



REPUBLIQUE ALGERIENE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Minist re de l'Enseignement Sup rieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Kheider-Biskra

Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et la Vie

Département Sciences de la Matière

Filière de Physique

N° d'ordre :

## Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de **Magister en Physique**

Option :

**Physique des Matériaux Métalliques et Non-métalliques**

Par

**KEBABI Amina**

*Thème :*

*Contribution à l'étude d'assemblage par brasage  
des Composants électroniques sur les circuits électroniques*

Soutenu le : ... / ... / 2012

Devant le Jury :

Président : M. Omari Professeur Univ. Mohamed Khider-Biskra

Rapporteur : Z. Boumerzoug Professeur Univ. Mohamed Khider-Biskra

Examineurs : A. Chala Professeur Univ. Mohamed Khider-Biskra

A. Meftah Professeur Univ. Mohamed Khider-Biskra

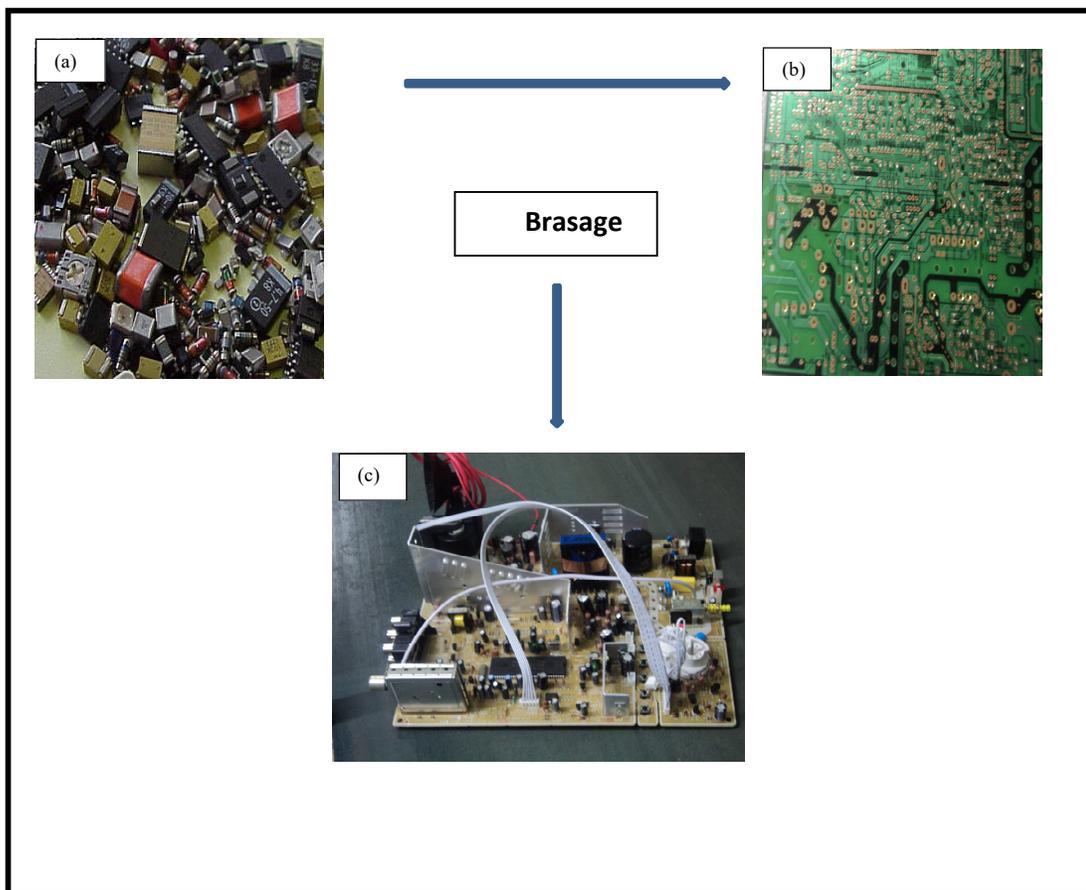
A. Dr. (M. C. "A") Professeur Univ. Mohamed Khider-Biskra

Debilou

## Chapitre I : Notions générales

## Partie A : Généralités sur les assemblages électroniques

Les assemblages électroniques sont constitués de composants électroniques et/ou de boîtiers contenant ces composants (Fig.I.1.a.), reportés sur des circuits imprimés (Fig. I.1.b.). Ces composants sont assemblés sur les circuits imprimés (Fig.I.1.c.) par des interconnexions brasées de différentes natures [1].



**Fig. I.1.** Illustration de l'assemblage électronique : (a) composants électroniques. (b) PCB vierge (P : Printed, P : Circuit, B : Board). (c) châssis (PCB + composants).

## 1. Notion de brasage :

En effet par abus de langage, le terme «soudage» est souvent employé à la place du terme « brasage».

Le brasage représente un de plusieurs méthodes d'assemblage des matériaux solides [2] (Fig. I.2), à l'aide d'un alliage d'apport de nature différente des pièces à assembler. Cet alliage d'apport présente une température de fusion inférieure à celle des pièces à réunir [1], et lui seul participe à la constitution du joint d'assemblage.

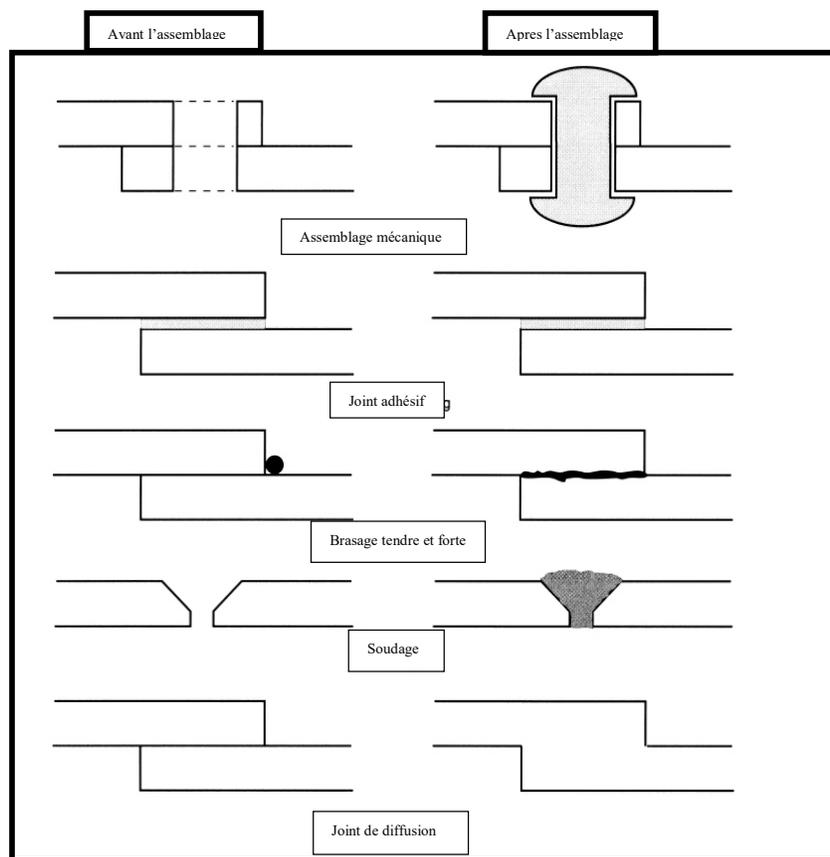


Fig. I.2. Méthodes principales d'assemblage des matériaux solides [2].

## 2. Types de brasage :

On distingue le **brasage tendre** et le **brasage fort**, selon que la température de fusion du métal d'apport est respectivement inférieure à 450°C ou supérieure à 450°C [2].

- Le brasage tendre : correspond le terme technique anglais « soldering»
- Le brasage fort : correspond le terme technique anglais « brazing»

Le soudage se distingue du brasage par le fait que l'une des pièces à assembler participe, par fusion, à la formation du joint, tandis que, dans le cas de brasage la liaison, alliage d'apport/pièces à assembler se fait par diffusion à l'interface, et les pièces métalliques restent à l'état solide [1].

### **3. Comparaison entre les brasures tendres et fortes :**

Ces deux types de brasage, qui ont été définis précédemment, et qui impliquent deux types de brasures (tendres et fortes), ne peuvent pas être distingués par la limite de la température (450°C), comme il est connu. Cette distinction a une origine historique : les brasures tendres les plus anciens sont les alliages d'étain, tandis que les brasures fortes sont les alliages de cuivre-zinc [2]. Mais, à plusieurs égards, il est fructueux de considérer les brasures tendres se rassemblent avec les brasures fortes. Ces problématiques, peuvent être justifiées par des raisons métallurgiques :

Le type de réaction métallurgique entre le métal d'apport et le métal de base est parfois employé pour différencier le brasage tendre de brasage fort. Habituellement, les brasures tendres réagissent pour former des phases intermétalliques. En revanche la plupart des brasures fortes forment des solutions solides. Cependant, cette distinction n'a pas la validité universelle, par exemple, les brasures fortes Ag-Cu-P réagissent avec des aciers pour former la phase interfaciale  $Fe_3P$ , d'une façon semblable à la réaction des brasures tendres à base de l'étain avec du fer et des aciers pour former  $FeSn_2$ .

D'autre part, des solutions solides forment entre les brasures tendres Ag-Pb et le Cuivre, juste comme elles font entre les brasures fortes à base de l'argent et le cuivre. En outre, ils existent des brasures fortes avec l'Al qui fondent en-dessous de 450°C.

La perpétuation de la distinction des brasures tendres de brasures fortes par la limite de la température 450°C, est due au gap significatif qui existe entre le point de fusion le plus élevé des brasures tendres disponibles qu'est le : Au-3Si qui fond à 363°C (Fig. I.3) , et le point de fusion le plus basse des brasures fortes qu'est l'alliage Al-4Cu-10Si qui fond à 524°C [2] (Fig. I.4).

On peut distinguer la majorité de brasures tendres et fortes disponibles, par les caractéristiques suivantes :

-La plupart des brasures tendres commerciales sont de composition eutectique, parce qu'il y a, habituellement, un besoin de réduire au minimum la température de traitement, avec une fluidité (du métal d'apport) raisonnable.

-Les brasures tendres sont intrinsèquement mous et doivent être conférées avec les propriétés mécaniques optimales, et généralement ceux-ci sont réalisés en ayant une microstructure à grains fins, qu'est une caractéristique d'un alliage eutectique [2].

-La plupart des brasures fortes possèdent une solubilité mutuelle entre leurs constituants, et sont donc offertes avec un large rang de compositions et de points de fusion.

-Le bas degré d'intersolubilité et la propension de former les composés intermétalliques possèdent par les alliages de brasages tendres, sont liés à leurs éléments constitutifs qui ayant une symétrie cristalline non cubique.

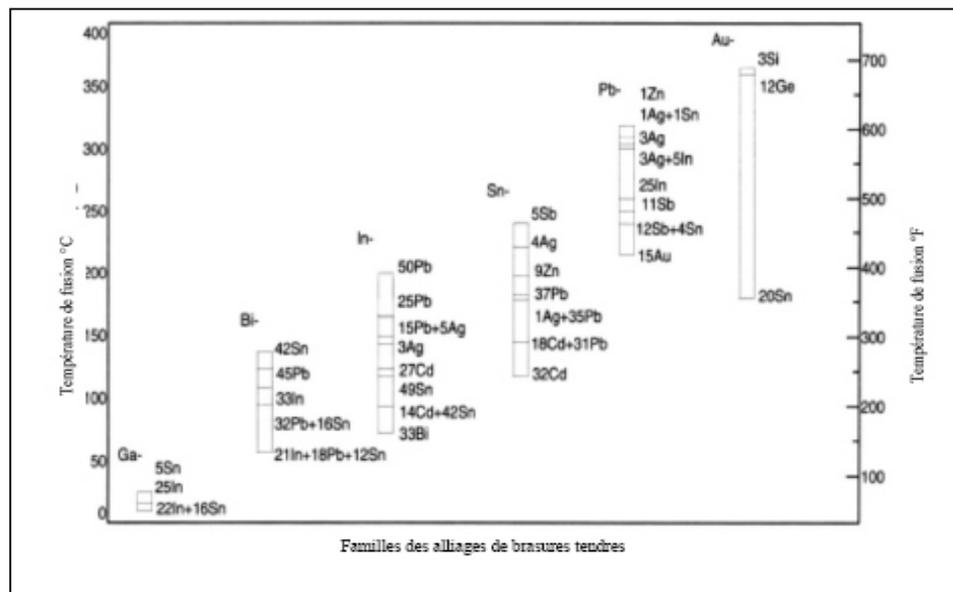


Fig. I.3. Principales familles des alliages de brasures tendres [2].

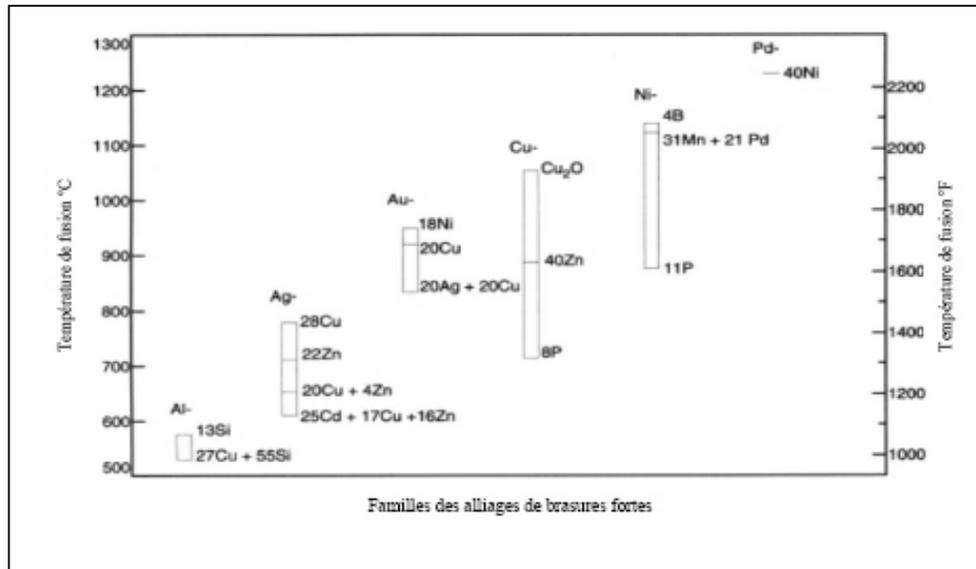


Fig. I.4. Principales familles des alliages de brasures fortes [2].

-Les brasures tendres sont appliqués aux températures qui varient entre 50 et 90% de leur point de fusion en degrés Kelvin. À ces températures relativement élevées, les alliages ne sont pas métallurgiquement stables, et la microstructure du joint va changer avec le temps.

-Les brasures fortes sont employées aux températures qui sont relativement beaucoup inférieures, et habituellement au-dessous de moitié de leur point de fusion en degrés Kelvin [2].

L'industrie électronique est amenée à effectuer un grand nombre de reports de composants sur circuits imprimés. Ces opérations sont réalisées le plus souvent par brassage tendre (communément appelé soudure Etain-Plomb) [3]. Ce dernier type de brasage, est le sujet de notre travail de recherche.

#### **4. La carte électronique (PCB) :**

##### **4.1. Définition :**

En principe, une carte électronique (PCB : Printed Circuit Board) a parfois appelé PWB (Printed Wiring Board, comporte : Une base, qui est un panneau mince de matériau isolant soutenant les composants, qui forment le circuit, et voies conducteurs, habituellement de cuivre, sur l'une ou deux face de la base [4].

