

Aide-Mémoire de Matériaux

—

Analyses physico-chimiques

Frédéric Menan

<https://lesdocsduprof.com/>

fmenan@cesi.fr

2023

Table des matières

1	LES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES.....	3
1.1	ANALYSE THERMIQUE.....	3
1.2	ANALYSE CALORIMETRIQUE DIFFERENTIELLE (DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY DSC).....	4
1.3	THERMOGRAVIMETRIE.....	6
1.4	DILATOMETRIE.....	7
1.5	GRANULOMETRIE	8
1.6	DIFFRACTION DES RAYONS X	9
2	MICROSCOPIE.....	10
2.1	MICROSCOPIE OPTIQUE	10
2.2	MICROSCOPIE ELECTRONIQUE.....	14
2.3	MICROSCOPIE A SONDE LOCALE.....	17
2.4	MICROSCOPIE A EFFET TUNNEL	18
2.5	MICROSCOPE A FORCE ATOMIQUE (AFM).....	18
2.6	APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET SCIENTIFIQUES DE LA MICROSCOPIE	18
2.7	VIDEOS	19
2.8	ANNEXE. ECHELLES D'OBSERVATION.....	20
3	REFERENCES	21
3.1	SITOGRAFIE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

Remarque : certains chapitres de ce texte ont été rédigés il y a longtemps et démarrés sur des Powerpoint dont les crédits photos se sont parfois perdus en route. J'essaie de citer l'ensemble de mes sources dans les références en fin de document. Si j'ai oublié de vous citer vous pouvez m'envoyer un mail fmenan@cesi.fr et je corrigerai le document.

Pour toute info ou remarque : fmenan@cesi.fr

1 Les analyses physico-chimiques

1.1 Analyse thermique

Techniques de l'Ingénieur AM3274 : « *L'analyse thermique englobe toute une série de techniques de caractérisation des matériaux fondées sur l'étude de la variation d'une propriété physique en fonction de la température. Il s'agit donc essentiellement d'approches macroscopiques du comportement des matériaux, qui font intervenir des considérations de thermodynamique des états d'équilibre et des processus irréversibles, et de cinétique, associées aux changements d'états et aux phénomènes de relaxation qui peuvent les accompagner. Dans le cas spécifique des polymères, l'analyse de la réponse thermique permet de mettre en évidence et de donner une interprétation microscopique de la transition vitreuse, la fusion/cristallisation, le vieillissement physique et chimique, la ségrégation de phases.....* »

Ce type d'analyse est courant du fait des faibles masses d'échantillon nécessaires (quelques mg), et de la rapidité des mesures.

- Analyse statique : la température reste constante lors de l'essai.
- Analyse dynamique : on fait varier la température lors de l'analyse.

Une analyse thermique peut être simple ou différentielle selon que la mesure de la grandeur physique considérée est effectuée directement ou par comparaison avec le comportement d'un échantillon de référence ne subissant pas de modification de la grandeur physique.

Le tableau ci-dessous liste les principales méthodes d'analyse thermique des matériaux.

Méthode	Abbréviation française	Abbréviation anglaise	Grandeur mesurée
Analyse thermique	AT	TA	Te
Analyse thermique différentielle	ATD	DTA	Te-Tr
Analyse calorimétrique différentielle Analyse Enthalpique différentielle	ACD AED	DSC	dΔH/dt
Analyse thermomécanique Analyse thermodilatométrique (dilatométrie)	ATM	TMA TDA ou DIL	Longueur / volume
Analyse dynamique électrique	ADE	/	Propriétés diélectriques
Analyse dynamique mécanique	ADM	DMA	Raideur
Analyse thermogravimétrique	ATG	/	Masse

Tableau I. Principales méthodes d'analyse thermique

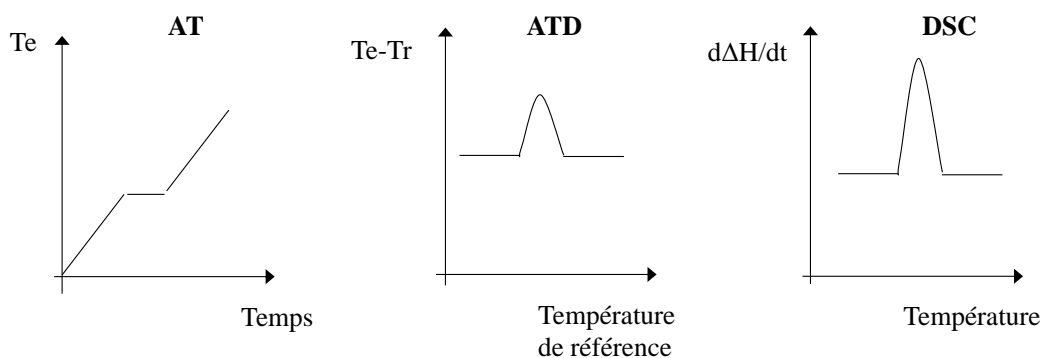


Figure 1. Principales méthodes d'analyse thermique

1.2 Analyse calorimétrique différentielle (Differential Scanning Calorimetry DSC)

En DSC on mesure la différence de chaleur reçue / fournie entre un échantillon et un échantillon de référence lors d'une rampe de température imposée en fonction du temps. On impose une évolution de température à un récipient contenant le matériau à tester et à un récipient de référence (porte-échantillon vide). On mesure la variation entre le flux de chaleur à imposer au matériau et le flux à imposer à l'échantillon de référence.

On mesure en fait la différence de puissance électrique qu'il faut fournir à la référence et à l'échantillon quand il se produit dans ce dernier une réaction endothermique ou exothermique de façon à réduire et à annuler la différence de température entre l'échantillon et la référence grâce à un programme de chauffe établi au préalable.

Dans la pratique on mesure l'intensité du courant fourni, nécessaire à l'équilibre thermique entre les deux têtes de mesure. Le signal enregistré est proportionnel à la différence de chaleur fournie à l'échantillon et à la référence.

On trace sur un graphe la différence de chaleur fournie en fonction de la température moyenne des deux échantillons.

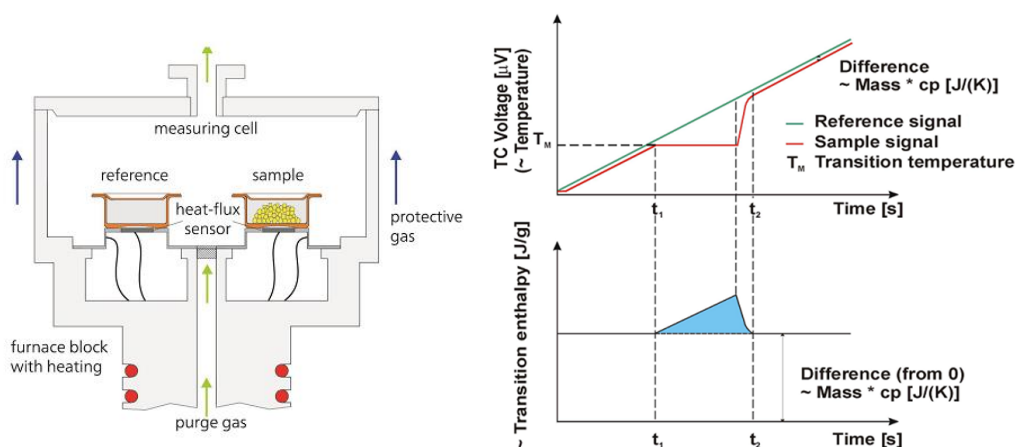


Figure 2. Principe de la DSC (www.netzsch-thermal-analysis.com)

L'analyse thermique différentielle permet de mettre en évidence des transformations endothermiques (fusion, la déshydratation, réactions de décomposition...) ou exothermiques (cristallisation, la condensation, l'oxydation, la polymérisation ...).

