



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL

PROGRAMME DE GÉNIE DES MATÉRIAUX

Le
génie
sans frontières

COURS MTR1110

CARACTÉRISATION MICROSTRUCTURALE DES MATÉRIAUX

Examen final

du 4 mai 2006

de 9h30 à 12h00

QUESTIONNAIRE

- NOTES :**
- ◆ Aucune documentation permise.
 - ◆ Calculatrice non programmable autorisée.
 - ◆ Les nombres en marge de droite indiquent le nombre de points accordés à la question; le total est de **35 points**.
 - ◆ Pour les questions nécessitant des calculs, aucun point ne sera accordé à la bonne réponse si le développement n'est pas écrit.
 - ◆ Le questionnaire comprend **9 pages**, en incluant les annexes.
 - ◆ **SVP ! Sur le cahier d'examen, répondez dans l'ordre des questions.**

En annexe, vous disposez de figures et formules qui pourraient vous être utiles.

Exercice n° 1 (Microscopie optique)

Le microscope optique est un instrument essentiel utilisé fréquemment en génie des matériaux pour observer et caractériser la microstructure d'un matériau. Voici quelques questions relatives à cet instrument.

- a) Quel rôle joue le diaphragme de champ (FA) dans un microscope optique ? Comment se manifeste son effet dans le champ de vision vu par l'observateur au travers de l'oculaire du microscope ? (2 pts)
- b) Quel rôle joue le diaphragme d'illumination (OA) dans un microscope optique ? Comment se manifeste son effet dans le champs de vision vu par l'observateur au travers de l'oculaire du microscope ? (2 pts)

Les lentilles (en particulier, la lentille objectif) d'un microscope optique peuvent être affectées de diverses aberrations.

- c) Quelle est la conséquence générale de ces aberrations sur la qualité finale des images obtenues avec de telles lentilles ? (1 pt)
- d) Décrivez en détail l'aberration de chromatisme (son origine, ses effets). *Vous pouvez utiliser un schéma pour appuyer vos explications.* (2 pts)
- e) Si vous observez un échantillon métallographique (ou souhaitez en prendre une photo) et que vous ne disposez pas d'une lentille objectif corrigée pour l'aberration de chromatisme, proposez une méthode d'observation qui permettrait d'obtenir des images non affectées par cette aberration. (1 pt)

Vous décidez de prendre une micrographie de votre échantillon poli et attaqué en utilisant une lumière filtrée considérée monochromatique ($\lambda = 500 \text{ nm}$) à un grossissement de 400X et des objectifs à sec.

- f) Choisissez-vous une combinaison « $G_{\text{objectif}} \times G_{\text{oculaire}}$ » égale à 20x20 ou à 40x10 ? *Justifiez quantitativement votre réponse.* (2 pts)

Données :	Grandissement de l'objectif :	20X	40X
	Ouverture numérique NA :	0,40	0,80
- g) Quelles sont les valeurs (exprimées en μm) de la limite de résolution et de la profondeur de champs obtenues avec la combinaison choisie à la question précédente ? (2 pts)

Exercice n° 2 (Métallographie)

Au cours des travaux pratiques, vous avez étudié la microstructure de certains alliages de cuivre. En annexe, vous trouverez deux micrographies (**M1** et **M2**) relatives à deux de ces alliages nommés **A** et **B**. L'alliage **A** est un cupro-aluminium qui contient 11,8 % Al alors que l'alliage **B** est un laiton qui contient 47 % Zn. Les diagrammes Cu-Al et Cu-Zn sont donnés en annexe.

Chaque état microstructural a été obtenu à la suite d'un traitement thermique spécifique appliqué à l'alliage considéré, qui était initialement à l'état brut de fonderie. Les deux traitements thermiques utilisés étaient les suivants :

- **Traitement T1** : Maintien à 900 °C/1 h, suivi d'un refroidissement lent jusqu'à 530 °C, puis trempe à l'eau (20 °C)
- **Traitement T2** : Maintien à 800 °C/1 h, suivi d'un refroidissement au four jusqu'à 20 °C.