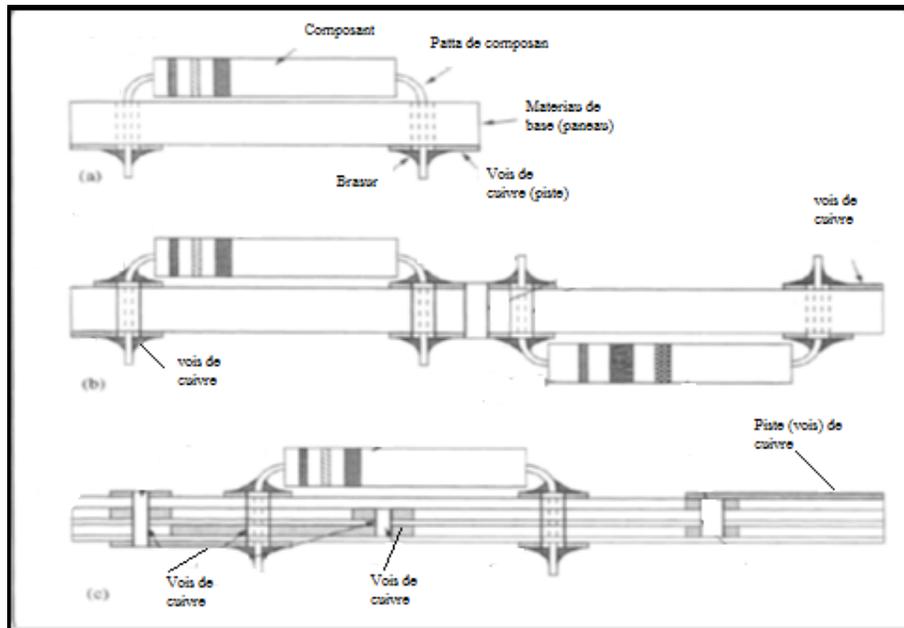
##### **4.2 Différents types de PCB :**

Les assemblages électroniques sont basées sur l'utilisation du cartes électroniques qui ont plusieurs formes de tenir les composants. Il y a trois catégories principales des cartes électroniques :

**4.2.1. Simple-face :** dans laquelle, le voie de cuivre est juste sur un coté de la base isolante (Fig. I.5.a).

**4.2.2. Double-face :** dans laquelle, le voie de cuivre est sur les deux faces de la base isolante (Fig.I.5.b).

**4.2.3. Multi-couche :** dans ce type, plusieurs couches de cuivre (voies de cuivre) sont incorporées dans un seul anneau (carte), stratifié avec des couches isolantes entre chaque couche de cuivre (Fig. I.5.c). Environ 30 couches sont typiquement faits en carte électronique multicouche d'environ 2mm d'épaisseur, le maximum connu par les auteurs est un panneau avec 60 couches, bien que les panneaux comme ceci soient peu communs et très couteux [4].



**Fig. I.5.** Différents types de PCB, (a)-simple-face, (b)-double-face, (c)- multi-couche [4].

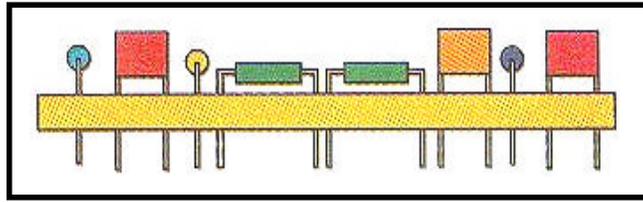
## 5. Les types de montage des composants sur les PCB :

On peut distinguer les différents types de montages des composants sur les circuits électroniques, selon que les composants soient piqués (traversants la carte), CMS (Composants Montés en Surface), ou mixte (traversants + CMS). Donc, on peut dire qu'il y a trois types de montages:

- Montage traversants.
- Montage tout CMS.
- Montage mixte (CMS + Traversants).

### 5.1. Montage traversants :

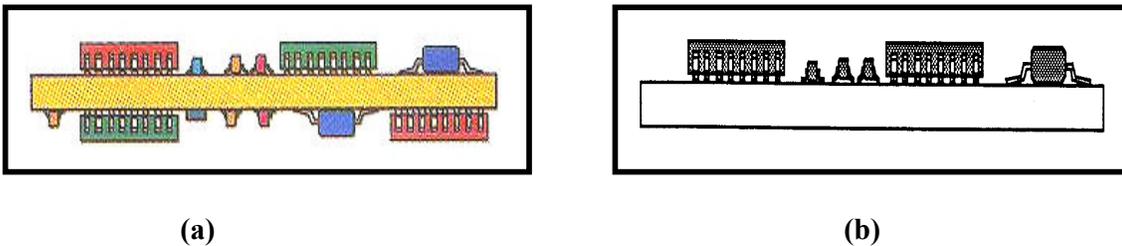
Ce type de montage est caractérisé par l'implantation de composants à insertion sur une face de carte (Fig. I.6).



**Fig. I.6.** Montage traversant.

### 5.2. Montage tout CMS :

Dans ce cas, les cartes ne comportent aucun composant à insertion. Les CMS peuvent être montés sur l'une ou l'autre face, ou sur les deux (Fig. I.7).



**Fig. I.7.** Montage tout CMS, **(a)**- CMS montées sur l'une face, **(b)**- CMS montées sur les deux faces.

### 5.3. Montage mixte :

Ce type de montage est caractérisé par l'implantation de composants CMS et de composants à insertion sur la même carte. Il présente plusieurs variantes :

- Carte simple face : CMS et composants à insertion sur la même face (Fig. I.8.a)
- Carte double face : CMS sur une face, composants à insertion sur l'autre face (Fig.I.8.b)
- Carte double face : CMS et composants à insertion sur une face, CMS sur l'autre face (Fig. I.8.c).

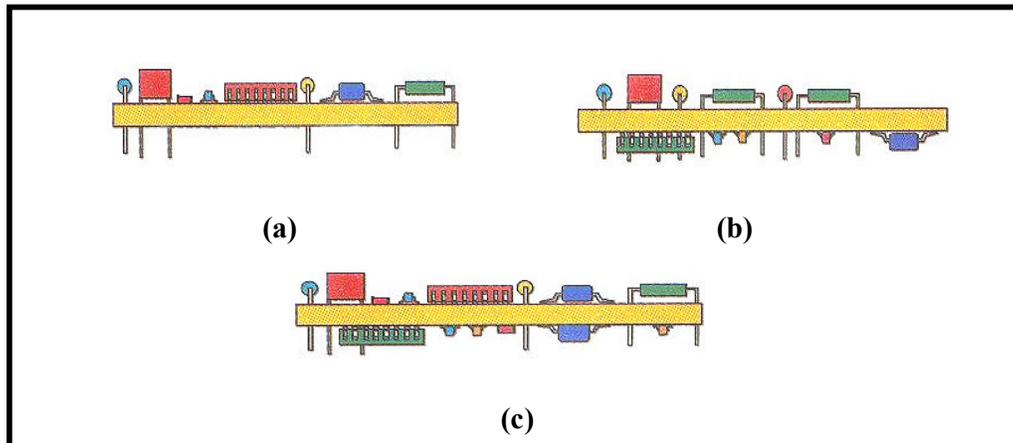


Fig. I.8. Montage mixte, (a)- carte simple-face, (b)- carte double face, (c)- carte double face.

## 6. Procédés de brasage des composants :

Il existe plusieurs méthodes pour classer les procédés de brasage.

### 6.1. Selon l'exécution du brasage : on distingue deux types.

**6.1.1. Brasage à la main :** le brasage à la main est habituellement exécuté à la main (Fig.I.9), il comporte l'utilisation des outils et des opérations spécifiques, qui dépend principalement des composants à braser.

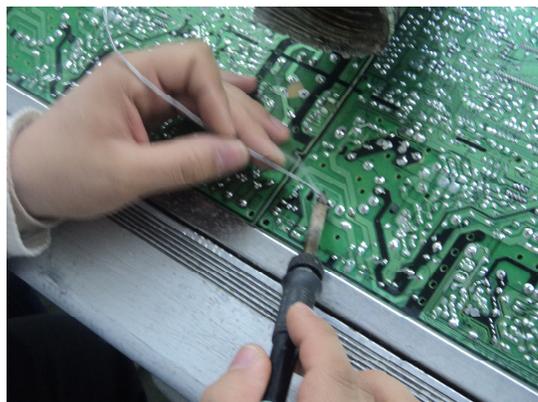


Fig. I.9. Brasage à la main.

**6.1.2. Brasage par la machine :** les méthodes de brasage par machine sont utilisées pour braser les composants dans, ou sur un PCB massif. Pour cette raison, elles s'appellent, méthode de brasage massive. Le premier but de cette méthode est d'accélérer la fabrication des assemblages électroniques [4].

**6.2. Selon la méthode de brasage :** on note qu'il y a deux catégories principales.

-Procédé de brasage CS.

-Procédé de brasage SC.

**6.2.1. Procédé de brasage CS :**

Ce procédé est connu en anglais sous le nom : Component/Solder process (CS), et parfois, s'appelle procédé de brasage à la vague (Wave) ou de l'écoulement (Flow). Cette méthode est utilisée en cas de mixité des composants CMS et traditionnels (traversants), ou bien des composants traversants seulement [4].

**6.2.1.1. Principe :**

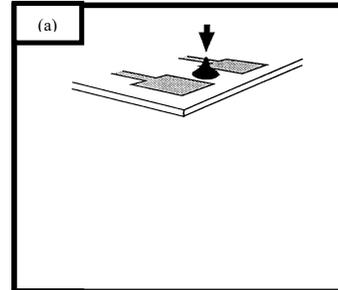
Le procédé de brasage CS se caractérise, en premier lieu, par la déposition des composants puis l'application de la brasure.

Pour assurer le maintien des composants CMS pendant cette opération, il est nécessaire de les coller préalablement sur la carte. Les colles utilisées en montage en surface sont des produits polymérisables. On sait que La polymérisation est une réaction chimique irréversible. Elle conduit au durcissement définitif d'un produit plus ou moins fluide lors de son application sur les éléments à coller.

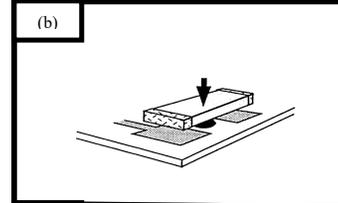
**6.2.1.2. Description du procédé :** (exemple d'un CMS)

Les principales étapes sont montrées da la figure I.10 :

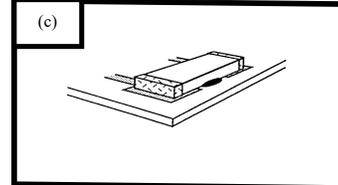
1-Pose d'un point de colle sur la carte (Fig. I.10.a).



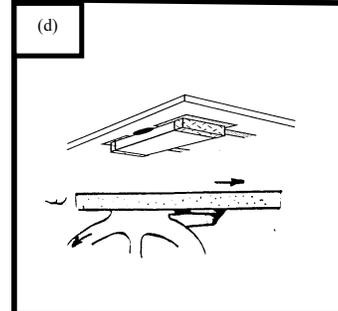
2-Pose du composant CMS sur le point de colle (Fig. I.10.b).



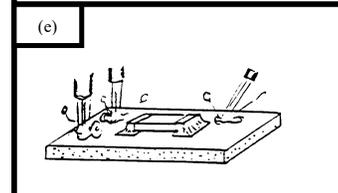
3-Polymérisation de la colle soit dans une étuve soit dans un four adapté (Fig. I.10.c).



4-Retournement du circuit et brasage à la vague (Fig. I.10.d).



5-Lavage du circuit (Fig. I.10.e).



**Fig. I.10.** Les principales étapes de brasage à la vague  
(Exemple d'un CMS).

### 6.2.1.3. Principe de base d'une machine à braser à la vague :

Une machine de brasage à la vague comprend un convoyeur à doigts ou à chariots chargé, pour transporter les cartes électroniques successivement dans les zones bien distinctes de fluxage, de préchauffage, de brasure et de refroidissement avant d'en être déchargé. Au

cours du brasage, un bain de brasure en fusion est amené au contact de la carte et de ses composants (Fig.I.11).

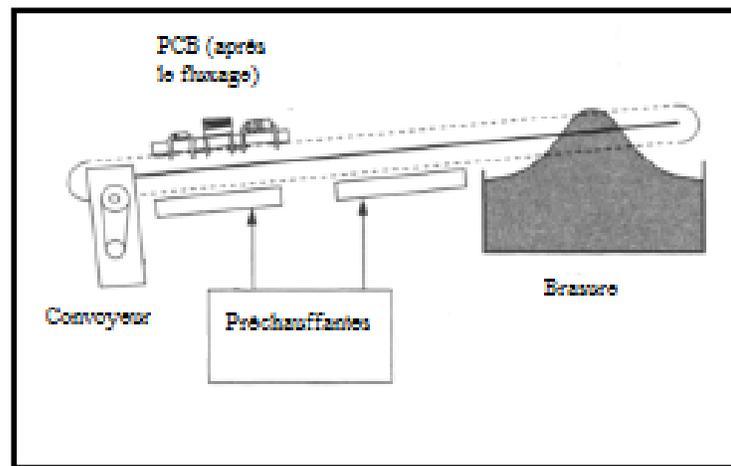


Fig. I.11. Principe de base d'une machine de brasage à la vague [4].

**6.2.1.3.1. Le fluxage :** La carte électronique (PCB) passe dans une machine de fluxage, dont le rôle est de projeter le flux uniformément sur l'ensemble de la carte. Ce flux, par ses propriétés de capillarité, diffuse dans les trous métallisés et nettoie les empreintes en ôtant toute oxydation, et par conséquent, favorise le brasage.

**6.2.1.3.2. Le préchauffage :** Cette opération a pour but de sécher le flux en volatilisant ses solvants. La température de préchauffage est de 80°C à 120°C. On note que Le séchage augmente la viscosité du flux. Car dans le cas d'une viscosité trop faible, le flux est chassé par la brasure en fusion et le mouillage devient insuffisant. Par ailleurs, le séchage accélère l'action chimique du flux sur les surfaces métalliques. Le préchauffage réduit également les chocs thermiques, qui entraînent, très souvent, une courbure de la carte pendant l'étape de brasure.

**6.2.1.3.3. La vague :** Après avoir traversé la zone de préchauffage, la carte arrive au-dessus de la vague de brasure qui est en renouvellement perpétuel, grâce à une pompe qui provoque et entretient ce mouvement.

**6.2.1.3.4. Le refroidissement :** la dernière étape, c'est le refroidissement qui est renforcé ou libre.

#### 6.2.1.4 Le profil de température :

Les températures à atteindre et la durée de leur maintien pendant les différents étapes de l'opération de brasage sont spécifiées et contrôlées. Ces différentes zones de température sont tracées graphiquement, comme ce représenté sur la Figure I.12. Ces zones de températures sont connues sous le nom de, profil de température d'une machine de brasage à la vague [4].

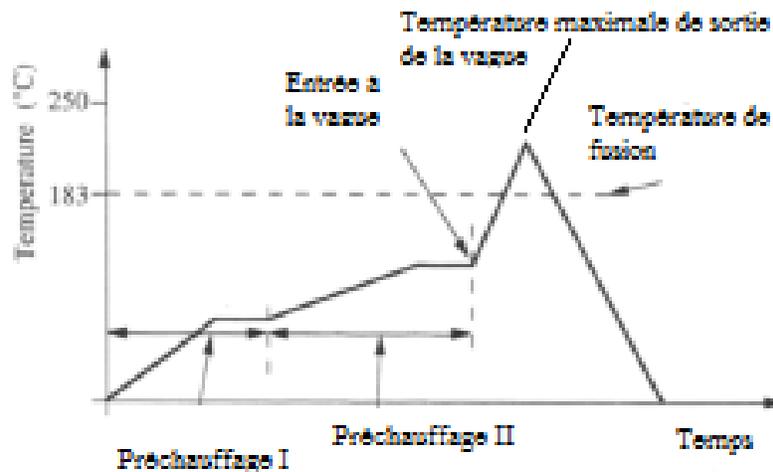


Fig. I.12. Profil type de température de brasage à la vague [4].

