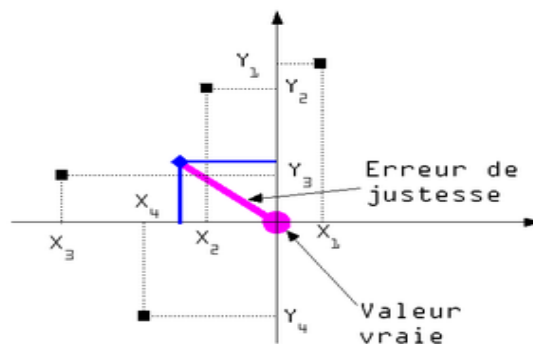


Fig.II.5. Représentation de l'erreur de justesse

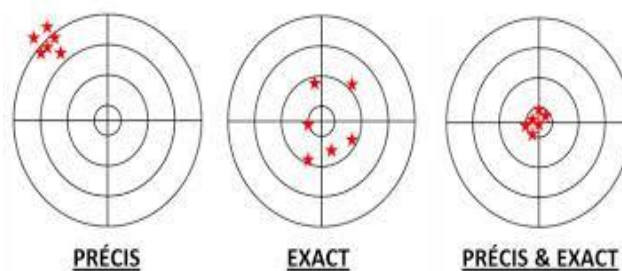
#### II.4.4. Précision

C'est l'erreur absolue que l'on peut avoir en effectuant une mesure. La précision est la qualité globale de l'instrument du point de vue des erreurs. Plus la précision est grande, plus les indications sont proches de la valeur vraie. Un instrument de mesure est d'autant plus précis que les résultats de mesure qu'il indique coïncident avec la valeur vraie (par définition théorique). Que l'on cherche à mesurer. La précision est plus aisée à définir par l'erreur de précision. Elle s'exprime en unité de grandeur (erreur absolue) ou en pourcentage (erreur relative). En dehors des conditions opératoires, la précision d'un appareil est essentiellement liée à deux types de caractéristiques : la justesse et la fidélité. Un appareil est précis s'il est à la fois juste et fidèle. La précision d'appareil de mesure peut également être entachée par des causes extérieures (**Fig.II.6**)

- Erreur opératoire, erreur provoquée par les grandeurs d'influences (température, pression etc), erreur de référence ou de d'étalonnage, ....etc.

#### Exemple :

Une balance au milligramme (0,001 g) est plus précise qu'une au décigramme (0,1 g). La détermination de la masse d'une petite bille donnerait 1,5 g avec la seconde et 1,512 g avec la première balance. Si les mesures répétées d'une même quantité donnent des résultats très voisins, on conclut que ceux-ci sont précis (ex. 1,510 g, 1,513 g, 1,511 G). Une grande précision ne présuppose pas forcément une grande exactitude.



**Fig.II.6.** Représentation schématique explique la précision et l'exactitude

#### II.4.5. Sensibilité

C'est le rapport  $S$  entre le déplacement  $\Delta d$  de l'indicateur de l'instrument de mesure correspondant à une variation  $\Delta M$  de la grandeur mesurée.

$$S = \Delta d / \Delta M$$

Dans le cas des instruments de mesure des longueurs,

- d (grandeur de sortie) ;
- $\Delta M$  (grandeur d'entrée) s'expriment dans la même unité ; on utilise parfois le terme de pouvoir d'amplification au lieu de sensibilité.

### Remarque

La sensibilité d'une chaîne de mesure est égale au produit des sensibilités des divers éléments de la chaîne.

### II.4.6. Répétabilité

La répétabilité d'une mesure est l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs (dans un court espace de temps) effectués avec l'application des mêmes conditions de mesure, Ces conditions sont appelées conditions de répétabilité Fidélité sous des conditions de répétabilité (même méthode, même laboratoire, même opérateur, même équipement et pendant un court intervalle de temps)

### II.4.7. Reproductibilité

La reproductibilité d'une mesure est l'étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure et espacée dans le temps, donc dans des conditions qui peuvent être expérimentalement légèrement différentes. Fidélité sous des conditions de reproductibilité (même méthode dans différents laboratoires, avec différents opérateurs et utilisant des équipements différents) (**Fig.II.7**)

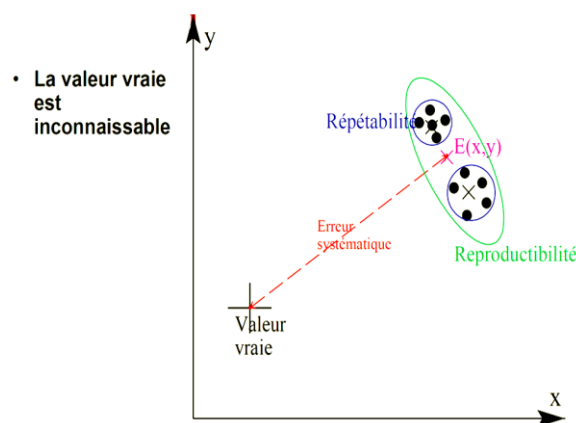


Fig.II.7. Représentation de la répétabilité et la reproductibilité.

### II.4.8. Résolution

La résolution est la plus petite variation de la grandeur G à mesurer que l'appareil est capable de détecter. La résolution est la plus petite variation de mesure qu'un appareil peut différencier. Elle est en générale exprimée en fonction de la capacité du capteur.

#### II.4.9. Etendue de Mesure (capacité)

Ensemble des valeurs d'une grandeur à mesurer pour les quelles l'erreurs d'un instrument de mesure est supposée maintenue entre des limites spécifiées. Les limites supérieures et inférieures de l'étendue spécifiée sont parfois appelées respectivement (portée maximale) et (portée minimale).

### II.5. L'erreur et l'incertitude de mesure

#### II.5.1. Système de mesure

Un système de mesure contient tout ce qui est nécessaire pour obtenir des valeurs mesurées d'un mesurande. Un instrument de mesure qui peut être utilisé seul est un système de mesure.

Tout système de mesure est inéluctablement attaché d'erreurs :

- le système de mesure n'est jamais parfait puisqu'il est en général plus ou moins sensible à l'environnement (température, pression, humidité...), il n'est pas fidèle et même les étalons servant à l'étalonnage de l'instrumentation ne sont qu'une matérialisation imparfaite de la définition de l'unité qu'ils sont chargés représenter .
- la mauvaise définition de la grandeur est elle-même une source d'erreur, Le résultat de mesure s'écrit par conséquent :

$$\text{Resultat de mesure} = \text{Valeur vraie} + \text{erreurs}$$

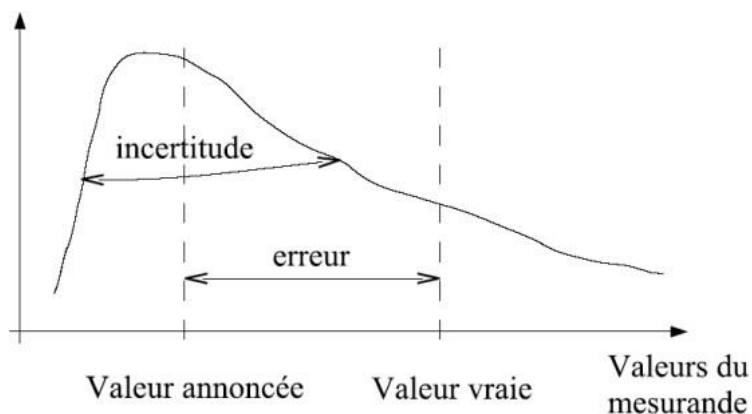


Fig.II.8. Illustration du concept d'erreur et d'incertitude

Mesurer c'est l'action de comparer une grandeur (quantité) par rapport à une grandeur de même espèce prise comme référence: talon ou gabarit, L'inexactitude d'une mesure quelconque est due à deux causes différentes: "l'erreur" ou "la faute.

### II.5.2. Les fautes

Les fautes on topographie sont des inexactitudes qui proviennent de l'opérateur ou de son aide, Les causes fréquentes sont: la maladresse, l'inattention ou l'oublie.

### II.5.3. Les erreurs

Une erreur est l'inexactitude due à l'imperfection des instruments de mesure et éventuellement la lecture des mesures. Les erreurs peuvent être minimisées en effectuant un bon choix des instruments et des méthodes de mesure, Il est toujours possible de décomposer le terme erreurs en une erreur systématique et une erreur aléatoire .

- ✓ L'erreur aléatoire (notée  $E_a$ ) est le résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande (grandeur physique) effectués dans des conditions de répétabilité (tout reste identique). (Fig.II.9)

**NB : Comme on ne peut faire qu'un nombre limité (fini) de mesurages, il est seulement possible de déterminer une estimation de l'erreur aléatoire. Cela veut dire que l'erreur aléatoire a elle-même une incertitude associée.**

- ✓ L'erreur systématique (notée  $E_s$ ) est la moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans des conditions de répétabilité, moins une valeur vraie du mesurande.

**NB : comme la valeur vraie, l'erreur systématique et ses causes ne peuvent être connues complètement.**

On peut toute fois diminuer leur influence en répétant les mesures.

- **Erreurs vraies:** ce sont les erreurs faites par rapport à une valeur exacte parfaite.
- **Erreurs apparentes:** ces sont les écarts de mesures à leur moyenne.

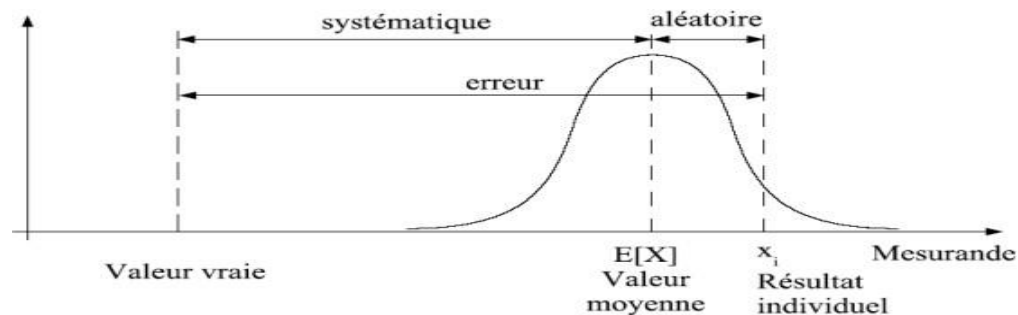


Fig.II.9. Décomposition de l'erreur

### II.5.4. Incertitude

L'incertitude  $\delta x$  traduit les tentatives scientifiques pour estimer l'importance de l'erreur aléatoire commise, En absence d'erreur systématique, elle définit un intervalle autour de la valeur mesurée qui inclut la valeur vraie avec un niveau de confiance déterminé, La détermination de l'incertitude n'est pas simple à priori, On rencontre en pratique deux situations :

- **$\delta x$  est évalué statistiquement** : on parle alors d'évaluation de type A de l'incertitude.
- **$\delta x$  est évalué par d'autres moyens** : on parle alors d'évaluation de type B de l'incertitude.

L'incertitude de mesure est définie par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) dans Vocabulaire international de métrologie (VIM)<sup>1,2</sup> : elle « caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées ».

La méthode de détermination de l'incertitude de mesure fait l'objet d'un fascicule métrologique du BIPM intitulé Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)<sup>3</sup> Dans ce guide on retrouve la définition sous une forme plus ancienne datant de 1993 : paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs ,qui pourraient raisonnablement, être attribuées au mesurande.

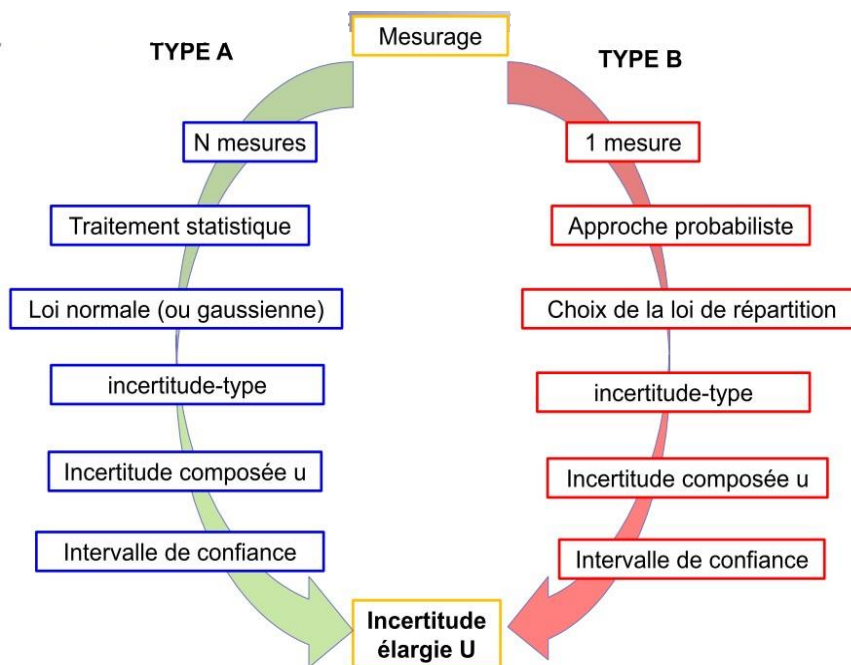


Fig.II.10. l'incertitude de type A et B

**II.5.4.1. Règles de présentation**

L'incertitude absolue s'exprime avec un seul chiffre significatif. Les chiffres significatifs d'un nombre indiquent le degré de précision de celui-ci :

Le premier chiffre significatif dans un nombre, est le premier chiffre dont la valeur n'est pas 0, La précision d'une mesure doit être la même que celle de son incertitude .

**II.5.4.2. Incertitude de type A (incertitude de répétabilité)**

Un même opérateur effectue n mesures du même mesurande m dans les mêmes conditions. Si les valeurs mesurées sont différentes, alors il y a une erreur de répétabilité dont l'origine est souvent inconnue. D'une mesure à l'autre, cette erreur peut prendre une valeur différente : erreur de répétabilité est une erreur aléatoire. Elle est évaluée par une méthode statistique.

La meilleure estimation du résultat de la mesure est donnée par la moyenne arithmétique :

$$\text{Meilleure estimation de } \bar{m} = \frac{m_1+m_2+m_3+m_4+\dots+m_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{n-1}^n m_n$$

La meilleure estimation de  $\sigma$  déduite des n mesures  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , notée  $\sigma_{n-1}$ , est donnée par:

$$\text{Meilleure estimation de } \sigma = \sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{n-1}^n (m_n - \bar{m})^2}$$

On détermine l'incertitude type de répétabilité  $u(m)$  du mesurande m à l'aide de la relation suivante :

$$\text{Incetitude type } u(m) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

Comme le nombre de mesures est limité, on introduit le facteur d'élargissement k (ou coefficient de Student  $t(n; x\%)$ ) qui dépend du nombre de mesures n et de l'intervalle de confiance (x%) choisi. L'incertitude élargie sur le mesurande se calcule avec la relation :

$$U(m) = k \times u(m) = t(n; x\%) \times u(m)$$

**II.5.4.3. Incertitude de type B**

L'évaluation de l'incertitude de type B est effectuée par des moyens autres que l'analyse statistique de série d'observations, Elle est basée sur la connaissance de la loi de probabilité suivie par le mesurande.

Différents cas peuvent se présenter :

- Le constructeur fournit l'incertitude-type  $u(m)$ , Dans ce cas, on utilise directement son incertitude.
- Pour une mesure avec un instrument à graduation (appareil à cadran, lecture d'un réglet, d'un thermomètre ...), l'incertitude type de lecture est :  $u = q/6$ ,  $q$  étant la résolution.
- Pour une mesure avec un instrument à affichage numérique, si la résolution est  $q$ , l'incertitude-type de lecture est donnée par la relation  $u = q/(2 \cdot 30.5)$ .
- Le constructeur fournit une indication de type  $\Delta c$  sans autre information.


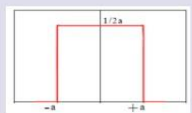
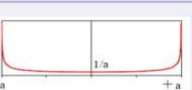
Dans ce cas, on prendra pour incertitude-type :  $u = \Delta c / (3)0.5$

Pour un instrument vérifié et conforme à une classe, si la classe est  $\pm a$ , l'incertitude-type est :  $u = a / (3)0.5$  Si le constructeur ne donne pas d'indications, il faut procéder à l'évaluation expérimentale de l'appareil.

- Dans la majorité des cas, lorsqu'on a une estimation de type B, on peut montrer que le coefficient d'élargissement  $k$  à retenir pour un niveau de confiance de 95 % est  $k=2$  et pour un niveau de confiance de 99 %,  $k = 3$ .

L'incertitude élargie  $U(m)$  est donnée par la relation :

$$U(m) = k \times u(m)$$

Type B					
LOIS DE PROBABILITE USUELLES					
Moyenne = 0			étendue 2a		
Loi	Allure	Écart-type	Instrument	Méthode de calcul	Remarque(s)
Normale		$\frac{a}{3}$	Instrument à graduation	si la résolution est "q", on a : $u = \frac{q}{6}$	IGEN en contradiction avec les recommandations internationales
Uniforme ou rectangle		$\frac{a}{\sqrt{3}}$	indicateur Numérique  Instrument vérifié et conforme à une classe	si la résolution est $q = 2a$ , on a : $\frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{q}{\sqrt{12}}$  si la classe est définie par $\pm a$ , on a : $u = \frac{a}{\sqrt{3}}$	Affichage s'ajoute souvent un pourcentage  $\pm 0,05 \text{ mL} >$ $u=0,03 \times 2$ (si 2 traits) = 0,06 mL
Dérivée d'arcsinus		$\frac{a}{\sqrt{2}}$	Variation entre deux valeurs de façon sinusoïdale	si les variations sont $\pm b$ , on a : $u = \frac{b}{\sqrt{2}}$	Utile pour la régulation de température

**Fig.II.11.** lois de probabilité usuelles

### II.5.5. Recherche des causes d'erreurs

Tout résultat de mesure est entaché d'une cause d'erreur.

- On répète deux fois la même mesure, va-t-on trouver la même valeur ?
- On change d'instrument, on trouvera probablement une autre valeur.  
→ Pourquoi ne trouve-t-on pas les mêmes résultats ?

✚ Analyse des causes d'erreurs (Fig II.12)

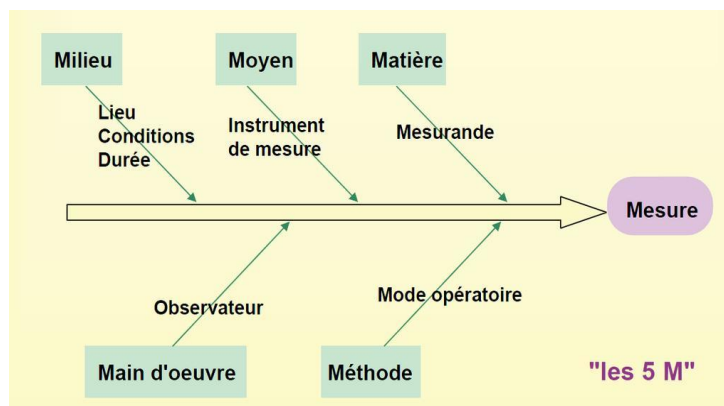


Fig.II.12. Cause d'erreur (les 5M).