À chacune des micrographies **M1** et **M2**, associez l'un des alliages **A** ou **B** ainsi que le traitement thermique **T1** ou **T2** qui lui a été appliqué pour obtenir l'état microstructural présenté par la micrographie considérée. **Justifiez en détail** vos associations **en identifiant** les phases ou constituants visibles sur la micrographie considérée et **en décrivant** les transformations qui se sont produites à l'état solide dans l'alliage **tout au long** du traitement thermique imposé. (6 pts)

Exercice n° 3 (Imagerie en microscopie électronique à balayage)

Vous disposez d'un MEB muni d'un canon à filament de tungstène (W), d'un détecteur d'Everhart-Thornley (ET) et d'un détecteur au silicium. Ces détecteurs sont positionnés de façon conventionnelle, telle que vue en cours et en travaux pratiques. Avec ce MEB, vous voulez examiner un échantillon d'un alliage d'aluminium – cuivre contenant 4 %m. de Cu qui a subi un traitement thermique ayant conduit à une précipitation du composé défini Al_2Cu , soit aux joints de grains, soit dans la matrice. Dans ce dernier cas, la précipitation de Al_2Cu se fait sur les plans {111} de la matrice d'aluminium. L'alliage étant un alliage de fonderie, des porosités sont parfois présentes à la jonction des joints de grains. Vous observez un échantillon poli de cet alliage et vous obtenez deux images (fig. 3-1 et 3-2) qui sont présentées en annexe.

Données :

Phase	Composition	Masse atomique A (g/mole)	N° atomique Z	Masse volumique (g/cm ³)
1	Al_2Cu	39,17	?	4,15
2	Al	26,98	13	2,70
3	Cu	63,55	29	8,96

- a) Pour réaliser ces photos au grossissement présenté, quelle était la valeur (en μm) du critère de résolution spatiale que vous avez dû satisfaire ? (1 pt)
- b) À quelle valeur maximale (en A) avez-vous dû régler le courant I_p de la sonde d'électrons primaires sachant que vous désiriez avoir un diamètre de sonde cinq (5) fois plus faible que le critère de résolution spatiale ? (1 pt)
- c) Sur quelle composante (partie constitutive) du MEB avez-vous agi afin d'obtenir la valeur requise du courant de la sonde d'électrons primaires balayant la région étudiée de l'échantillon? *Justifiez votre réponse si nécessaire avec des schémas.* (2 pts)
- d) En vous basant sur les caractéristiques particulières que présente chaque photo (fig. 3-1 et 3-2), laquelle de ces photos a été réalisée en électrons secondaires (ϵ_s) et laquelle a été réalisée en électrons rétrodiffusés (ϵ_r) ? *Justifiez, par des arguments qualitatifs et quantitatifs cette association.* (6 pts)
- e) Quel détecteur avez-vous utilisé pour réaliser la photo en électrons secondaires (ϵ_s) ? Comment était réglé ce détecteur ? Pourquoi avez-vous choisi ces réglages ? (1 pt)
- f) Quel détecteur avez-vous utilisé pour réaliser la photo en électrons rétrodiffusés (ϵ_r) ? Comment était réglé ce détecteur ? Pourquoi avez-vous choisi ces réglages ? (1 pt)

ANNEXES

Exercice n° 4 (Spectrométrie RX en microscopie électronique à balayage)