Exemple : en DSC, la température de transition vitreuse T_g se manifeste par une variation brusque de la capacité thermique. La transition vitreuse est alors marquée par une variation de la ligne de base due à l'augmentation de la capacité calorifique du matériau amorphe lors du passage vitreux → caoutchoutique.

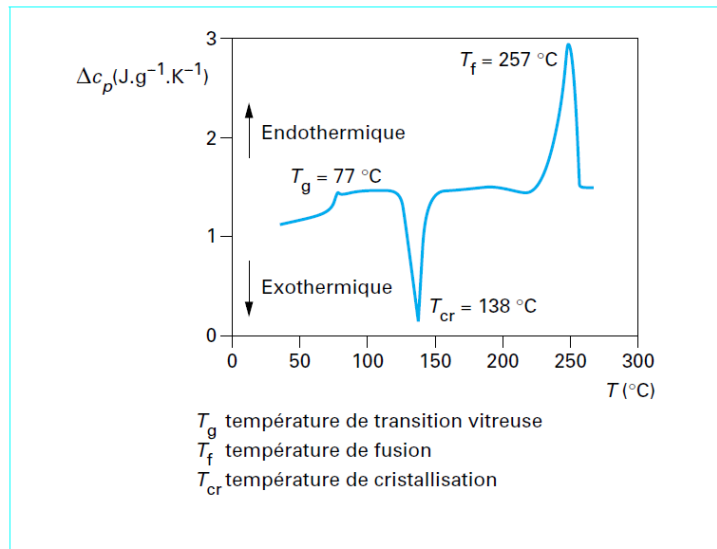


Figure 1 – Spectre obtenu par analyse enthalpique différentielle du poly(éthylène téréphthalate)

Figure 3. Analyse DSC sur un polymère (TI AM3274)

Exemple : Roche Volcanique, Transition Vitreuse, Cristallisation à Froid, Fusion

Les matériaux naturels tels que les roches sont difficiles à analyser au regard de leur composition chimique. De tels matériaux sont généralement des mélanges de différents oxydes, sulfates ou carbonates. Les roches volcaniques sont généralement issues de la solidification du magma et leurs principaux composants sont différents oxydes. Cet exemple présente une mesure DSC sur un tel matériau. Il est clairement visible que la roche a pratiquement solidifié complètement en phase amorphe. La transition vitreuse se situe entre 623°C et 655°C. La cristallisation à froid et la fusion ont été détectées à 884°C et 1111°C (température des pics). La chaleur relâchée durant la cristallisation est comparable à la chaleur de la fusion, indiquant la nature hautement amorphe de cet échantillon.

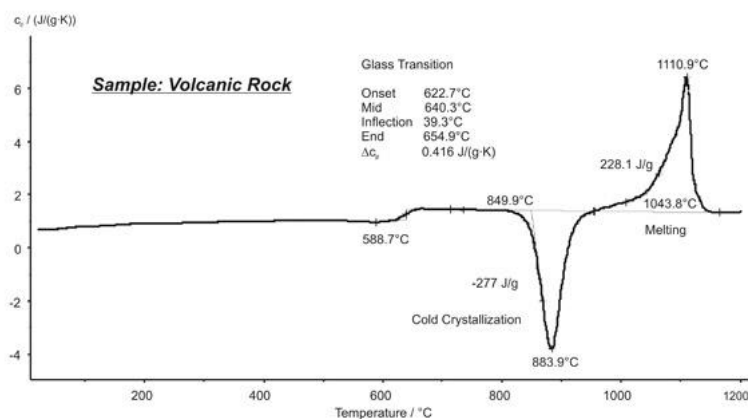


Figure 4. réf www.netzsch-thermal-analysis.com

1.3 Thermogravimétrie



On mesure la variation de la masse d'un échantillon en fonction de la température, ou en fonction du temps à température constante.

On peut détecter des changements de masse, l'humidité absorbée par un matériau, une oxydation en corrosion à haute température, l'évaporation et la sublimation d'un composant chimique, une température de décomposition, la lyophilisation, la déshydratation....

Figure 5. Thermobalance (www.netzsch-thermal-analysis.com)

Les courbes typiques obtenues par thermogravimétrie sont données ci-dessous.

2/ Perte de masse rapide, caractéristique d'une évaporation ou d'une déshydratation

3/ Décomposition de l'échantillon en une étape. On peut ainsi définir la limite de stabilité en fonction de la température

4/ Décomposition en plusieurs étapes.

5/ Prise de masse liée à la réaction de l'échantillon avec l'atmosphère, exemple typique d'une oxydation d'un métal donnant un composé non volatil

6/ Ensemble de réactions donnant lieu à une prise puis à une perte de masse (par exemple, une réaction d'oxydation, l'oxyde se décomposant à plus haute température).

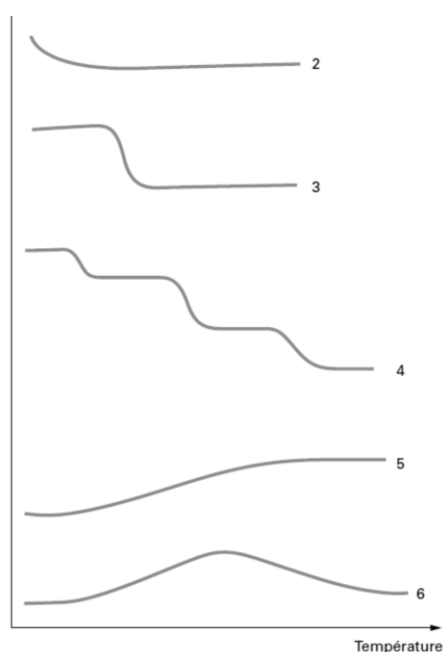
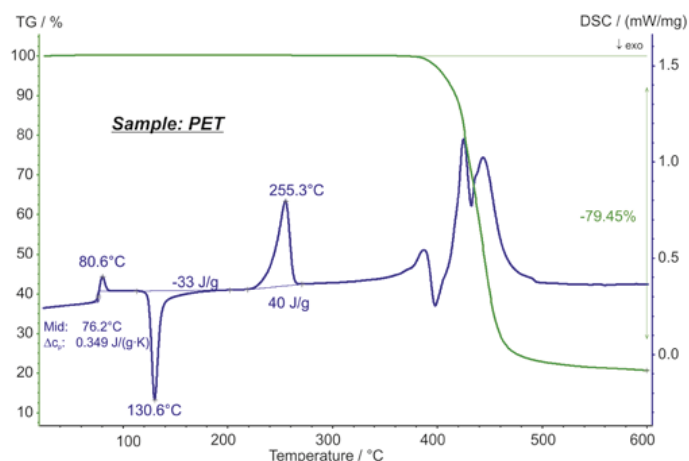


Figure 6. Courbes typiques de thermogravimétrie (ordonnée : masse)

Exemple : Mesures couplées thermogravimétrie/DSC sur PET

Plastic bottles, textile fibers and films (for example packaging for food) are well known applications of the polymer PET (polyethylene terephthalate). The STA measurement under nitrogen exhibits a step in the DSC signal below 100°C which is due to the glass transition. A corresponding increase in specific heat of 0.35 J/(g·K) was detected. The endothermic DSC peak at 81°C is due to relaxation, the exothermic peak at 131°C is due to crystallization and the endothermic peak at 255°C is due to melting. At temperatures above 360°C, the pyrolytic decomposition of the sample occurred with an entire mass loss of 79.5%.



www.netzsch-thermal-analysis.com

1.4 Dilatométrie

On enregistre la variation de longueur d'une éprouvette en fonction de la température, du taux d'humidité, ou du temps (transformation isotherme).