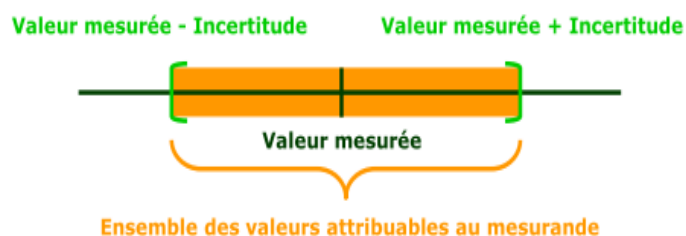
- (1) **Milieu** (environnement) : (Température, Hygrométrie, Pression, Vibrations, Poussières, Magnétisme, Rayonnements)
- (2) **Main d'oeuvre** (opérateur) : (Effort de mesure, Expérience, Formation, Parallaxe, Interpolation, Vue)
- (3) **Moyens** (appareillage) : (Justesse, Fidélité, Géométrie, Résolution, Incertitude d'étalonnage, Température, Corrections)
- (4) **Matière** (produit mesuré) : (Température, État de surface, Déformabilité, Positionnement, Géométrie, Aspect, Magnétisme)
- (5) **Méthode** : ( Nombre de mesures, Durée de la mesure, Choix de la méthode, Choix de la référence, Choix de l'appareil, Nombre d'opérateurs, Corrections).

L'erreur peut se décomposer en une erreur systématique et une erreur aléatoire.

- Erreur systématique
- Erreur aléatoire

#### II.5.5.1. Incertitude de mesurage

En métrologie, dans un ou des mesurages, une incertitude de mesure « caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées » Les causes de cette dispersion, liées à différents facteurs, influent sur le résultat de mesurage, donc sur l'incertitude ;



**Fig.II.13.** valeur mesurée

### II.6. Différents classes de métrologie

La métrologie comprend trois grands axes de compétence; la métrologie scientifique, industrielle et la métrologie légale.

#### II.6.1. Métrologie scientifique

Le terme de métrologie scientifique est employé dans le cadre de la définition des unités de mesure. C'est ce qui permet d'avoir un langage universel pour l'expression de la mesure d'une grandeur. Ensuite, ces unités sont matérialisées par des références que l'on appelle « étalon primaires ». Elle traite l'organisation et le développement des étalons de mesures et de leur maintien à niveau dans des laboratoires dits primaires, tels que le LNE. La Métrologie fondamentale ou scientifique couvre tous les aspects généraux théoriques et pratiques relatifs aux unités de mesure, aux étalons de mesure, aux méthodes scientifiques et aux résultats de mesure y compris (calculs d'erreur et d'incertitude de mesure) ainsi que les problèmes des propriétés métrologiques des instruments de mesure. Elle englobe différents domaines de spécialité, par exemple :

- Métrologie des masses, qui traite de la mesure des masses;
- Métrologie dimensionnelle, qui traite de la mesure des longueurs et des angles;
- Métrologie thermique, qui traite de la mesure des températures;

Métrologie électrique, qui traite des mesures électriques;

#### II.6.2. Métrologie industrielle

La métrologie industrielle est la plus utilisée actuellement, car elle correspond à une métrologie efficace et adaptée aux besoins de l'entreprise, suivant les domaines d'activités (agro-alimentaire, automobile, métallurgie, électronique, chimique ...). Elle doit assurer le fonctionnement adéquat des instruments de mesure utilisés dans l'industrie, comme dans la production et les processus d'essais. Elle traite des mesures applicables aux contrôles de la production et aux contrôles de qualité. La métrologie industrielle couvre toutes les activités métrologiques dans l'entreprise telles que le contrôle des processus de mesure, la gestion des instruments de mesure dans l'industrie, les procédures de vérification/étalonnage (traçabilité des mesures) afin d'assurer leur conformité aux exigences propres à leur utilisation prévue.

### **II.6.3. Métrologie légale**

C'est l'ensemble des règles et exigences légales et réglementaire imposées par l'Etat concernant le système national d'unités (unités légales, la fabrication et l'utilisation des instruments de mesure utilisés dans le domaine du commerce, de la santé, de la sécurité et la protection de l'environnement. On parle souvent de métrologie légale lorsque la mesure est utilisée pour des transactions commerciales.

Cette métrologie a pour missions de :

- Assurer la fiabilité des mesures et prévenir les fraudes ;
- Permettre aux industriels de disposer d'instruments adaptés à leurs besoins ;
- Soutenir la performance et la compétitivité des fabricants nationaux d'instruments de mesure.

### **II.7. L'étalonnage**

#### **II.7.1. Etalonnage**

l'étalonnage est une opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir un résultat de mesure à partir d'une indication . En clair, cette opération consiste à mesurer la même grandeur avec l'équipement à étalonner et l'équipement étalon, et à comparer les indications des deux instruments, puis à exploiter les résultats de cette comparaison.

En métrologie, l'étalonnage est une opération qui concerne les appareils de mesure ou de restitution de données. Deux appareils différents — de conception différente, mais aussi deux appareils de la même gamme (même marque, même modèle) — ne réagissent pas exactement de la même manière. Il faut donc une procédure permettant d'obtenir le même résultat à partir de la même situation initiale , On rencontre aussi l'anglicisme calibration .

D'après le Vocabulaire international de métrologie (**VIM**) édition 2008, l'étalonnage est une « opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir un résultat de mesure à partir d'une indication ,En clair, cette opération consiste à mesurer la même grandeur avec l'équipement à étalonner et l'équipement étalon, et à comparer les indications des deux instruments, puis à exploiter les résultats de cette comparaison , et aussi Les étalonnages et vérifications périodiques des instruments permettent de s'assurer et garantir, par notamment la traçabilité vers les étalons nationaux, que ces instruments restent conformes (n'ont pas dérivé, erreurs identiques) dans le temps, donc que les décisions prises s'appuient toujours sur des résultats de mesure que l'on maîtrise.

---

# **Chapitre III**

## **Validation de la méthode de mesure des distances par microscope**

---

### III.1. Etalonnage de l'oculaire d'un microscope

#### III.1.1. Présentation du matériel

Pour permettre la mesure des éléments présents sur une lame microscopique, une lame micrométrique ET un oculaire micrométrique sont absolument et simultanément nécessaires, L'élément essentiel est un oculaire micrométrique, qui s'adapte au microscope à la place de l'oculaire normal. L'étalonnage de cet oculaire nécessite l'emploi d'une lame micrométrique.

#### III.1.2. Étalonner le micromètre de l'oculaire

on place au niveau du diaphragme fixe de l'un des oculaire, un disque transparent portant une échelle munie de 100 graduations, Ce disque d'oculaire est vendu comme accessoire et doit être commandé en même temps que le microscope, Son diamètre correspond au diamètre intérieur de l'oculaire ,L'oculaire qui porte cet accessoire est appelé oculaire micrométrique.

**Remarque :** Si vous achetez un oculaire micrométrique différent de celui qui équipait votre microscope, il y a de très grandes chances pour que deux images ne puissent pas fusionner parfaitement, On doit dans ce cas utiliser l'oculaire micrométrique uniquement pour réaliser les mesures puis remettre l'oculaire initial pour rétablir la vision binoculaire nettement plus confortable et moins fatigante pour les yeux.

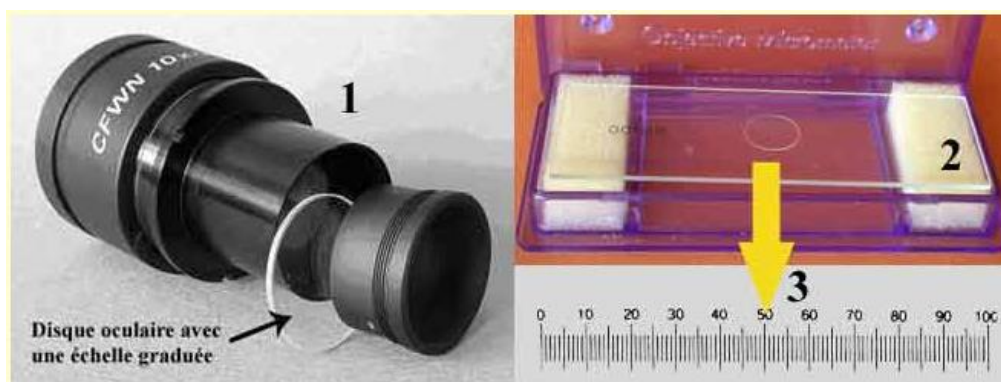


Fig.III.1. oculaire micrométrique avec échelle graduée

(1) L'échelle du disque oculaire, divisée en 100 parties égales, forme le micromètre oculaire.

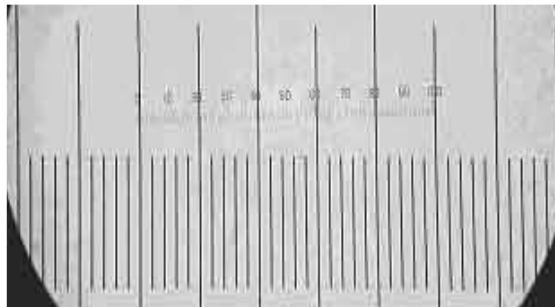
(2) La lame micrométrique porte un segment de 1mm, le micromètre objet, divisé en 100 parties égales.

(3) 2 traits consécutifs sont séparés par 10  $\mu\text{m}$ .

Pour évaluer les longueurs il faut étalonner cet oculaire pour chacun des objectifs du microscope savoir à quelle longueur en  $\mu\text{m}$  correspond la distance entre deux graduations successives On utilise une préparation microscopique particulière appelée lame micrométrique ou micromètre objet qui porte un segment de 1 mm de longueur divisé en 100 parties égales.

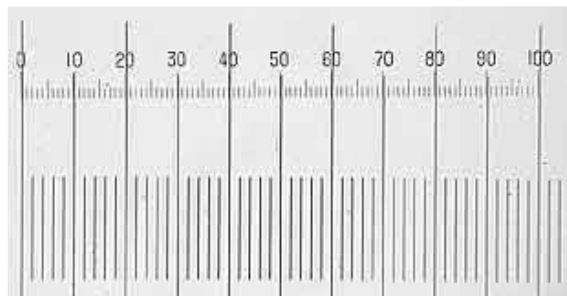
- Sur la lame micrométrique, 100 graduations = 1 mm = 1000  $\mu\text{m}$
- entre 2 graduations successives du micromètre objet, il y a donc 10  $\mu\text{m}$

On place le micromètre objet sur la platine et on l'observe avec l'oculaire micrométrique. On fait la MAP puis en déplaçant la préparation micrométrique on fait coïncider le zéro du micromètre oculaire avec le zéro du micromètre objet, Il suffit de lire le nombre de  $\mu\text{m}$  qui correspond aux 100 graduations du micromètre oculaire (celui qui bouge quand on fait tourner l'oculaire).



**Fig.III.2.** grossissement

Au grossissement 400 (10x40) les 100 graduations du micromètre oculaire (M) correspondent à 25 divisions (soit 250  $\mu\text{m}$ ) du micromètre objet, entre 2 graduations de l'oculaire micrométrique il y a donc 2,5  $\mu\text{m}$ .



**Fig.III.3.** grossissement

Au grossissement 200 (10x20) les 100 graduations du micromètre oculaire correspondent à 50 divisions (soit 500  $\mu\text{m}$ ) du micromètre objet ,entre 2 graduations de l'oculaire micrométrique il y a donc 5  $\mu\text{m}$ .

**Autre Exemple :**

au grossissement 1000 (10x100) les 100 graduations du micromètre oculaire correspondent à 8,3 divisions (soit 83  $\mu\text{m}$ ) du micromètre objet, entre 2 graduations de l'oculaire micrométrique il y a donc 0,83  $\mu\text{m}$ , Une spore mesurant 17 graduations aura donc pour taille  $17 \times 0,83 = 14 \mu\text{m}$ .

Au grossissement 1000, si les 100 divisions du micromètre oculaire correspondent à 10 divisions (soit 100  $\mu\text{m}$ ) du micromètre objet ce qui correspond au cas idéal,entre 2 graduations de l'oculaire micrométrique il y a donc 1  $\mu\text{m}$ , Les valeurs trouvées pour chaque objectif sont reportées sur un petit morceau de papier scotché sur le microscope,Il suffit ensuite de faire les mesures et de multiplier par le coefficient préalablement trouvé.

**Remarque :** le micromètre objet ne sert qu'une seule fois, lors de l'étalonnage du micromètre oculaire.

**III.1.3. L'oculaire micrométrique**

L'oculaire micrométrique est un oculaire classique dont la lentille inférieure dispose d'une échelle graduée arbitrairement, On utilisera donc ces graduations pour déterminer les dimensions réelles d'un objet.

C'est un oculaire classique dont la lentille inférieure comporte un segment gradué.



**Fig.III.4.** Oculaire micrométrique

Le segment est gradué de 0 à 10 unités arbitraires (UA). Entre chaque repère d'UA (0, 1, 2, ...) se succèdent des graduations espacées de 0,1 UA :

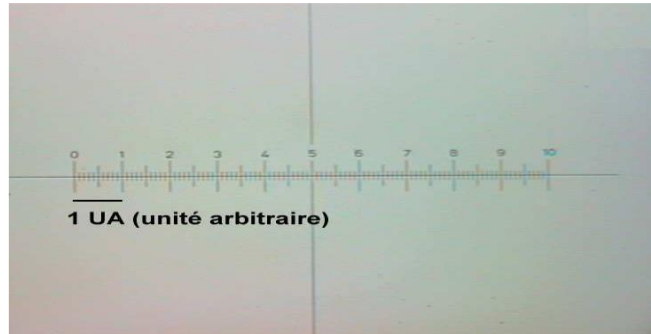


Fig.III.5. unités arbitraires (UA) de Le segment gradué

### III.1.4. La lame micrométrique

La lame micrométrique ou micromètre objet donne la référence des dimensions, Au centre de la lame, on observe une échelle de 1mm de long, graduée au centième de millimètre ( $10\mu\text{m} = 0.010\text{mm}$ ), On peut ainsi étalonner l'oculaire micrométrique avant d'effectuer les mesures sur des objets.

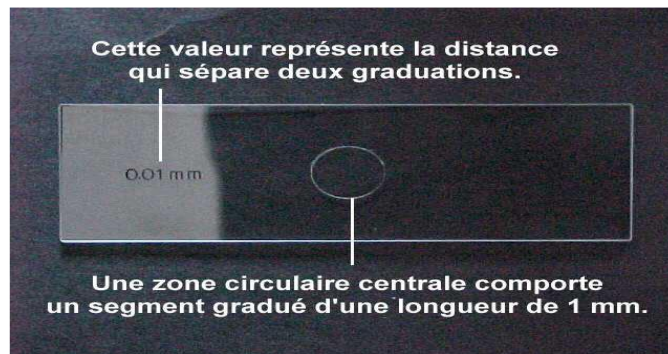


Fig.III.6. lame micrométrique

- Le segment gradué est subdivisé en  $0,01\text{ mm} (= 10\ \mu\text{m})$  :

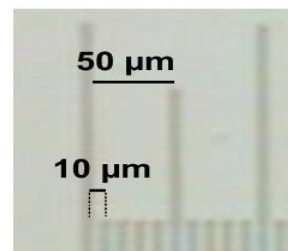
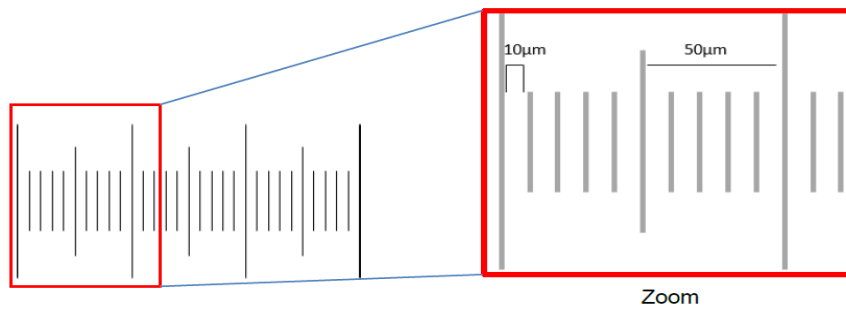


Fig.III.7. Le segment gradué

Autre :



### III.1.5. Protocole d'étalonnage

Etalonner l'oculaire micrométrique consiste à répondre à la question En utilisant l'objectif x... de mon microscope, à quelle taille réelle correspond une unité arbitraire de l'oculaire micrométrique ?

L'étalonnage doit être réalisé pour chaque objectif du microscope Il peut être effectué à la première séance de microscopie, Les résultats restent valables pour les séances ultérieures sur le même modèle de microscope.

- 1) Mettre en place la lame micrométrique et l'oculaire micrométrique.
- 2) Mettre en place l'objectif choisi pour effectuer l'étalonnage.
- 3) Effectuer la mise au point sur les graduations de la lame.
- 4) Aligner et orienter les deux graduations de sorte que leurs origines se correspondent, Méthode: déplacer la lame micrométrique à l'aide du chariot du microscope et tourner l'oculaire micrométrique.

Objectif x 10

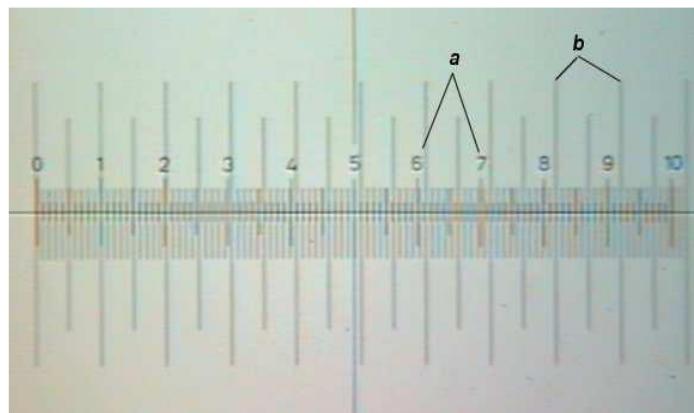


Fig.III.8. a : graduations de l'oculaire , b : graduations de la lame

- 5) La lecture des deux graduations superposées permet d'établir la correspondance entre une longueur en unités arbitraires de l'oculaire et une taille réelle en  $\mu\text{m}$ .

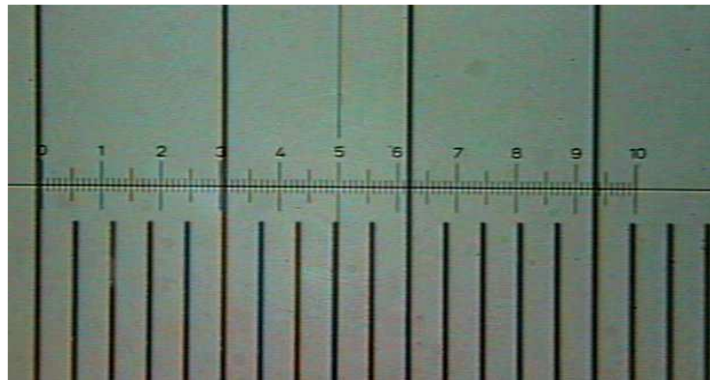
Sur l'exemple ci-dessus :

10 UA correspondent à  $970 \mu\text{m}$

→ 1 UA correspond à  $97 \mu\text{m}$  (environ  $100 \mu\text{m}$ )

- 6) Répéter les opérations 2, 3, 4 et 5 pour les autres objectifs du microscope.

**Exemple :** objectif x 60

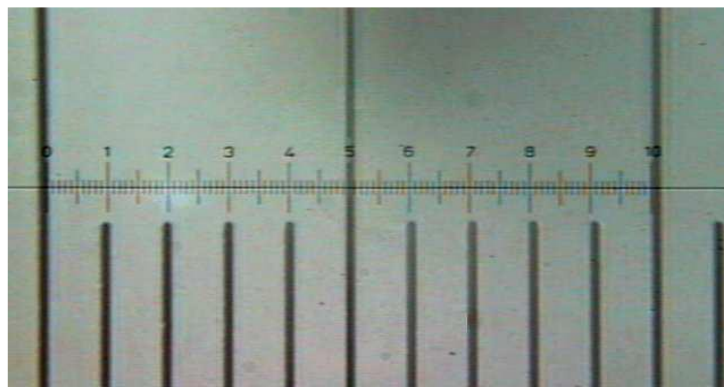


**Fig.III.9.** objectif x 60

10 UA correspondent à environ  $160 \mu\text{m}$

→ 1 UA correspond à  $16 \mu\text{m}$

**Exemple :** objectif x 100



**Fig.III.10.** objectif x 100

10 UA correspondent à environ  $100 \mu\text{m}$

→ 1 UA correspond à  $10 \mu\text{m}$

### III.1.6. Mesures

### **III.1.6.1. Principe**

Les mesures d'objets au microscope s'effectuent après avoir étalonné l'oculaire micrométrique pour les différents objectifs du microscope.