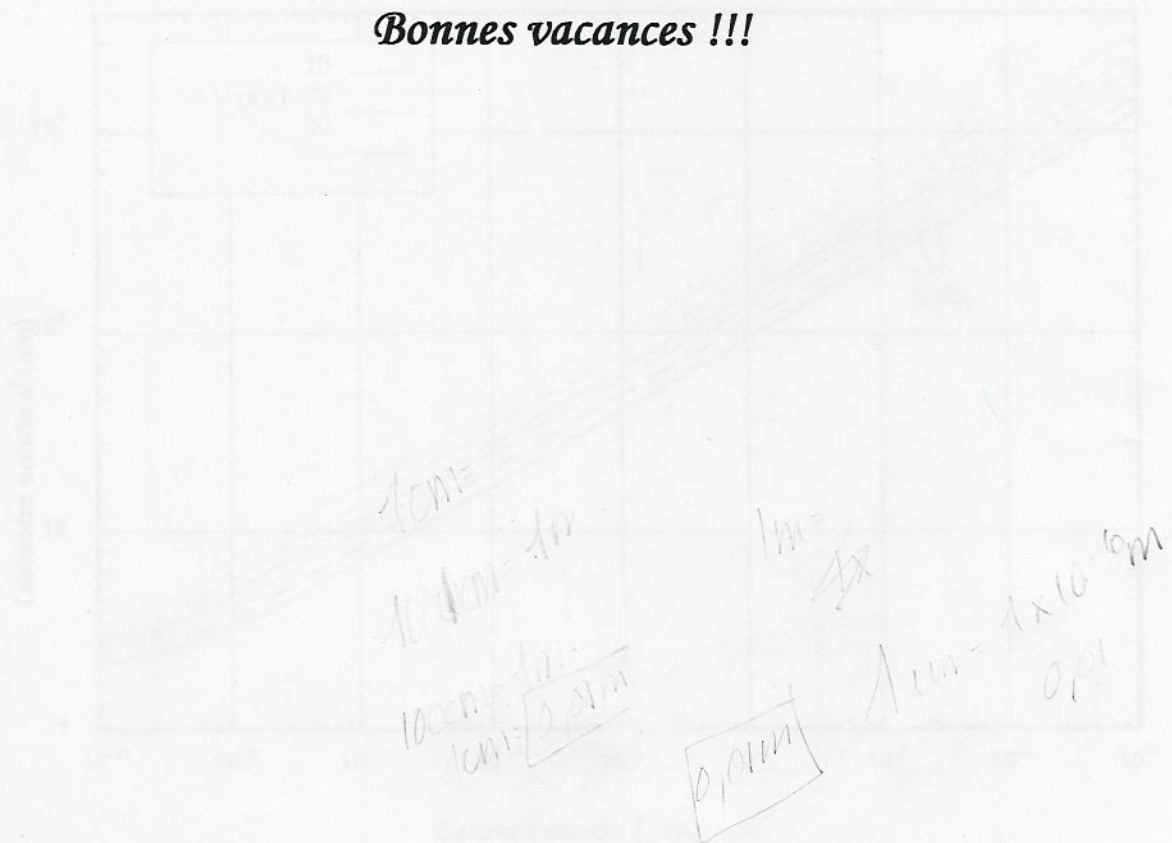
Un spectromètre RX, associé à un microscope électronique à balayage (MEB), permet de réaliser une analyse chimique élémentaire des éléments présents dans l'échantillon observé. Voici deux cas typiques de conditions expérimentales dans lesquelles vous réalisez une analyse par spectrométrie RX d'un échantillon donné.

- **Cas A** : Échantillon **A** monophasé constitué de fer (Fe). Analyse ponctuelle réalisée à l'intérieur d'un grain. Énergie des électrons primaires $E = 20 \text{ keV}$.
- **Cas B** : Échantillon **B** multiphasé ayant comme principal élément le nickel (Ni) et pouvant contenir du manganèse (Mn), du fer (Fe), du cobalt (Co) et du cuivre (Cu) en solution solide. Analyse ponctuelle réalisée à l'intérieur d'un grain. Énergie des électrons primaires $E = 20 \text{ keV}$.

- a) Dans le cas **A**, quelle est la dimension (rayon exprimée en μm) de la zone émissive des RX ? (2 pts)
- b) Dans le cas **B**, par quel(s) élément(s) les raies K_{α} et L_{α} émises par les atomes de nickel (Ni) seront absorbées ? (3 pts)

Données : voir annexes

Bonnes vacances !!!