#### 6.2.2. Procédé de brasage SC :

Ce procédé est connu en anglais sous le nom : Solder/Component process (SC), parfois, s'appelle, procédé de brasage par refusion. La refusion est utilisée pour les cartes contenant soit uniquement des composants CMS, soit des composants traversants et CMS qui dont le brasage ne peut se faire que par cette technique.

##### 6.2.2.1 Principe :

Le procédé de brasage SC se caractérise, en premier lieu par la déposition des composants après l'application de brasure.

Les pâtes de brasage sont constituées de poudre d'alliage métallique sensiblement et de grains sphériques (d'un diamètre de quelques dizaines de microns) liée par un flux. Le flux (mélange d'acides organiques et de solvants) remplit trois fonctions majeures :

-Éliminer les oxydes et tout film surfacique présents sur le métal de base et sur les poudres de l'alliage d'apport et maintenir ces surfaces sans oxydes pendant l'assemblage.

-Optimiser la température des surfaces métalliques pendant le cycle de chauffage.

-Diminuer la tension de surface à l'interface métal/brasure et ainsi favoriser une bonne mouillabilité de la surface du métal par la brasure en fusion [1].

#### 6.2.2.2. Description du procédé :

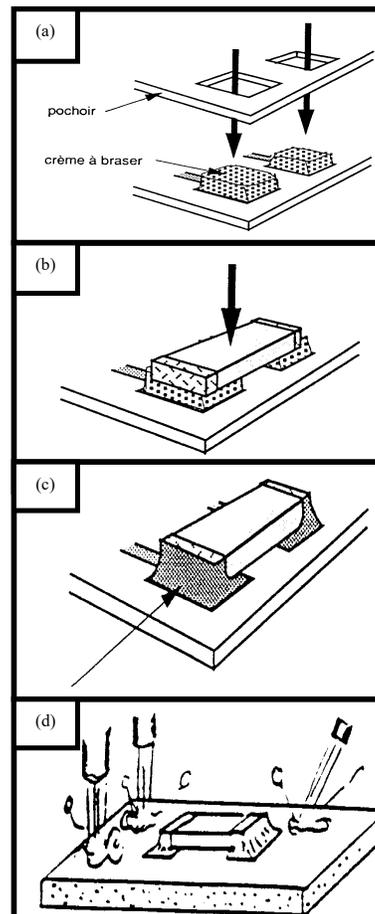
Les étapes principales du procédé de brasage SC sont illustrées par la figure I.13.

1-Sérigraphie de la pâte à souder (Fig. I.13.a)

2-Pose du composant CMS sur cette pâte (Fig. I.13.b)

3-Refusion de la pâte à souder (Fig. I.13.c)

4-Lavage de la carte (Fig. I.13.d)



**Fig. I.13.** Les étapes principales de procédé de brasage par refusion.

### 6.2.2.3. Principe de base d'une machine de brasage par refusion :

En générale, il y a deux types principales de machine de brasage par refusion on sait :

- Refusion au four à rayonnement infra-rouge.
- Refusion en phase vapeur.

#### 6.2.2.3.1. Principe de base d'une machine de refusion au four à rayonnement infra-rouge :

Les cartes électroniques sont convoyées à travers un four qui contient plusieurs zones chauffantes. Le tapis avance à vitesse constante et les composants subissent à une température qui s'élève progressivement de la zone de préchauffage à la zone de refusion. Puis les cartes électroniques traversent la zone de refroidissement et l'assemblage est terminé. (Fig. I.14)

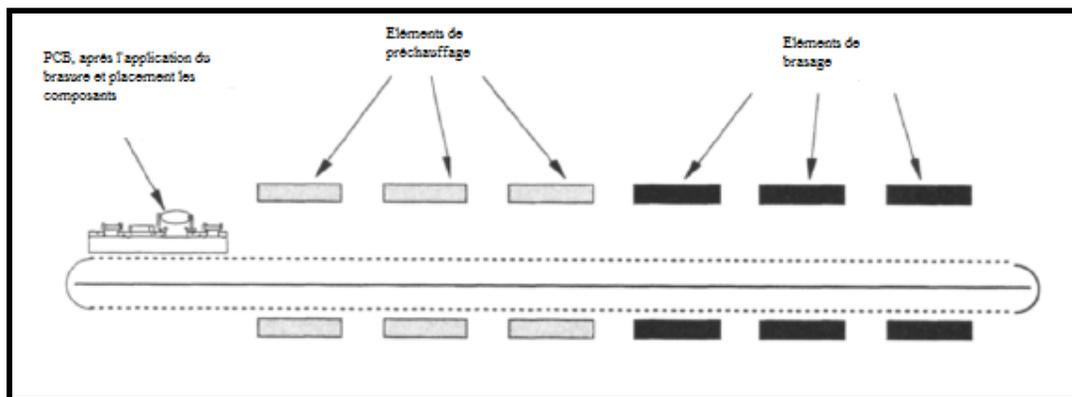
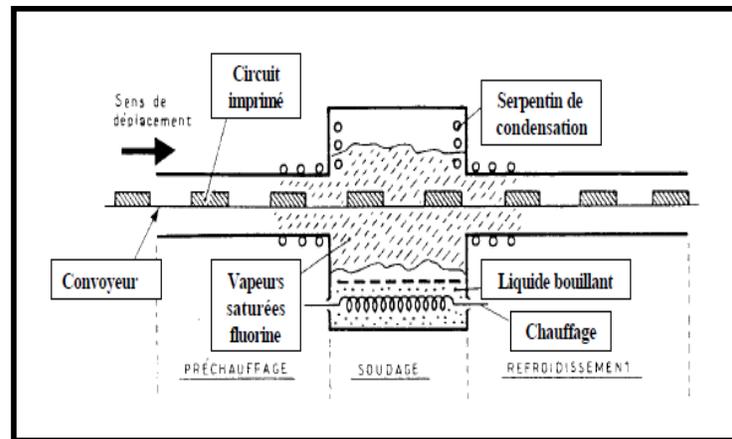


Fig. I.14. Principe de base d'une machine de refusion au four infra-rouge [4].

#### 6.2.2.3.2. Principe de base d'une machine de refusion en phase vapeur :

Le principe d'une machine de refusion en phase vapeur est d'échanger la chaleur latente de vaporisation d'un liquide inerte (neutre : hydrocarbures fluorés spéciaux appelés fluorine) avec le circuit (Fig. I.15).



**Fig.I.15.** Principe de base d'une machine de refusion en phase vapeur [4].

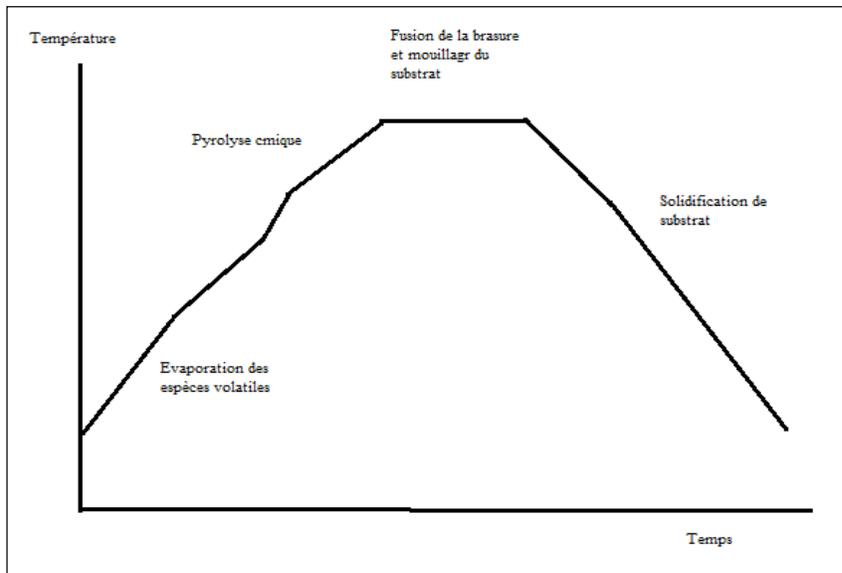
Le procédé d'assemblage, par refusion, des composants électroniques sur une carte, pour les deux types de brasage par refusion, comprend les étapes suivantes.

1. dépôt d'une crème à braser sur la carte.
2. positionnement des composants sur la crème.
3. refusion de la crème à braser.
4. nettoyage des résidus du flux contenus dans la crème à braser.

#### 6.2.2.4. Le profil de température :

La phase critique du processus d'assemblage est l'étape de refusion. Celle-ci permet de fondre les particules de l'alliage d'apport, de mouiller les surfaces à lier et enfin de solidifier la brasure pour assurer un lien solide entre le composant et la carte. Elle se déroule en trois étapes : (Fig. I.16).

1. Montée à la température de fusion, pendant laquelle le flux joue son rôle d'activateur et l'alliage mouille les surfaces en présence.
2. Palier la température de brasage.
3. Refroidissement.



**Fig. I.16.** Profil de température de procédé de refusion.

Le contrôle de la vitesse de passage de la carte électronique est essentielle, afin de ne pas détériorer les circuits par choc thermique et d'évaporer les espèces volatiles provenant du flux. On note aussi que le temps de maintien et la température du palier de brasage sont des paramètres critiques. En effet, la qualité du mouillage et ainsi la force de liaison entre le joint de brasure et les pièces à assembler, dépend de ces paramètres [1].

## 7. Les procédés de brasage des différents types de montage :

Les organigrammes ci-dessous montrent les différents procédés de brasages dans chaque type de montage.

### 7.1. Montage traversants :

L'assemblage des composants traversants sur une carte électronique comprend deux étapes (Fig. I.17).

- Insertion des composants.
- Brasage des composants dans le PCB.

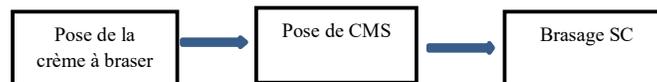


**Fig. I.17.** Organigramme des procédés de brasage de montage traversants.

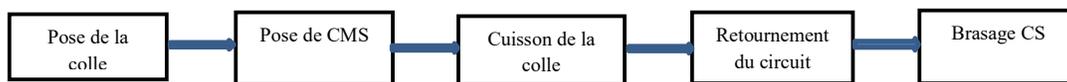
## 7.2. Montage tout CMS :

### 7.2.1. Tout CMS sur une seule face :

Deux processus de brasage, SC (Fig. I.18) et CS (Fig. I.19), peuvent être employés pour braser ce montage Fig. I.18.



**Fig. I.18.** Organigramme de procédé de brasage (SC) de montage tout CMS sur une seule face.



**Fig. I.19.** Organigramme de procédé de brasage (CS) de montage tout CMS sur une seule face

### 7.2.2. Tout CMS sur les deux faces :

L'assemblage dans le montage tout CMS sur les deux faces implique l'utilisation des procédés de brasage CS et SC en même temps (Fig. I.20).

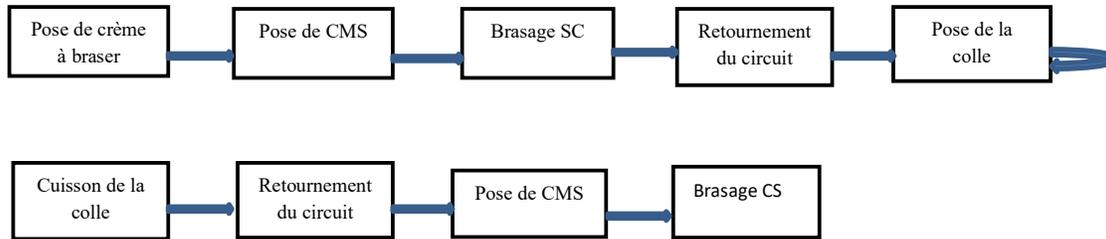


Fig. I.20. Organigramme de procédé de brasage de montage tous CMS sur les deux faces.

### 7.3. Montage mixte :

#### 7.3.1. Carte double face : CMS sur une face, composants traversants sur l'autre face :

L'assemblage dans ce montage implique l'utilisation de procédé de brasage CS seulement, comme il est montré dans la figure I.21.

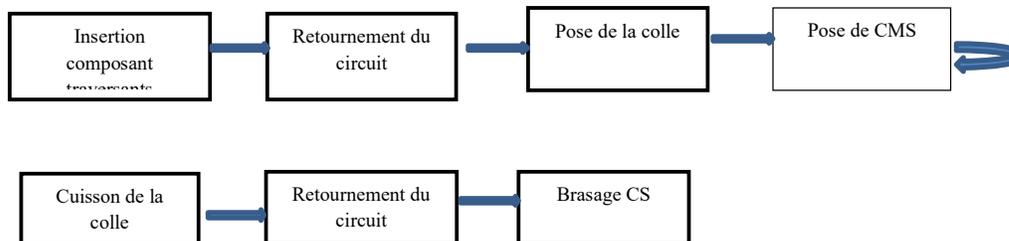
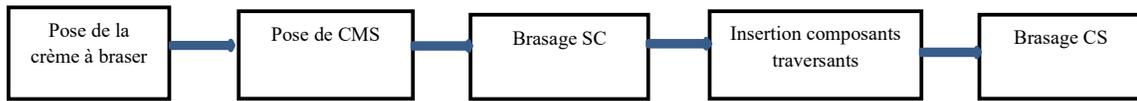


Fig. I.21. Organigramme de procédé de brasage de montage, carte double face : CMS sur une face, et composants à insertions à l'autre face.

#### 7.3.2. Carte simple face : CMS et composants traversants sur la même face :

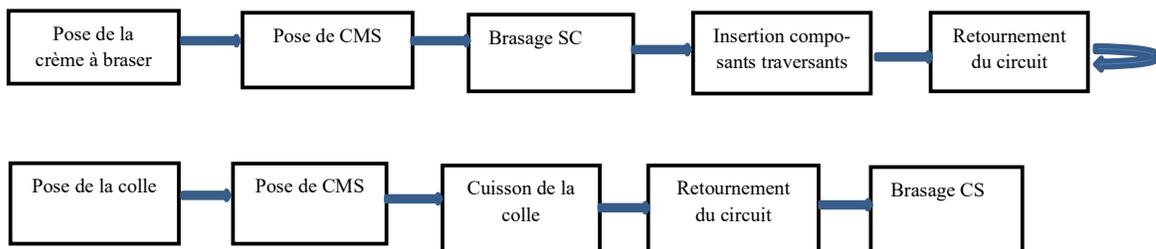
Dans ce cas, il faut utiliser les deux procédés de brasage, CS et SC en même temps (Fig. I.22).



**Fig. I.22.** Organigramme de procédé de brasage de montage, carte double face : CMS et composants à insertion sur la même face.

### 7.3.3. Carte double face : CMS et composants à insertion sur une face, CMS sur l'autre face :

Les deux procédés de brasage CS et SC doivent être utilisés dans ce type de montage (Fig. I.23).



**Fig. I.23.** Organigramme de procédé de brasage de montage, carte double face : CMS et composants à insertion sur une face, CMS sur l'autre face.

## **Partie B: les brasures et leur métallurgies**

Cette partie seront présentés une généralité sur les systèmes d'alliages de brasure. On doit prendre en considération le matériau de base, avec lequel la brasure est employée, parce que la convenance d'une brasure dépend en grand partie de sa compatibilité avec les matériaux de base.

### **1. les brasures Sn-Pb :**

#### **1.1 Histoire de brasures molles contenant le plomb et l'étain :**

L'histoire d'assembler avec métaux comme le plomb (Pb) et l'étain (Sn), ou leurs alliages remonte à plusieurs millier d'années [7]. Malheureusement, l'évidence archéologique de l'utilisation du Pb et de Sn est absente pour deux raisons principales. D'abord, ces éléments sont dégradés par la corrosion sous l'exposition à long terme aux eaux souterraines et au sol, donc, les objets façonnés réels sont rares. Le second, il y a une absence des manuscrits écrits de l'utilisation de Pb et de Sn. Parce que, telles pratiques ont été généralement exécutées par les esclaves et les artisans de la classe ouvrière. Par conséquent, les historiens ou les individus de la bourgeoisie, ayant la capacité de lire et écrire, ont eu un très peu d'intérêt pour ces matériaux et les processus associés [6].