- a) Mettre l'oculaire micrométrique en place et disposer la lame porte-objet sur la platine du microscope.
- b) Choisir l'objectif approprié pour l'observation et la mesure. La précision de la mesure sera d'autant plus grande qu'elle se fera avec un objectif de plus fort grossissement. Effectuer la mise au point sur l'objet à mesurer.
- c) Déplacer la lame à l'aide du chariot guide-objet et orienter l'oculaire de sorte que le bord de l'objet à mesurer coïncide avec la graduation 0 UA, Cette opération est délicate sur un microscope non équipé d'un chariot guide-objet.
- d) Mesurer l'objet en UA.
- e) A l'aide des données fournies par l'étalonnage, convertir la taille mesurée en UA en taille réelle ( $\mu\text{m}$ ).

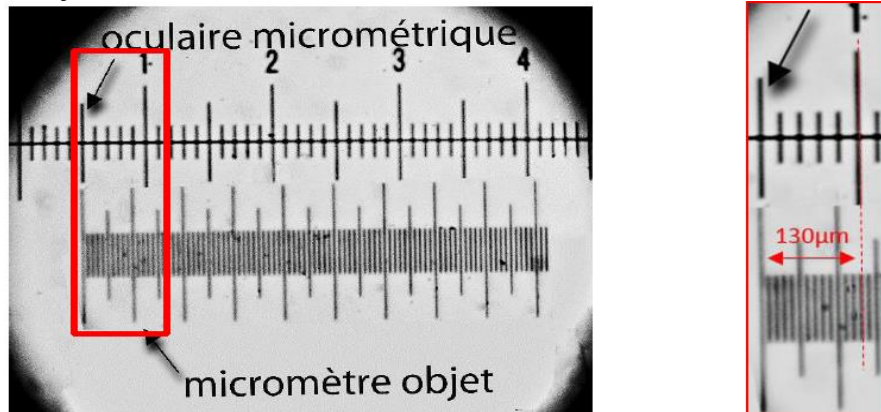
### **III.1.7. Utilisation**

#### **III.1.7.1. En vision directe**

- Placer le micromètre objet sur la platine.
- Installer l'oculaire micrométrique à la place de l'oculaire habituel
- Dans le cas d'un microscope binoculaire, un seul oculaire micrométrique suffit.
- Sélectionner l'objectif choisi pour effectuer l'étalonnage.
- Faire la mise au point sur le micromètre objet.
- Faire correspondre l'origine de l'échelle de l'oculaire à une graduation entière du micromètre objet. Méthode : déplacer la lame micrométrique à l'aide de la sur-platine à mouvements orthogonaux.
- On cherche quelle graduation de l'oculaire est superposée à une gravure du micromètre objet. Cela établit la correspondance entre une longueur en unités arbitraires de l'oculaire et une taille réelle en  $\mu\text{m}$  indiquée par le micromètre objet.
- On calcule par une règle de 3 quelle longueur réelle représente une graduation de l'oculaire, en fonction de l'objectif choisi.
- Oter le micromètre objet, et placer la lame à observer.

**Remarque :** Il est possible que l'échelle de l'oculaire micrométrique soit numérotée. Il ne faut pas tenir compte de ces chiffres (UA = unités arbitraires), mais uniquement des graduations.

**Exemple :** à l'objectif x10



Ici, on a donc 5 UA correspondent à  $130\mu\text{m}$ .

→ 1 UA correspond à  $26\mu\text{m}$ .

Ensuite, remplacer la lame micrométrique par votre lame à observer. Et vous pourrez estimer à l'objectif x10 la taille de vos éléments, en sachant qu'1 UA équivaut à  $26\mu\text{m}$ .

### III.1.7.2. Avec une caméra oculaire

Dans cette configuration, on ne peut pas utiliser l'oculaire micrométrique, Ce sont les pixels de l'écran qui serviront de graduation arbitraire.

- On procède de la même façon, c'est-à-dire que l'on place le micromètre objet sur la platine.
- On prend une photo de l'échelle.
- Attention, à partir de cette étape, il ne faut plus toucher au zoom du logiciel.
- A partir du logiciel, tracer une ligne (à l'aide de l'outil dédié) sur l'échelle du micromètre objet, entre 2 graduations pleines.
- Le nombre de pixels de cette ligne est connu, et correspond à une longueur déterminée par le micromètre objet.
- Indiquer au logiciel la correspondance entre la longueur réelle et le nombre de pixels. Le logiciel calculera automatiquement les dimensions des objets.

## Chapitre III/Validation de la méthode de mesure des distances par microscope

- Vous pourrez à nouveau zoomer sur l'image. L'échelle s'ajustera automatiquement.

### III.2. Logiciel de caméra associé à un microscope

#### III.2.1. interface de travail de Logiciel de caméra

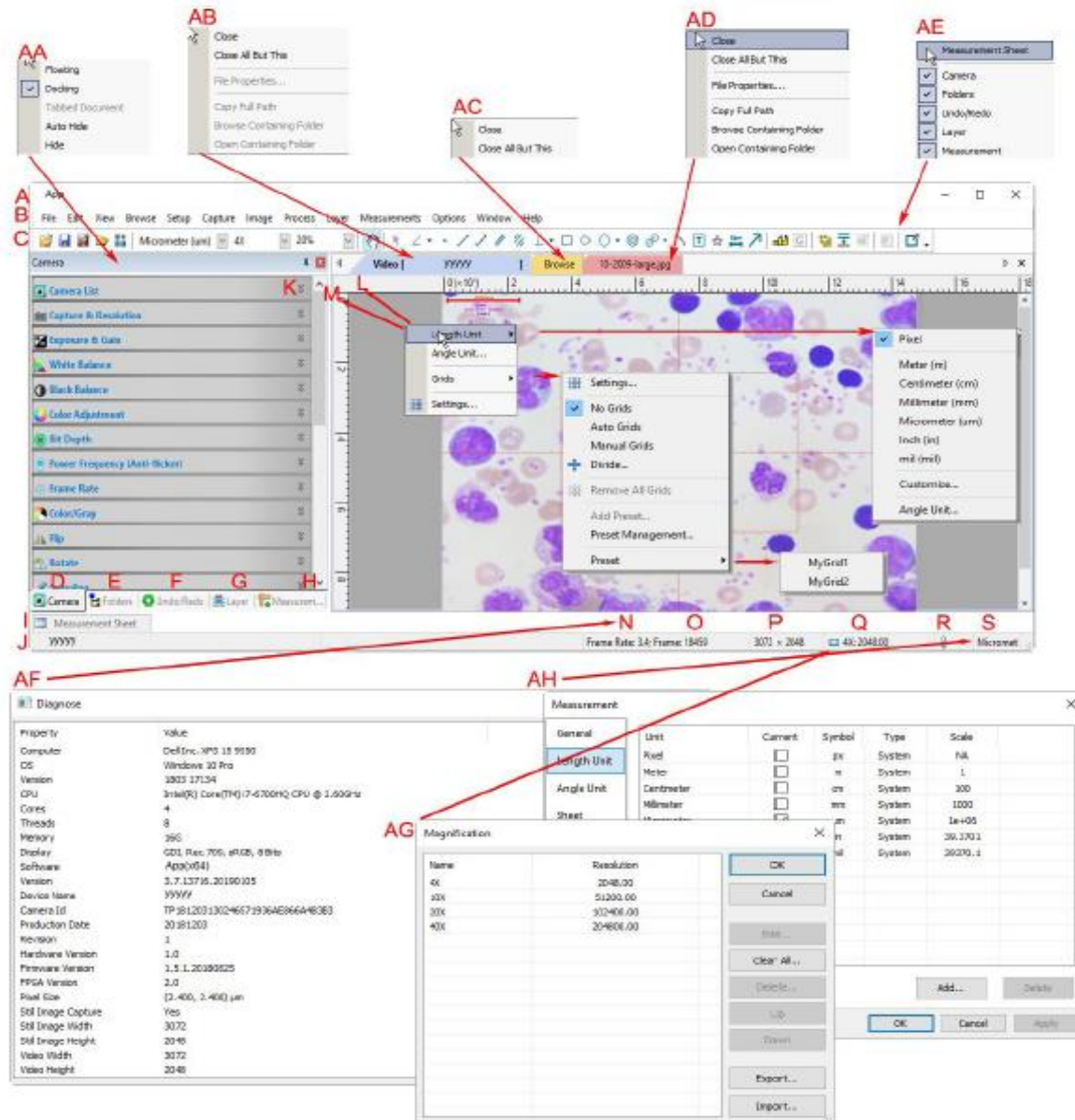
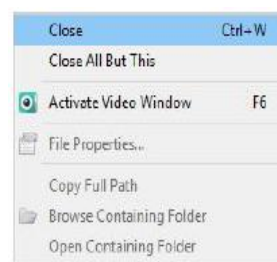


Fig.III.11. GUI de fenêtre vidéo

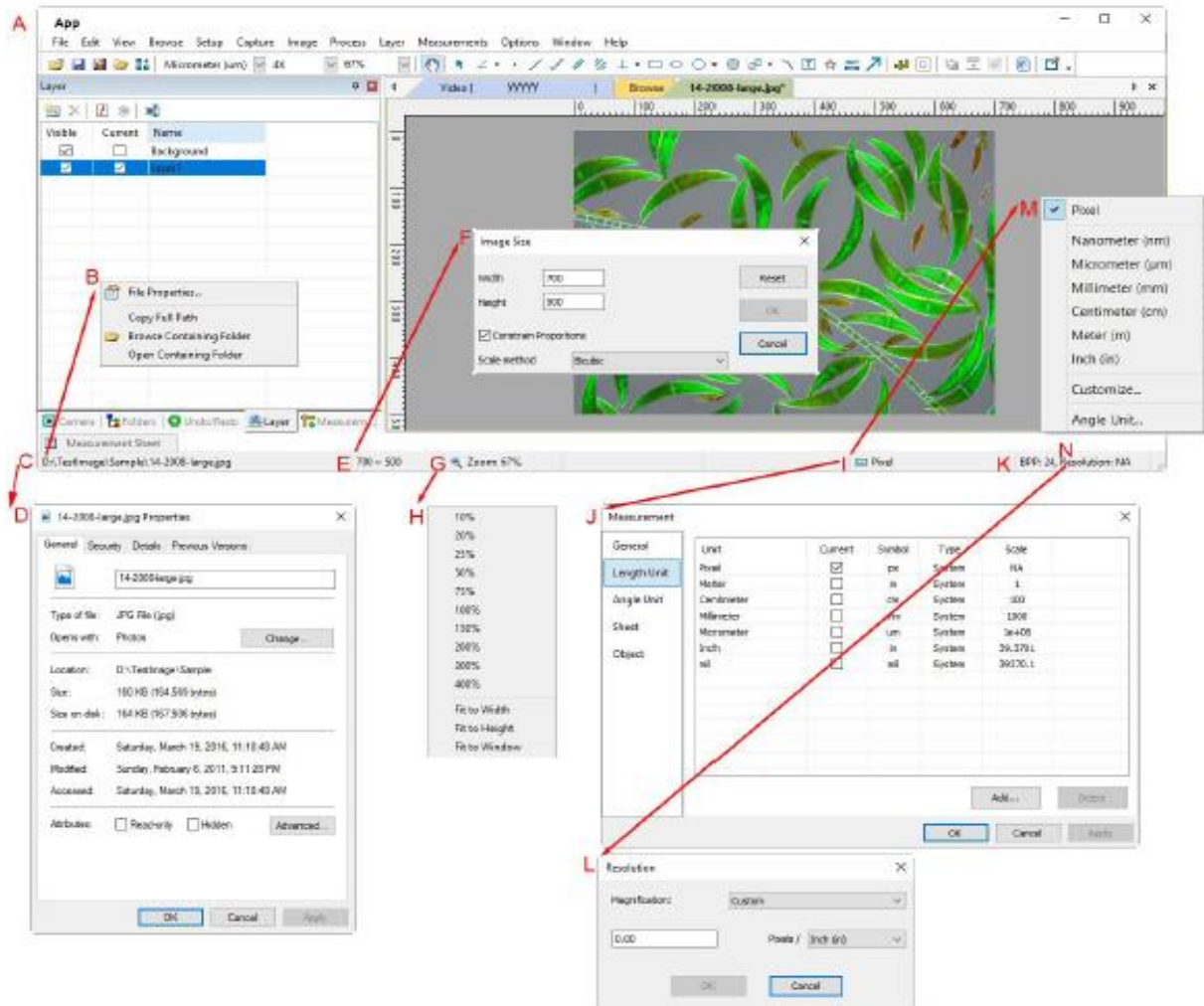
- A : La barre de titre de l'application
- B : menus
- C : barre d'outils des applications
- D : barre latérale de la caméra
- E : Barre latérale des dossiers

- F : Annuler/Rétablir la barre latérale
  - G : Barre latérale des calques
  - H : Barre latérale de mesure
  - I : feuille de mesure
  - J : barre d'état
  - K : bouton Masquer automatiquement
  - L : règle horizontale
  - M : règle verticale
  - N : fréquence d'images
  - : images capturées
  - P : Tailles actuelles des vidéos
  - Q : Le grossissement du microscope sélectionné
  - R : Température de refroidissement
  - S : unité actuelle
- 
- AA : menu contextuel du bouton droit de la souris dans la barre latérale
  - AB : menu contextuel du bouton droit de la souris de la fenêtre vidéo
  - AC : menu contextuel du bouton droit de la souris de la fenêtre de navigation
  - AD : menu contextuel du bouton droit de la souris de la fenêtre d'image
  - AE : menu contextuel du bouton droit de la souris de la fenêtre Frame
  - AF : double-cliquez pour afficher la boîte de dialogue Diagnostiquer
  - AG : Double-cliquez pour afficher la boîte de dialogue Grossissement
  - AH : double-cliquez pour afficher la boîte de dialogue Mesure
  - AI : menu contextuel de la règle horizontale ou de la règle verticale avec le bouton droit de la souris
- **Comment fermer la fenêtre vidéo ?**

1. Double-cliquer sur le titre de la fenêtre vidéo à onglets ou cliquer sur x dans la barre de titre à droite pour fermer la fenêtre vidéo directement .
2. Choisissez la commande Windows>Fermer tout pour fermer la fenêtre vidéo ;
3. Cliquez avec le bouton droit de la souris sur le titre de la fenêtre vidéo pour appeler le menu contextuel et choisissez Fermer pour fermer la fenêtre vidéo ;
4. Appuyez sur les boutons Ctrl+W.



**Fig.III.12.** Pour fermer la fenêtre vidéo .



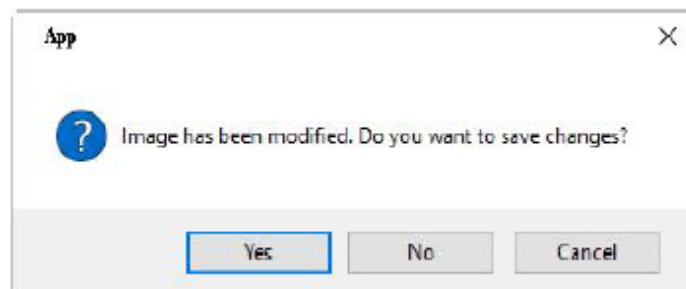
**Fig.III.13.** Interface graphique de la fenêtre d'image

- A : La barre de titre de l'application
- B : Le menu contextuel du bouton droit de la souris sur le fichier ouvert dans la barre d'état
- C : Le nom et le répertoire du fichier ouvert
- D : Double-cliquez pour afficher la boîte de dialogue Propriétés du fichier ouvert
- E : largeur et hauteur de l'image actuelle
- F : Double-cliquez pour afficher la boîte de dialogue Échelle d'image
- G : taux de zoom de l'image, un double-clic agrandira l'image à 100 %
- H : menu contextuel du bouton droit de la souris sur le taux de zoom
- I : Unité actuellement sélectionnée
- J : Double-cliquez pour afficher la boîte de dialogue Mesure
- K : BPP et résolution de l'image
- L : double-cliquez pour afficher la boîte de dialogue Paramètres de résolution
- M : menu contextuel du bouton droit de la souris sur l'unité

- N : Résolution calibrée.
- **Comment fermer la fenêtre d'image ?**

1.Si l'utilisateur a modifié une image avant d'essayer de la fermer, double-cliquer sur la barre de titre de la fenêtre d'image à onglets ou cliquer sur le bouton x sur le côté droit de la barre de titre affichera une boîte de dialogue d'avertissement comme indiqué ci-dessous :

2.Si la fenêtre d'image est accrochée ou collée avec un numéro comme titre, double-cliquer sur la barre de titre de la fenêtre d'image à onglets ou cliquer sur le bouton x sur le côté droit de la barre de titre affichera une boîte de dialogue d'avertissement comme indiqué ci-dessous:



3.Cliquer sur Oui enregistrera les modifications avec son ancien nom et fermera la fenêtre rapidement, Non fermera le fichier immédiatement sans modification ni avertissement, ou Annuler annulera la commande Fermer et laissera le fenêtre là-bas sans changements .

4.Si la fenêtre d'image est capturée à partir de la fenêtre vidéo ou collée en tant que nouveau fichier à partir du presse-papiers, cliquer sur Oui fera apparaître la boîte de dialogue Enregistrer sous Dans la boîte de dialogue Enregistrer sous, l'utilisateur peut : Enregistrer dans : sélectionnez le pilote et le dossier dans lesquels vous souhaitez enregistrer votre fichier image dans la zone de liste déroulante Enregistrer dans et entrez le nom du fichier dans la zone d'édition Nom de fichier ; Enregistrer : cliquez sur Enregistrer pour enregistrer la nouvelle image avec le répertoire et le nom de fichier spécifiés .

5.Cliquez sur Non dans la boîte de dialogue d'avertissement pour fermer le fichier immédiatement sans modification ni avertissement .

6. Appuyez sur les boutons Ctrl+W.

**Remarque :** Choisir la commande Fenêtre>Fermer tout peut également fermer la fenêtre d'image à onglets. S'il vous plaît, vérifiez le Fenêtre>Fermer tout pour plus de détails.

▪ **barre d'outils de l'interface utilisateur**

Lorsque la caméra est démarrée, l'image est ouverte (ou capturée) ou la fenêtre d'image est configurée avec Coller comme nouveau fichier, la plupart des icônes de la barre d'outils seront activées pour une utilisation rapide de la fenêtre vidéo ou image.



**Fig.III.14.** barre d'outils de l'interface utilisateur

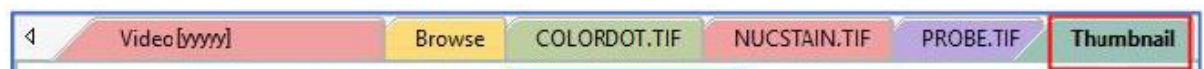
- 1 : Ouvert
- 2: Enregistrer
- 3: Sauvegarde rapide
- 4: Parcourir
- 5: Vignette

Folders est un navigateur pour parcourir tous les fichiers image sur le disque. C'est également une plate-forme importante où les utilisateurs peuvent effectuer facilement des opérations, telles que Stitch, EDF, HDR, Color Composition, etc. Mais l'utilisateur ne peut pas trouver de fichiers image temporaires dans les dossiers qui sont simplement capturés à partir du logiciel ou collés à partir du presse-papiers et qui n'ont pas été enregistrés sur le disque.