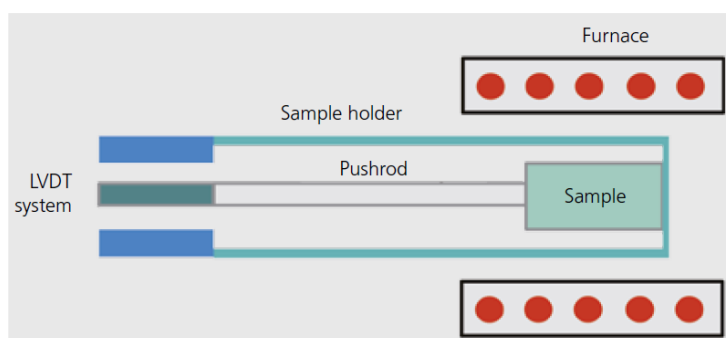


Figure 7. Banc de dilatométrie

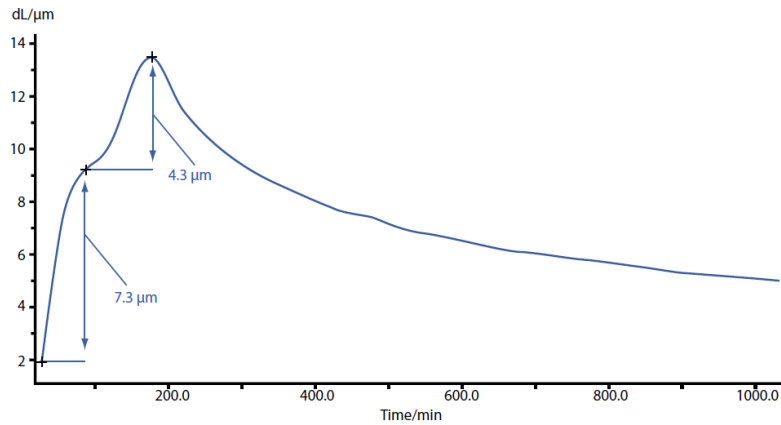
On peut détecter des changements de phase, des précipitations ou des dissolutions, une transition vitreuse, une cristallisation, un point de ramollissement.....

On distingue plusieurs méthodes :

- Dilatométrie différentielle : analyse dilatométrique par rapport à un échantillon de référence
- Dilatométrie absolue : enregistrement direct de la dilatation.

Exemple : Influence of Humidity on a Polymer

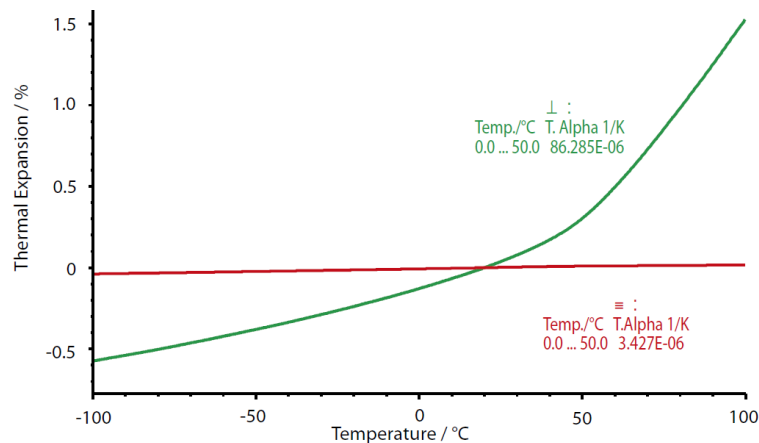
A polymer sample was measured with the DIL 402 C connected to the humidity generator. The temperature was kept constant at 55°C. The atmosphere was preset to nitrogen with 70% humidity. After switching on the humidity generator, the sample immediately expands in two steps. After 200 min, the humidity generator is switched off and the sample begins drying. The drying process can be observed in the subsequent shrinkage of the sample. However, even after 15h of the drying process, the sample does not shrink back to its initial length.



www.netzsch.com

Exemple : Fiber-Reinforced Polymer

A 2D fiber-reinforced polymer was measured in and perpendicular to the fiber orientation. Both tests were carried out between -100°C and 100°C . In the fiber direction, the CTE is strongly reduced by the influence of the fibers. Perpendicular to the fibers, their influence is small; the CTE is in the typical range for the polymer matrix. Additionally, the glass transition of the polymer is clearly visible in the perpendicular direction. This shows that fiber reinforcement has a significant effect on the thermal expansion behavior.



www.netzsch.com

1.5 Granulométrie

La granulométrie est la mesure de la taille et de la répartition statistique des particules dans un échantillon.

On distingue les méthodes suivantes : tamisage à sec : supérieur à $100\text{ }\mu\text{m}$, tamisage humide : supérieur à $30\text{ }\mu\text{m}$, sédimentométrie : $1\text{ }\mu\text{m}$ à $100\text{ }\mu\text{m}$, centrifugation analytique: $0,01\text{ }\mu\text{m}$ à $20\text{ }\mu\text{m}$, diffraction laser : $0,01\text{ }\mu\text{m}$ à 3 mm , microscopie et analyse d'image : $50\text{ }\mu\text{m}$ à 1 mm

En granulométrie laser, les particules à analyser sont placées dans une cuve remplie d'eau et dispersées à l'aide d'un système d'agitation. Les particules circulent ensuite dans un circuit d'eau et traversent une cellule en verre à travers laquelle passe un laser. Le laser frappe alors les particules et est dévié. Des détecteurs placés de l'autre côté de la cellule récupèrent l'angle de diffraction. Plus la particule est petite et plus l'angle de diffraction sera grand. En revanche, un petit angle de diffraction sera mesuré lorsque le laser rencontre des grosses particules. On suppose donc que les particules rencontrées sont sphériques et la taille calculée est un diamètre moyen.

1.6 Diffraction des Rayons X

La diffraction de rayons X permet de déterminer la structure atomique d'un matériau, les paramètres de maille d'une structure cristalline (on exploite alors la Loi de Bragg $2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$, voir Figure 8), ou de mesurer des contraintes résiduelles.

