



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique
Laboratoire de Génie Énergétique et Matériaux – LGEM



LGEM
Laboratoire de Génie
Énergétique et Matériaux

Exposé :

Les méthodes de caractérisations des matériaux

Laboratoire de Génie Énergétique et Matériaux – LGEM

Formation doctorale (LMD) : Matériaux et Structures

Département de Génie Mécanique, Université de Biskra

Réalisé par : **A. Kistrane-Bouzidi** (doctorant)

Proposé par: **Pr. Mosbah ZIDANI** (Responsable de la matière)

Date de création du document : Jan 2017

Introduction:

Le choix des matériaux pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. A ce stade, la caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis les sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour cela, on recourt à un certain nombre d'essais normalisés. Ces derniers, permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés [1].

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation. Le propos de ce document est de présenter les techniques expérimentales les plus couramment utilisées, aussi bien dans les laboratoires universitaires qu'industriels, pour caractériser le comportement mécanique des matériaux. Les techniques abordées seront : les essais uniaxiaux (quasistatiques et dynamiques), les essais multiaxiaux, les mesures d'indentation, les essais de fatigue et les techniques gravitant autour du phénomène de rupture. En outre, les annexes apportent un complément sur les méthodes de mesure de la déformation et de la contrainte. Il s'agit ici de donner les grandes idées et les modes opératoires propres à chacune des techniques abordées sans entrer dans trop de détails [2].

I. Contraintes / déformations

L'effet des forces sur différents matériaux est expliqué par Robert HOOKE (1635-1703), de façon empirique à l'échelle macroscopique : un matériau à l'état solide ne résiste à une force appliquée qu'en se déformant sous l'action de cette force. Les matériaux sont élastiques. Il établit une règle, la loi de HOOKE, selon laquelle l'allongement est toujours proportionnel à la force appliquée.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Cette loi n'est rigoureusement vraie que pour les céramiques, le verre, la plupart des minéraux et les métaux les plus durs. Mais, dans quelle mesure le comportement d'une structure dépend de son matériau constitutif plutôt que de ses dimensions et de sa forme ? Nous avons besoin de standards objectifs de comparaison qui soient indépendants de la taille et de la forme du matériau. La considération des conditions qui règnent en chaque point d'un

matériau soumis à des forces mécaniques conduit aux notions de contrainte et de déformation. La définition claire et utilisable de ces deux notions est due à Augustin CAUCHY (1789-1857). Quand on soumet un corps à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent par réaction, à l'intérieur de ce corps. À ces contraintes sont associées des déformations. Pour s'affranchir de la dépendance des dimensions du matériau, les paramètres contrainte et déformation sont utilisés.

La contrainte (ou stress) détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés les uns des autres ou comprimés les uns sur les autres. Cette contrainte est, pour une traction simple, la force qui agit sur une unité de surface du matériau.

$$\sigma = F/S$$

Elle se mesure en Pascal (Pa).

Les trois principales contraintes sont la traction, la compression et le cisaillement qui sont définies plus loin.

La déformation indique dans quelles proportions les liaisons inter atomiques (à l'échelle microscopique) et la structure elle-même (l'objet, à l'échelle macroscopique) ont été déformées. La déformation, pour une traction simple, est le rapport de l'allongement à la longueur initiale [3].

$$\varepsilon = (L-L_0)/L_0$$

L'allongement est sans unité.