**Fig.III.15.** Folders

Thumbnail est également un navigateur qui peut gérer tous les fichiers ouverts y compris les fichiers ouverts sur le disque et les fichiers temporaires ouverts qui ne sont pas encore sur le disque, De nombreuses opérations pratiques peuvent être effectuées dans le navigateur de vignettes, en plus des opérations sur les fichiers ouverts sur le disque (Stitch, EDF, HDR et Color Composite), Quick Save et Batch Save peuvent également être effectuées pour les fichiers temporaires. La sélection de plusieurs images exportées vers Microsoft Word Report ne peut être effectuée que dans le navigateur de vignettes.



**Fig.III.16.** La vignette

- 6 : Unité
- 7 : Grossissement
- 8 : Zoomer
- 9 : Piste (activé uniquement lorsque la taille de l'image/vidéo est supérieure à la taille de la fenêtre)
- 10: Sélection d'objet (sera activé lorsqu'un objet est superposé sur le calque d'arrière-plan.
- 11 : Angle
- 12 : Pointer
- 13 : ligne
- 14 : ligne (3 points)
- 15 : Parallèle
- 16 : Deux parallèles
- 17 : verticale
- 18 : rectangle
- 19 : Ellipse
- 20 : cercle
- 21 : Annule
- 22 : Deux cercles
- 23 : Arc
- 24 : texte
- 25 : Polygone
- 26 : Barre d'échelle
- 27 : Flèche
- 28 : Calibrer (pour les deux fenêtres image/vidéo)
- 29 : Calibrage des gris (pour la fenêtre vidéo)
- 30: Stitch (pour image/vidéo/Parcourir/fenêtre de miniatures)
- 31 : EDF (pour image/vidéo/Parcourir/Fenêtre des vignettes)
- 32 : plage dynamique élevée (HDR, pour la fenêtre image/parcourir/miniatures)
- 33 : Rapport Microsoft Word
- 34 : Application externe (Ouvrir l'image actuelle avec l'application externe)
- 35 : Personnaliser la barre d'outils



### III.2.2. Barre latérale de la caméra

La barre latérale de la caméra est utilisée pour le contrôle de la caméra, elle comprend de nombreux groupes, Le groupe peut être agrandi en

a) en cliquant sur le nom du groupe ou

b) en cliquant sur la flèche vers le bas à l'extrémité droite du nom du groupe



Fig.III.17. Barre latérale de la caméra

### III.2.2.1. Groupe Liste de caméras

La liste des caméras répertorie toutes les caméras connectées aux ports USB de l'ordinateur qui prennent en charge l'application, Cliquer sur le nom de la caméra yyyy lancera la fenêtre vidéo de la caméra.

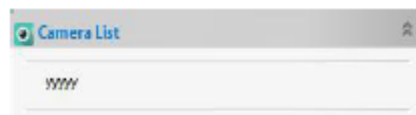


Fig.III.18. le nom de la caméra

### III.2.2.2. Groupe Capture et résolution Capturer

cliquez dessus pour prendre des images en continu , Enregistrement : enregistrez le flux vidéo au format mp4(H264)/mp4(H265)/wmv/avi(obsolète)Endirect : définissez la résolution

de la vidéo en direct ; Snap : définissez la résolution Snap pour la capture d'image ; Format : peut être le format RVB24/RAW/RGB48 selon le modèle de caméra pour Snap.



**Fig.III.19.** 3 options dans le groupe Capture et Résolution

### III.2.2.3. Groupe d'échantillonnage

Binning est une fonction qui fait la moyenne ou ajoute plusieurs pixels de capteur pour obtenir une valeur unique : Si les valeurs de pixels sont ajoutées, la luminosité de l'image augmente , si les valeurs de pixels sont moyennées, le bruit de l'image est réduit, cela réduit également la quantité de données à transférer et permet des fréquences d'images de la caméra plus élevées. L'image capturée a une résolution inférieure mais toujours le même champ de vision par rapport à l'image en pleine résolution.



**Fig.III.20.** Binning

Le regroupement des couleurs tel qu'il est effectué par la plupart des capteurs de couleur, combine uniquement les pixels de la même couleur. Pour certains capteurs monochromes, la caméra effectue également un binning des couleurs, ce qui entraîne de légers artefacts. La plupart des capteurs monochromes et certains capteurs couleur combinent des pixels de motif Bayer voisins, dans ce cas les informations de couleur sont perdues (mono binning). Le sous-échantillonnage ignore plusieurs pixels du capteur lors de la lecture des données d'image. Cela réduit la quantité de données à transférer et permet des fréquences d'images de la caméra plus élevées, L'image capturée a une résolution inférieure mais toujours le même champ de vision par rapport à l'image en pleine résolution.

#### III.2.2.4. Groupe Histogramme

1. Un histogramme illustre la distribution des pixels d'une image en représentant graphiquement le nombre de pixels à chaque niveau d'intensité de couleur. L'histogramme montre les détails dans les ombres (affichées dans la partie gauche de l'histogramme), les tons moyens (affichées au milieu) et les hautes lumières (affichées dans la partie droite). Un histogramme peut vous aider à déterminer si une image a suffisamment de détails pour effectuer une bonne correction

2. Ce groupe affiche l'histogramme de la vidéo active actuelle. Deux marqueurs de ligne verticale indiquent les limites supérieure et inférieure des niveaux d'intensité. Ces marqueurs peuvent être déplacés avec la souris. Si vous regardez une image en couleur, l'histogramme reflétera les valeurs RVB (histogramme des canaux rouge, vert et bleu en même temps), R (rouge), V (vert) et B (bleu) avec des lignes de même Couleur

3. Vous pouvez également saisir directement les valeurs souhaitées dans les zones d'édition Gauche ou Droite sous le graphique Histogramme pour les limites Gauche et Droite de l'histogramme

4. Linéaire ou Logarithmique peut être choisi pour rendre la vidéo dans un mode d'affichage rationnel

5. Cliquer sur le bouton Valeurs par défaut ramènera les limites de l'histogramme gauche et droite à leurs valeurs d'origine

6. Cliquez sur le bouton Auto pour localiser automatiquement les deux limites afin d'obtenir la meilleure qualité vidéo.

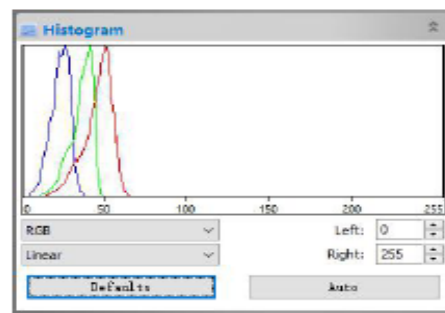


Fig.III.21. l'histogramme

#### III.2.3. Déposer

### III.2.3.1. Ouvrir l'image

Choisissez la commande Fichier>Ouvrir une image ••• pour ouvrir un fichier image existant. La commande Ouvrir l'image ••• peut également être utilisée pour prévisualiser une image en petite taille ou pour afficher les informations statistiques de l'image sans réellement ouvrir l'image elle-même. Ces capacités peuvent être utilisées pour localiser rapidement une image particulière.

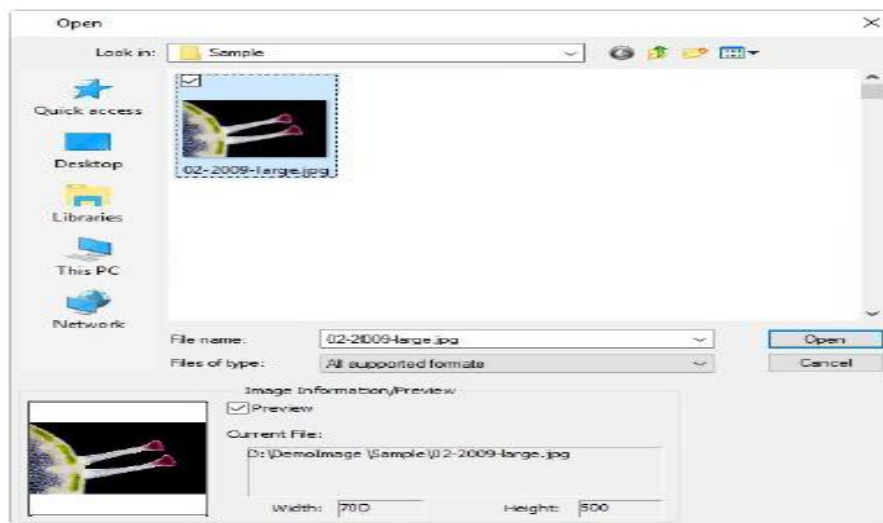


Fig.III.22. Ouvrir l'image

### III.2.3.2. Enregistrer sous

Choisissez la commande Fichier>Enregistrer sous••• pour enregistrer le contenu de la fenêtre actuelle dans un format de fichier spécifié comme indiqué sur le côté droit. A la fin d'une opération Fichier>Enregistrer sous•••, la fenêtre image sera associée au nouveau fichier et au nouveau format (c'est-à-dire que sa barre de titre affichera le nouveau nom de fichier).

Possibilité de sélectionner les différents paramètres pour encoder le fichier.

- ✓ Option pour JPEG
- ✓ Option pour PNG
- ✓ Option pour TIF
- ✓ Option pour JPEG 2000 Standard 2000JPEG 2000 Codestream

### III.2.3.2. Twain : Acquérir

Il existe essentiellement deux techniques utilisées pour capturer les images vidéo à partir d'appareils vidéo tels qu'un PC appareil photo, appareil photo numérique et scanner, Il s'agit de la technique Twain : Acquire, et de la technique DirectShow précédemment appelée VFW , Les caractéristiques les plus évidentes de la technique Twain sont qu'elle prévisualise la vidéo dans une résolution plus petite mais capture l'image avec une résolution plus élevée. La plupart des caméras que nous avons fournies prennent en charge toutes ces deux techniques de prévisualisation vidéo.

### III.2.4. View

#### III.2.4.1. Feuille de mesure

Feuille de mesure. La feuille de mesure affiche les caractéristiques possibles de l'objet, telles que le nom, le centre, le diamètre, la surface, la longueur, l'angle, le point de départ et le point final. superposé sur le calque d'arrière-plan, sur la gauche de la feuille de mesure, il y a une barre d'outils avec 5 boutons appelés Exporter vers Html , Exporter vers Excel , Exporter vers CSV , Ajouter au CSV , Reste , Surbrillance automatique et Réglage .

Choisir Affichage > Feuille de mesure ou cliquer sur le titre de la feuille de mesure sous la barre latérale activera la feuille de mesure

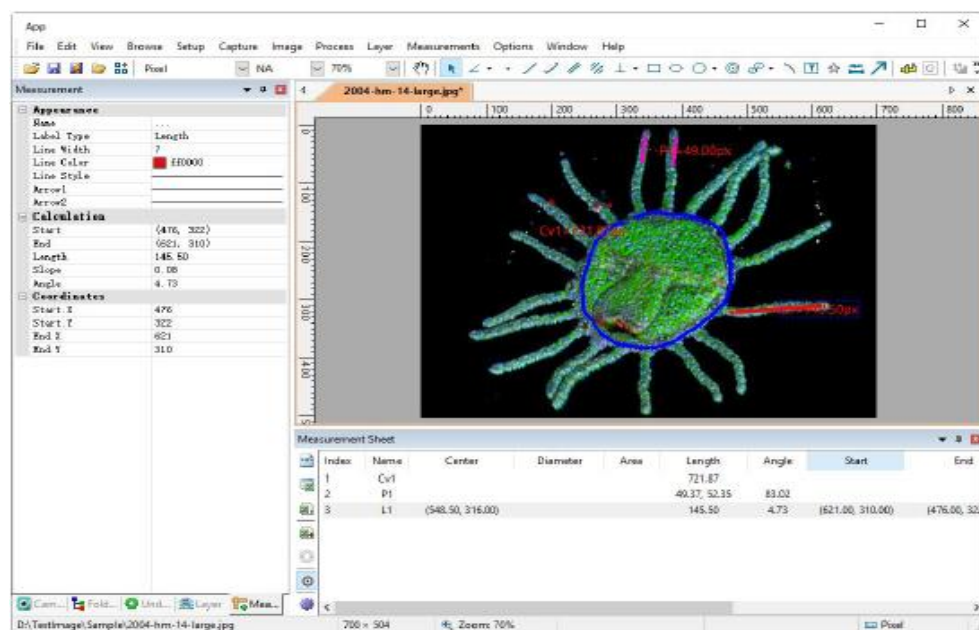


Fig.III.23. exemple d'un Feuille de mesure

### III.2.5. Installer

#### III.2.5.1. Filigrane vidéo

La figure.III.24 montre une micro règle. Les lignes sombres peuvent être extraites sous forme de filigrane vidéo et superposées sur la fenêtre vidéo. Les étapes sont les suivantes:

1.Choisissez la commande Capture > Capture Image ou cliquez pour capturer l'image de la micro-règle comme indiqué sur La figure.III.24

2.Choisissez la commande Process > Binary, pour binariser l'image comme indiqué sur la figure.III.25

3.Choisissez la commande Image > Ajuster > Inverser pour inverser l'image et choisissez la commande Image > Quantifier la couleur pour convertir l'image en 24 bits, comme indiqué sur la figure.III.26 Choisissez la commande Fichier > Enregistrer sous... pour enregistrer l'image au format BMP 24 bits .

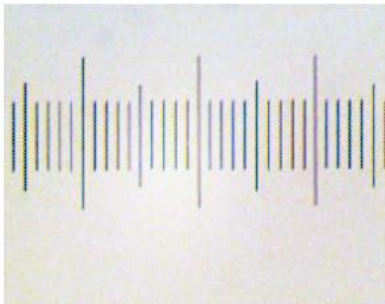


Fig.III.24. Micro règle capturée

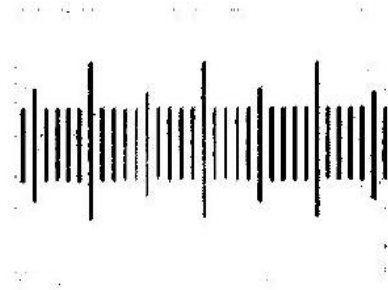


Fig.III.25. Micro règle après avoir été binarisée

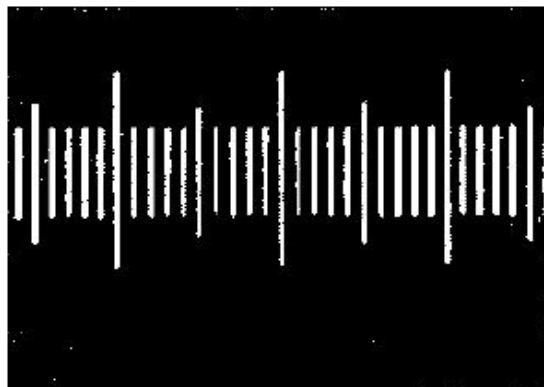
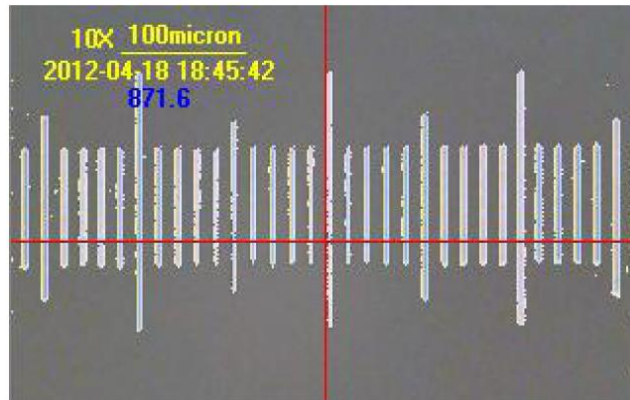


Fig.III.26. Image inversée 24 bits

Le filigrane vidéo final superposé sur la fenêtre vidéo est montré dans la **Fig.III.27**.



**Fig.III.27.** Fenêtre vidéo avec filigrane vidéo superposé

### III.2.6. Capturer l'image

Pendant l'aperçu vidéo, l'utilisateur peut toujours choisir la commande Capture> Capturer l'image pour capturer l'image vidéo, Une fois l'image capturée, la fenêtre créée pour l'image capturée deviendra la fenêtre active actuelle, mais le menu Capture>Capturer l'image est toujours activé, l'utilisateur peut le choisir à nouveau pour continuer l'opération de capture. Noter: a) Le bouton Snap sur la barre latérale de la caméra peut prendre l'image en continu même si la fenêtre vidéo n'est pas activée. L'utilisateur peut cliquer sur ce bouton dans la barre latérale de l'appareil photo pour capturer l'image de manière rapide et continue ;

b) Si les résolutions Live et Snap sont différentes, l'application doit d'abord passer de la résolution Live à la résolution Snap pour capturer une image avec la résolution Snap. Une fois le Snap terminé, l'application reviendra à la résolution Live pour poursuivre le processus de flux vidéo. Cela prendra plus de temps pour capturer une image fixe ;

c) Si de nombreuses images sont capturées, l'utilisateur peut choisir Windows>Activer la fenêtre vidéo (F6) pour revenir rapidement à la fenêtre vidéo (voir Sec.16.1 pour plus de détails).

### III.2.7. Image

#### III.2.7.1. Mode

Il existe de nombreux types de mode :

### 1- Quantification des couleurs :

La commande Color Quantize est largement utilisée pour modifier le bit de l'image. L'Application prend en charge les transferts mutuels entre images 24 bits, 8 bits, 4 bits ou 1 bit. Lorsque la boîte de dialogue des bits de couleur est ouverte, les bits de couleur sélectionnés par défaut sont les bits de couleur de l'image actuelle. Sélectionnez l'élément de bit souhaité et cliquez sur OK pour terminer la commande. L'image sera convertie en bits de couleur sélectionnés dans la fenêtre d'image.

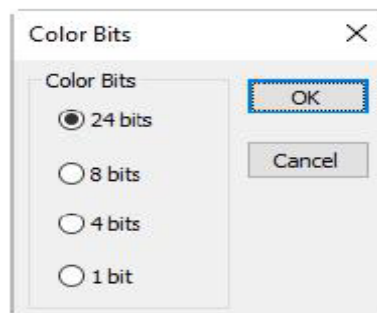


Fig.III.28. différent bits de couleur

### 2- Échelle de gris :

Choisissez la commande Niveaux de gris pour convertir une image en couleurs (image en couleurs vraies ou image en couleurs d'index) en une image en niveaux de gris. Si l'image d'origine est de 24 bits, la nouvelle image sera de 8 bits. Sinon les bits de l'image ne seront pas modifiés.

### 3- Décoloration préservant le contraste

Choisissez Image > mode > La commande Décoloration en préservant le contraste peut convertir l'image couleur en image grise avec un contraste préservé. Les images suivantes (a) est l'image microscopique d'origine, (b) est l'image grise produite par la méthode traditionnelle .

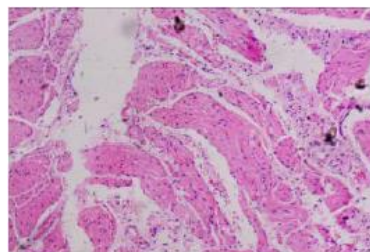


Fig.III.29. (a) Image microscopique originale

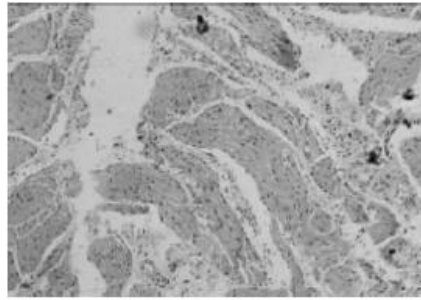


Fig.III.30. (b) Méthode traditionnelle d'échelle de gris

### III.2.7.2. Histogramme

Un histogramme illustre la distribution des pixels d'une image en représentant graphiquement le nombre de pixels à chaque niveau d'intensité de couleur, L'histogramme indique si l'image contient suffisamment de détails dans les ombres (affichées dans la partie gauche de l'histogramme), les tons moyens (affichées au milieu) et les hautes lumières (affichées dans la partie droite) afin d'effectuer une bonne correction.