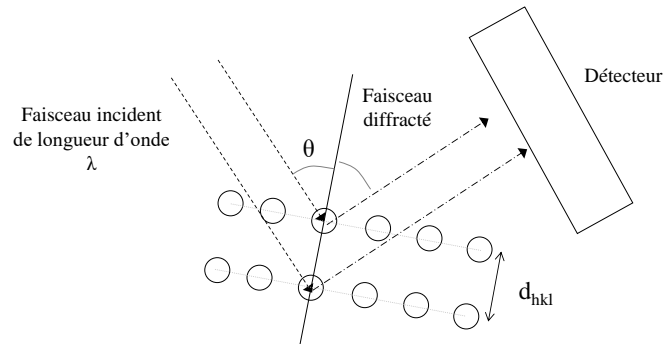


Figure 8. Diffraction de rayons X

2 Microscopie

2.1 Microscopie optique

La microscopie optique permet d'observer la microstructure des matériaux jusqu'à une taille de l'ordre de quelques dixièmes de microns (inclusions, phases, taille et forme des grains, précipités.....).

On peut observer les rayons lumineux qui passent à travers l'échantillon (microscopie en transmission) ou les rayons lumineux réfléchis par l'échantillon (microscopie en réflexion).

2.1.1 Microscopie en transmission

Applications : matériaux transparents découpés en lames minces (polymères, céramiques)

2.1.2 Microscopie en transmission en lumière polarisée

Mais la lumière est également une onde. La lumière est en effet la partie visible par l'œil humain de l'ensemble des ondes électromagnétiques (longueurs d'onde comprises entre 400 et 760 nm).

Polarisation de la lumière

La polarisation d'une onde électromagnétique plane (Figure 9) caractérise l'évolution de la direction du champ électrique au cours du temps (la direction de la polarisation est celle du champ électrique \vec{E}).

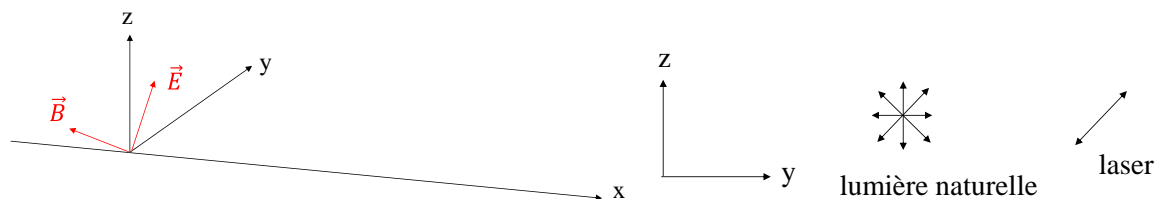


Figure 9. Polarisation de la lumière

En lumière polarisée, on peut observer la phase cristalline des polymères (Figure 10). Les contrastes de couleur proviennent de la polarisation de la lumière par le réseau cristallin local formé par les macromolécules.

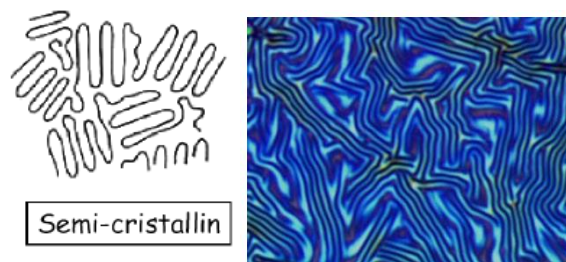


Figure 10. Observation d'une phase cristalline dans un polymère en microscopie polarisée

On peut également observer la microstructure dans des roches par lumière polarisée (Figure 11).

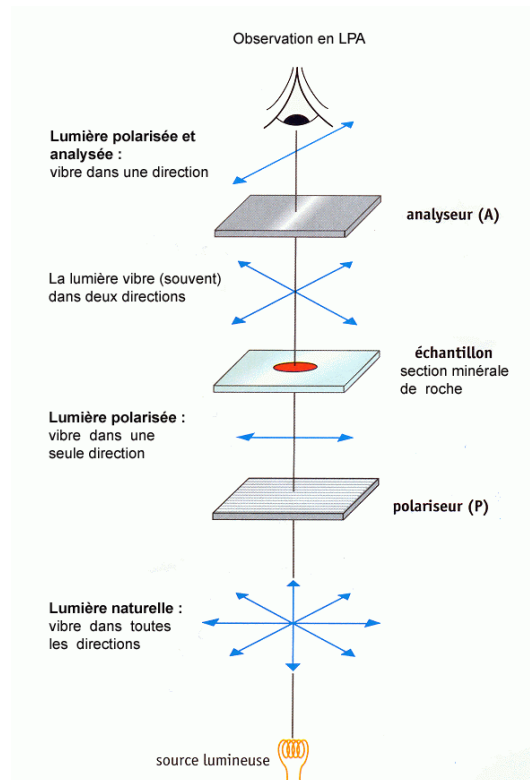


Figure 11. Polarisation de la lumière (static.wixstatic.com)

2.1.3 Microscopie en réflexion

2.1.3.1 Loupe binoculaire

La loupe binoculaire (Figure 12) a un grossissement faible mais conserve une vue des reliefs (profondeur de champ), comme pour une loupe. De plus elle ne nécessite aucune préparation particulière de la surface de l'échantillon.

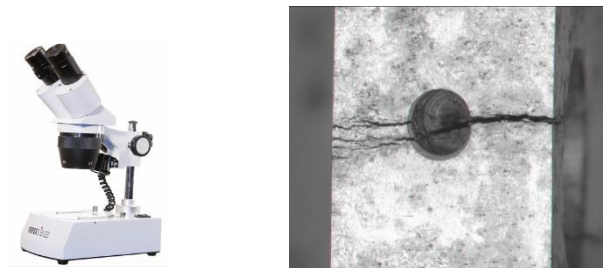


Figure 12. Gauche : loupe binoculaire (naturoptic.com) Droite : image obtenue à l'aide d'une loupe binoculaire (fissure de corrosion sous contrainte dans une éprouvette en aluminium 2024-T351 [1])

2.1.3.2 Microscope à platine inversée

Ce microscope (Figure 13) permet un grossissement plus important que la loupe binoculaire.

Le microscope à platine inversée est utilisé avec des échantillons polis et éventuellement attaqués par un réactif pour révéler les éléments de la microstructure (Figure 14 et Figure 15).

Le microscope à platine inversée permet d'observer la microstructure jusqu'à une taille de l'ordre de quelques dixièmes de microns : inclusions, phases, taille et forme des grains, précipités..... (Figure 16).

Après montage de 3 images, on peut illustrer la microstructure dans l'espace d'un matériau polycristallin (Figure 16).

Tous ces instruments sont aujourd'hui reliés à des caméras numériques et des logiciels d'enregistrement et d'analyse d'images.