ANNEXES

Microscopie optique

Limite de résolution d : $d = \frac{\lambda}{2NA}$ Profondeur de champ ρ : $\rho = \frac{v\lambda}{(NA)^2}$

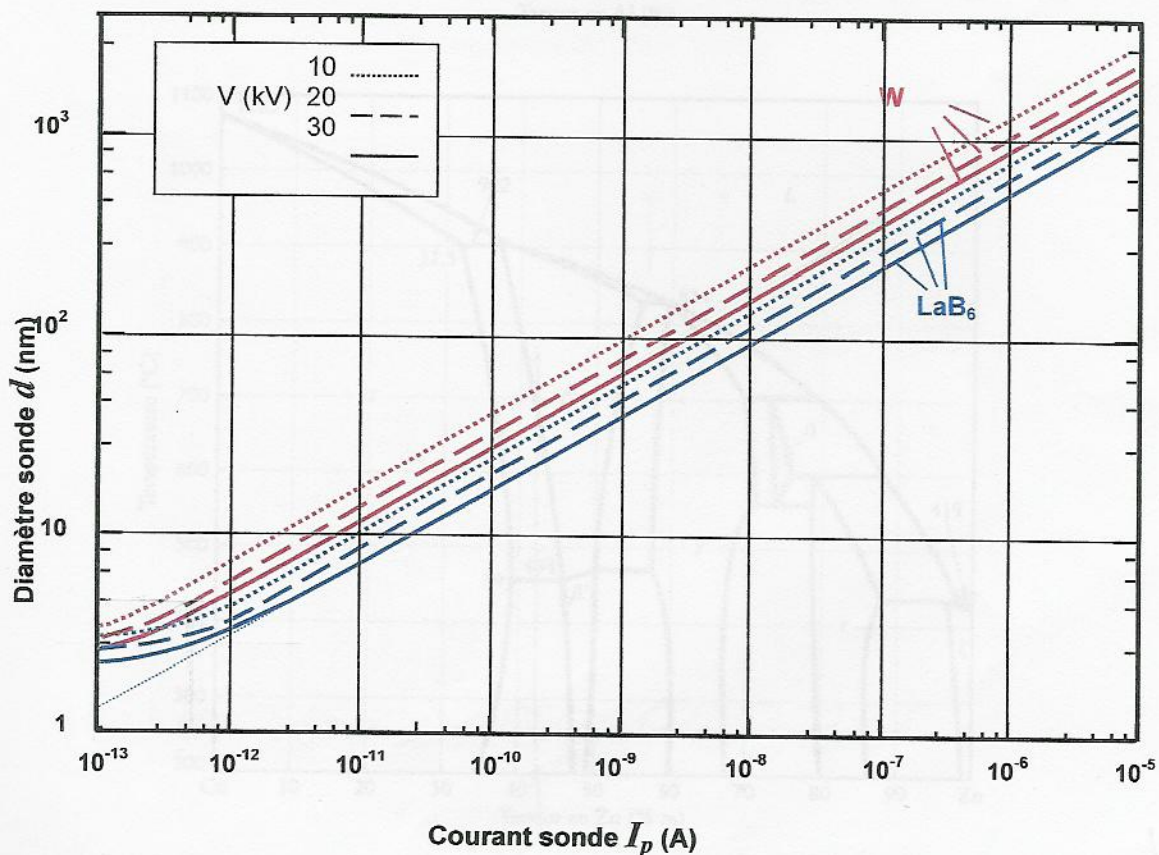
Microscopie électronique à balayage

Limite de résolution de l'œil humain $d_{im} = 0,2 \text{ mm}$

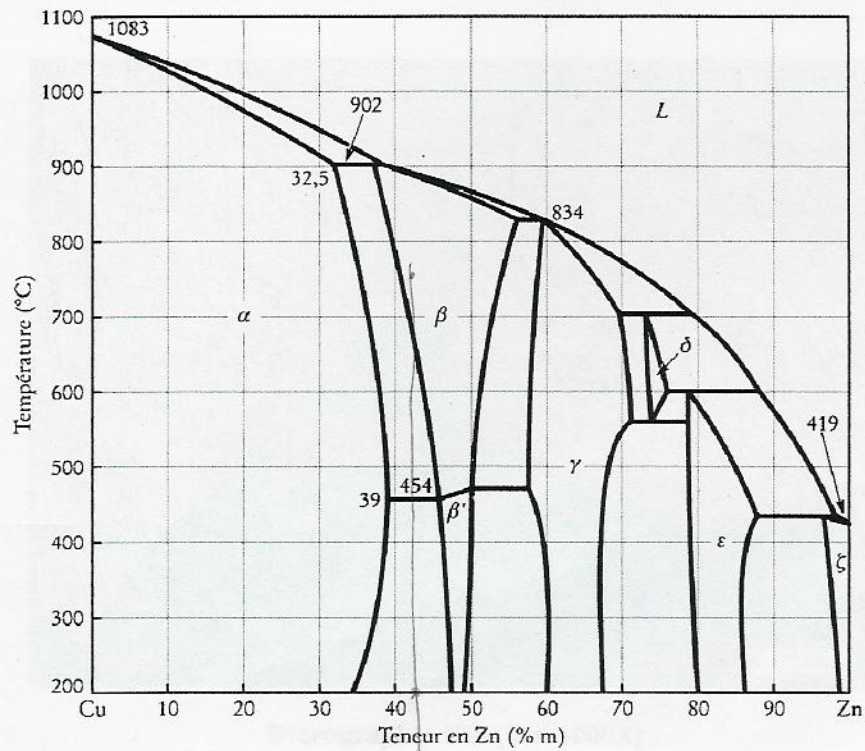