II. Caractérisation des propriétés mécaniques

Afin de caractériser le comportement mécanique d'un ou de plusieurs matériaux soumis à des forces extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations, on a recours à un certain nombre d'essais mécaniques. Ces essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contrainte simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque. De plus ils doivent être reproductibles. C'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais (AFNOR, ISO, CEN). Parmi ces essais mécaniques on distingue :

II.1 Essai de traction

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que la limite élastique, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture

et le coefficient de striction. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. [3-4]

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante. L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette.[3]

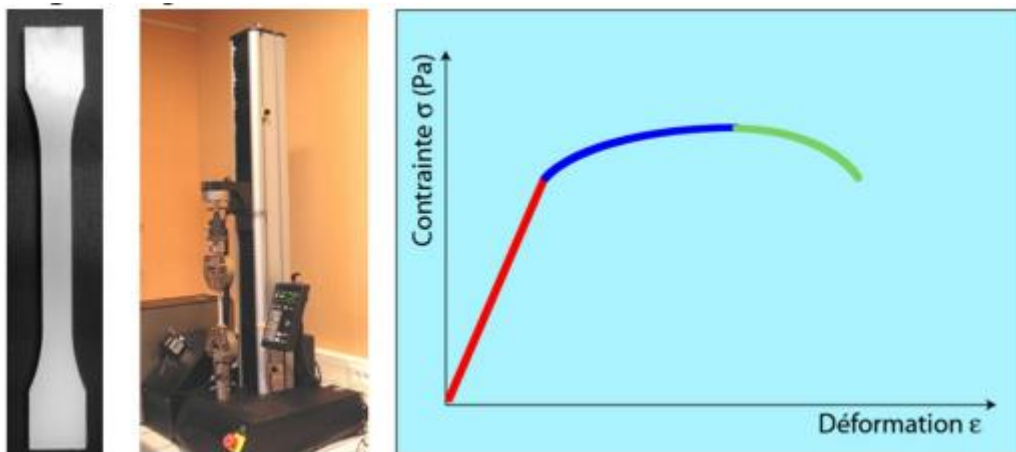


Figure.1 Eprouvette. Machine de traction.
Courbe contrainte-déformation

II.1.1 Courbe de traction

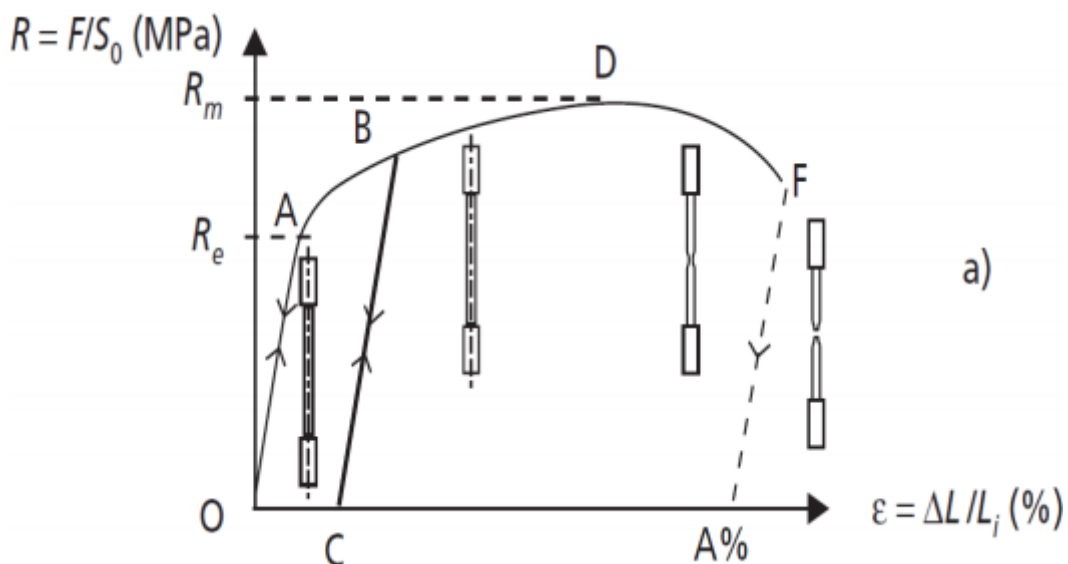


Figure.2 Courbes conventionnelles typiques de traction

OA : allongement élastique linéaire, réversible.

Au-delà de A : déformation plastique permanente + déformation élastique. La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent (OC). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).