L'histogramme donne également une image rapide de la gamme de tons de l'image ou du type de clé d'image. Une image low-key a des détails concentrés dans les ombres, une image high-key a des détails concentrés dans les hautes lumières et une image moyenne a des détails concentrés dans les tons moyens, Une image avec une gamme de tons complète a un certain nombre de pixels dans toutes les zones. L'identification de la plage tonale aide à déterminer les corrections tonales appropriées.

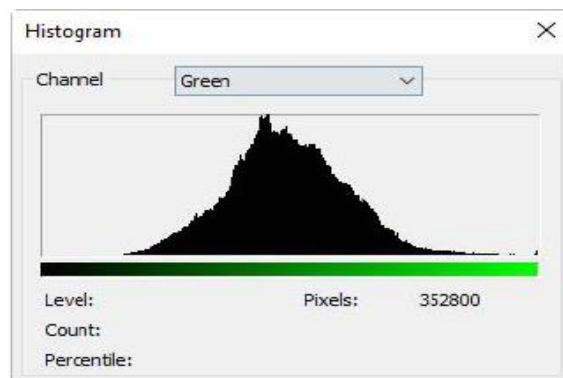


Fig.III.31. exemple d'un histogramme

---

---

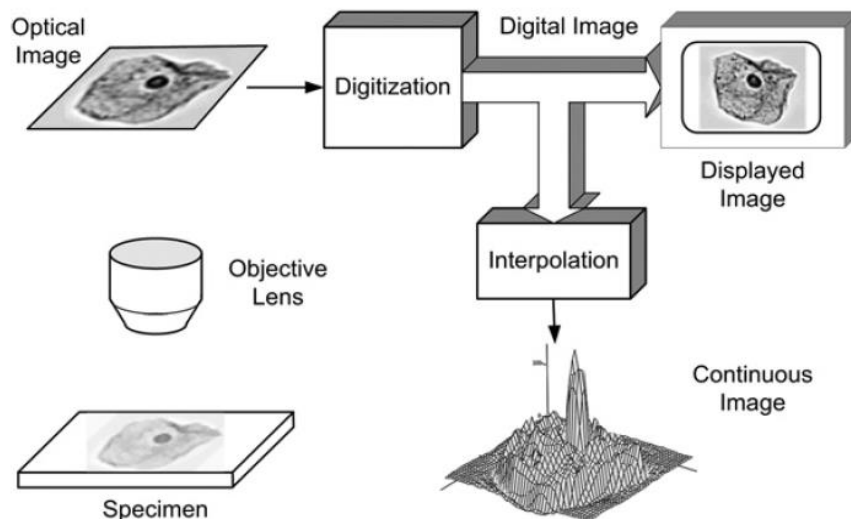
**Chapitre VI**  
le traitement de l'image pour un  
microscope

---

---

### VI.1. Traitement d'image

Le traitement d'images est une discipline de l'informatique et des mathématiques appliquées qui étudie les images numériques et leurs transformations, dans le but d'améliorer leur qualité ou d'en extraire de l'information, Il s'agit d'un sous-ensemble du traitement du signal dédié aux images et aux données dérivées comme la vidéo (par opposition aux parties du traitement du signal consacrées à d'autres types de données : son et autres signaux monodimensionnels notamment), tout en opérant dans le domaine numérique (par opposition aux techniques analogiques de traitement du signal, comme la photographie ou la télévision traditionnelles) , Dans le contexte de la vision artificielle le traitement d'images se place après les étapes d'acquisition et de numérisation, assurant les transformations d'images et la partie de calcul permettant d'aller vers une interprétation des images traitées. Cette phase d'interprétation est d'ailleurs de plus en plus intégrée dans le traitement d'images, en faisant appel notamment à l'intelligence artificielle pour manipuler des connaissances, principalement sur les informations dont on dispose à propos de ce que représentent les images traitées (**connaissance du « domaine »**) .



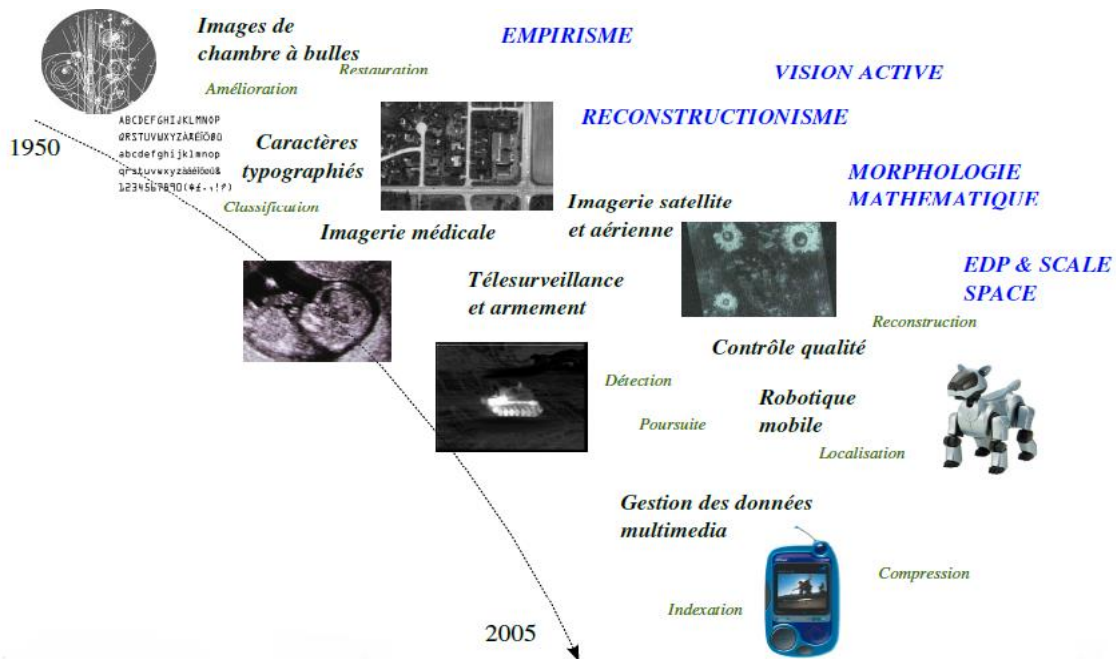
**Fig.VI.1.** Traitement d'images par microscope [Qiang\_Wu]

Les quatre images de microscopie numérique. Le microscope forme une image optique du spécimen. Ceci est numérisé pour produire l'image numérique, qui peut être affichée et interpolée pour former l'image continue.

#### VI.1.2. Historique du traitement d'images

Le traitement d'images commence à être étudié dans les années 1920 pour la transmission d'images par le câble sous-marin allant de New York à Londres. Harry G. Bartholomew et Maynard D. McFarlane effectuent la première numérisation d'image avec

compression de données pour envoyer des fax de Londres à New York. Le temps de transfert passe ainsi de plus d'une semaine à moins de trois heures. Il n'y a pas vraiment d'évolution par la suite jusqu'à la période d'après-guerre, Le traitement du signal prend de l'importance vers la fin de la Seconde Guerre mondiale avec l'arrivée du radar. La prospection pétrolière participe aussi beaucoup au développement des techniques de traitement du signal, Le véritable essor du traitement d'images n'a lieu que, dans les années 1960 quand les ordinateurs commencent à être suffisamment puissants pour travailler sur des images. Peu après, la redécouverte de la transformée de Fourier rapide (FFT) révolutionne le domaine, en rendant possible les manipulations du contenu fréquentiel des signaux sur ordinateur. Cependant, l'essentiel des recherches porte encore, à cette époque, sur l'amélioration des images et leur compression, En 1980 David Marr formalise le premier la détection de contours de manière précise (D. Marr et E. Hildreth : Theory of Edge Detection, Proc. R. Soc. London, B 207, 187-217, 1980) Au cours des années 1980, un véritable engouement se fait jour pour le traitement de l'image et surtout pour la compréhension de l'image par des systèmes experts Les ambitions étaient beaucoup trop grandes, l'échec fut d'autant plus cuisant, Les années 1990 voient l'amélioration constante des opérateurs La recherche médicale devient un très gros demandeur en traitement d'images pour améliorer les diagnostics faits à partir des nombreuses techniques d'imagerie médicale, la technique reine étant l'IRM. Les publicitaires, puis le grand public se familiarisent avec la retouche d'image grâce au logiciel Photoshop, et le traitement d'images dans un objectif esthétique se répand avec l'apparition d'autres logiciels dédiés (The Gimp, Paint Shop Pro). Enfin, la décennie s'achève sur l'engouement pour les ondelettes et les images multimodales, Au XXIe siècle un grand développement a été connu au moyen de programmes et de programmation.



**Fig.VI.2.** Historique du traitement d'images

### VI.1.3. Technique de traitement d'images

On désigne par technique de traitement d'images toutes les techniques ayant pour but la modification des caractéristiques chromatiques des pixels des images bitmap. Traitement d'images est souvent synonyme d'amélioration des images avec pour but l'obtention d'une plus grande lisibilité. Il n'y a pas création d'informations, mais mise en évidence de l'information pertinente déjà présente.

- **Image RVB :**

On appelle image RVB une image où chaque pixel est défini par trois valeurs de rouge de vert et de bleu. Les écrans 16 millions de couleurs sont des écrans RVB à 8 bits, soit 256 couleurs par teinte de base.

- **Image indexée :**

On appelle image indexée, une image où la teinte de chaque pixel est déterminée par une valeur d'indice à l'intérieur d'un tableau de teintes RVB (palette). La modification d'une entrée de la palette entraîne la modification de la couleur de tous les pixels référant à cette entrée. Les écrans 16, 256, 4096 couleurs sont des écrans indexés.

#### VI.1.3.1. Types de données manipulées

Le traiteur d'image dispose principalement d'images numériques donc échantillonnées, Il dispose également de données intermédiaires de diverses natures :

- ✓ Cartes de régions
- ✓ Listes de points connexes
- ✓ Tableaux de valeurs mesurées

En ce qui concerne les images proprement dites, la représentation la plus utilisée est celle d'un tableau à 2 dimensions composé d'un ensemble de lignes et de colonnes. Chaque cellule du tableau, appelée pixel, contient une valeur quantifiée. Cette valeur est une sémantique dépendant du type de signal qu'elle code (intensité lumineuse du point, distance à un point de référence, ou numéro de la région d'appartenance par exemple). Dans le cas des images 3D d'IRM, la représentation n'est plus un tableau à 2 dimensions mais un tableau à 3 dimensions. La compréhension du traitement d'images commence par la compréhension de ce qu'est une image. Le mode et les conditions d'acquisition et de numérisation des images traitées conditionnent largement les opérations qu'il faudra réaliser pour extraire de l'information. En effet, de nombreux paramètres entrent en compte, les principaux étant :

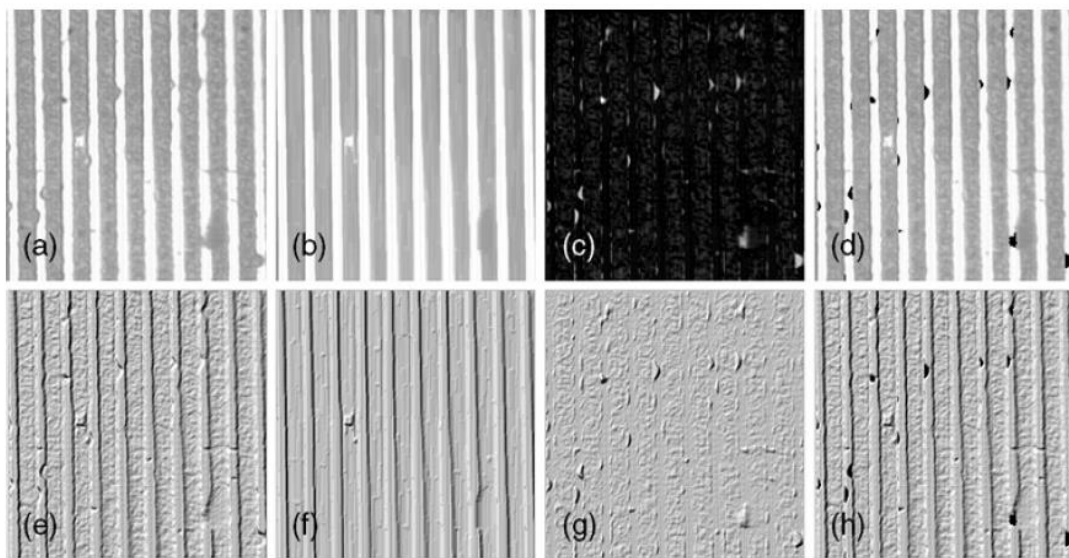
- La résolution d'acquisition et le mode de codage utilisé lors de la numérisation, qui déterminent le degré de précision des éventuelles mesures de dimensions.
- Les réglages optiques utilisés, (dont la mise au point) qui déterminent par exemple la netteté de l'image.
- Les conditions d'éclairage, qui déterminent une partie de la variabilité des images traitées.
- Le bruit de la chaîne de transmission d'image.

Le traitement des images se place aux premières étapes du processus de vision artificielle, Les opérations sur les images effectuées à cette étape se font au niveau des pixels. Aucune interprétation de haut niveau du contenu de l'image n'est tentée.

Le traitement des images dans un contexte de vision artificielle est utile pour :

- Restaurer le contenu (e.g. atténuer les effets du bruit).
- Rehausser certains éléments dans les images (e.g. mettre en évidence les contours (discontinuités d'illuminance)).
- Compresser le contenu des images en supprimant les informations redondantes.

Les concepts précédents (restauration, rehaussement, compression) sont assimilés à des opérations de filtrage.



**Fig. VI.3.** Les différentes opérations de traitement d'image appliquées sur une image

### VI.1.4. Applications

#### Systemes à base de TI (traitement d'image)

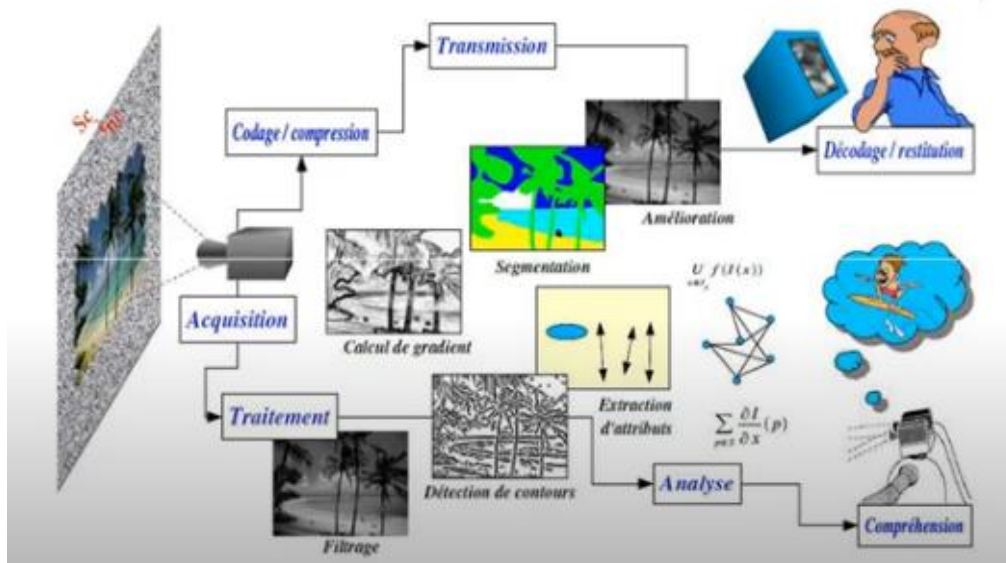


Fig.VI.4. Schéma complet du traitement d'images

❖ **Robotique - Industrie**

- Assemblage, reconnaissance de pièces
- Contrôle de qualité
- Véhicule autonome

❖ **Téledétection**

- Météo
- Cartographie
- Analyse des ressources terrestres
- Astronomie
- Restauration

❖ **Imagerie médicale**

- Tomographie
- Aide au diagnostic
- Comptage (nombre de cellules)
- Suivi de formes anatomiques

❖ **Sécurité**

- Reconnaissance (d'empreintes, visages, signatures)
- Détection de mouvement

**VI.1.5. Quelques aspects du Traitement d'Image**

- Filtrage / convolution (ou filtrage inverse)
- Compression
- Segmentation
- Restauration / reconnaissance
- Reconstruction tomographique



Fig.VI.5. Les niveaux du Traitement d'Image

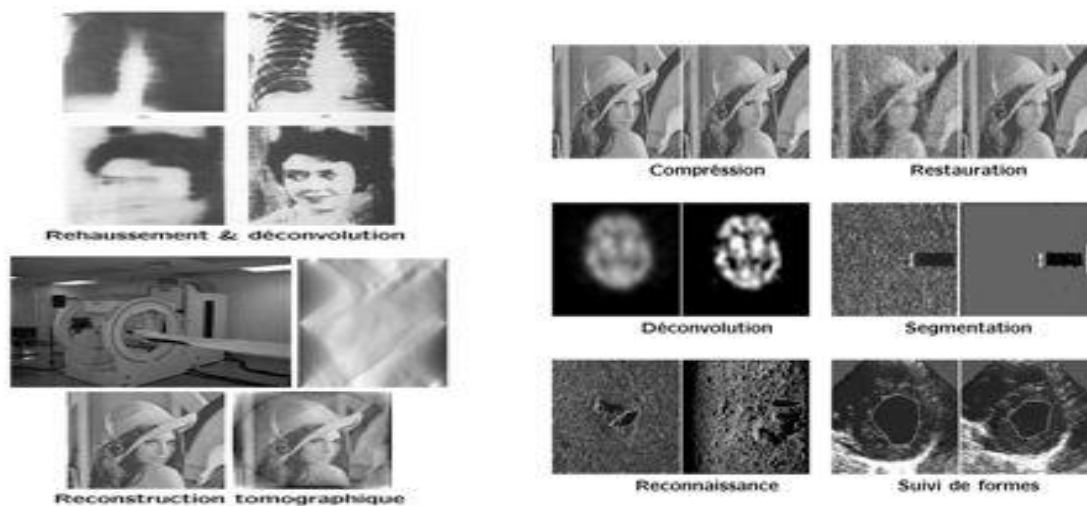


Fig.VI.6. aspects du Traitement d'Image

nous évoquerons successivement trois aspects fondamentaux :

### (1) Filtrage

L'outil mathématique essentiel pour le filtrage est la transformation de Fourier (ou toute autre transformation du même type comme la transformation en ondelettes).

### (2) Segmentation

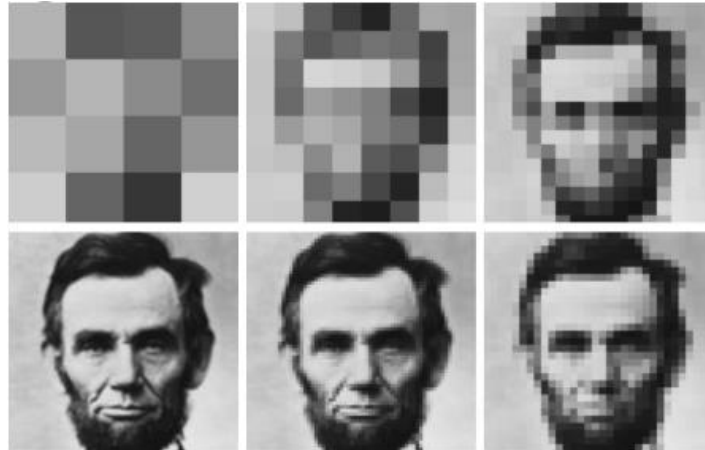
La segmentation fait intervenir des notions d'optimisation, des outils géométriques et des équations aux dérivées partielles.