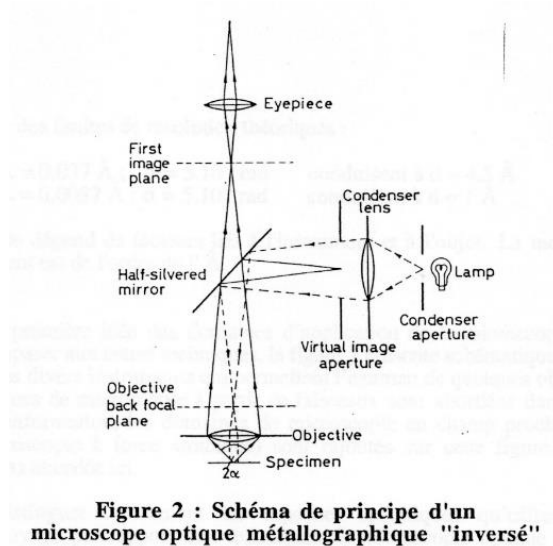


Figure 13. Microscope à platine inversée (www.naturoptic.com)

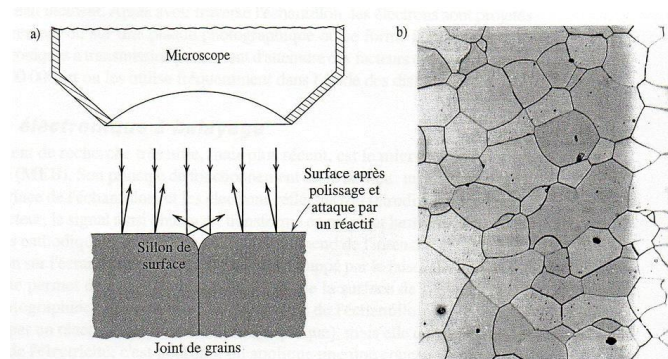


Figure 14. Surface d'un matériau polycristallin après attaque des joints de grain par un réactif [2]

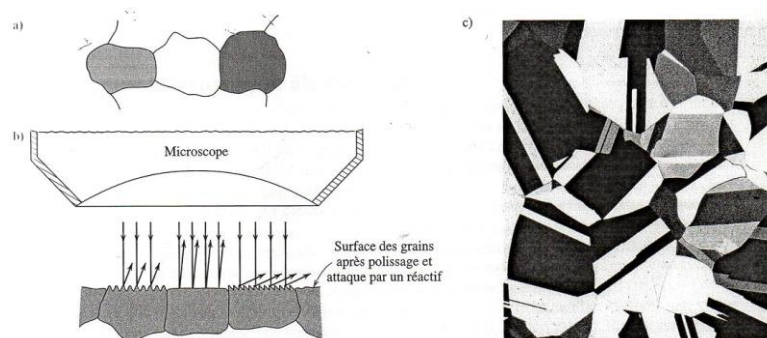


Figure 15. Microscopie optique sur un matériau polycristallin après attaque des grains par un réactif ([2] (Micrographie de JE Burke GE)

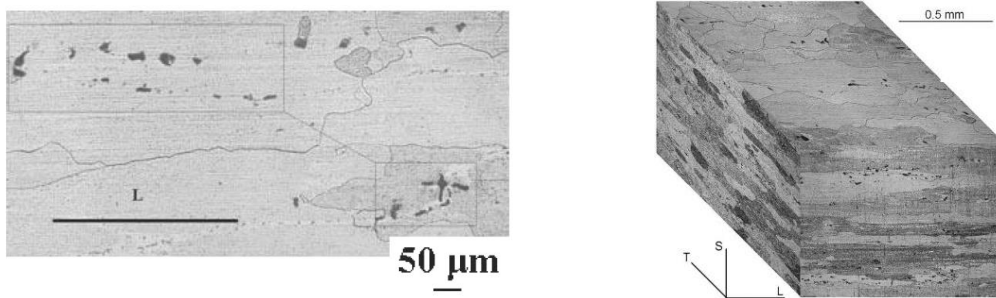


Figure 16. Microstructure d'un alliage d'aluminium 2024-T351 [1]

2.1.4 Limites de la microscopie optique

Le caractère ondulatoire de la lumière permet d'aborder la notion de diffraction.

On parle de diffraction lorsque la lumière ne se propage pas en ligne droite dans un milieu transparent, homogène et isotrope, à cause des obstacles de petite dimension placés sur le trajet (Figure 17).

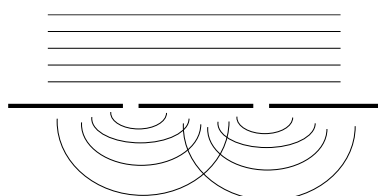


Figure 17. Mise en évidence de la diffraction à l'aide des trous d'Young et d'une lumière laser

La diffraction permet de comprendre la limite de résolution des microscopes optiques. En effet la résolution des microscopes est limitée par les effets de diffraction à la pupille d'ouverture de l'objectif (Figure 18).

Soit un objet plan éclairé par un rayonnement incohérent, la plus petite distance d entre 2 points de l'objet qui permet encore la séparation de leurs images données par l'objectif est :

$$d = \frac{0,61\lambda}{n \cdot \sin\alpha}$$

d : distance de résolution ; λ : longueur d'onde ; n : indice de réfraction du milieu entre l'objet et l'objectif ; α : ouverture de l'objectif

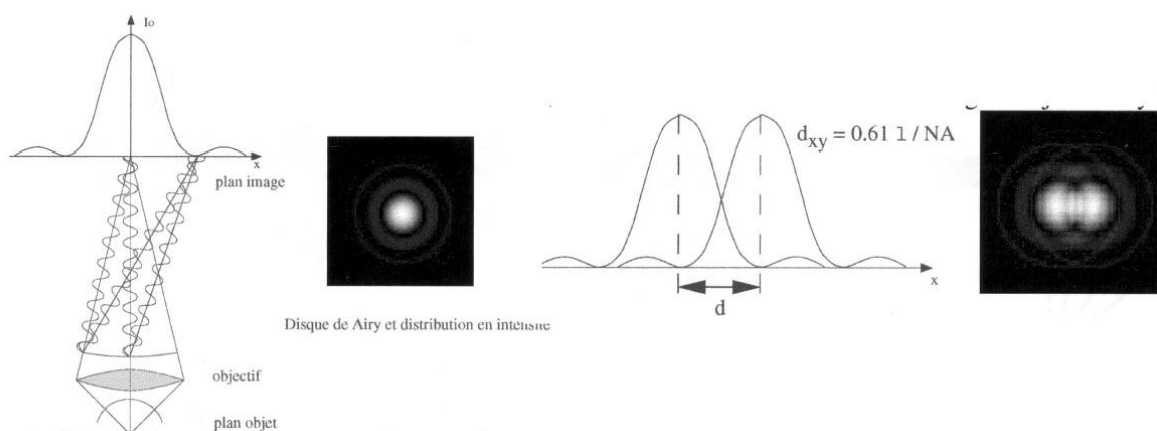


Figure 18. Diffraction à la pupille d'ouverture de l'objectif

Ordre de grandeur des limites de résolution : $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$; $\alpha = 1 \text{ rad}$; $n = 2$, alors $d = 0,15 \mu\text{m}$. La limite de résolution d'un microscope photonique (optique) est au mieux d'environ $0,2 \mu\text{m}$.

Si d diminue, on améliore la résolution. Pour diminuer d , on peut diminuer λ , augmenter l'ouverture α , augmenter l'indice de réfraction n

La solution optimale est de diminuer la longueur d'onde λ . L'onde associée aux photons (lumière) a une trop grande longueur d'onde. On utilisera l'onde associée à des corpuscules. Les corpuscules les plus pratiques sont les électrons (faciles à produire, faciles à focaliser, faciles à observer sur un écran fluorescent ou un film photo). C'est l'objet de la microscopie électronique. La microscopie électronique permet donc un plus fort grossissement que la microscopie optique (Figure 19).