$R_e = F_e/S_0$: limite apparente d'élasticité (MPa) :

$$R_e = \frac{F_m}{S_0}$$

$R_{p0,2}$: Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique; sa détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.

AD : allongement élastique + allongement plastique réparti. $R_m = F_m/S_0$: résistance à la traction (MPa).

DF : apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles. En F : la rupture de l'éprouvette.

$A\% = \Delta L_u/L_i$: allongement pour cent après rupture (%)

$$A\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

$E = R_e/\epsilon_e$: module de Young. En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extensométrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E.[1]

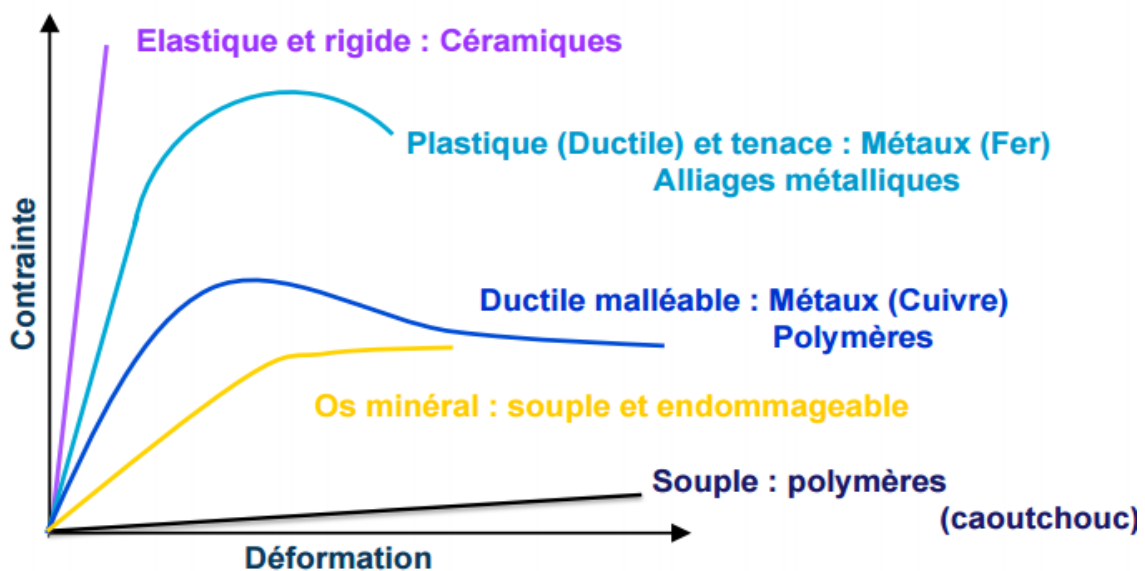


Figure.3 Courbes de tractions des matériaux

II.2 Essai de compression

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées. Si le matériau étudié est

ductile, la rupture ne peut être atteinte avec ce test. L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (comme les céramiques) qui sont difficiles à usiner pour un essai de traction.[3]