Le premier de ces éléments utilisés pour l'assemblage était le Pb. Le plomb a été employé pour assembler le cuivre par les mésopotamiens autour de 3000 avant J.C. en raison de sa disponibilité dans la région. Aussi bien que sa basse température de fusion (327°C) qui étaient compatibles avec les fourneaux et les fours (feu en bois). L'étain a été exploité autour de 1900 avant J.C. par les Phéniciens, Celtes et Gaulois de l'Europe Nordique, où les gisements de minerai étaient abondants. Les brasures molles ont été employées par ces civilisations pour assembler les outils de Cuivre ou les alliages et les batteries de cuisine. Les Romains ont étudiés les alliages de Sn et de Sn-Pb et les ont employés pour leurs aqueducs [5].

Durant la révolution industrielle du 19<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation des brasures molles se étendus (au-delà des applications aux outils légers et la fabrication du bijou).

La disponibilité des sources de chaleur portatives qui ont employé les gaz combustibles ou l'électricité a permis d'exécuter le brasage aux plusieurs emplacements. Le brasage avec le Sn-Pb a trouvé l'utilisation dans la tuyauterie du conduit d'eau et de gaz, la construction des échangeurs de chaleur, les récipients de nourriture et l'assemblage, aussi bien que la construction de feuilles métalliques [5].

Le 20<sup>ème</sup> siècle est l'ère de l'électronique, où les brasures Sn- Pb ont eu leur rôle. En effet les premiers raccordements électriques dans l'équipement de radio et de télécommunications étaient les assemblages mécaniques. L'application de brasure à ces raccordements les a empêchés de se desserrer, ce qui réduisant la charge statique dans la transmission et la réception de signal. Les alliages eutectiques (Sn-37Pb) et proche-eutectiques (Sn -50Pb, 60Sn-40Pb), qui ont des températures de fusion bas, ont été employés pour ces applications.

L'utilisation des alliages Sn-Pb au joint de brasure est restée comme méthodologie primaire d'assemblage dans l'industrie électronique aujourd'hui [5].

### **1.2 Les attributs des brasures Sn-Pb :**

Il est important d'apprécier le rôle des brasures Sn-Pb dans la miniaturisation et la fabrication à haute-volume des assemblages électroniques. Ces deux attributs sont résulté de deux causes : peu-couteux (l'électronique de grand publiques, par exemple, téléphone de cellules, ordinateurs individuels, etc...), et ceci grâce à la disponibilité de ces minerais dans nombreux pays autour du monde et la facilité de recyclage de ces métaux. Aussi bien, le haut-fonctionnement (les produits militaires disponibles aujourd'hui, les systèmes d'armes "fûtes").

### **1.3 Métallurgie physique liée au système Pb-Sn :**

L'importance de comprendre la métallurgie physique du système d'alliage Sn-Pb provient de la relation de propriétés-microstructure. C'est-à-dire, la microstructure d'un alliage Sn-Pb, ou n'importe quel matériau, détermine ses propriétés mécaniques. Dans le cas des

brasures Sn-Pb, cette relation est particulièrement critique [6] parce que la microstructure de ces matériaux est sensible aux vitesses de refroidissement utilisé dans un assemblage, et la microstructure peut être aisément changée pendant la durée de vie de service [5].

### **1.3.1 Microstructures et le diagramme de phase du système Sn-Pb :**

La microstructure des brasures Sn-Pb peut être décrite par le diagramme de phase d'alliage binaire. Le diagramme de phase représente le matériau à l'équilibre, à proprement parler, l'équilibre est réalisé quand le matériau a été refroidi à une vitesse très lente. Malheureusement, une microstructure d'équilibre n'est pas souvent réalisée dans les brasures Sn-Pb en raison des conditions qui règnent dans les processus de fabrication (les vitesses de refroidissement qui sont relativement rapides) et les applications qui utilisent ces matériaux (même à la température ambiante) [5].

La figure I.1 montre le diagramme de phase d'alliage binaire pour le système Sn-Pb [7]. Les quantités de pourcentage de Pb et de Sn sont massiques. Le calcul du pourcentage atomique de Sn peut être calculé par l'équation 1. Le pourcentage atomique de Pb est : (100% - Sn% at.).

$$\text{Pourcentage atomique de Sn} = [A / (57,3+0,427A)] \times 100\% \quad (1)$$

Dans l'équation 1, A est le pourcentage en poids de Sn.

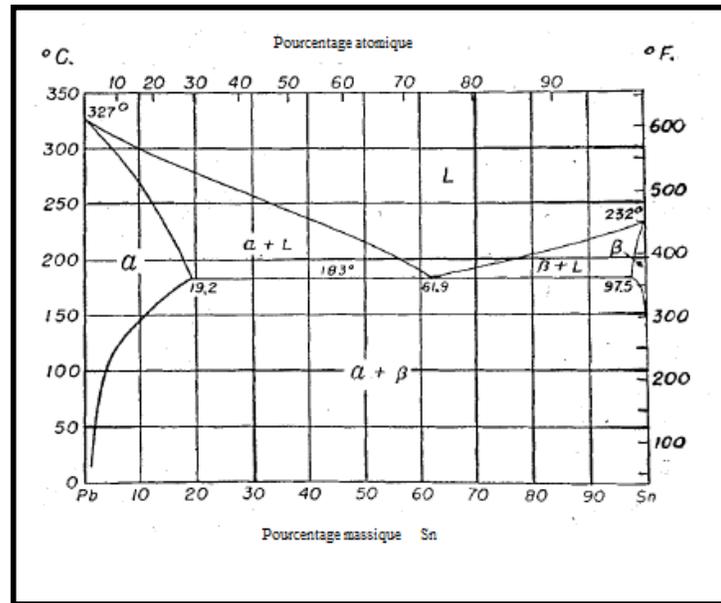
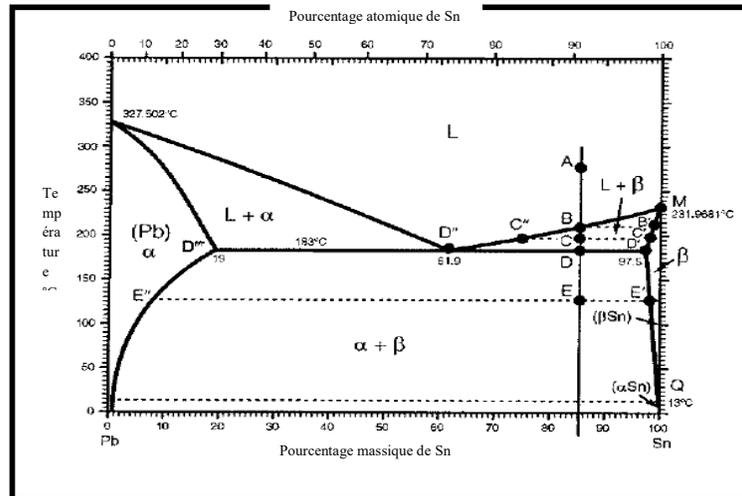


Fig. I.1. Diagramme de phase du système Sn-Pb [8].

### 1.3.1.1. Exemples d'alliages de brasure Sn-Pb :

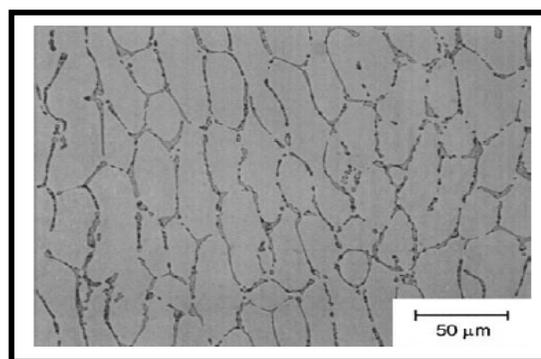
#### 1.3.1.1.1. Exemple 1 : 15Pb-85Sn :

La figure I.3 montre une ligne correspondant à l'alliage 15Pb-85Sn, la ligne qu'a été dessinée, représenter la composition hypereutectique, où la concentration de Sn est dans la gamme,  $61,8 < \text{Sn}\% \text{ mass.} < 97,5$ , les phases d'équilibres décrites, suivant cette ligne, sont en fonction de la diminution de température.



**Fig. I.2.** Diagramme de phase de Sn-Pb représente la composition hyper-eutectique 15Pb-85Sn [9].

La composition des phases  $\alpha$  et  $\beta$  dépend de la vitesse de refroidissement de l'alliage 15Pb-85Sn. Au point E (125°C), la composition des phases  $\alpha$  et  $\beta$  correspondent aux points E'' et E' respectivement. A la température ambiante (25°C) le diagramme de phase indique que la phase  $\alpha$  est 99Pb-1Sn et la phase  $\beta$  est effectivement 100Sn. Une micrographie optique de la brasure 15Pb-85Sn est montée dans la figure I.4, cet échantillon a été élaboré à une vitesse de refroidissement de 10°C/min. Les régions claires sont la phase  $\alpha$  (riche en Sn) et les régions foncées sont la phase  $\beta$  (riche en Pb).



**Figure I.3.** Micrographie optique de la structure de brasure 15Pb-85Sn. La vitesse de refroidissement produisant cette microstructure était 10°/min [5].

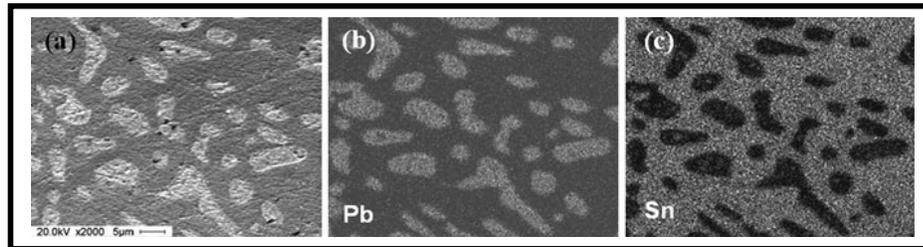
Les vitesses de refroidissement plus rapides peuvent produire des dendrites pro-eutectiques riches en Sn dispersées dans la microstructure [10]. Ce qui implique que la microstructure dépend de la vitesse de refroidissement.

#### 1.3.1.1.2. Exemple 2 : 38,1Pb-61,9Sn :

La figure I.2 montre que l'alliage eutectique est 38,1Pb-61,9Sn. Mais, il y a une différence dans la désignation du point eutectique, la plus part des auteurs considèrent que la composition eutectique est 63%Sn-37%Pb, alors que les études récentes considèrent que l'alliage eutectique est 38,1Pb-61,8Sn [4].

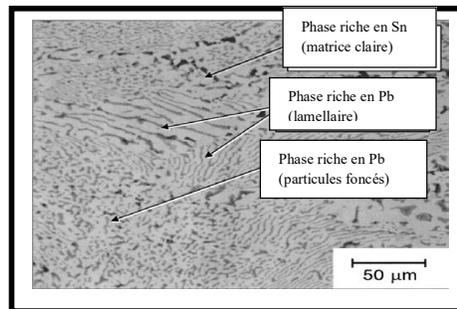
L'eutectique 37Pb-63Sn est un système biphasé, se compose d'un mélange d'une phase riche en Pb, c'est la phase  $\alpha$  (solution solide de Sn dans Pb) et d'une phase riche en Sn, c'est la phase  $\beta$  (solution solide de Pb dans Sn) [11]. La solidification de la composition se produit à une température constante [5]. La réaction eutectique,  $L \longrightarrow \alpha + \beta$ , a lieu à 183°C, et la quantité massique de la phase  $\beta$  est de 45,5%, cette valeur est calculé par la règle des segments inverses  $[(97,5-61,9)/(97,5-19,2) = 45,5]$ , par conséquent la quantité de la phase  $\alpha$  est de 54,5%.

Les micrographies par MEB /EDX dans la Figure I.5.b,c montrent la distribution du Pb et Sn. Les régions foncées et claires montrés dans la figure I.5a sont la phase  $\beta$  et  $\alpha$  respectivement [11].

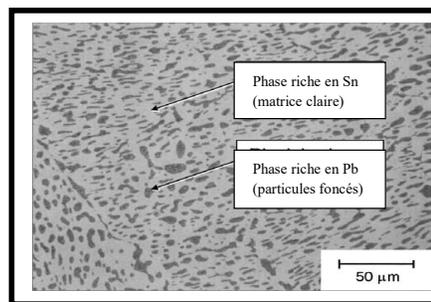


**Fig. I.4.** (a) Micrographe MEB/EDX de la microstructure de brasure Sn-37Pb, (b) Distribution élémentaire de Pb (régions claires) et (c) Distribution élémentaire de Sn (régions claires) [11].

La microstructure de l'alliage eutectique Sn-Pb, dépend fortement à la vitesse de refroidissement [10]. Pour une vitesse de refroidissement très lente on aura une structure lamellaire avec des particules de la phase  $\alpha$  dispersés dans une matrice riche en Sn ( $\beta$ ) Fig. I.5 [5].



**Fig. I.5.** Micrographie optique montrant la microstructure Lamellaire de brasure 37Pb-63Sn, résultat d'une vitesse de refroidissement de 10°C/min [5].

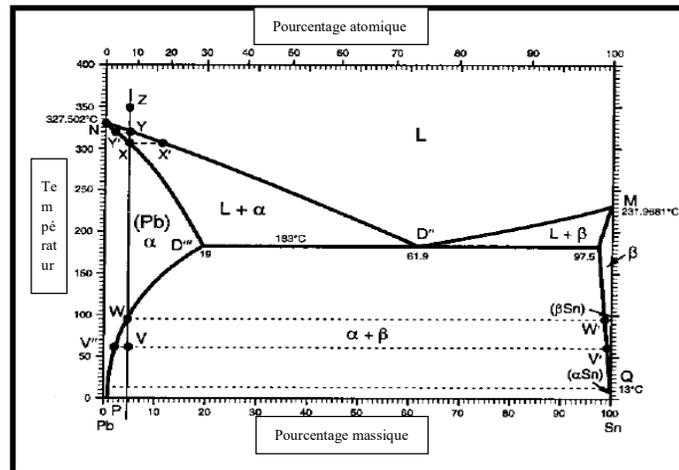


**Fig. I.6.** Micrographe optique de la structure de brasure Sn-37Pb après un test de vieillissement à 70°C pendant 400 jours [5].

Le micrographe montré dans la figure I.7, illustre la dernière microstructure, mais elle a été produite à partir d'un échantillon vieilli à 70°C pendant 400 jours [5].

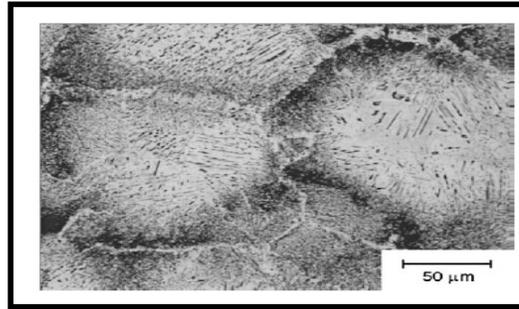
### 1.3.1.1.3. Exemple 3 : 95Pb-5Sn :

Le troisième alliage utilisé pour illustrer les caractéristiques du système Sn-Pb est l'alliage 95Pb-5Sn. La ligne de cet alliage est montrée dans la figure I.7. La propriété unique de cet alliage, qui représente tous les alliages ayant un contenu de Pb qui excède 81%mass. et qu'elle solidifie sans réaction eutectique.