2.2 Microscopie électronique

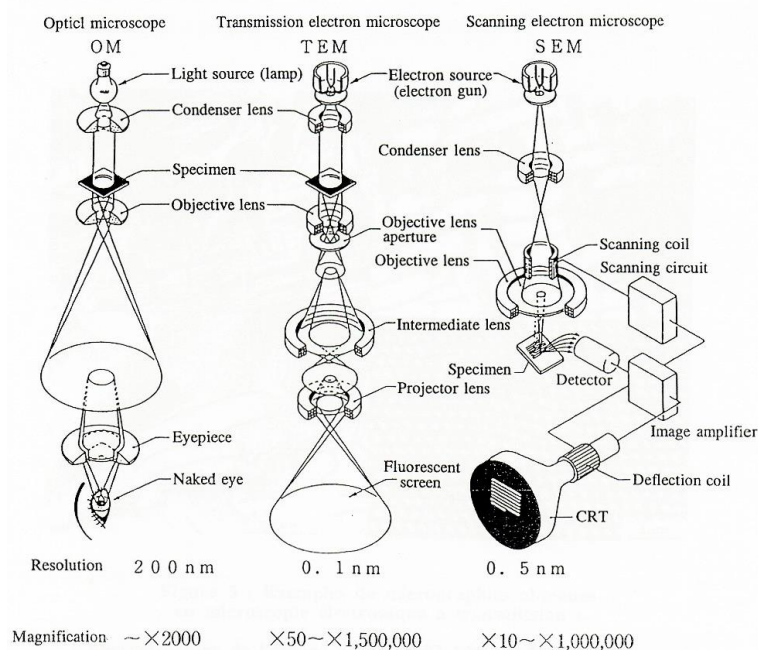


Figure 19. [3]

2.2.1 Microscopie Electronique à Balayage (Anglais : SEM)

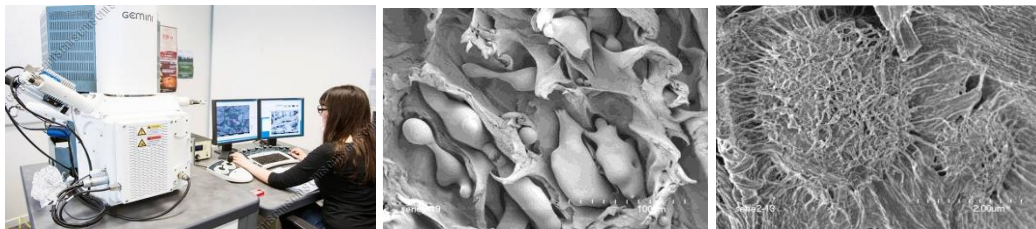


Figure 20. MEB (CNRS Photothèque) - Image MEB d'un polymère nanostructuré. (umet.univ-lille1.fr)

Dans un MEB, on focalise un faisceau d'électrons de forte énergie sur la surface de l'échantillon. Ces électrons, appelés électrons primaires, interagissent avec un petit volume de matière de l'échantillon.

Les différents types de rayonnements et signaux produits par ces interactions sont récupérés par un capteur pour former l'image sur un écran cathodique ou un écran d'ordinateur. La microscopie électronique à balayage exploite donc les interactions entre les électrons et la matière qui constitue l'échantillon.

On distingue deux types d'interactions :

- Interaction élastique : la trajectoire des électrons est modifiée par la surface mais leur énergie reste constante
- Interaction inélastique : transfert d'énergie entre le faisceau incident et les atomes de l'échantillon. Il y a production d'électrons secondaires, électrons Auger, rayons X,.....

Types de signal en sortie	Interaction
Electrons secondaires	Inélastique
Electrons rétrodiffusés	Elastique
Electrons Auger	Inélastique
Photons émis par la surface	Inélastique
Rayons X émis par la surface	Inélastique

Figure 21. Interactions électron matière

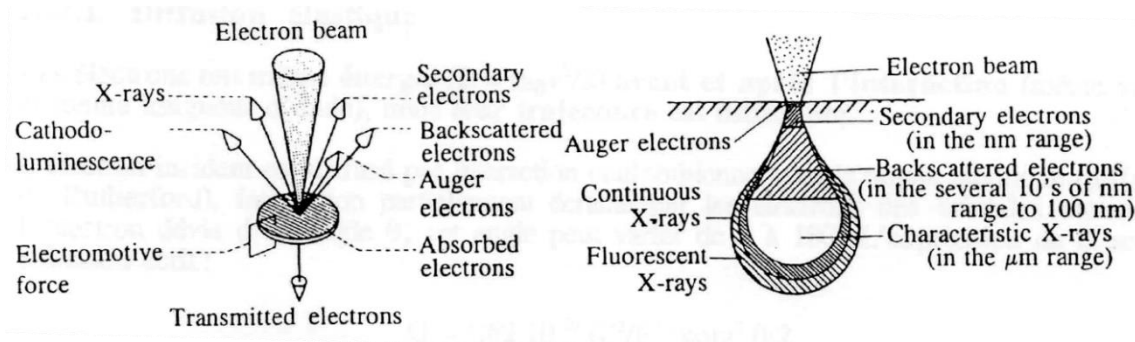


Figure 22. (Cours ENSMA P. Villechaise 2008)

2.2.2 Détection des électrons rétrodiffusés (back-scattered electrons)

Les électrons rétrodiffusés sont influencés par Z , numéro atomique des atomes de l'échantillon. Les atomes « lourds » (grand Z) renvoient plus d'électrons que les atomes légers. On pourra donc obtenir des contrastes de composition chimique : plus Z est grand, plus la zone concernée apparaîtra brillante (contrastes de phase)

2.2.3 Détection des électrons secondaires

Electrons “arrachés” aux atomes par les électrons primaires. Moins énergétiques que les électrons rétrodiffusés. Ces électrons dépendent de la topographie de la surface : on s'en servira pour “observer” les reliefs de la surface, avec une image obtenue proche d'une image “optique”.

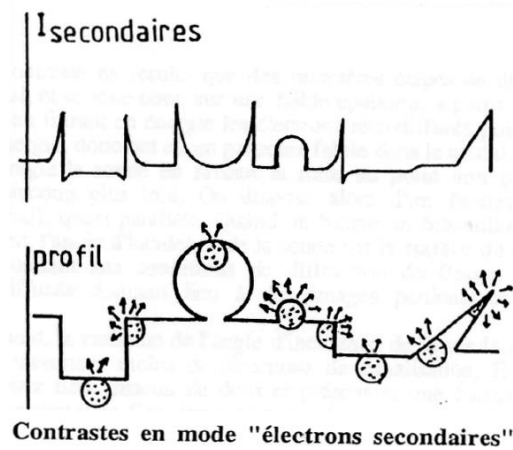


Figure 23. Electrons secondaires, contraste dépendant de la topographie de la surface

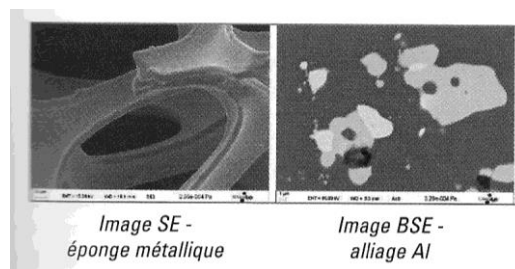


Figure 24. Gauche : électrons secondaires. Droite : électrons rétrodiffusés [4]

[Le microscope électronique à balayage \(www.youtube.com/watch?v=2w4q4-ltW7E\)](http://www.youtube.com/watch?v=2w4q4-ltW7E)