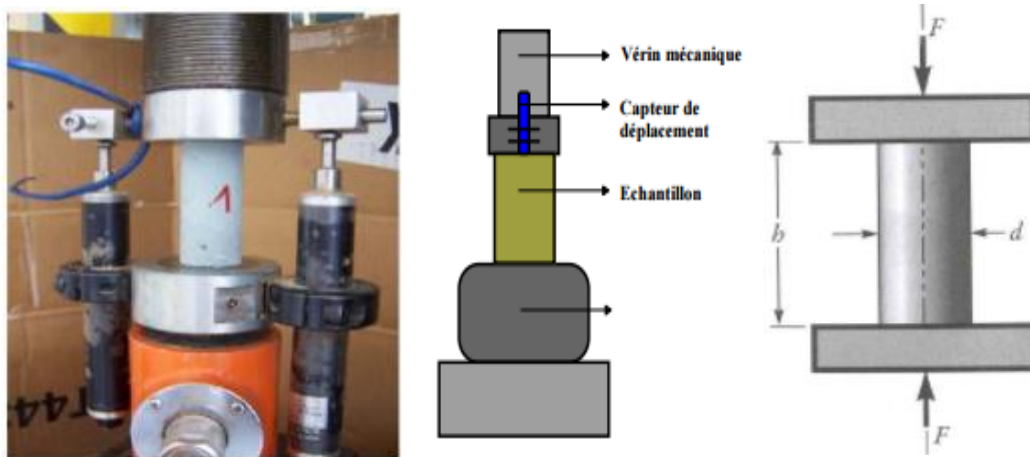


Figure.4 Presse de compression. Schéma et principe

L'échantillon doit présenter de préférence une élongation (rapport hauteur sur diamètre) de 2 à 2,5. La dimension usuelle dans le laboratoire est de 80 mm de hauteur par 40 mm de diamètre. Dans certains cas (manque de matériaux, qualité de la roche,...) les échantillons peuvent avoir des dimensions inférieures pour pouvoir réaliser les essais. Les échantillons sont préparés par forage au diamètre 40 mm (ou inférieur, préciser le cas de l'expertise en cours si différent), découpage et rectification pour l'obtention de surfaces strictement parallèles.



Figure.5 Echantillons (roches) de compression

Au cours de l'essai, un enregistreur permet de relever l'évolution de la contrainte axiale grâce à un capteur de force ou de pression, ainsi que celle des déformations soit par des capteurs de déplacement soit par des jauges de déformation. Cet enregistrement permet de déterminer différentes caractéristiques mécaniques selon le besoin : la résistance à la compression uni axiale R_c , la limite élastique R_e , le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν . [5]

Le Tableau 1 reprend un classement des roches en fonction de leur résistance à la compression uni axiale

Tableau.1 Qualification de la résistance d'une roche en fonction de la valeur de la résistance en

R_c (MPa)	Terme descriptif
$R_c > 200$	Très élevée
$60 < R_c < 200$	Elevée
$20 < R_c < 60$	Moyenne
$6 < R_c < 20$	Faible
$R_c < 6$	Très faible

II.3Essai de flexion

L'essai de flexion 3 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture. Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles.

L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles.Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.[3]

C'est l'essai le plus utilisé pour obtenir la valeur du facteur d'intensité de contrainte critique K_{Ic} qui est un paramètre caractéristique de la propagation des fissures dans les solides. Ce paramètre permet, en effet, de déterminer le niveau de contrainte nécessaire pour initier une fissure, ainsi que l'énergie nécessaire pour la faire propager (moyennant le calcul du taux de restitution d'énergie). [5]

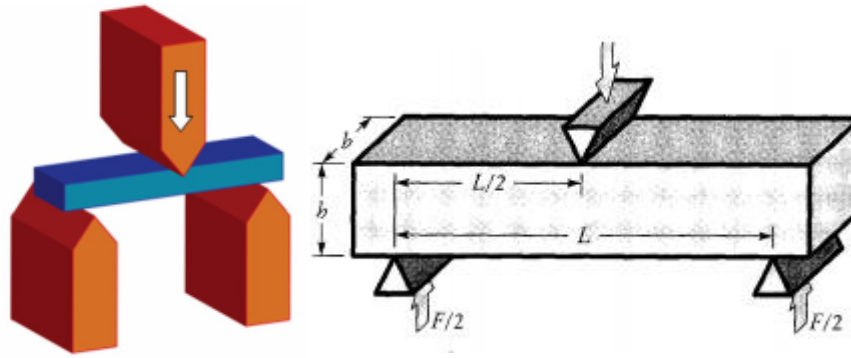


Figure.5Essai de flexion simple

Dans la flexion simple le contrainte maximale d'une éprouvette de section rectangulaire est