### (3) Restauration

Les modèles variationnels en restauration utilisent de l'optimisation et de l'analyse fonctionnelle fine (Banach, théorie de la mesure).

## VI.2. Image Numérique

Une image numérique est une fonction à support discret et borné, et à valeur discrètes. Le support est multidimensionnel en général 2d ou 3d. Les valeurs peuvent être scalaire (image en Niveau de gris) ou vectorielles (imagerie multi composantes, imagerie couleur). Une image numérique est associée à un pavage de l'espace, en général rectangulaire. Chaque élément du pavage s'appelle pixel, et désigné par ses coordonnées entières.



**Fig.VI.7.** Traitement numérique des images

- L'échantillonnage est le procédé de discrétisation spatiale d'une image consistant à associer à chaque pixel une unique valeur. On parle de sous échantillonnage lorsque l'image est déjà discrétisée et qu'on diminue le nombre de pixels.
- La quantification désigne la discrétisation tonale correspondant à la limitation du nombre de valeurs différentes que peut prendre chaque pixel. Une image numérique est donc une image échantillonnée et quantifiée.

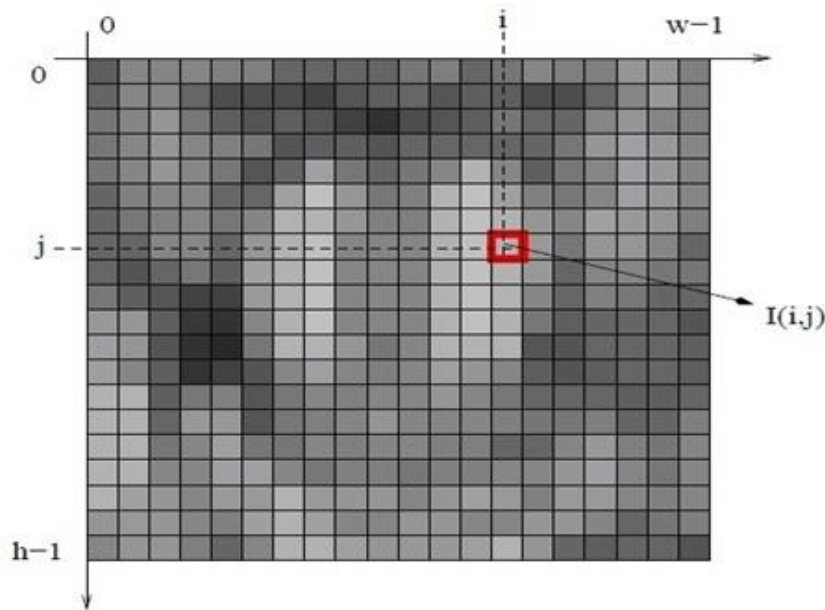
Selon une autre définition, Une image numérique est composée d'unités élémentaires (appelées pixels) qui représentent chacun une portion de l'image. Une image est définie par :

- le nombre de pixels qui la compose en largeur et en hauteur (qui peut varier presque à l'infini).
- l'étendue des teintes de gris ou des couleurs que peut prendre chaque pixel (on parle de dynamique de l'image).

Une image numérique ne constitue donc qu'une version approchée de l'image réelle, formée par l'image (au sens mathématique), de la projection de la scène 3d sur la portion du plan correspondant à la surface photosensible du capteur. La qualité de l'approximation dépend de

la quantité d'information portée par l'image numérique, en particulier du nombre de pixels utilisés, c'est ce qu'on appelle la résolution spatiale.

Une image numérique 2d est représentée par un tableau  $I$  de  $h$  lignes et  $w$  colonnes. Le Pixel est désigné par le couple de  $(i, j)$  où  $i$  désigne l'indice de la colonne  $i$  appartenant à l'intervalle  $[0, w-1]$ , et  $j$  l'indice de ligne de l'intervalle  $[0, h-1]$ .  $w$  est la largeur et  $h$  est la hauteur de l'image  $I$ . Par convention le pixel origine  $(0,0)$ , en général en haut et à gauche, Le nombre  $I(i, j)$  est la valeur du pixel  $(i, j)$ .



**Fig.VI.8.** Traitement d'images On désigne par technique de traitement

### VI.2.1. Principe de l'image numérique

Une image est un signal bidimensionnel, Une image analogique est par exemple celle formée sur la rétine de l'œil ou l'image obtenue par la photographie argentique classique, Une image numérique est un signal numérique composé d'unités élémentaires (appelées pixels) qui représentent chacun une portion de l'image, Contrairement au cas unidimensionnel, nous étudierons uniquement les images numériques (discrètes).

Une image numérique est définie par :

- ✚ le nombre de pixels qui la composent en largeur et en hauteur.
- ✚ l'étendue des teintes de gris ou des couleurs que peut prendre chaque pixel (on parle de dynamique de l'image).

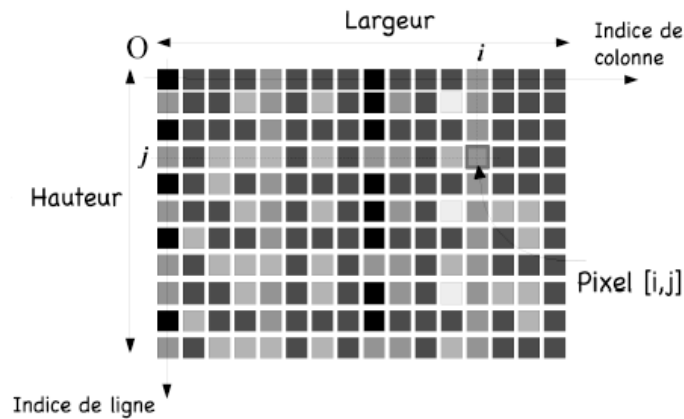


Fig.VI.9. Pixels et niveaux de gris

I est l'image numérique :  $I = (i, j)$ , n est la valeur du niveau de gris Lorsque  $n \in (N_{min}, N_{max})$ ,  $N_{max} - N_{min}$  est le nombre de niveaux de gris, La dynamique de l'image est donnée par  $\text{Log}_2(N_{max} - N_{min})$ .

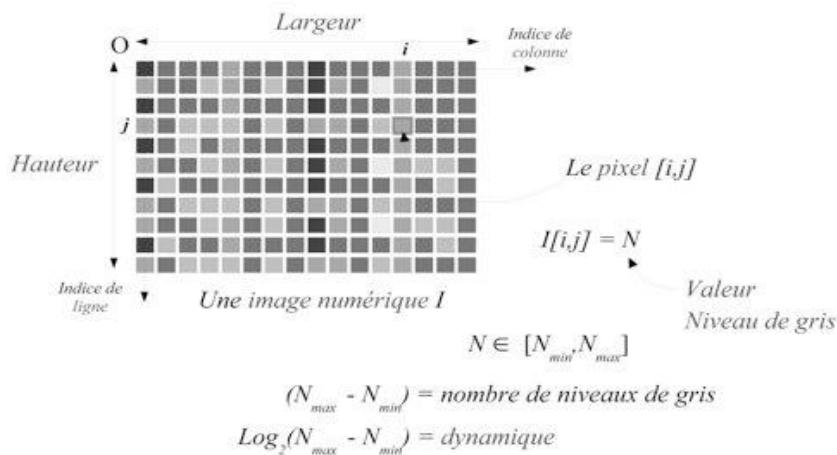


Fig.VI.10. équations de Pixels et niveaux de gris

Une image est définie par 3 type :

- **Les images binaires (noir ou blanc) :**

ce sont les images les plus simples, un pixel peut prendre uniquement les valeurs noir ou blanc, C'est typiquement le type d'image que l'on utilise pour scanner du texte quand celui-ci est composé d'une seule couleur.

- **Les images en niveaux de gris :**

en general, les images en niveaux de gris renferment 256 teintes de gris. Par convention la valeur zero represente le noir (intensité lumineuse nulle) et la valeur 255 le blanc (intensité lumineuse maximale) Le nombre 256 est lié à la quantification de l'image, En e et chaque

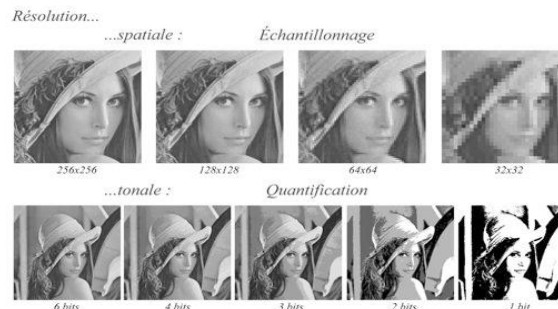
entier représentant un niveau de gris est codé sur 8 bits, Il est donc compris entre 0 et  $2^8 - 1 - 255$ , C'est la quantification la plus courante, On peut coder une image en niveaux de gris sur 16 bits ( $0 \leq n \leq 216 - 1$ ) ou sur 2 bits : dans ce dernier cas le "niveau de gris" vaut 0 ou 1 : il s'agit alors d'une image binaire (Noir et Blanc).

- **Les images couleurs**

S'il existe plusieurs modes de représentation de la couleur, le plus utilisé pour le maniement des images numériques est l'espace couleur Rouge, Vert, Bleu (R,V,B), Cet espace couleur est basé sur la synthèse additive des couleurs, c'est à dire que le mélange des trois composantes (R, V, B) donne une couleur.

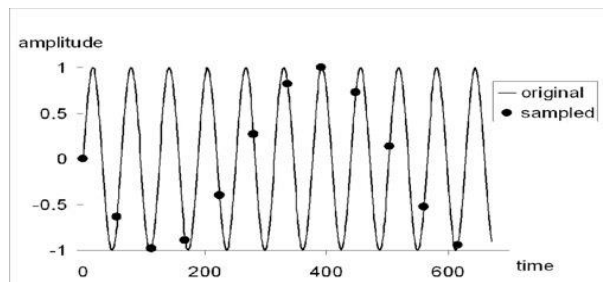
**VI.2.1.1. Echantillonnage**

L'échantillonnage est le procédé de discrétisation spatiale d'une image consistant à associer à chaque zone rectangulaire  $R(x, y)$  d'une image continue une unique valeur  $I(x, y)$ . On parle de sous-échantillonnage lorsque l'image est déjà discrétisée et qu'on diminue le nombre d'échantillons, Une image numérique est une image échantillonnée et quantifiée, La quantification désigne la limitation du nombre de valeurs différentes que peut prendre  $I(x, y)$ .



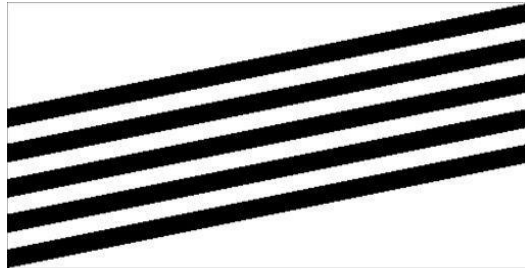
**Fig.VI.11.** image échantillonnée et quantifiée

L'échantillonnage est une étape fondamentale qui doit tenir compte du contenu informationnel pertinent de l'image à analyser, Sur l'exemple ci-dessous, en 1D, le signal échantillonné, ressemble à une sinusoïde de fréquence 8 fois plus faible :

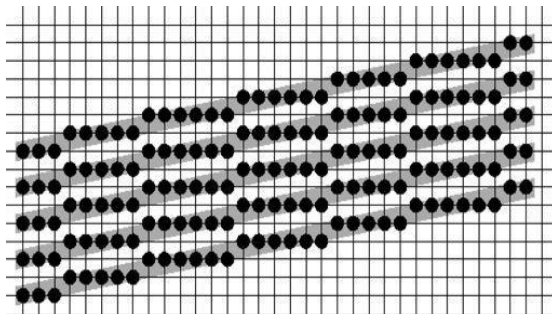


**Fig.VI.12.** le signal échantillonné

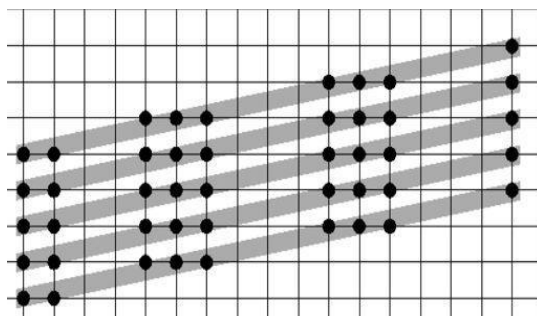
Ce phénomène appelé aliasing est encore pire en 2D, car il affecte la fréquence et la direction des structures périodiques. Imaginons par exemple qu'on souhaite échantillonner l'image cor-respondant aux bandes noires ci-dessous :



Avec un échantillonnage adapté, l'image numérique fait apparaître des structures conformes à l'information présente dans l'image :



Mais en considérant seulement 1 échantillon sur 2, une structure différente apparaît, dont l'analyse (ici des bandes verticales, plus épaisses) ne sera pas conforme à la réalité de l'objet



### VI.2.1.2. quantification

La quantification peut également faire apparaître des distortions dans les images. Comme pour l'échantillonnage, il existe des règles pour déterminer la bonne quantification (le bon nombre de bits) pour coder les images numériques, L'une dépend du capteur, et de sa capacité effective à observer des signaux de valeurs différentes : le rapport signal sur bruit, Le rapport signal sur bruit est défini à partir du rapport entre l'amplitude des

niveaux de gris mesurables par le capteur  $n_{\max}$   $n_{\min}$  et le niveau du bruit, en gros l'écart-type  $\sigma_n$  de la perturbation aléatoire qui affecte les niveaux de gris, En prenant le logarithme, on a le nombre de bits utile au capteur pour coder les images, Outre les capacités du capteur, le nombre de bits réellement nécessaires pour coder une image varie d'une image à l'autre, en fonction de leur contenu informationnel. Ce nombre dépend de l'entropie, définie à partir de la distribution des niveaux de gris de l'image (statistique).

$$E = - \sum_{i \leq N} P_i \log_2(P_i)$$

ou  $N$  est le nombre de niveaux de gris présents,  $p_i$  est la proportion ( $0 < p_i < 1$ ) de points de l'image ayant pour niveau de gris  $i$  Cette grandeur représente le nombre moyen de bits par pixel nécessaires pour coder toute l'information présente, Elle est utilisée dans les techniques de compression sans perte pour adapter le volume de donnée des images à leur contenu informationnel.



Fig.VI.13. quantification

## VI.2.2. Quelques techniques de traitement d'image

Après avoir expliqué, c'est quoi une image numérique et la faire de la définirai comme étant une fonction mathématique, nous pourrions cependant, effectuer plusieurs opérations, pour soit extraire l'information, ou bien changer l'information existante, en partant par une image initiale à une image de résultat. Le domaine de traitement d'image est très vaste, nous allons expliquer quelques techniques de base.

### VI.2.2.1. Histogramme

Un histogramme est un graphique statistique permettant de représenter la distribution des intensités des pixels d'une image, c'est-à-dire le nombre de pixels pour chaque intensité lumineuse. Par convention un histogramme représente le niveau d'intensité en abscisse en allant du plus foncé (à gauche) au plus clair (à droite). Ainsi, l'histogramme d'une image en 256 niveaux de gris sera représenté par un graphique possédant 256 valeurs en abscisses, et le nombre de pixels de l'image en ordonnées.

Selon une définition simple L'histogramme d'une image est l'histogramme de la série de données correspondant aux niveaux de gris des pixels. C'est une fonction définie par :

$$\forall p \in \{0, \dots, 255\}$$

$h(p)$  \_ Nombre des pixels ayant p pour niveau de gris .

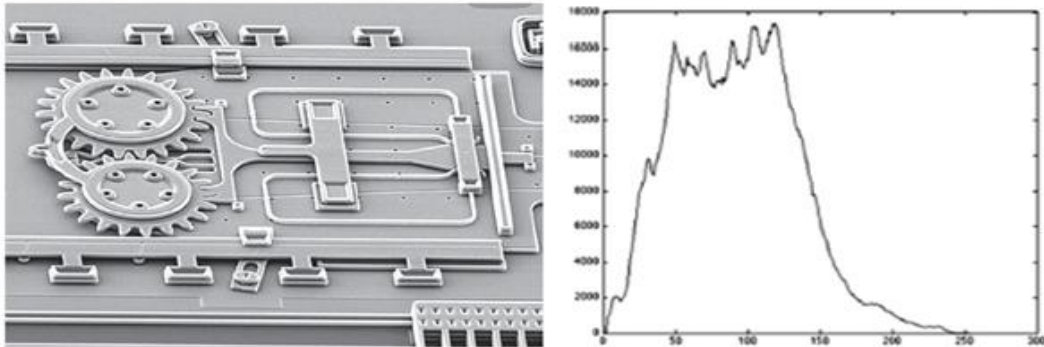


Fig.VI.14. Histogramme d'une image d'un MESM

L'histogramme donne une indication de la dynamique de l'image (répartition des niveaux de gris) mais n'est, en aucun cas, une caractéristique de l'image.

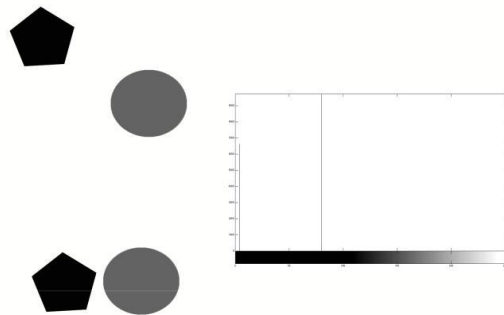


Fig.VI.15. Deux images différentes peuvent avoir le même histogramme

La figure suivante présente l'histogramme d'image des nano fibres :

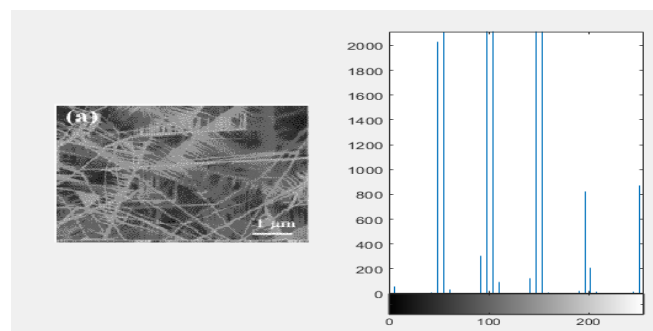
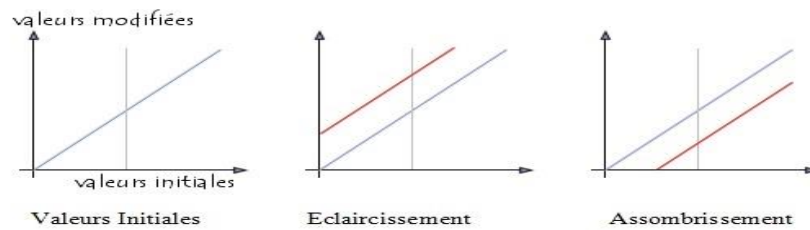


Fig.VI.16. a gauche c'est l'image des nano fibres avec leur histogramme à droite

### (1) Modification de l'histogramme

L'histogramme est un outil très utile pour étudier la répartition des composantes d'une image mais il permet également de corriger le contraste et l'échelle des couleurs pour des images surexposées ou sous-exposées, En outre sa modification n'altère pas les informations contenues dans l'image mais les rend plus ou moins visibles. La modification d'un histogramme est généralement représentée sur une courbe (appelée courbe tonale) indiquant la modification globale des composantes de l'image avec en abscisse les valeurs initiales et en ordonnées les valeurs après modification, La courbe tonale correspond à une fonction de transfert définie par une table de transcodage appelé look up table, notée LUT, Ainsi la diagonale indique la courbe telle que les valeurs initiales sont égales aux valeurs finales, c'est-à-dire lorsque aucune modification n'a eu lieu. Les valeurs à gauche de la valeur moyenne sur l'axe des abscisses représentent les pixels "clairs" tandis que ceux à droite représentent les pixels foncés.