2.2.4 Détection des rayons X émis par la surface

L'énergie et la longueur d'onde des rayons X émis dépendent des atomes de l'échantillon >>> Application : analyse chimique d'une surface (Figure 25)

Mesure de leur énergie : EDS Energy Dispersive Spectrometry (spectrométrie à dispersion d'énergie)

Mesure de leur longueur d'onde : WDS Wavelength Dispersive Spectrometry (spectrométrie à dispersion de longueur d'onde)

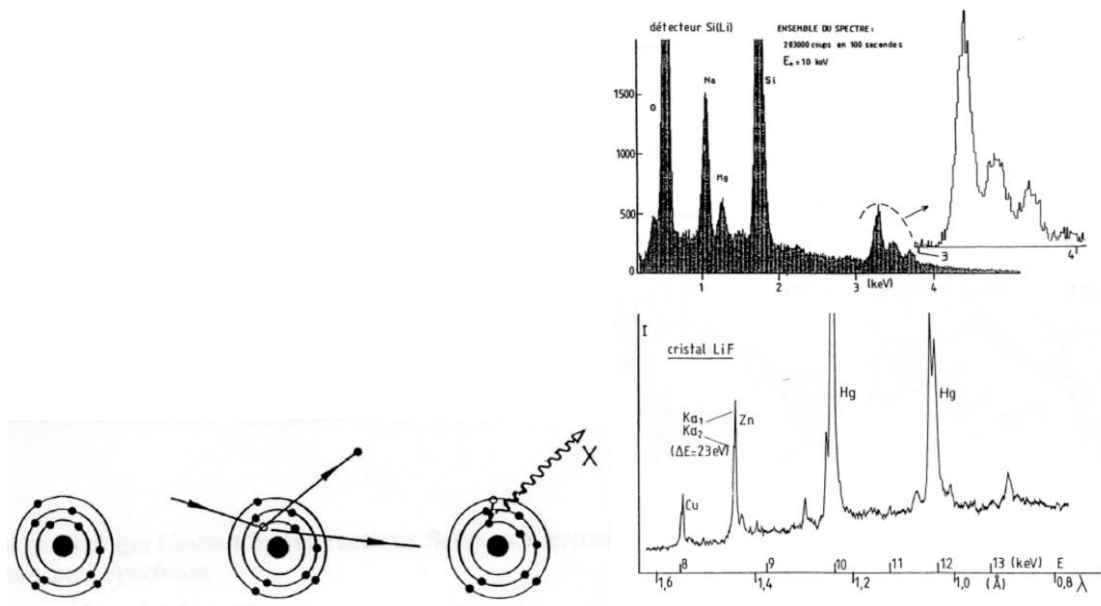


Figure 25. Analyse chimique par détection des rayons X (Cours ENSMA P. Villechaise 2008)

2.2.5 Microscopie Electronique en Transmission (Anglais : TEM)

Le MET a été mis au point en 1931 par Max Knoll et Ernst Ruska. En 1986, ce dernier a reçu le prix Nobel de Physique pour cette invention.

Les électrons (en microscopie optique ce sont les photons) passent à travers une lame mince de qqes dizaines de nm d'épaisseur et sont diffractés par les éléments de la microstructure.

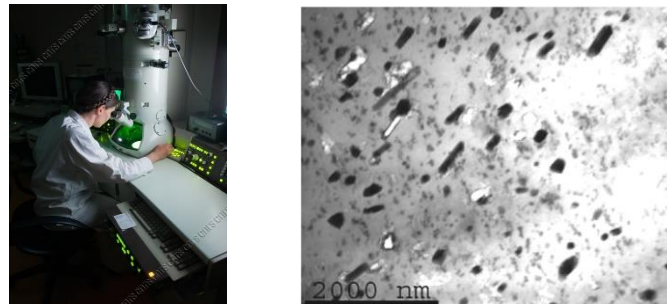


Figure 26. Gauche : MET (CNRS Photothèque). Droite : microstructure d'un alliage d'aluminium 2024-T351 vue au MET [1]

La microscopie électronique en transmission permet des grossissements plus importants qu'en MEB mais le zone d'analyse est petite (quelques mm), on ne distingue pas le relief de la microstructure, la préparation de lames minces est délicate et la réalisation et l'analyse des images demande de l'expérience. Ce type de microscope est principalement utilisé en recherche (métallurgie, biologie....).

2.3 Microscopie à sonde locale

La microscopie à sonde locale permet de caractériser de façon très détaillée le relief des surfaces.

2.4 Microscopie à effet tunnel

Dans ce type de microscope, une sonde très fine approche le relief d'une surface. Un courant électrique se crée par effet tunnel (phénomène quantique). Afin de garder une intensité constante entre le point de mesure et la surface, il est alors nécessaire de garder une distance constante entre ce point de mesure et la surface. On doit donc moduler la hauteur de la pointe, ce qui permet de mesurer le relief de la surface.

[Effet tunnel \(www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=DC0U5viudt0\)](http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=DC0U5viudt0)

[Le microscope à effet tunnel \(www.youtube.com/watch?v=NEsbREz-BBU\)](http://www.youtube.com/watch?v=NEsbREz-BBU)

2.5 Microscope à force atomique (AFM)

On suit l'altitude du contact pointe-échantillon par mesure de la déflexion du support de la pointe.

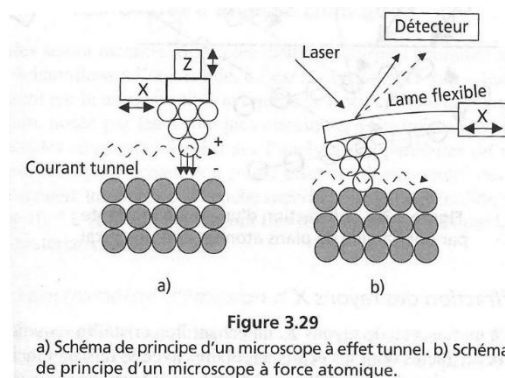


Figure 3.29

a) Schéma de principe d'un microscope à effet tunnel. b) Schéma de principe d'un microscope à force atomique.

[5]

2.6 Applications industrielles et scientifiques de la microscopie

2.6.1 Fractographie

La fractographie est l'analyse des causes de la rupture d'une éprouvette ou d'une pièce rompue. Elle fait appel à la fois à la microscopie optique et électronique (Figure 27).

Avec une loupe binoculaire puis au MEB, on cherchera à identifier le chemin de rupture et donc les mécanismes de rupture (rupture transgranulaire, intergranulaire, par coalescence de vides, par clivage.....). On parle d'analyse du faciès de rupture. En effet l'aspect des faciès de rupture nous renseigne sur le mode de rupture (rupture en traction, torsion, flexion, fatigue, fluage, fragilisation par l'hydrogène, corrosion, influence de la microstructure.....) (Figure 28).

On fera aussi une coupe métallographique pour observer la microstructure du matériau au microscope à platine inversée (Figure 27).