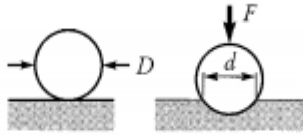

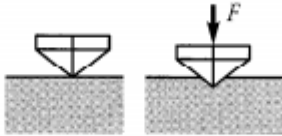


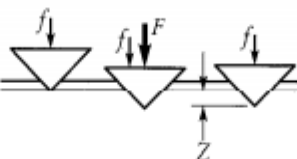
$$\sigma_{\max} = \pm \frac{3}{2} \left(\frac{F \cdot L}{bh^2} \right)$$

donné par la relation suivantes :

II.4Essai de dureté

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétreur-surface indentée, la géométrie de pénétreur, ses propriétés mécaniques et la charge qui y est impliquée. Le tableau 2 Résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisée : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), les duretés Rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient données sans dimensions, les duretés Brinell et Vickers, de par leur définition, sont homogènes à des contraintes [1]

Tableau.2Qualification de la résistance d'une roche en fonction de la valeur de la résistance en

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté); 5 à 1000 gf		Diagonale de l'empreinte (d) 	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge f de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRB = f(Z)$

Source: J.P Bailon, J.M. Dorlot, Des matériaux

III. Caractérisation de la microstructure

Il est important de mettre en relation les mécanismes de transformation de phases des matériaux avec les diverses microstructures qui se forment, car ce sont celles-ci qui déterminent dans une large mesure les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux. On rencontre, dans les matériaux, un grand nombre de microstructures diverses : grains cristallins ou phases amorphes comportant souvent des précipités d'une ou de plusieurs phases dispersées, sphérolithes, structures eutectiques lamellaires ou fibreuses, etc.

Les microstructures sont constituées d'un ensemble d'éléments organisés à l'échelle microscopique et qui contrôlent les propriétés d'un grand nombre de matériaux. Leur observation et leurs caractérisations nécessitent donc l'utilisation de techniques microscopiques. La méthode la plus utilisée pour étudier la structure des solides à l'échelle de l'atome est la microscopie électronique. Il existe d'autres techniques pour l'observation de la microstructure. Dans cet ouvrage élémentaire, nous nous sommes limités aux techniques de microscopies optique et électronique.

III.1 Technique d'observation (imagerie et analyse d'images)

Le tableau 3 montre les différentes techniques d'observation à l'échelle microscopique.

Tableau.2Techniques d'observation

Méthode	Sigles	Principe	Particules incidentes	Particules émises	Système discriminateur	Détecteur	Volume analysé		Sensibilité	Informations fournies
							Surface	Profondeur		
Microscopie optique	OM	Formation d'une image optique	Photons	Photons	Lentilles	— Œil — Dispositif photographique — Dispositif pour numérisation	À partir de 0,2 μm	= 0		Textures Structures
Microscopie électronique à balayage	MEB SEM	Reconstitution point par point d'une image en niveaux de gris modulés par l'intensité du rayonnement émis	Électrons	— Électrons secondaires	-----	Scintillateur	-----	1 à 2 nm (métaux)	-----	[Textures Structures Topographie N° atomique
				— Électrons rétrodiffusés	-----	Diode 4 quadrants	0,1 à 1 μm	0,1 à qq μm	-----	
				— Cathodoluminescence	-----	Œil, spectromètre	0,1 à 1 μm	-----	-----	
Microscopie électronique en transmission	MET TEM STEM	Formation d'une image d'un échantillon mince par les électrons transmis	Électrons	Électrons	Optique électronique	— Écran fluorescent — Photographie — Dispositif pour numérisation	= 1nm	qq μm		Textures Structures
Microscopie acoustique par balayage électronique	SEAM	Analyse d'ondes acoustiques générées par un faisceau électronique pulsé	Électrons	Ondes acoustiques		Cristal piézoélectrique	0,1 à qq μm	0,1 à 10 μm		Textures Structures
Micro-tomographie X	XRM	Formation d'une image par irradiation d'un corps par une micro-source de rayons	Photons X	Photons X		— Dispositif photographique — Dispositif pour numérisation				Textures