Ainsi, si la courbe de modification de l'histogramme est située en dessous de la diagonale, les pixels auront des valeurs plus faibles et seront donc éclaircis .

### VI.2.2.2. Egalisation de l'histogramme

L'égalisation d'histogramme a pour but d'harmoniser la répartition des niveaux de luminosité de l'image, de telle manière à tendre vers un même nombre de pixel pour chacun des niveaux de l'histogramme. Cette opération vise à augmenter les nuances dans l'image.

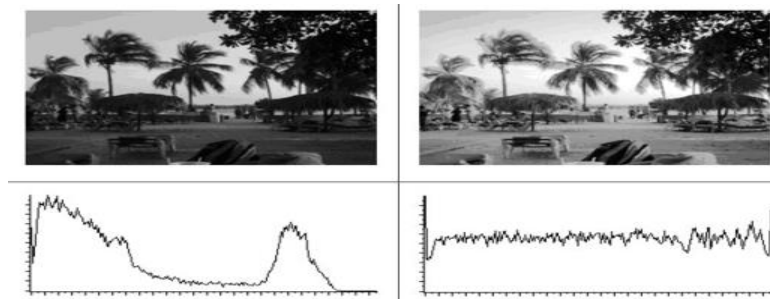


Fig.VI.17. Egalisation de l'histogramme

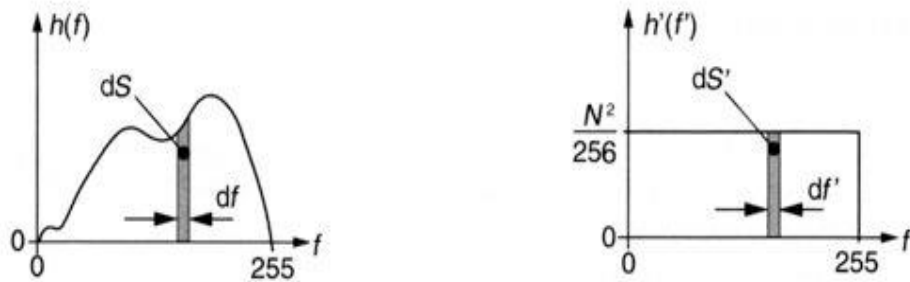


Fig.VI.18. Fonction idéale d'égalisation d'un histogramme

L'exemple suivant montre l'application de l'opération d'égalisation d'histogramme sur un MEMS (Micro Electro Mechanical System ).

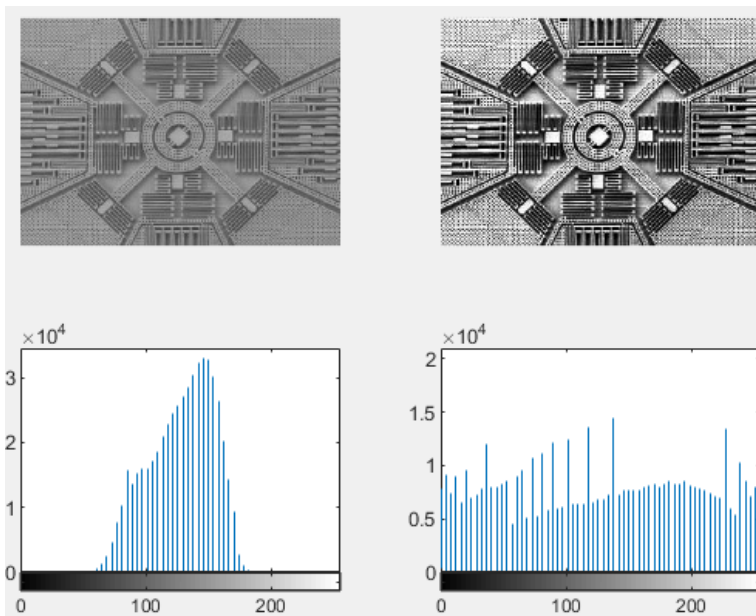


Fig.VI.19. Egalisation et modification de l'histogramme d'un système micro électro-mécanique .

### VI.2.2.3. Seuillage

L'opération dite de "seuillage simple" consiste à mettre à zéro tous les pixels ayant un niveau de gris inférieur à une certaine valeur (appelée seuil, en anglais treshold) et à la valeur maximale les pixels ayant une valeur supérieure. Ainsi le résultat du seuillage est une image binaire contenant des pixels noirs et blancs, c'est la raison pour laquelle le terme de binarisation est parfois employé. Le seuillage permet de mettre en évidence des formes ou des objets dans une image. Toutefois la difficulté réside dans le choix du seuil à adopter.

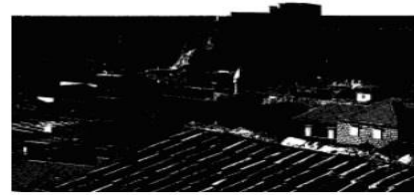


Fig.VI.20. Seuillage

#### VI.2.2.4. Le filtrage

Le principe du filtrage est de modifier la valeur des pixels d'une image, généralement dans le but d'améliorer son aspect. En pratique, il s'agit de créer une nouvelle image en se servant des valeurs des pixels de l'image d'origine, modification des valeurs de l'image par application d'un opérateur. Dans le filtrage global, chaque pixel de la nouvelle image est calculé en prenant en compte la totalité des pixels de l'image de départ. Dans cette catégorie on trouve, par exemple, les opérations sur les histogrammes ou les opérations qui nécessitent de passer dans l'espace de Fourier. Dans le filtrage local chaque pixel de la nouvelle image est calculé en prenant en compte seulement un voisinage du pixel correspondant dans l'image d'origine. Il est d'usage de choisir un voisinage carré et symétrique autour du pixel considéré. Ces voisinages sont donc assimilables à des tableaux à deux dimensions (matrices) de taille impaire.

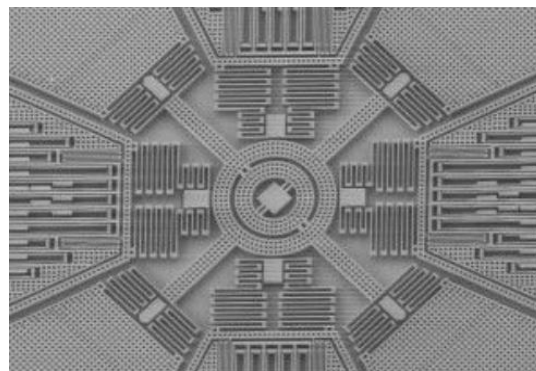



Fig.VI.21. Vue au microscope d'un capteur gyroscopique Filtrage en Traitement d'image

 **Objective du filtrage :**

- Réduire le bruit.
- Rehausser des contours.
- Calculer certaines caractéristiques de l'image (gradient, laplacien).

**VI.2.2.4.1. Types de Filtrage**

Le filtre local est dit linéaire si la valeur du nouveau pixel est une combinaison linéaire des valeurs des pixels du voisinage.

$$\text{Nouvelle Valeur } x, y = \sum_{i,j} A_{i,j} * P_{x+i,y+j}$$

avec  $i,j$  variant entre  $-h$  et  $+h$ , la demi taille du voisinage (pour  $3 \times 3$   $h=1$ , pour  $5 \times 5$   $h=2$ , ...) et  $A_{i,j}$  = valeur, entière ou réelle, spécifique au filtre linéaire.

Si le filtre ne peut pas être exprimé par une combinaison linéaire, il est appelé non-linéaire. Les filtres non-linéaires sont plus complexes à mettre en œuvre que les filtres linéaires. Cependant les résultats obtenus avec les filtres non-linéaires sont très souvent de meilleure qualité que ceux obtenus par les filtres linéaires.

**Il existe donc deux types de Filtrage :**

**(1) Filtrage linéaire**

Un filtre est un système linéaire continu et invariant. En d'autres termes, on se donne deux espaces normés  $X$  et  $Y$  ainsi qu'un opérateur linéaire continu, invariant par translation .

$$A : X \rightarrow Y$$

Dans le modèle linéaire, la structure mathématique sous-jacente est l'Espace Vectoriel. Les opérateurs fondamentaux sont ceux qui préservent la structure d'espace vectoriel, c'est-à-dire les applications linéaires :

$$F(I+J) = f(I) + f(J)$$

$$F(\lambda I) = \lambda f(I)$$

Un filtre linéaire possède les propriétés suivantes:

- ✓ invariance à la position: le résultat du filtrage ne dépend que du voisinage d'un pixel et non de la position absolue du pixel dans l'image.
- ✓ respecte les principes de mise à l'échelle et de superposition.( le résultat du filtrage de la somme de deux images est le même que celui de la somme des deux images filtrées)

dans lequel est un système formé des espaces d'entrée et de sortie et d'un opérateur linéaire continu , Supposons qu'on puisse définir la transformée de Fourier des signaux d'entrée  $f$  et de sortie  $g$  (par exemple si ces fonctions sont dans  $L^1(\mathbb{R})$  ou dans  $L^2(\mathbb{R})$  et que le signal de sortie le filtrage de  $f$  par un filtre linéaire est tel que :

$$\hat{G} = H \hat{A}$$

ou'  $\hat{G}$  désigne la transformée de Fourier de  $g$ . La fonction  $H$  est appelée fonction de transfert du filtre. Si la fonction de transfert  $H$  est dans  $L^2(\mathbb{R}) \cap L^\infty(\mathbb{R})$ , elle admet une transformée de Fourier inverse  $h = F^{-1}H$ , bornée et a' d'écroissance rapide, continue (sauf peut-être a' l'origine) et la relation

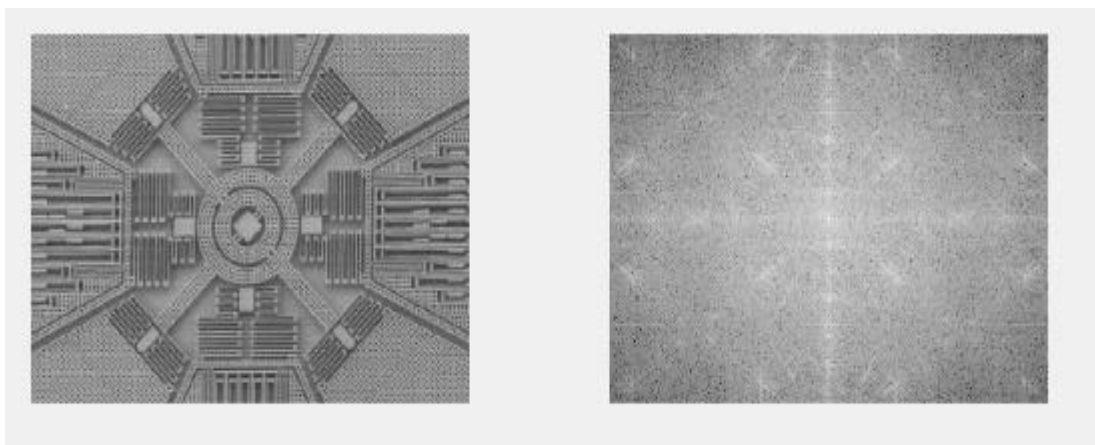
$$\hat{G} = \hat{H} \hat{A}$$

Entraîne

$$G = H * A$$

La réponse a' l'entrée  $A$  est donc un produit de convolution de l'entrée avec une fonction fixe  $h$  que l'on appelle réponse impulsionnelle.

La transformation de fourrier d'une image nous permet la visualisation des différentes fréquences composés notre image.



**Fig.VI.22.** transformation de Fourier de l'image de gyroscope d'un smartphone

✚ On rencontre 4 grandes catégories de filtres.

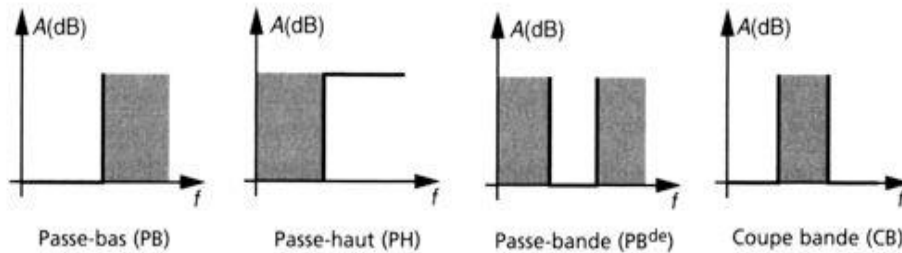


Fig. VI.23. Catégories des filtres

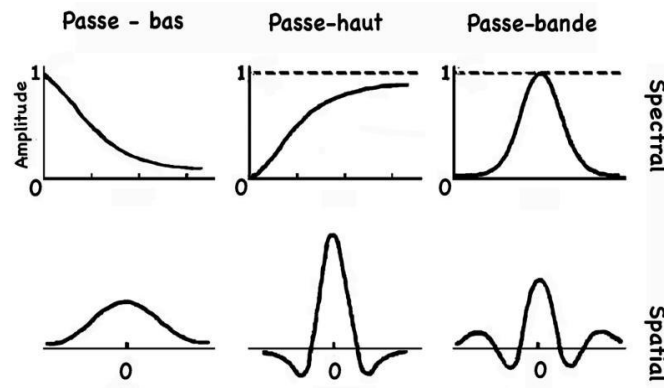


Fig. VI.24. Différents types de filtrage (on n'a pas représentée le filtre coupe-bande)

- **Le filtre passe-bas** diminue le bruit mais atténue les détails de l'image (ou plus prononcé).
- **Le filtre passe-haut** accentue les contours et les détails de l'image mais amplifie le bruit.
- **Le filtre passe-bande** élimine certaines fréquences indésirables présentes dans l'image.

➤ **La convolution : FILTRAGE 2D**

C'est l'opérateur de base du traitement linéaire des images. Apparue très tôt dans les premiers systèmes d'analyse d'images sous forme empirique et justifiée par des considérations d'implantation, ce n'est que plus tard qu'on a fourni des justifications physiques et fait le lien théorique avec les filtres et le traitement du signal.

Soit I une image numérique

Soit h une fonction de  $[x_1, x_2] \times [y_1, y_2]$  à valeurs réelles, La convolution de I par h est définie par :

$$(I * H)[x, y] = \sum_{i=x_1}^{x_2} \sum_{j=y_1}^{y_2} h = [i, j] \cdot I[x-i, y-j]$$

— **Propriétés de la convolution :**

- commutativité  $\rightarrow \mathbf{h} \times \mathbf{g} = \mathbf{g} \times \mathbf{h}$
- associativité  $\rightarrow (\mathbf{h} \times \mathbf{g}) \times \mathbf{k} = \mathbf{h} \times (\mathbf{g} \times \mathbf{k}) = \mathbf{h} \times \mathbf{g} \times \mathbf{k}$
- distributivité  $\rightarrow \mathbf{h} \times (\mathbf{g} + \mathbf{k}) = (\mathbf{h} \times \mathbf{g}) + (\mathbf{h} \times \mathbf{k})$

La fonction  $h$  est dite noyau de convolution.

Les nouvelles valeurs du pixel sont calculées par produit scalaire entre le noyau de convolution et le voisinage correspondant du pixel.

Pour calculer une convolution, on remplace la valeur de chaque pixel par la valeur du produit scalaire entre les valeurs du noyau de convolution et les valeurs du voisinage du pixel considéré (par rapport à l'origine (0,0) du noyau de convolution).

➤ **Filtrage spatial**

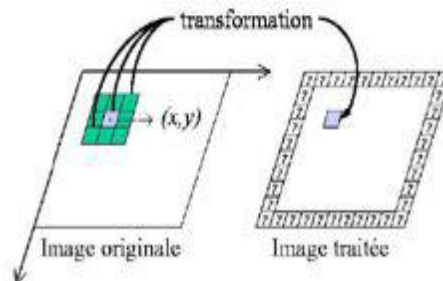
Le filtrage spatial est essentiellement une opération de convolution (2D). Si  $f$  est l'image à filtrer (ou à rehausser) et  $g$  le filtre spatial (ou PSF ou masque) on a :

$$f(x, y) * g(x, y) = F^{-1}\{F(f(x, y)) \cdot F(g(x, y))\}$$

Une image numérique étant essentiellement discrète (pixels et niveaux de gris) nous allons présenter les filtres dans le cas discret. Dans tout ce qui suit  $x$  et  $y$  sont des entiers (coordonnées des pixels) et  $f$  est à valeurs entières (dans  $\{0, \dots, 255\}$ ).

➤ **La convolution / Médian**

On ne fait pas en général une convolution globale mais une transformation basée sur le voisinage d'un point  $(x, y)$  :



**Fig.VI.25.** transformation

➤ **Le modèle fréquentiel**

à décrire l'image en termes de structures périodiques, en la décomposant dans une base de fonctions périodiques simples, comme des sinusoïdes :

➤ **La transformée de Fourier**

Outil fondamental d'analyse en traitement du signal, le pendant bidimensionnel de la TF et sa version discrète peut être appliqué avec profit aux images numériques. Si son utilisation en tant qu'outil analytique et algorithmique s'est estompée en traitement d'images au profit d'approches mieux adaptées à la localisation spatiale des fréquences (ondelettes), elle reste un outil théorique et pédagogique important : la formalisation du phénomène de l'aliasing et des contraintes d'échantillonnage en est un exemple (voir cours Espace d'échelles).

La transformée de Fourier permet la décomposition d'un signal  $f$  en combinaison linéaire de sinusoïdes complexes, dont les coefficients  $F[u,v]$  dit coefficients de Fourier, fournissent des informations sur les fréquences  $(u,v)$  et permettent des manipulations dans le domaine fréquentiel.

– **Propriétés de la transformée de Fourier**



**Fig.VI.26.** Les étapes de La transformée de Fourier

### (2) Filtrage non linéaire

#### ✚ Objectif :

- effet passe-bas
- avec une meilleure préservation des contours

#### ✚ types :

- Filtre médian
- Filtre de Nagao

#### ➤ Filtre médian

- **Principe** : on affecte à chaque pixel la valeur médiane des intensités dans la fenêtre centrée sur lui .
- **Avantage** : préservation de la dynamique des contours (pas de flou).
- **Inconvénient** :
  - arrondi tout de même les angles
  - coûteux, il faut mettre en place un tri

#### ➤ Filtre non linéaire : nagao

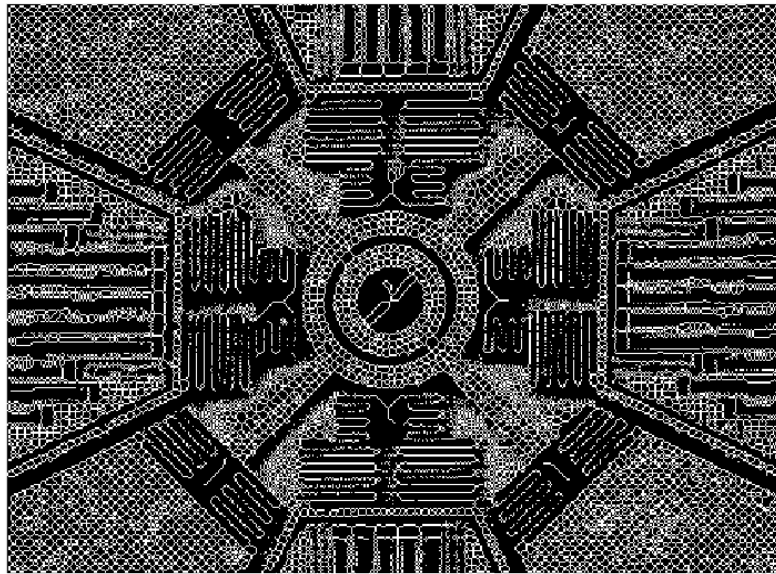
- pour chaque pixel, on considère 9 sous-fenêtres  $F_k$ ,  $k=1, \dots, 9$
- pour chaque fenêtre, on calcule la moyenne  $m_k$  et la variance  $v_k$
- on affecte au pixel la moyenne de la fenêtre qui a la variance la plus faible
- bonne préservation des contours et des angles
- au prix d'une complexité et d'un coût accrus

### VI.3. Reconnaissance des formes

#### VI.3.1. introduction

La Reconnaissance des formes (RDF) ou Reconnaissance artificielle des formes (par opposition à la reconnaissance naturelle de formes qui est pratiquée par l'Homme) traite de l'apprentissage du processus de reconnaissance et de la prise de décision automatique. Reconnaître une forme c'est donner à une machine la capacité de donner un nom à cette forme à partir des informations descriptives qui lui ont été fournies par l'environnement. C'est dire que ces méthodes et techniques ont vocation à intervenir dans la quasi-totalité des domaines d'intérêt de l'être humain. Les techniques d'automatisation de la production industrielle, les méthodes de contrôle de la qualité, les méthodes de reconnaissance d'objets dans les images numériques, ou la reconnaissance de sons (parole), ou la reconnaissance de gestes, la conduite de robots. Tous ces champs relèvent relativement des méthodes d'apprentissage et de RDF.