**Fig. I.7.** Diagramme de phase de Sn-Pb représente la composition pro-eutectique 95Pb-5Sn [5].

La figure I.8 illustre la microstructure de l'alliage 95Pb-5Sn, résultant d'une vitesse de refroidissement de 10°C/min. Cette vitesse de refroidissement est suffisamment lente, telle que la microstructure résultante est une représentation raisonnable d'équilibre. La phase β se précipité le long des joints des grains de la phase α, d'une manière plus répandue. Sous une vitesse de refroidissement très rapide, on peut observer une seule phase riche en Pb (α), qui est sursaturée en Sn. la vitesse de précipitation de Sn et ainsi la formation de la phase β, dépendrait de la température et du temps [5].



**Fig. I.8.** Micrographie optique de la microstructure de brasure 95Pb-5Sn. La vitesse de refroidissement était 10°C/min [5].

#### **1.4. Métallurgie physique de formation de composé intermétallique avec le système Sn-Pb :**

Le principal paramètre d'alliage d'apport est que la température de fusion est inférieure à celle de métal de base. L'adhérence, qu'est formée par une réaction à l'interface, implique certains ou tous les éléments constitués du métal d'apport ou du métal de base. Ces réactions peuvent avoir lieu pendant le processus du brasage, et peuvent continuer même après la mise en service [5]. Donc, la formation des composés intermétalliques à l'intérieur de la matrice de brasure et entre les brasures/substrats est inévitable [11].

##### **1.4.1. La réaction avec le cuivre (Cu) :**

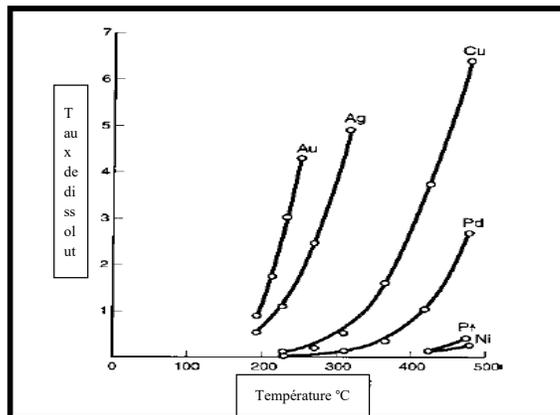
Seulement le constituant Sn, parmi les deux éléments qui comportant les brasures Sn-Pb, réagit directement avec le métal de base. Le métal de base le plus généralement utilisé est le cuivre.

On observe deux phases de composé intermétalliques : la phase  $\eta'$  ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) et la phase  $\varepsilon$  ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ) [12]. La phase  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  est favorisée quand les brasures Sn-Pb riche en Sn (compris l'eutectique 37Pb-63Sn) sont joints au cuivre [13]. On observe une épaisseur nominale de couche (0,5-1,5 $\mu\text{m}$ ) dans les joints brasés [14]. L'exposition de métal de base (Cu) aux brasures fondues Sn-Pb pendant plusieurs minutes à température élevée (>292°C), cause seulement une augmentation très légère de l'épaisseur de la couche de composé intermétallique [13]. Quand la teneur en Sn de la brasure est réduite, approximativement à

27% mass. la composition intermétallique favorise la formation de phase riche en Cu, stœchiométrie  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . La couche  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  se forme réellement à partir d'une initiale sous couche  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  [5].

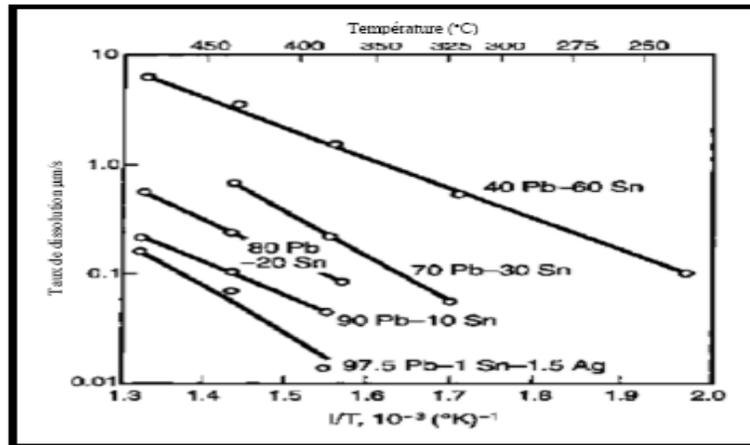
#### 1.4.1.1. La réaction à l'état liquide :

En présence de la brasure fondue, les réactions d'interface incluent des processus simultanés de la dissolution de métal de base et la formation de composé intermétallique. Pour le cas de brasure fondu 40Pb-60Sn et des métaux de base, Au, Ag, Pd, Pt, Ni et Cu, l'ampleur de la dissolution dépend de la composition du métal de base, comme il est démontré dans la figure I.9 [15].



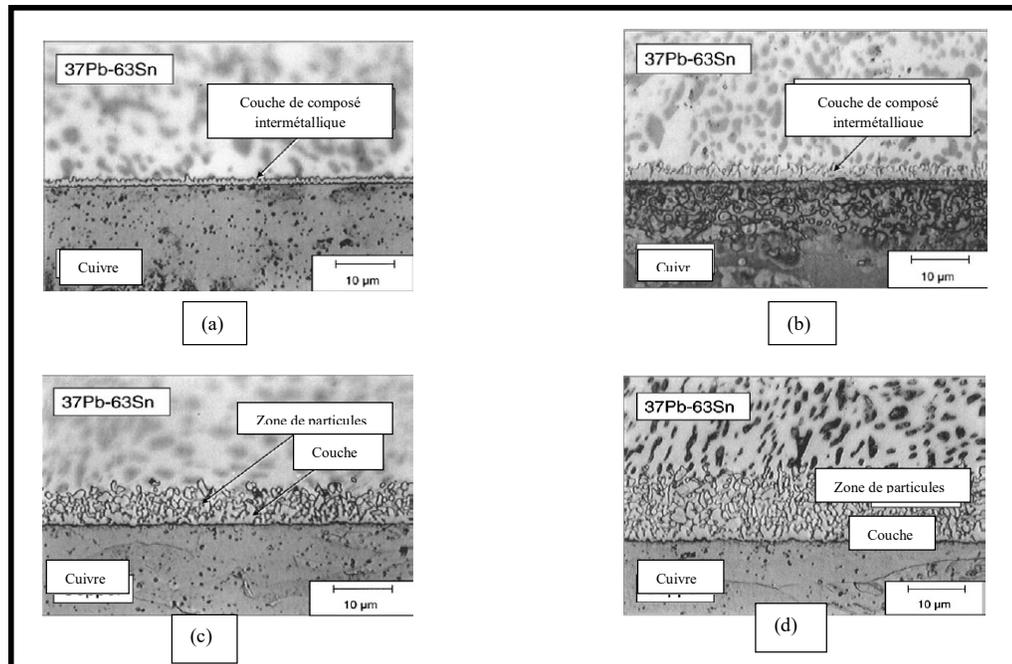
**Fig. I.9.** Taux de dissolution de Au, Ag, Pd, Pt, Ni et Cu dans la brasure fondu 40Pb-60Sn en fonction de la température de brasage [15].

Le taux de dissolution de Cu, spécifiquement en fonction de la température pour plusieurs compositions fondues Pb-Sn, est montré dans la figure I.10 [16].



**Fig. I.10.** Taux de dissolution de Cu en fonction de la température de fusion du brasure pour différentes compositions de Sn-Pb [16].

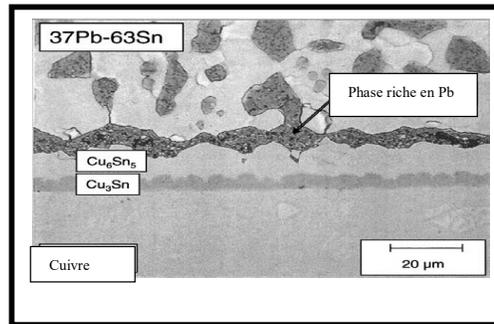
La dissolution de métal de base peut, potentiellement, saturer le champ fondu voisin de brasure Sn-Pb. Lors de la solidification, le métal de base, M, précipite à l'extérieur comme des particules de composé intermétallique  $M_xS_ny$ , qui se trouvent près de, et à, l'interface. Par exemple, le Cu diffusé se précipite comme de particules  $Cu_6Sn_5$ , qui forment une zone à côté d'une couche intermétallique contiguë. Des micrographes optiques ont été pris de l'interface de 37Pb-63Sn, après que le métal de base ait été exposé aux brasures fondu (215°C) pour 5, 60, 300, et 900 secs [6] (Fig. I.11).



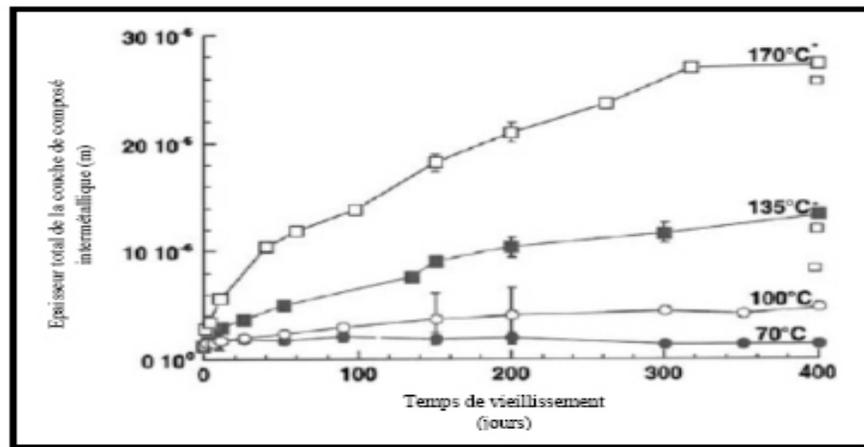
**Fig. I.11.** Micrographes optiques de la région d'interface produite par l'exposition du métal de base Cu à brasure fondue Sn-37Pb (215°C) pour (a) 5 sec. (b) 60 sec. (c) 300 sec. et (d) 900 sec. [5].

#### 1.4.1.2. La réaction à l'état solide :

La croissance de couche de composé intermétallique peut continuer après la solidification du joint. L'élément Sn réagit avec le métal de base, et l'élément rejeté Pb, forme une phase riche en Pb entre la couche de composé intermétallique et le champ de brasure (fig. I.12). La cinétique de la réaction a été étudiée par les expériences de vieillissement. La phase  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  apparaît comme une sous-couche à l'interface  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\text{Cu}$  après un temps prolongé et/ou une température de vieillissement élevé. Le graphe dans la figure I.13 montre l'effet de temps et de la température sur l'épaisseur de la couche de composé intermétallique pour le couple 37Pb-63Sn/Cu [18]. La sous-couche  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  est apparue seulement sous les températures de 135°C et 170°C [5].



**Fig. I.12.** Micrographie optique de l'interface entre la brasure Sn-37Pb et le cuivre, montrant la couche de composé intermétallique, qui s'est développée après vieillissement à 135°C pendant 400 jours [17].



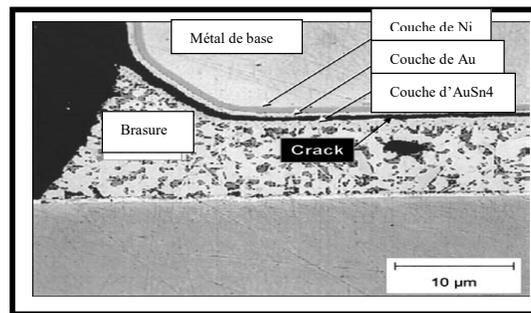
**Fig. I.13.** Epaisseur totale de la couche de composé intermétallique ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Cu}_3\text{Sn}$ ) en fonction du temps de vieillissement et la température du couple Sn-37Pb/Cu [17].

#### 1.4.2. L'interaction avec d'autres métaux :

Quand les brasures à base de Sn sont brasées sur le Cu, le composé intermétallique le plus commun formé est  $\text{Cu}_5\text{Sn}_6$ , et qui se forme quand la brasure fondue mouille le Cu [18]. Généralement, en pratique, on utilise les électrodes Nickel et l'Or sur la surface de Cu comme une couche de protection contre l'oxydation entre la brasure et la couche de Cu. La couche de l'Or est très mince et complètement dissoute dans la brasure

pendant le brasage. Ainsi la mouillabilité se produit vers l'électrode de Ni qui contient le phosphore (P), et le composé intermétallique  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  sera formé entre la brasure qui est riche en Sn et la couche de Ni [11].

Des ruptures ont été observées à l'interface  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4/\text{Ni-P}$  (Fig. I.14). Les raisons possibles de ces ruptures sont : (1) la ségrégation de P à l'interface (2) contamination ou oxydation pendant l'électrodéposition de Au-Ni ou après, par l'intermédiaire de la diffusion et (3) fragilité du Ni-P et  $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  [19].



**Fig. I.14.** Micrographie optique montrant une fissure dans un joint de brasure Sn-37Pb avec une couche d' Au (le fissure a formé à l'interface entre le composé intermétallique et la couche restante d' Au [5].

## 2. Les brasures sans plomb :

Les alliages d'apport utilisés pour le brasage sont choisis pour leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques, ils doivent être métallurgiquement compatibles avec les finitions des plots des connexions des composants et du circuit imprimé. Ils doivent également mouiller correctement les surfaces à braser, c'est-à-dire avoir une bonne adhérence avec ces surfaces, et enfin avoir une viscosité adaptée aux méthodes de brasage industriel [20]. Les alliages généralement retenus sont basés sur le système Etain-Plomb ; l'alliage eutectique Sn-37Pb et proche eutectique Sn-40Pb, mais tous ces alliages contiennent un élément très toxique, c'est le Plomb [1]. Donc il faut expliquer pourquoi le Plomb doit être banni des équipements électriques et électroniques.

### 2.1. Définition :

Il n'y a aucune définition de brasures sans-plomb admise universellement. En fait, même l'EU n'a pas fourni (et non requis pour fournir) une définition jusque à 1 an après que la directive de RoHS (Restriction Of certain Hazardous Substances) entre dans l'effet. Cependant, les divers organismes d'industrie ont adopté des teneurs maximum de 0,1% en plomb résiduelles [5]. Cette valeur semble quelque peu arbitraire (c.-à-d., non basé sur une certaine valeur de seuil relative à la santé).

### 2.2. Interdiction de l'utilisation du plomb dans les équipements électriques :

Le plomb est un métal lourd très toxique [21]. Approximativement, 5 millions de Tonnes de Pb sont consommées annuellement, alors que les batteries représentent la plus grande application de Pb (>80%) (Tableau I.1).

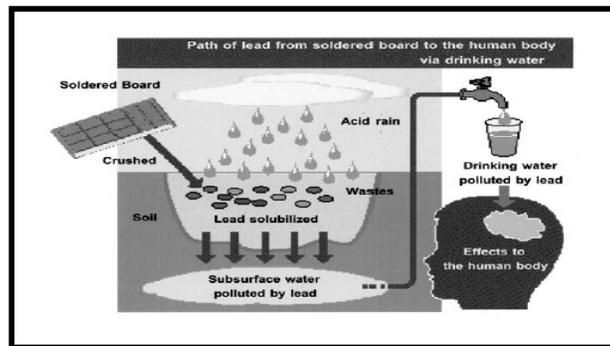
Produit	Consommation ?
Batteries de stockage	80,81
Oxides utilisés pour les verres, produits céramiques, les colorants, et les produits chimiques	4,78
Munitions (Ammunition)	4,69
Plomb de feuilles	1,79
Couvertures de cables	1,40
Métaux de bâti	1,13
Billetes et lingots de laiton et de bronze	0,72
Pipes	0,72
Brasures (exclusion de brasures électroniques)	0,70
Brasures électroniques	0,49
Miscellaneous	2,72

**Tableau I.1.** Consommation de plomb (Pb) par les produits [5].

Le plomb et ses composés sont parmi les produits chimiques produisant des risques importants pour la santé et pour l'environnement [23]. Le plomb est lié fortement aux protéines [21]. La présence du plomb et les problèmes de pollution qui en résultent lorsque les cartes électroniques vieilles sont abandonnées, ne sont plus tolérées par la législation. Dans

la nature, la brasure peut se décomposer plus ou moins rapidement sous l'effet d'acides contenus dans le sol ou provenant des eaux de pluie et peut venir polluer la nappe phréatique [22]. Il peut aussi, causer des dommages sur le système nerveux, des reins, la circulation sanguine de l'homme, anémie,...