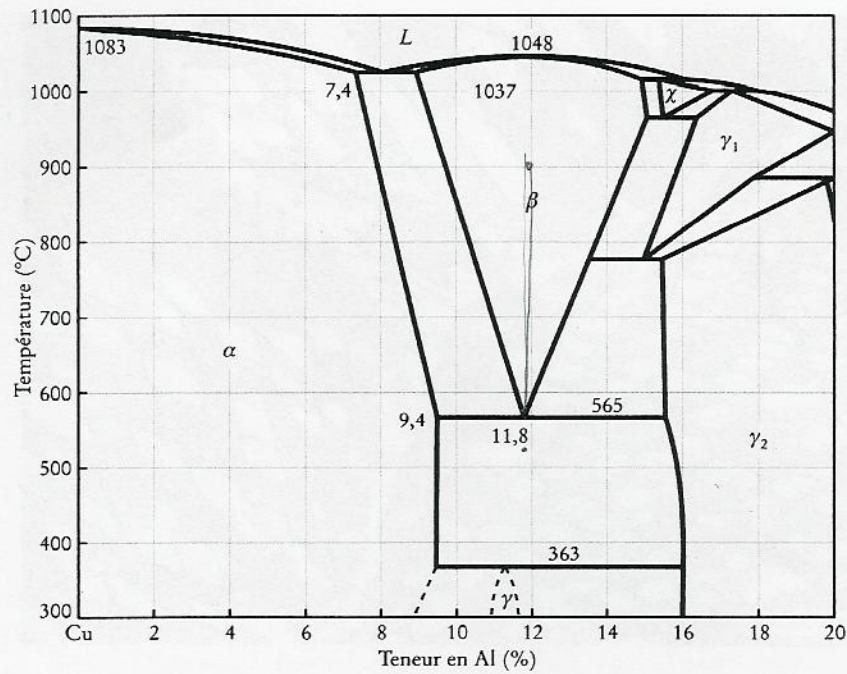
Coefficient de rétrodiffusion $\eta = (1 + \cos\alpha)^{-9/Z}$

Rayon de Kanaya – Okayama : $R_{KO}(\mu\text{m}) = 0,0276 \frac{A E_0^{1,67}}{\rho Z^{0,89}}$

avec A = masse molaire de l'élément
 ρ = masse volumique de l'élément
 Z = numéro atomique de l'élément
 E_0 = énergie des électrons primaires en keV