La reconnaissance des formes (RdF) est issue de différentes disciplines qui sont les mathématiques (probabilités et statistiques), les sciences de l'ingénieur, l'informatique et l'intelligence artificielle. C'est à partir des années 60 que la reconnaissance de formes est devenue une discipline spécifique. L'extraordinaire développement des ordinateurs ces dernières années a donné un élan à la RdF en permettant des applications temps réel, en particulier dans le domaine des applications visuelles et auditives. Les procédés d'acquisition tels que caméra, scanner sont très accessibles, ainsi que des ordinateurs à la fois puissants et bon marché, Ils permettent le traitement de nombreuses données en un temps raisonnable comme cela est souvent nécessaire en RdF.



**Fig.VI.27.** reconnaissance des lignes par algorithme de RdF

### **VI.3.2. Definition**

On désigne par reconnaissance de formes RdF (ou parfois reconnaissance de motifs) un ensemble de techniques et méthodes visant à identifier des motifs à partir de données brutes afin de prendre une décision dépendant de la catégorie attribuée à ce motif.

La RdF est considérée comme une branche de l'intelligence artificielle qui fait largement appel aux techniques d'apprentissage automatique et aux statistiques, Les formes ou motifs à reconnaître peuvent être de nature très variée. Il peut s'agir de contenu visuel (code barre, visage, empreinte digitale...) ou sonore (reconnaissance de parole), d'images médicales (rayonX, EEG, IRM...) ou multi spectrales (images satellitaires) et bien d'autres.

La RdF est défini par divers auteurs comme :

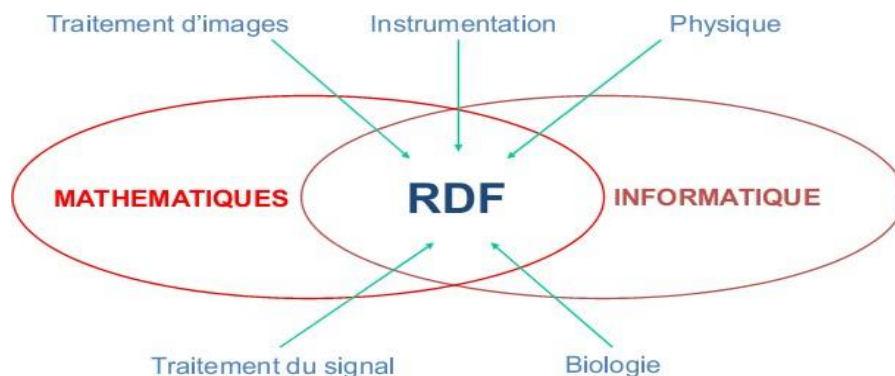
- Pattern recognition, a field concerned with machine recognition of meaningful regularities in noisy and complex environments" (Duda et Hart 1973).
- Pattern recognition is a search for structure in data." (Bezdek 1987).

Ces deux définitions laissent apparaître à la fois l'objectif et la difficulté de la tâche à accomplir, La RdF ainsi définie, est l'apprentissage ou la découverte de structures appelées classes dans un ensemble de données éventuellement perturbées, L'objectif de cet apprentissage est généralement, décisionnel suivant qu'il s'agit de déclencher un événement, une action en fonction de l'appartenance de tel ou tel objet à une classe.

### VI.3.3. Exemple d' application de la RDF

#### VI.3.3.1. La vision artificielle

La vision par ordinateur est l'un des principaux champs d'application de la RdF. Actuellement, elle a trouvé une place dominante dans un domaine tel que l'imagerie biomédicale. Par exemple, dans la détection des cellules cancéreuses du cerveau, les images sont acquises en Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), Au cours de l'étape de segmentation, on va rechercher dans les images différentes régions du cerveau : matière blanche, matière grise, liquide cérébro-spinal, etc Ensuite on cherche à détecter d'éventuelles tumeurs bénignes ou malignes à partir de caractéristiques extraites de régions de l'image. Bien évidemment, il ne s'agit là que de fournir une aide au diagnostic validée ultérieurement par le praticien.



**Fig. VI.28.** La RdF un domaine pluridisciplinaire

La figure suivante montre l'utilisation de la vision artificielle pour commande et contrôler une micro grippe en vue d'assurer des déplacements et des gestes micrométriques.

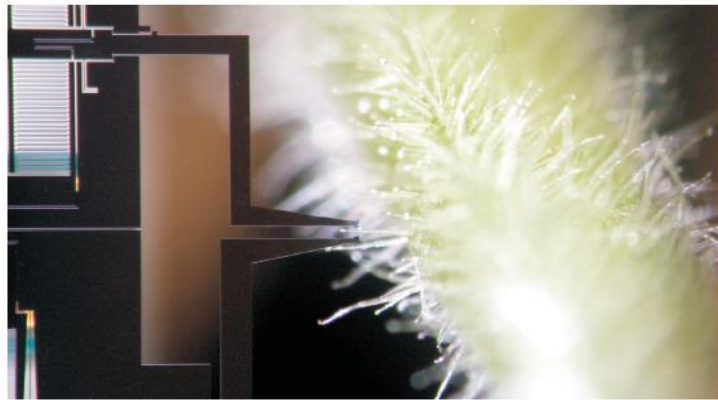


Fig.VI.29. Photographie du testeur de micro tension à deux axes aligné avec un trichome de la plante pétunia

#### VI.3.4. Le schema de la reconnaissance des formes

Le principe de la RdF est de classer les nouvelles formes en utilisant un classifieur qui génère une fonction d'appartenance pour chaque classe. Ainsi la classification d'un nouveau point peut se faire en fonction de la valeur d'appartenance qu'il obtient par rapport à chaque classe. La RdF est réalisée en deux phases : l'apprentissage à partir des données connues et la classification des nouvelles données. En amont de ces deux phases, une étape de prétraitement est utilisée pour trouver l'ensemble minimal de paramètres informatifs nécessaire à l'établissement de l'espace de représentation. L'ensemble des étapes majeures d'une approche de reconnaissance des formes se décompose comme l'illustre la figure suivante.

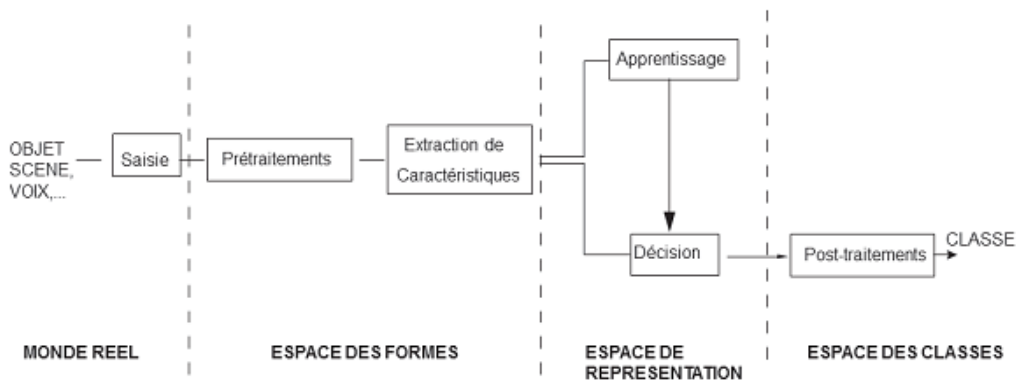


Fig.VI.30. Schéma général d'un système de reconnaissance des formes.

On s'appuie sur le schéma classique d'un processus de reconnaissance de formes pour décrire les principaux traitements à effectuer et leurs objectifs.

Buts des étapes du schéma :

- **Numérisation** : obtenir une représentation des données à traiter qui soit manipulable en machine.
- **Prétraitement** : élimination des bruits, normalisation, re-échantillonnage, amélioration des contrastes, etc.
- **Calcul des représentations** : obtenir une représentation des données compatible avec les outils d'apprentissage et de décision utilisés.
- **Apprentissage** : à partir d'un ensemble d'exemplaires, construire une représentation des classes.
- **Analyse** : assigner une forme inconnue à une classe.
- **Post-traitement** : valider les décisions de l'analyse sur la base de connaissances (du domaine).

Dans la pratique, un système de reconnaissance des formes s'éloigne souvent de ce schéma. Des traitements en amont sont souvent nécessaires pour isoler la forme à reconnaître de son contexte, ce qui en soit est un problème de reconnaissance (segmentation forme/fond, délimitation d'une forme dans un ensemble). Des traitements ultérieurs sont aussi utiles pour valider les décisions et éventuellement les remettre en cause.

Le caractère séquentiel du processus de reconnaissance, tel qu'il est présenté dans ce schéma, n'est pas toujours la meilleure option. Ainsi, une erreur dans la segmentation de la forme à reconnaître augmente forcément le risque d'une mauvaise reconnaissance. Il est possible d'introduire une boucle dans le processus, remettant en cause la segmentation après analyse des résultats de la reconnaissance. Il est aussi possible de fusionner segmentation et reconnaissance. C'est le cas en écriture où la segmentation en lettres d'un mot cursif peut être couplée à la reconnaissance des suites de lettres formant un mot lexicalement valide (même principe pour la segmentation d'un signal de parole en phonèmes). Ce schéma illustre en fait l'immersion du noyau dur de la reconnaissance de formes (les méthodes d'apprentissage et d'assignation

d'une donnée à une classe) dans un système qui, partant d'un signal brut, va permettre de résoudre un problème de reconnaissance.

### VI.3.5. les Methodes de la RDF

Les méthodes de RdF peuvent généralement être divisées en deux catégories : les méthodes paramétriques et les non paramétriques.

Les méthodes paramétriques considèrent l'ensemble d'apprentissage comme des données indépendantes, toutes distribuées selon la même loi de probabilité, comme le fait le classifieur Bayésien (Dubuisson, 1990) (Yager, 2006). Cette hypothèse n'est bien souvent pas valide dans le cas d'applications réelles.

Les méthodes non paramétriques génèrent les fonctions d'appartenance des classifieurs (Medasani, 1998) soit :

- En estimant la fonction de densité de probabilité conditionnelle pour chaque classe, comme le fait la méthode des fenêtres de Parzen (Parzen, 1962) (Dubuisson, 2001) et la méthode des K-Plus Proches Voisins (Cover, 1967) (Denoeux, 2001) .
- En construisant par apprentissage les régions de décision comme le font les réseaux de neurones (Ripley, 1996) ou les Séparateurs à Vaste Marge (Vapnik, 1995) .

Les méthodes de la RdF sont souvent regroupées en grandes classes identifiées par : statistique, syntaxique, structurelle, hybride (une combinaison des autres).

#### VI.3.5.1. méthodes statistiques

Les méthodes statistiques sont fondées sur l'étude statistique des mesures que l'on a effectuées sur les objets à reconnaître. L'étude de leur répartition dans un espace métrique et la caractérisation statistique des classes permet de prendre une décision de reconnaissance du type « plus forte probabilité d'appartenance à une classe ». Ces méthodes s'appuient en général sur des hypothèses concernant la description statistique des familles d'objets analogues dans l'espace de représentation.

#### VI.3.5.2. méthodes syntaxique

Si l'approche statistique permet de se placer dans un cadre mathématique solide et général, elle présente néanmoins le défaut d'oublier la nature des mesures qui sont faites sur les formes et de les traiter de façon abstraite.

Dans le cas d'une description structurelle, il faudra utiliser des formalismes plus complexes, Les formes sont décomposées en primitives simples (c'est-à-dire en composantes élémentaires –non décomposables- d' une forme, Elles sont mises en évidence à la phase d'extraction, A titre d'exemple : un segment de droite, une boucle... dans une figure géométrique) qui peuvent être des graphèmes ou même les pixels de l'image. Elles sont ensuite représentées par un objet complexe, composé de primitives, comme une chaîne ou un graphe,Le processus de reconnaissance grammatical,stochastique ou graphique est propre à la représentation utilisée. La représentation structurée peut sembler plus naturelle en RdF,Le traitement structuré des formes peut se répartir en deux grandes familles :

- ⊕ **Syntaxique** : car elle tente de s'appuyer sur les travaux de la linguistique formelle. es formes sont alors codées par des « mots » utilisant un alphabet dont chaque terme représente un élément de la forme à décrire. Définir une classe de formes revient à établir des règles syntaxiques caractérisant les mots acceptables. Le choix de l'alphabet et des règles syntaxiques est souvent fort délicat, mais des méthodes pour déterminer ces règles ont été proposées.
- ⊕ **Structurelle** : tout en organisant la représentation des formes à l'aide de primitives de description et de relations entre ces primitives, elle ne s'appuie pas sur les grammaires formelles mais sur des techniques combinatoires (isomorphismes de graphes, arbres d'interprétation, ...) ou numériques (métrique sur les mots, relaxation,...).

### VI.3.5.3. combinaison des classificateurs

Pour résoudre les problèmes de reconnaissance, on doit parfois combiner plusieurs classificateurs. On le fait pour plusieurs raisons [Jain et al, 00] :

- Le concepteur du système peut avoir accès à plusieurs classificateurs, développés dans des contextes différents pour des représentations/descriptions totalement différentes d'un même problème.
- On peut avoir plusieurs ensembles d'entraînement. Ces ensembles ont été collectés/extraits à différents moments dans différents environnements, et peuvent être représentés par des paramètres différents.

- Des classificateurs différents, entraînés sur les mêmes données, peuvent présenter de grandes différences dans la qualité de la classification. Chaque classificateur peut avoir son propre sous espace de paramètres où il est le plus efficace.
- Certains classificateurs comme les réseaux de neurones montrent des comportements différents selon la phase d'initialisation, ceci est dû à la part aléatoire du processus d'initialisation. Au lieu de ne garder qu'un seul classificateur, on peut combiner les réseaux de neurones obtenus pour bénéficier des résultats de tous les entraînements.

---

# Conclusion générale

---

Dans le domaine micromécanique, le dimensionnement des micro-pièces et micro-motif est un requis qualité très important pour les ingénieurs et les constructeurs des MEMS.

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer des positions en micro monde. Suivant le type de performances à rechercher en priorité, il est possible de faire appel aux capteurs résistif, piézoélectrique, capacitif, inductif, optique, etc.

L'une des capteurs les plus demandé sont les capteurs sans contact, tel que les capteurs dite vision-image. Ce capteur est constitué de deux parties, La partie de la vision qui représente le système d'acquisition d'image, et la partie de traitement d'image qui représente le système de dimensionnement.

Nous avons fait le choix dans cette thèse d'explorer la voie de la mesure par vision, par l'usage d'une caméra et un microscope optique. L'objectif est d'acquérir et de comparer plusieurs images d'un objet précis pendant une durée de temps limitée. La comparaison entre les images nous permet d'extraire des informations importantes sur le mouvement et les dimensions de notre objet.

Un autre problème traité dans notre thèse, c'est la qualité des images obtenus à partir de système d'acquisition,La qualité d'image peut affecter par plusieurs facteurs environnementaux tel que la luminosité et la température,Le facteur humain, le matérielles utilisé et d'autres facteurs sont considérés comme des paramètres d'influence métrologique sur notre système de mesure.

Par conséquent, nous consacrons une grande partie de notre travail à une étude métrologique. L'évaluation de l'incertitude de mesure et l'étalonnage de système de vision sont les points essentiels étudier dans cette partie.

Le traitement d'image est bien détaillé dans cette thèse, notamment, le filtrage la segmentation et la reconnaissance des formes. Ces opérations de traitements d'image s'effectués au niveau de logiciel de traitement associé avec la caméra, ou bien au niveau des algorithmes de traitement externes.

L'analyse de Fourier, est un autre sujet traité dans notre thèse. Suite à l'importance de cette méthode dans le domaine de traitements d'un signal en deux dimension.

En fin, on peut considérer notre travail comme une initiation pour comprendre le domaine de l'intelligence artificiel basé sur le traitement d'image, et surtout dans l'étude et le

dimensionnement des micros system, La perspective de notre travail, c'est le développement et l'amélioration des systèmes de dimensionnement par des capteurs sans contact (capteur vision-image).

## Liste des abréviations

BIPM : Le bureau international des poids et mesures

VIM : Vocabulaire International de Métrologie

GUM : Guide to the expression of Uncertainty in Measurement

RDF : La reconnaissance des forme

MEMS : (Micro Electro Mechanical System).

TF : transformation de Fourier

ITF : transformation de Fourier Inverse

IRM : Imagerie par résonance magnétique

RVB : Rouge vert bleu

---

## Référence Bibliographique

---

- [1] Métallographie et traitements thermiques des métaux, I.Lakhtine, édition Mir Moscou, 1978.
- [2] Métallurgie, élaboration des métaux, C.Chaussin et G.Hilly, édition Dunod Paris, 1972.
- [3] Maïtine Bergounioux, « Quelques méthodes mathématiques pour le traitement d'image », Submitted on 4 Jan 2009 .
- [4] Patrick Hébert & Denis Laurendeau , « Traitement des images » , (Dernière révision : mai 2017).
- [5] Maïtine Bergounioux , « Quelques methodes de filtrage en Traitement d'Image », Submitted on 24 Feb 2011.
- [6] M. REGOURD, « Méthodes d'études de la structure interne des matériaux de construction », extrait d'un cours à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris-France.
- [7] J.H. WREDDEN, "The microscope, its theory and applications", Churchill-London, QH205.W74m.
- [8] J.D. CASARTELLI, "Microscopy for Students", McGraw-Hill, London QH205.C315, 1965.
- [9] Pascal NOSS, « Strasbourg Réaliser des mesures au microscope », – Lycée Int des Pontonniers.
- [10] Jeulin partageons , « l' expérience microscopie mesure » .
- [11] « Swift Microscope Camera Software Help Manual » ,Manuel d'aide du logiciel Swift Microscope Camera .
- [12] Mémoir Microscopies , « Techniques de caractérisation des matériaux ».
- [13] [https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Optical-Microscopy\(French\).aspx](https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Optical-Microscopy(French).aspx) .
- [14] <https://sites.google.com/site/ladivisoncellulairedesplantes/travaux-pratiques-physique-image-donnee-par-une-lentille-convergente/principe-du-fonctionnement-du-microscope-optique>.

- [15] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement\\_d%27images](https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_d%27images).
  
- [16] <http://wcours.gel.ulaval.ca/2017/a/GIF4100/default/5notes/A2017TraitementImagesPartie1PageWeb.pdf>.
  
- [17] <https://sites.google.com/site/androidtraitementimage/traitement-d-images>.
  
- [18] <https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782807300057-optique-physique>.
  
- [19] <http://www.afl-lichenologie.fr/micro/reglages07.htm>.
  
- [20] [https://perso.ensta-paris.fr/~manzaner/Cours/IAD/AM\\_Introduction.pdf](https://perso.ensta-paris.fr/~manzaner/Cours/IAD/AM_Introduction.pdf).