La dissolution du plomb dans les eaux souterraines aboutit à la chaîne alimentaire animale et humaine (fig. I.15). Deux mécanismes possibles ont été décrits dans la littérature [22] :



**Fig. I.15.** Le chemin suivi par le plomb jusqu'à qu'il arrive au corps humain [5].

L'organisation mondiale de la santé (OMS) a établi une dose provisoire hebdomadaire tolérable de 25mg/Kg de poids corporel pour les enfants et les adultes [21]. C'est pourquoi, les états unis et le parlement européen propose des lois afin d'interdire l'utilisation du plomb. La législation européenne a décidé de prohiber l'usage de brasures contenant du plomb dans toute l'Europe à partir de juillet 2006 [22].

### 2.3. Alliages de brasage sans plomb, suppléants de l'eutectique Sn-Pb

Les objectifs devant être atteints pour le choix des alliages d'apport de substitution sont :

- 1- des alliages sans plomb ou autre métaux nocifs.

2- des alliages d'apport à point de fusion compatible avec les procédés de report de composants existants.

3- des alliages d'apport présent de meilleures propriétés mécaniques et physiques que l'alliage étain-plomb.

4- des alliages d'apport qui ne soient pas beaucoup plus coûteux que les alliages Etain-Plomb.

D'autre part, ces alliages d'apport de substitution doivent si possible être eutectique et présenter une bonne fluidité.

Les alliages à base d'étain sont privilégiés, car l'étain interagit avec de nombreux métaux en formant des liaisons métalliques fortes. Le rôle du joint de brasure était d'assurer une liaison forte entre deux surfaces, les alliages à base d'étain sont donc de bon candidats. Sur la base des différentes études réalisées, le tableau I.2 donne l'ensemble des alliages binaires, ternaires et quaternaires candidats au remplacer l'alliage Sn-Pb [23,24].

<b>Alliage</b>	<b>Liquidus</b>	<b>Solidus</b>
Sn-58Bi	E	138
Sn-56Bi-4Zn	E	130
Sn-51In	E	120
Sn-10In-1Ag-0,5Sb	196	206
Sn-10In-2Ag-0,4Bi	188	197
Sn-20In-2,8Ag	178	189
Sn-9Zn	E	199
Sn-8Zn-3Bi	195	199
Sn-10Au	E	225
Sn-3,5Ag	E	221
Sn-0,7Cu	E	227
Sn-3,4Ag-2,9Bi	E	215
Sn-3,8Ag-0,7Cu	E	217

**Tableau I.2.** Alliages sans plomb candidats au remplacement de l'alliage étain-plomb [23,24].

## Chapitre II : Fiabilité des assemblages électroniques

### 1-Définition :

La fiabilité est l'habilité d'un produit d'exécuter les fonctions requises, ou est une réponse aux exigences définies sous un ensemble des conditions prédéterminées, pendant une période spécifique, qui est la vie durée de vie d'un produit [1].Cet habilité est habituellement exprimée comme une probabilité. Donc, la fiabilité est la probabilité qu'un produit exécutera son mission indiquée d'une manière satisfaisante, sous conditions indiquées, pendant une période spécifique [2].

### 2-Historique de fiabilité :

L'histoire du domaine de fiabilité date des années 30 (1930) quand les principes de probabilité ont été appliqués pour résoudre les problèmes de génération d'énergie électrique aux Etats-Unis [3].Pendant la deuxième guerre mondiale, l'Allemagne appliqua les concepts de base de fiabilité pour améliorer la fiabilité de leur fusées V1 et V2. En outre, pendant la deuxième guerre mondiale, le département de défense des Etats-Unis a identifié le besoin d'améliorer la fiabilité de son équipement. Pendant le période entre 1945-1950, il a réalisé de diverses études qui concernent la défaillance d'équipement électrique, maintenance d'équipement, et cout de réparation, etc. Les trois résultats de ces études étaient comme suit [3] :

-Une étude d'armée a indiqué que, entre 2/3 et 3/4 de l'équipement utilisé par l'armée était hors de commission ou sous la réparation.

-Une étude de l'Armée de l'Air, réalisée pendant cinq ans, a indiqué que les couts de réparation et de maintenance d'équipements utilisés pour l'Armée de l'Air étaient approximativement dix fois de leurs couts originaux.

-Une étude de marine, conduit pendant les manœuvres, a indiqué que l'équipement électronique utilisé était fonctionnel d'environ 30% du temps.

A cause de ces résultats, le département de défense des USA a établi un comité ad-hoc sur la fiabilité en 1950.

En 1952, ce comité est devenu un groupe permanent connu sous le nom de Group Consultatif sur la Fiabilité de l'Équipement Electronique (AGREE). En 1957, le groupe a libéré son rapport, appelé le rapport AGREE, qui a finalement libéré des spécifications sur la fiabilité des équipements électroniques militaires [3].

D'autre part, un colloque national sur la fiabilité et le contrôle de qualité a été tenue pour la première fois aux États-Unis en 1954. Deux ans après, en 1956, le premier livre disponible dans le commerce sur la fiabilité a été édité [3].

On note que le premier programme de maîtrise de la technologie de fiabilité a été commencé à l'institut de technologie de l'Armée de l'Air des États-Unis (USAF) en 1962.

Depuis le commencement du domaine de fiabilité, beaucoup de gens et des organismes ont contribué dans le domaine. On note aussi qu'un vaste nombre de publications sur le sujet sont apparus [4,5].

### **3-Statistiques :**

Pour évaluer la performance des produits, plusieurs concepts statistiques sont utilisés. Où la fiabilité et l'occurrence des défaillances sont exprimées en termes de probabilités [1].

#### **3-1 Définitions :**

-La fonction de fiabilité  $R(t)$  est en fonction du temps, ou est une probabilité de survie jusqu'à un temps  $t$ .

- En terme de défaillance,  $F(t)$  est la probabilité cumulée de la défaillance au temps  $t$ .

Ces deux termes sont interliés. On sait que  $F(t)$  est une fonction monotone croissante de temps, et comme probabilité, elle prend des valeurs entre 0 et 1. Géométriquement,  $F(t)$  est la surface indiquée par la fonction de densité de probabilité  $f(t)$ .

La probabilité de défaillance dans l'intervalle  $\Delta t$  ( $t_1$  et  $t_2$ ) est indiqué par :

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt = F(t_2) - F(t_1) \quad (1)$$

Alternativement, si  $t_1$  est le temps de départ, à savoir  $t_1=0$ , et  $t_2=t$ , alors la probabilité de défaillance est donnée par :

$$F(t) = \int_{t=0}^{t=t} f(t) dt \quad (2)$$

Il suit alors que :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3)$$

Dénotons  $F(t)$  pour être la fonction de défaillance, alors la fonction de fiabilité est:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4)$$

Prenons un essai simple: nous avons 1000 joints de Flip-Chip. Après 10 h d'utilisation on aura 103 joints défectueux. Alors la fonction de défaillance  $F(t) = 103 / 1000 = 0,103 = 10,3\%$  à 10 h. À 20 h, les 72 joints additionnels seront défectueux et ainsi de suite. Nous pouvons alors tracer la fonction de défaillance comme il est montré dans la figure II.1, où le joint a échoué à 400h.

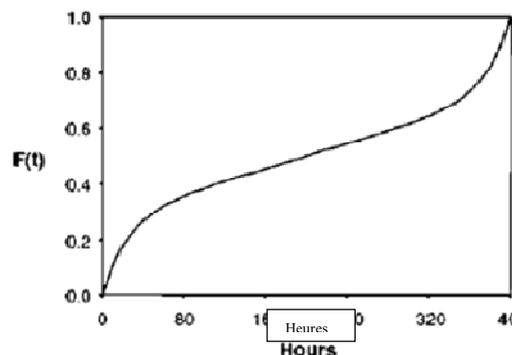


Fig. II.1. Fonction cumulative de défaillance [2].

Puis, la fonction de densité de probabilité de défaillance s'écrit :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

-Une autre fonction utile qui est souvent employée dans les statistiques de fiabilité, est le taux de risque  $h(t)$ . Elle est employée pour décrire le taux de défaillance d'unités qui sont encore fonctionnelles. En autre terme, c'est une indication du taux de défaillance instantané. Ainsi :

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (6)$$

Il est important de noter que le taux de risque  $h(t)$  indique la fraction des défaillances qui se produisent dans un temps infinitésimale, où l'échantillon est pris. Il ne représente pas la population entière de l'échantillon.

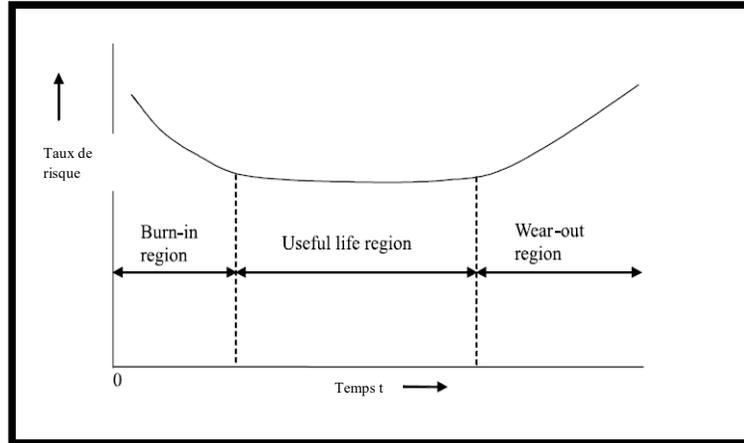
-La fonction cumulative de risque  $H(t)$  est obtenue en intégrant le taux de risque au cours du temps, ainsi :

$$H(t) = \int_{t=0}^{t=t} h(t)dt \quad (7)$$

En addition, il découle des équations (4), (5), et (6) la formule suivante :

$$H(t) = -\ln[1 - F(t)] \quad (8)$$

Il est important de signaler que le concept de taux de risque est très utile pour illustrer le modèle typique de la vie lié aux composants électroniques, la courbe de forme- baignoire de défaillance est un bon exemple Fig. II.2.



**Fig. II.2.** Courbe de baignoire de taux de risque [3].

### 3.2 Distributions :

Plusieurs modèles statistiques sont utilisés pour modéliser le défaut-à-temps, qui dépend de la distribution de défaut. Les plus appropriés parmi ces derniers sont les distributions Exponentielles, Lognormal, et Weibull. Les équations représentant les trois distributions sont données dans le tableau II.1 [1].

Function	Exponential	Weibull	Lognormal
$f(t)$	$1/\lambda e^{-t/\lambda}$	$\beta/\lambda(t/\lambda)^{\beta-1} e^{-(t/\lambda)^\beta}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi t}} \exp\left[\frac{1}{2\sigma^2}(\ln t - \mu)^2\right]$
$F(t)$	$1 - e^{-t/\lambda}$	$1 - e^{-(t/\lambda)^\beta}$	$\frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{\ln t - \ln \mu}{\sigma}\right)\right] \right]$
$R(t)$	$e^{-t/\lambda}$	$e^{-(t/\lambda)^\beta}$	$1 - F(t)$
$h(t)$	$1/\lambda$	$\beta/\lambda(t/\lambda)^{\beta-1}$	$\frac{(1/\sigma\sqrt{2\pi t}) \exp\left[(-1/2\sigma^2)(\ln t - \mu)^2\right]}{1/2 \left[ 1 - \operatorname{erf}\left\{ (1/\sqrt{2}) \left[ (\ln t - \ln \mu)/\sigma \right] \right\} \right]}$
$H(t)$	$t/\lambda$	$(t/\lambda)^\beta$	$-\ln \left( 1 - \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{\ln t - \ln \mu}{\sigma}\right)\right] \right\} \right)$

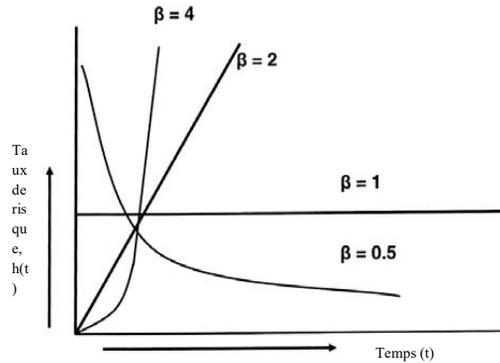
Tableau II.1. Modeles de distribution de fiabilité [1].

Certaines distributions peuvent être mieux appropriées aux types spécifiques de défaillance. Par exemple, les données de défaillance liés aux procédés chimiques de défaillance tels que l'électromigration, la corrosion, etc. sont en générale mieux adaptés aux distributions Lognormal. D'autre part, la défaillance à fatigue de joint brasé est normalement mieux adaptée à une distribution de Weibull. Les trois différentes régions de la courbe de baignoire peuvent être représentées mathématiquement par la distribution de Weibull en changeant le paramètre de pente  $\beta$ .

Si  $\beta < 1$  la courbe représente une défaillance tôt ou prématuré

Si  $\beta = 1$  la courbe représente la région intrinsèque de défaillance

Si  $\beta > 1$  la distribution représente la défaillance de wearout, comme il est montré dans la figure II.3.



**Fig. II.3.** La distribution de Weibull de taux de risque pour les valeurs de  $\beta < 1$ ,  $1$  et  $> 1$  [1].

Le choix de la distribution peut dépendre du niveau de confiance choisi pour l'ajustement. Par exemple, la distribution Lognormal peut d'une manière satisfaisante représenter les données de défaillance à un niveau plus bas de confiance dans certains cas.

Il est important de comprendre la physique de défaillance (par exemple, les caractéristiques physique qui affectent la propagation de fissure). La variation de la dureté du joint avec l'augmentation du cycles thermique, le taux de progression de fissure, la structure des grains, la présence des vides et leurs endroit, la nature et l'ampleur des phases intermétalliques, etc. sont tous importants.

#### 4. Fiabilité des assemblages électroniques

La fiabilité des assemblages électroniques est la capacité des joints brasés de fonctionner dans des conditions données, et de rester dans la conformité à spécifications mécaniques et électriques pendant une période indiquée (sans défaillance pendant le temps de fonctionnement) [2].

En général, un mode de défaillance particulier, est le résultat de certains mécanismes de défaillance, dans lesquels certaines combinaisons spécifiques des propriétés des matériaux et de l'environnement agissent simultanément. Il y a plusieurs facteurs qui doivent être considérés si on évalue la fiabilité d'un joint brasé, telle que la distribution des contraintes, la nature cyclique de la contrainte (mécanique, thermique et thermomécanique), la température

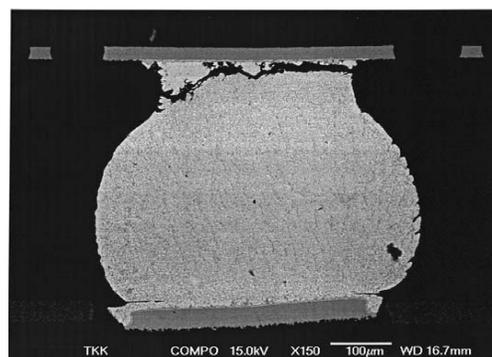
et d'autres facteurs environnementaux (corrosion, vibration et ainsi de suite.). Indépendamment de ces derniers, il est également très important de tenir en compte, le comportement métallurgique et physique de brasure et du joint brasé, puisque ceux-ci, également affectent fortement le comportement de la fiabilité du joint brasé [2].