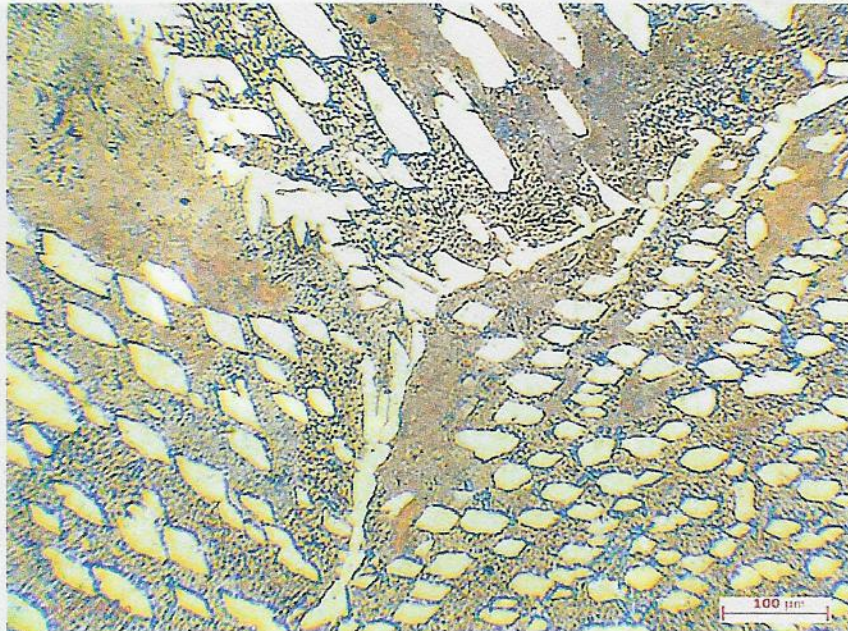


ANNEXE 3
 Exercice 11 - Diagrammes d'équilibre Cu-Al et Cu-Zn



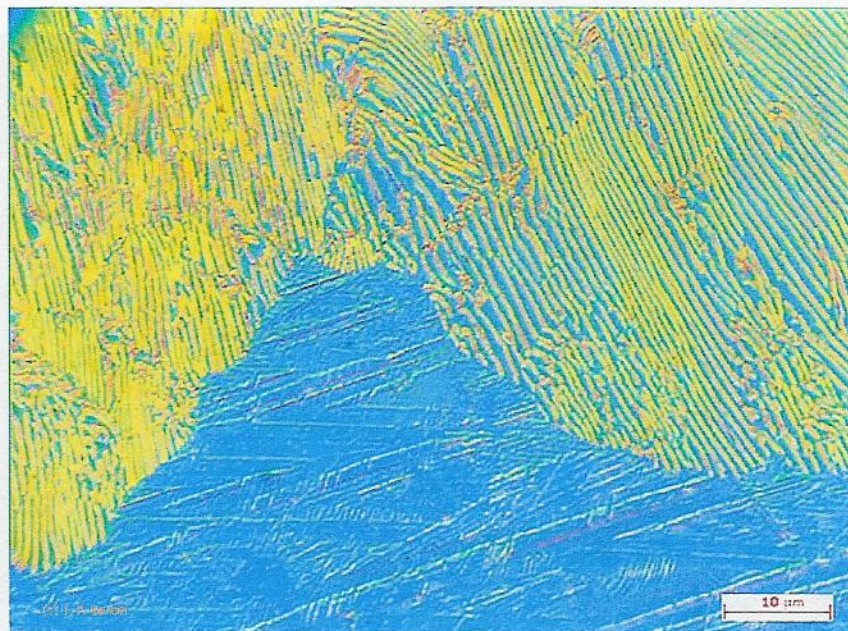
ANNEXES

Exercice n° 2 : Deux aspects microstructuraux d'alliages de cuivre



Micrographie M1 (G = 1000X)

Fig. 3.1 : Alliage Al + 4%at Cu, brut de polissage, observé au MEB



Micrographie M2 (G = 1000X)