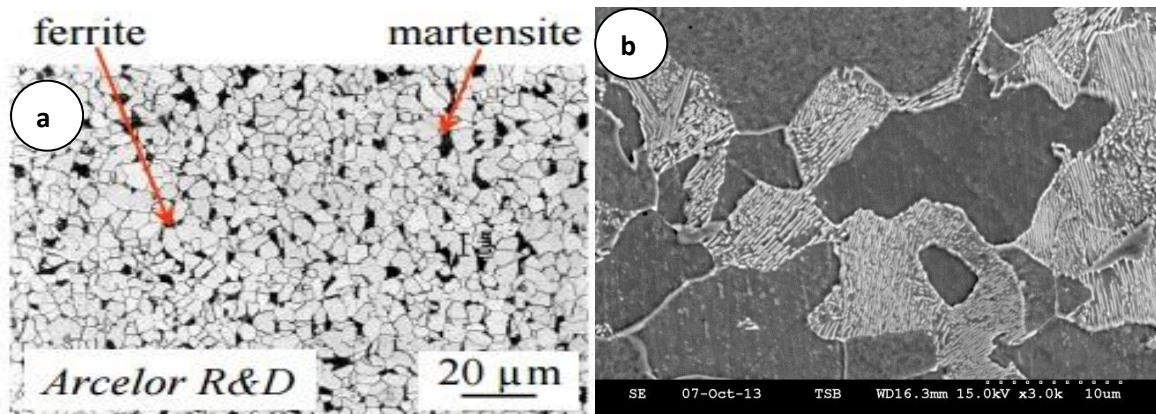


Figure.6 Exemples des micrographies

a) par MO b) par MEB

III.2 Principales microstructures des alliages fer-carbone

On distingue deux catégories importantes d'alliages fer-carbone : les aciers et les fontes. Le domaine des aciers au carbone correspond aux alliages fer-carbone contenant moins de 1,5% de carbone. Les alliages comportant plus de 2% de carbone constituent les fontes. Nous avons vu qu'à une température de 727°C et à une concentration en carbone de 0,8%, le diagramme Fe-C est caractérisé par une transformation eutectoïde entre les phases γ (austénite) et α (ferrite) + Fe₃C (cémentite). La microstructure d'un acier eutectoïde, refroidi lentement, on distingue clairement les couches alternées de ferrite et de cémentite. Cette structure lamellaire, qui apparaît au microscope optique aux faibles grossissements sous un aspect chatoyant similaire à celui de la nacre, a reçu le nom de perlite. La formation de la perlite se fait d'une façon analogue à la formation d'une microstructure eutectique, avec le cristal γ -cfc comme phase en transformation à la place du liquide. Lorsqu'on refroidit un acier de composition hypereutectoïde (> 0,8% de C), il se forme d'abord de la cémentite (Fe₃C) et la perlite eutectoïde apparaît ensuite. La germination de cette cémentite proeutectoïde s'effectue préférentiellement sur les joints de grains de l'austénite car la germination et la croissance le long des joints de grains est nettement plus facile, ce qui favorise l'implantation d'une nouvelle phase. La perlite apparaît ensuite à la température de transformation eutectoïde. En raison de la présence d'un réseau de carbures aux joints de grains, ces aciers sont généralement fragiles [6]

Références

- [1] Cours propriétés des matériaux/chapitre-1 caractérisations mécaniques des matériaux.pdf
- [2] Marc Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux 2006-2007
- [3] B. JACQUOT, Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009-2010
- [4] Mechanical Metallurgy, G.E. Dieter, chap. 9, The Tension Test, p. 329-377, Internatl. Student Edition McGraw-Hill, 1976.
- [5] Faculté Polytechnique de Mons - Service de Génie Minier, Belgique
- [6] J.-P. EBERHART, Analyse structurale et chimique des matériaux, Bordas, Paris, 1989.