#### 4.1. Origine de défaillance :

L'industrie électronique est actuellement confrontée à un problème de fiabilité des joints brasés, problème qui entraîne la défaillance des assemblages électronique. Les origines de défaillance peuvent être multiples mais les principaux paramètres auxquelles sont confrontés les joints de brasures, lors des conditions normales d'utilisation des assemblages électroniques, sont les fluctuations thermiques et à une moindre échelle les vibrations mécaniques. Ces fluctuations thermiques peuvent être d'origine interne, par exemple liées à l'échauffement cyclique des composants lors de cycle marche/arrêt, ou d'origine externe lors de variations de la température environnante [6].

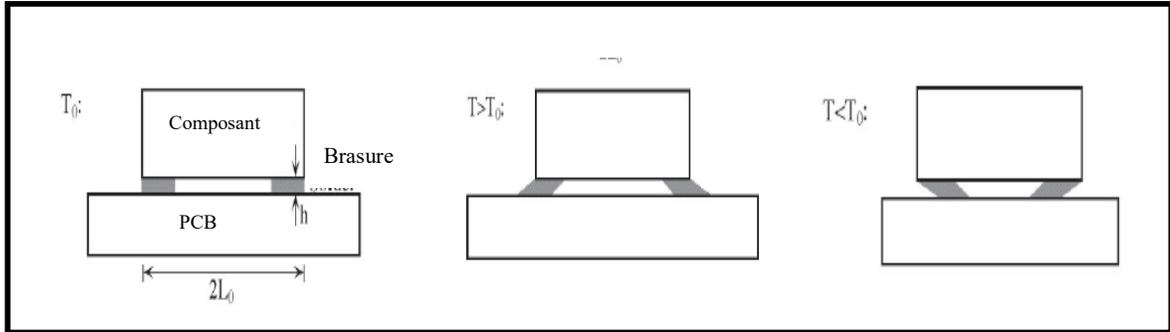
##### 4.1.1. La fatigue :

La fatigue est le phénomène de la rupture résultant de l'application des cycles de contraintes réitérées. La contrainte peut être d'origine mécanique, thermique, ou électrique [1]. La figure II.4 montre le mode de défaillance le plus généralement observé dans les joints brasés et qui ont été examinées dans des conditions de cycle thermique.



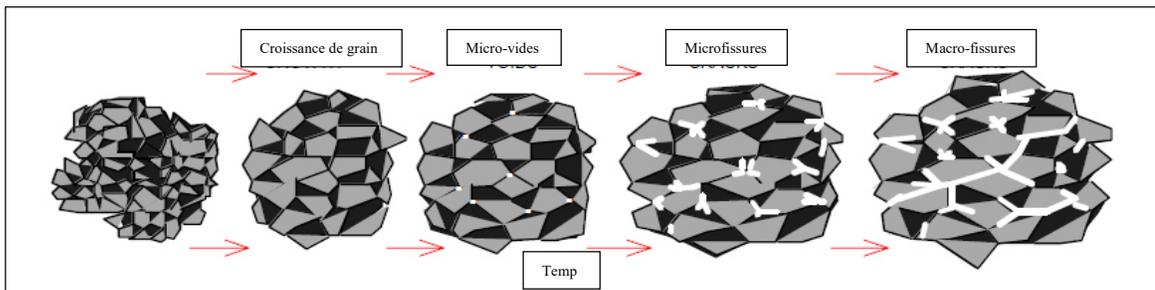
**Fig. II.4.** Mode de défaillance le plus généralement observé dans les joints brasés (entre le cuivre et la brasure) [1].

La grande différence de coefficient de dilatation thermique qui existe entre les trois éléments qui constituent l'assemblage électronique, à savoir le composant, le joint de brasure, et le circuit imprimé, entraîne l'apparition de contrainte cycliques d'origine thermomécanique lorsque l'assemblage est soumis à des variations de température [6]. La figure II.5 montre comment la fluctuation de la température produit des niveaux de contrainte significatifs, comme conséquence de la disparité de coefficient de dilatation thermique.



**Fig. III.5.** Illustration de l'origine de contraintes cycliques, causées par la différence de coefficient de dilatation thermique qui existe entre les trois éléments qui constituent l'assemblage électronique [7].

Le joint de brasure étant beaucoup plus ductile que le reste de l'assemblage, la majorité des contraintes générées vont se concentrer à l'intérieur de celui-ci. Ces contraintes de nature cyclique vont progressivement entraîner l'apparition de fissures dans le joint de brasure. Ces fissures vont ensuite se propager pour conduire à la rupture catastrophique du joint de brasure. Fig. II.6.



**Fig. II.6.** Illustration schématique de développement de la défaillance en fatigue [8].

Quand le nombre de cycles thermiques augmente, les déformations, liées aux contraintes de cisaillement dans le joint de brasure, se concentrent dans deux régions situées au voisinage immédiate des interfaces joint/composant (J/C) et joint/circuit imprimé (J/CI). La propagation de ces déformations entraîne l'apparition de bandes de déformation plastique, d'épaisseurs limitées, qui croissent parallèlement aux interfaces J/c et J/CI suivant la direction de cisaillement maximal. Ces bandes sont initiées sur une face libre du joint de brasure, en un point où il existe une concentration de contraintes principales.

Des phénomènes de recristallisation dans les bandes de déformation entraînent une augmentation de la taille des grains dans ces zones et ainsi un gradient de microstructure du centre du joint vers les deux interfaces. Enfin, quand la contrainte dans les bandes de déformation est supérieure à la contrainte de rupture du joint de brasure, des fissures sont générées dans ces zones et qui entraînent la rupture catastrophique du joint [6]. Deux mécanismes de rupture sont généralement observés : la rupture au sein du joint et la rupture à l'interface J/C ou J/CI.

a) Rupture dans le joint de brasure près des interfaces J/C et J/CI : lors des cycles thermomécaniques, les phénomènes de recristallisation et de grossissement de la microstructure modifient la répartition des concentrations de contraintes au sein du matériau ce qui facilite l'initiation et la propagation de fissures.

b) Rupture dans l'intermétallique à l'interface intermétallique/C ou intermétallique/CI. Lors du procédé de report des composants, l'alliage d'apport de brasure va réagir avec le métal de base des plots de connexion (généralement du cuivre) du composant ou du circuit imprimé. Il en résulte la formation d'une couche d'intermétallique aux interfaces J/C et J/CI. Ces intermétalliques étant fragiles, ils se présentent comme des zones privilégiées de propagation de fissures. La rupture du joint est alors observée entre le cuivre et l'intermétallique [6].

La résistance de fatigue du joint brasé peut être augmentée en employant des alliages malléables qui présentent une capacité de déformer avant qu'ils se rampent.

#### 4.1.2. Fluage :

Quand le joint brasé est mis sous charge permanente, statique et durable, une déformation plastique globale se produira. Ceci est connu comme fluage, qui est une mesure de contrainte en fonction du temps [9]. C'est une déformation non-recouvrable, et procéder à des contraintes relativement basses, (évalue  $10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ ) aux températures qui favorisent un taux de diffusion significatif [1]. Ceci implique que la dureté de la brasure est beaucoup inférieure avec le chargement à long terme qu'avec le chargement à court terme [10]. Les taux de fluage dépendent de l'alliage d'apport, par exemple, les taux de fluage de joint brasé sans plomb de la brasure 96,5Sn-3Ag sont plus hauts que ceux de la brasure 63Sn-37Pb [11].

En principe, la déformation du métal sous une charge statique peut être divisée en multiples phases, appelées le fluage primaire, fluage secondaire, et fluage tertiaire (Fig. II.7.) A l'étape primaire, n'importe quelle évidence microstructurale des dommages de fluage peut être trouvée dans le matériau. Le fluage secondaire est également connu comme fluage équilibré, car le niveau de contrainte maintiendra relativement constant. A cette étape, le travail de taux de durcissement est équilibré par le taux de rétablissement activé thermiquement. Des différents vides commencent à se produire au niveau de microstructure. A la région tertiaire de fluage, le matériau soumis à un taux de contrainte plus élevée qu'au fluage secondaire. A cette étape, les vides commencent à accroître et forment les fissures qui provoquent la rupture finale.

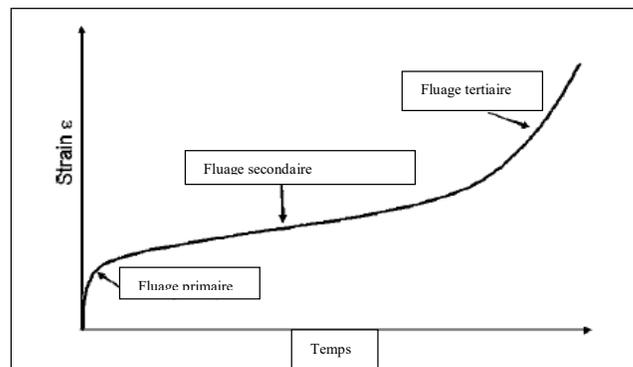


Fig. II.7. Courbe de fluage [2].

Le mécanisme secondaire de fluage joue un rôle important dans les dommages de fatigue-fluage dans les brasures. Le fluage secondaire est contrôlé, par exemple, par le

mouvement des dislocations dans les plans de glissement. Le fluage dans la brasure est dû au mécanisme de dislocation, ou dû au glissement du joints de grains et par la migration des vides transgranulaires (diffusion de joints de grains). La plus part des mécanismes appropriés de déformation de fluage avec les brasures sans plomb sont : fluage de dislocation, fluage de diffusion, et glissement de joints de grains. Ces dernières années, beaucoup de modèles constitutifs de fluage d'alliages sans- plomb ont été développés, qui souligne l'importance de comprendre les mécanismes de fluage avant les défaillances de joint brasé [2].

La résistance au fluage peut être augmentée en employant des matériaux de brasure avec des températures de fusion plus élevé.

#### **4.2. Facteurs métallurgiques et structuraux :**

Indépendamment de ces derniers, Il est très important de tenir en compte, le comportement métallurgique et physique de la brasure et du joint brasé, puisque ceux-ci, également affectent fortement sur le comportement de la fiabilité du joint brasé.

Il est bien connu que la microstructure d'un alliage de brasure, comme n'importe quel matériau a un effet très significatif sur ses propriétés mécaniques [1]. La microstructure d'un joint brasé est une combinaison de la structure de grains et des phases présentes dans la matière. Aussi bien que les défauts, la distribution et la morphologie. La microstructure du joint brasé dépend de la composition d'alliage de brasure, la matière de substrat, le processus de la solidification, le temps et la température de refusion. Aussi bien l'histoire thermique, mécanique et chimique, de l'alliage d'apport, duquel le taux de refroidissement est un des facteurs les plus critiques. Une vitesse de refroidissement plus rapide augmente le nombre de germes formés, donnant des plus petits grains. Par contre, les grains seront plus grands avec une vitesse de refroidissement plus lente [13]. Les propriétés de la matière et les différents mécanismes de défaillance du joint brasé, sont fortement influencé par la microstructure. Pour améliorer la résistance en fatigue des alliages de brasure, on devrait augmenter la vitesse de refroidissement pendant la solidification pour créer une microstructure equiaxe [14].

Le joint brasé seul ne peut pas être considéré comme fiable ou non fiable, selon la définition de la fiabilité, il devient ainsi seulement dans le contexte d'un microsystème où les composants sont reliés par l'intermédiaire des joints brasés à la carte (PCB). Les propriétés du composant, du substrat, et du joint brasé, ainsi que les conditions de service, déterminent la fiabilité de la surface qui monte les assemblages. La surface qui porte les joints brasés fournit

des fonctions électriques, mécaniques, et thermiques et devrait, dans ce but, être assez malléable pour déformer et résister différents niveaux des contraintes [2].

La formation des couches intermétalliques assure un bon lien métallurgique, et il a donc une grande importance pour l'intégrité et la fiabilité du joint brasé. Aux niveaux bas, les intermétalliques ont un effet de renforcement et produisent des améliorations distinctes en propriétés mécaniques et thermiques des alliages de brasures. Cependant, à des niveaux élevés, ils causent la fragilisation du joint [14].

#### **4.3. Tests Accélérés :**

La détermination des distributions de défaillance dans un environnement réel, bien qu'idéale, est impraticable et prohibitif. Ceci est dû à la longue vie désignée d'un produit, et/ou les conditions de marché qui rendent le produit obsolète avant l'accomplissement de test. Cependant, Il est important d'effectuer l'essai étendu pour assurer la fiabilité de produit. Par conséquent, pour accélérer le processus qui provoque les défaillances dans une période courte, il faut effectuer le test de produit aux niveaux d'effort beaucoup plus haut que ceux rencontrés dans les conditions de service [1]. Donc Les conditions de test vont reproduire les vraies conditions de service d'une façon accélérée, et pour que les mécanismes de défaillance observés dans les échantillons d'essai soient identiques aux conditions qui produisent dans le domaine de service, et là il existe une relation prévisible entre l'effort appliqué et la vie du produit [2].

Le but principal du test accéléré est pour identifier et quantifier la défaillance et les mécanismes de défaillance qui font défaillir le composant, et aussi pour déterminer leur vie utile dans l'application exigée.

Différents tests accélérés peuvent être réalisés pour chaque mécanisme potentiel de défaillance, car les contraintes qui produisent les défaillances sont différentes pour chaque mécanisme.

##### **4.3.1. Fatigue thermique :**

Il y a plusieurs mécanismes de défaillance dans les microsystemes. Les défaillances peuvent être provoquées par des mécanismes thermomécaniques, électriques, chimiques, et/ou environnementaux. Mais, la fatigue thermomécanique est le mécanisme principal de défaillance pour les joints de brasure [2]. Puisque la source principale de fiabilité des joints brasés est liée au chargement de cycle thermique, induit par les changements de température

environnementaux ou par les cycles actifs de marche/arrêt [14]. La force qui conduit à la fatigue de joints de brasure est la disparité de coefficient de dilatation thermique entre les divers matériaux qui constituent l'assemblage [2].

#### **4.3.1.1. Mécanisme de défaillance de fatigue :**

Dans des conditions normales d'utilisation des assemblages électroniques, les joints de brasure sont sollicités au-delà de leur limite d'élasticité. A chaque cycle, la déformation plastique s'accumule et les joints rompent rapidement.

L'endommagement par fatigue comprend trois stades qui sont :

- l'amorçage des fissures.
- La propagation de ces fissures.
- Et enfin la rupture.

Lors de l'étape d'amorçage, l'initiation des microfissures s'effectue dans les zones où il y a une concentration de contraintes (inclusion, joints de grain...). La propagation de ces microfissures se fait ensuite généralement à travers les grains successifs. Lorsque leurs taille deviennent très importantes, celles-ci donnent naissance à des macro-fissures qui à leur tour vont croître pour finalement entraîner la rupture du matériau. La rupture par fatigue est alors transgranulaire [6].

#### **4.3.1.2. Test de la fatigue thermique**

Le test de cycles thermiques est l'un des approches fondamentales pour caractériser la résistance en fatigue de joint brasé. Ils opèrent habituellement, avec des amplitudes cycliques de haut-température, et des périodes cycliques plus courtes comparées aux conditions d'utilisation. Les cycles de la température sont répétés avec une certaine période de temps jusqu'à ce que la rupture se produise [2]. En service, les joints brasés sont rarement soumis aux cycles continus et réguliers, ils sont soumis, normalement, à des températures pendant plusieurs heures ou jours selon les demandes d'exécution. La figure III.8 montre une température caractéristique en fonction de temps, comme il se produit dans un joint de brasure pendant le test de cycles thermiques qui sont exécutés dans l'air à l'air [14].