Fig. 3.2 : Alliage Al + 4%at Cu, brut de polissage, observé au MEB

ANNEXES
Exercice 3 : Imagerie en microscopie à balayage

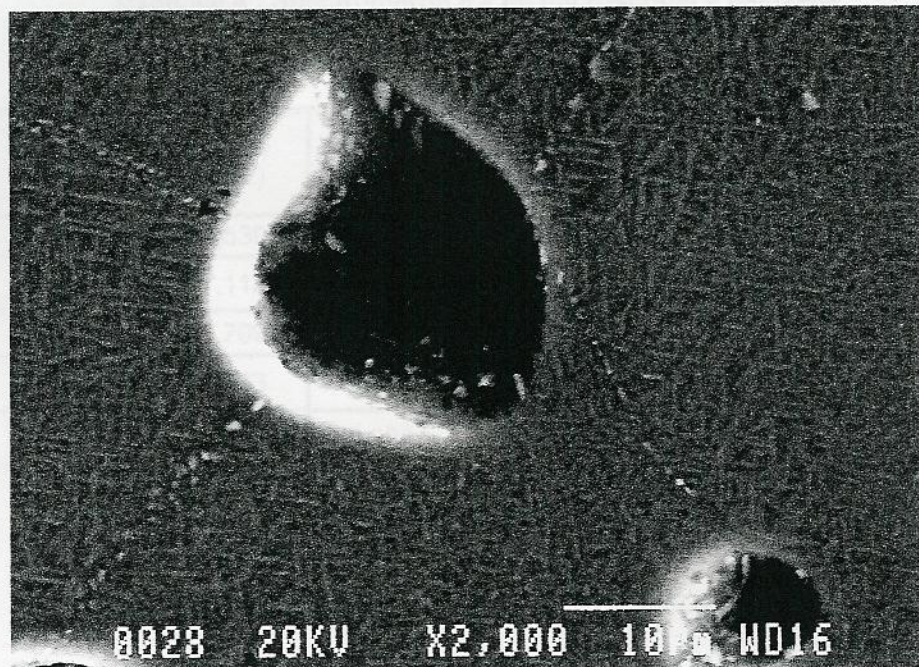


Fig. 3.1 : Alliage Al + 4% Cu, brut de polissage, observé au MEB

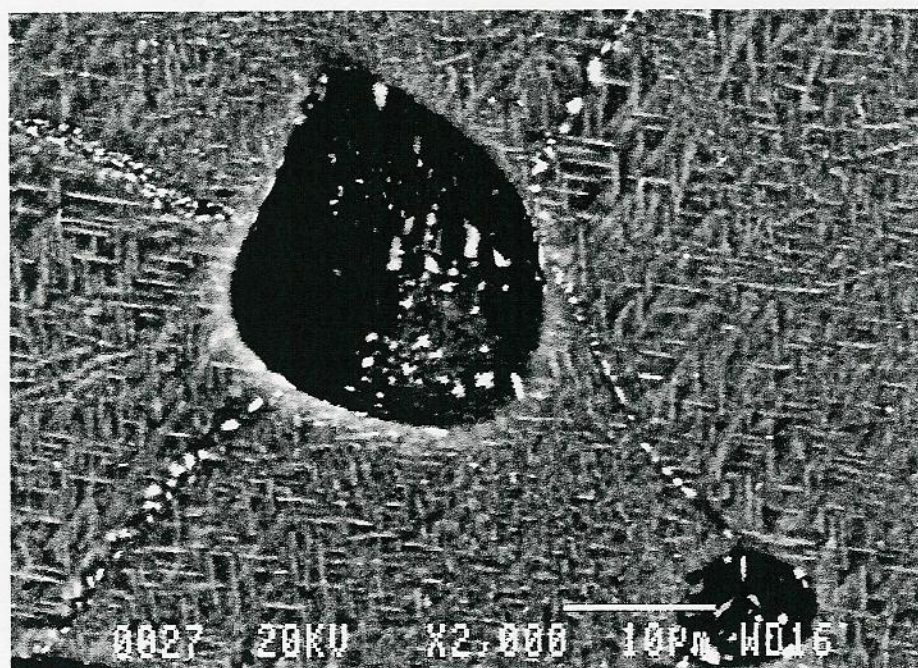


Fig. 3.2 : Alliage Al + 4% Cu, brut de polissage, observé au MEB

ANNEXES

Exercice 4 : Spectrométrie RX en microscopie à balayage

Élément	K α (keV)	E _c (K) (keV)	L α (keV)	E _c (L) (keV)	Coefficient d'absorption massique (μ/ρ) en (cm ² /g)	
					Ni K α	Ni L α
²⁵ Mn	5,898	6,539	0,636	0,639	330	12146
²⁶ Fe	6,404	7,112	0,704	0,708	370	13688
²⁷ Co	6,930	7,709	0,775	0,779	51	12654
²⁸ Ni	7,478	8,333	0,849	0,854	60	1806
²⁹ Cu	8,047	8,979	0,928	0,933	64	1916