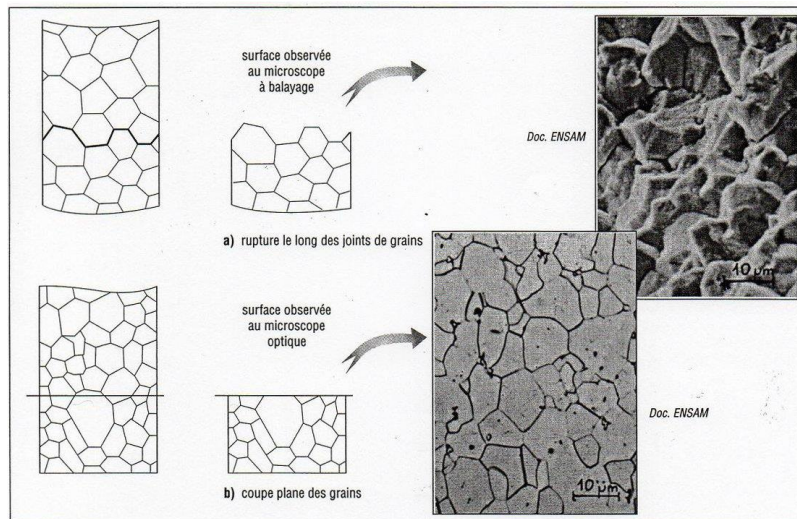


Figure 27. Métallographie [2]

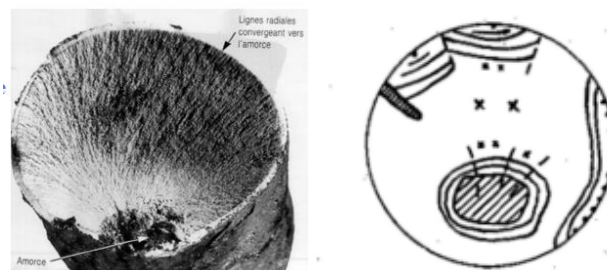


Figure 28. Analyse du faciès de rupture d'une éprouvette sollicitée en fatigue (Verdu INSA de Lyon - GEMPPM)

2.6.2 Analyse d'images

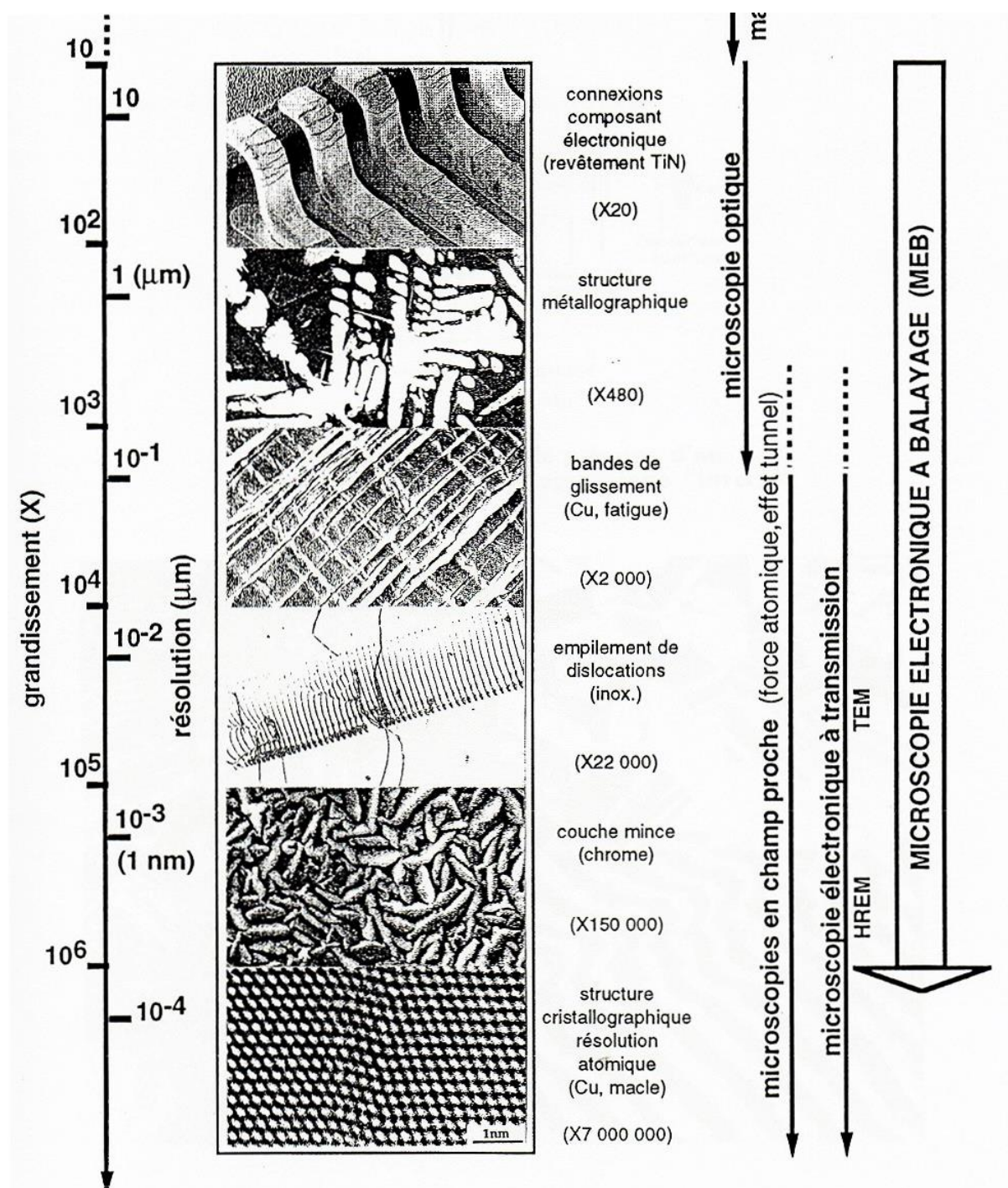
Extraction quantitative de données à partir d'une image : analyse globale : porte sur toute l'image (composition chimique, pourcentage de phases), analyse individuelle : forme de précipités, tailles d'inclusions, analyse dynamique : images rapprochées dans le temps, stéréologie : calcul de paramètres 3D à partir de mesures sur images 2D

Reconnaissance de formes : contrôle d'un évènement (inspection de défauts par exemple les nœuds du bois, vérification d'étiquettes.....), reconnaissance pour classement

2.7 Vidéos

<http://portail.cea.fr/multimedia/Pages/animations/physique-chimie/comment-voir-atomes.aspx>

2.8 Annexe. Echelles d'observation



Référence [3]

3 Références

- [1] F. Menan, « Influence de la corrosion saline sur la tolérance aux dommages d'un alliage d'aluminium aéronautique 2XXX », 2008. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2008POIT2301/document>
- [2] J. Barralis et G. Maeder, *Métallurgie: élaboration, structures-propriétés, normalisation*, Nouv. éd. in Précis. [Paris-La Défense] Paris: AFNOR Nathan, 1997.
- [3] P. Villechaise, *Cours de microscopie électronique*. ISAE-ENSMA, 2008.
- [4] *Vade-mecum des matériaux*, Fédération Française des Matériaux. 2010.
- [5] M. Dupeux, *Aide-mémoire de science des matériaux*, 3^e éd. DUNOD, 2013.
- [6] Hocheid, *Que sais-je ? La métallurgie*, Presses Universitaires de France. 1970.
- [7] J. Hertz, « Diagrammes d'équilibre - Alliages binaires », *Étude et propriétés des métaux*, déc. 1999, doi: 10.51257/a-v2-m70.
- [8] M. Dupeux et J. Gerbaud, *Exercices et problèmes de sciences des matériaux*. in Sciences sup. Paris: Dunod, 2010.