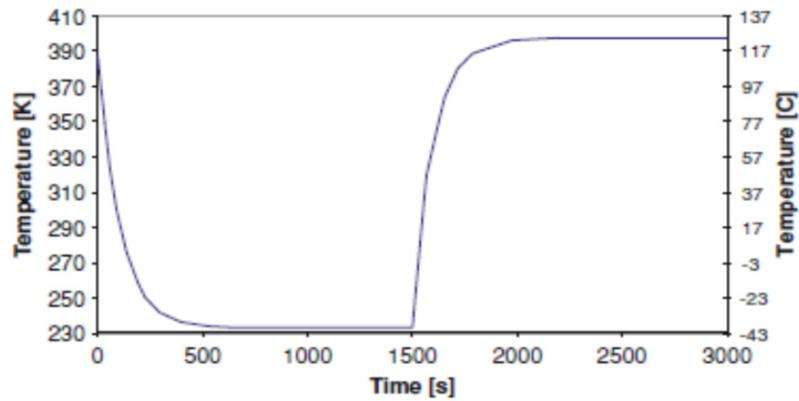


Fig. II.8. Caractéristiques de test du cycle thermique [14].

Plusieurs types de cycles thermiques sont disponibles, comme il est indiqué dans le tableau II.1.

Tests thermiques	Paramètres influencés	Méthodes
Cycles thermique (compris choc thermique de l'air/l'air)	Taux de température Temps de cycle	Un seule chambre-cyclique Deux chambres-cycliques
Choc thermique (liquide/liquide)	Limites de température Température moyenne Temps de cycle	Immersion dans un liquide chaud et froid
Cycle de puissance (Power cycling)	Limites de température Température moyenne Distribution inhomogène de température Taux de température Temps de cycle Limites de température Température moyenne	Puissance haut/bas Température ambiante Température élevée

Tableau II.1. Différents types de test thermique [12].

### 4.3.1.3. Normes de test de cycle thermique

En raison de l'importance du chargement thermique dans des diverses applications électroniques, le test thermique des joints de brasure est étudié intensivement. Le test accéléré de cycle thermique est un procédé standard pour évaluer la fiabilité des produits. Les normes actuellement disponibles sont [12] :

- IPC-9701A, “Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments”
- IEC/EN 60068 Part 2-14; “Environmental testing-Temperature Change”
- JESD 22-A104, “Temperature Cycling”
- Various industry/company internal standards.

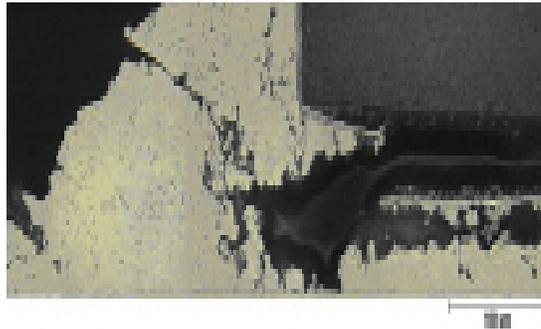
Puisque les conditions de service sont différentes, aucun test standard général ne peut être défini pour les produits électroniques. Une classification pour différentes industries est donnée par IPC-9701A, (tableau II.2).

Application	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	Nombre de cycles (par an)
Grand public	0	60	365
Informatique	15	60	1460
Aéronautique	-55	95	3000
Télécommunications	-40	85	365
Automobile	-55	150	300
Aérospatial	-40	25	8760

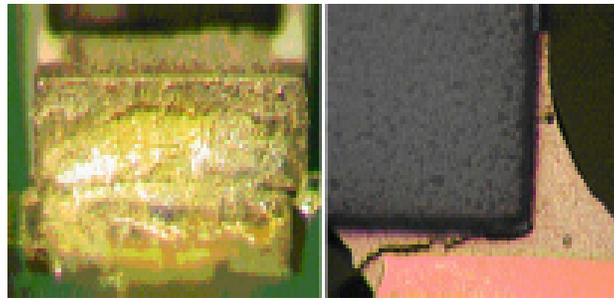
**Tableau II.2.** Gamme de température et nombre de cycles par an auxquels peuvent être soumis les assemblages électroniques en fonction de leur domaine d'application [12].

#### 4.3.1.4. Détection de défaillance de fatigue :

En général, l'apparition de la défaillance de fatigue est détectée par les mesures électriques de résistance ou par l'inspection visuelle des coupes des joints brasés (l'inspection visuelle des fissures). La mesure électrique de résistance est la technique la plus simple, et qui permet la détection de défaillance d'une manière non destructive pour un nombre important de composants. Un exemple est montré dans la figure II.9, pour la brasure Sn-3,5Ag, où contrairement au joint totalement cassé, seulement une légère augmentation de la résistance a été détectée.

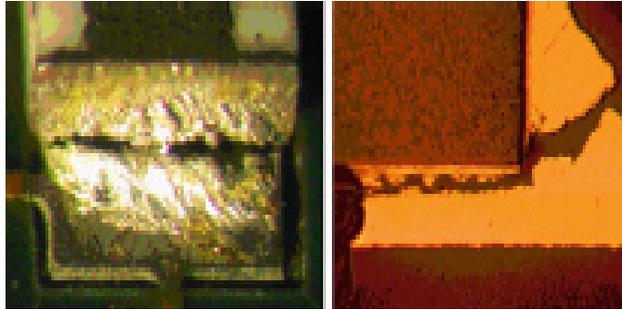


**Fig. II.9.** Chip resistors 0805 avec la brasure Sn-Ag sur une PCB de type FR-4, après ; 2000 cycles, -40...125°C, 60min. la résistance a augmenté seulement de 164mΩ à la température ambiante [12].



**Fig. II.10.** Chip resistors 1206 avec le brasure SAC sur une PCB de type FR-4, après ; 1000 cycles, -40...125, 60min. la résistance a augmenté de 26 à 28 mΩ à la température ambiante [12].

Un deuxième exemple est montré dans la figure II.10, et qui concerne la brasure Sn-3,5Ag-0,5Cu, où on peut observer une fissuration d'une grande partie de joints et qui n'est pas détecté par la mesure de résistance à la température ambiante. La résistance augmente jusqu'à l'infini seulement si les surfaces craquées se déplacent vraiment indépendamment l'un à l'autre, comme il est montré dans la figure II.11.



**Fig. II.11.** Chip resistors 1206 avec le brasure SAC sur une PCB de type FR-4, après ; 2000 cycles, -40...125°C, 60min. la résistance a augmenté de 26 à  $\infty$  m $\Omega$  à la température ambiante

[12].

Dans ce chapitre, on présenterons la partie pratique de ce travail, qui est constitué de deux parties : la première partie est l'étude appliquée au niveau de l'entreprise de Condor, et la deuxième est la partie expérimentale c.-à-d., une étude simple sur les échantillons qui ont été apportés de l'entreprise.

### **1. L'étude appliquée :**

Puisque notre thème est l'étude d'assemblage par brasage des composants électroniques, cette étude est effectuée à l'entreprise de Condor de Bordj Bou Arreridj, qui est considérée parmi les nombreuses entreprises en Algérie qui est spécialisée dans le domaine.

#### **1. 1. Présentation de l'entreprise de condor :**

Condor appartient au groupe de Ben Hamadi, qui contient 5 entreprises productives :

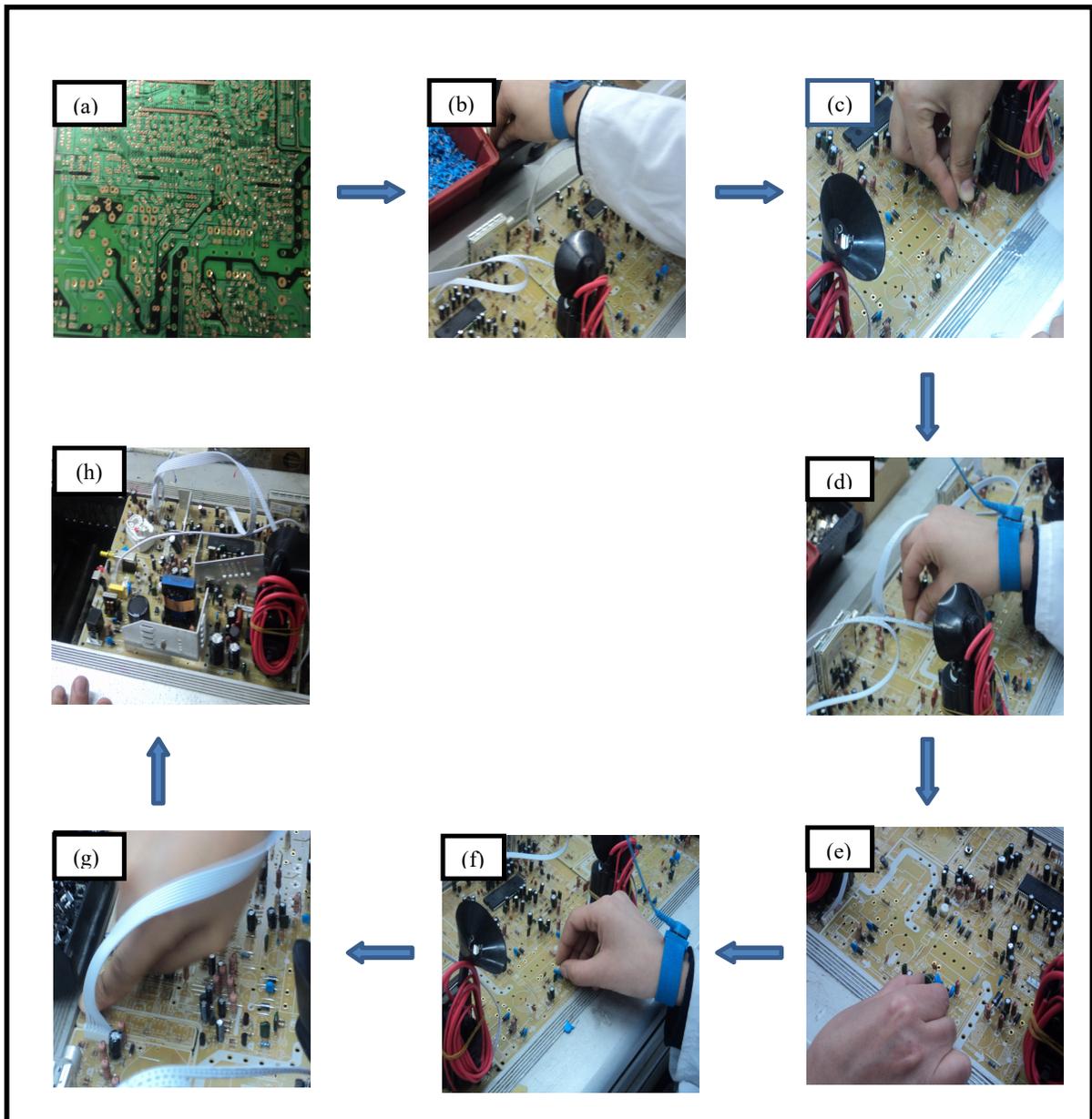
- ARGILOR pour la production de briques et dénoyautées rouges.
- GERBIOR pour la production de blé dure et de ses dérivés.
- POLYBEN pour la production de sacs en plastique
- CONDOR pour la production d'appareils électroniques et appareils électro-ménagés.

L'entreprise de Condor a émergé pour les industries électroniques dans la zone industrielle de Bordj Bou Arreridj en Avril 2002. C'est une société à responsabilité limitée, sous le nom de ANTAR TRAD. Elle active dans la fabrication de produits électriques et électro-ménagés. L'entreprise utilise des technologies très sophistiquées dans le domaine de l'industrie, et elle commercialise ses produits sur le marché Algérien. Ces produits consistent d'une gamme de ; téléviseurs, récepteurs numériques et les appareils électro-ménagés (réfrigérateurs, climatiseurs, et lecteurs CD).

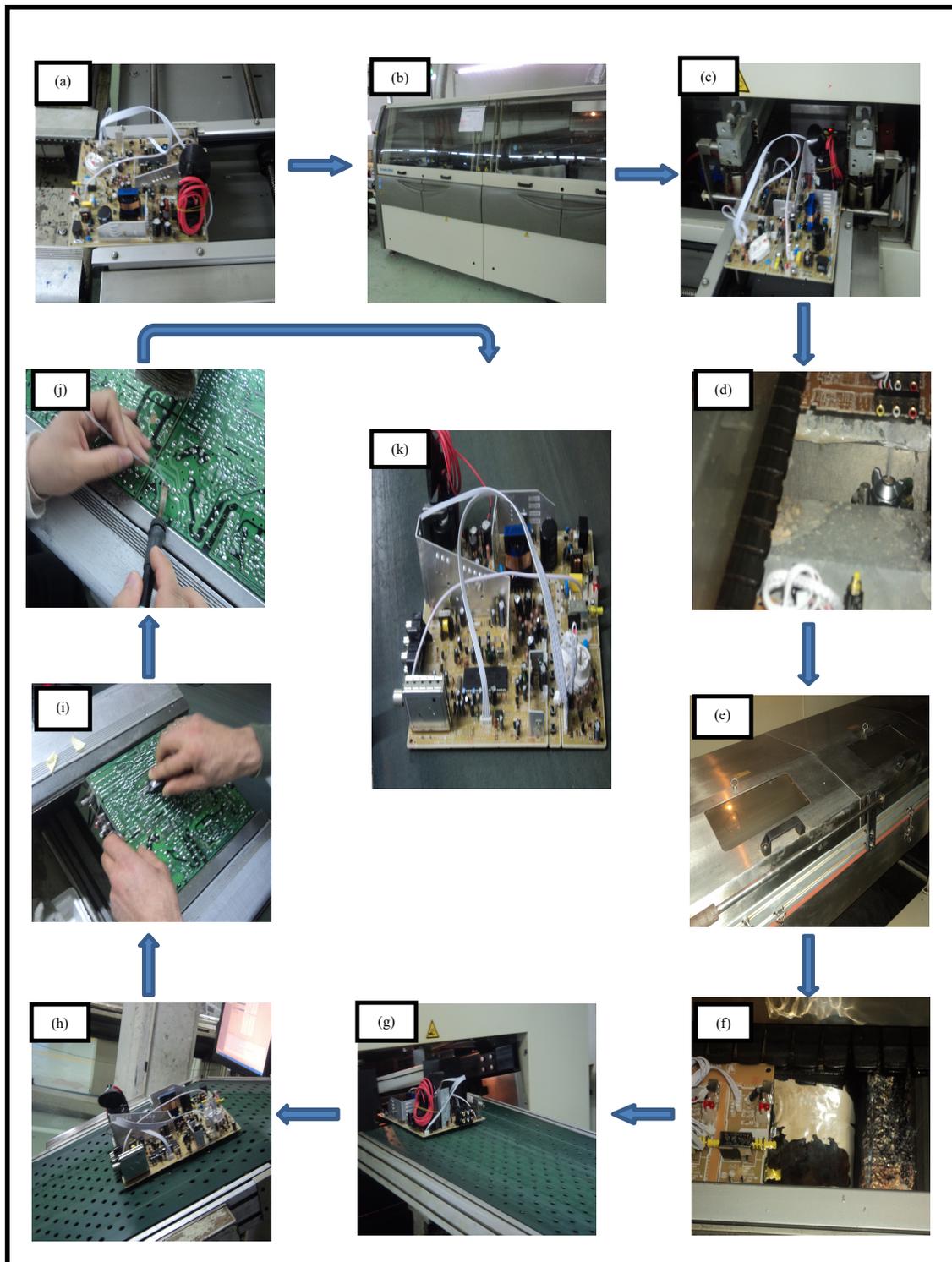
#### **3. 1. 2. Techniques de brasage à Condor:**

D'après nos recherche bibliographiques, nous avons remarqués qu'il y a plusieurs types d'alliages de brasage, de l'alliage eutectique Sn-37Pb à des alliages sans plomb comme (Sn-Cu, Sn-Ag, Sn-Au, ...). On note qu'il y a aussi deux types de brasage (brasage à la vague et brasage par refusion). A l'entreprise de Condor, l'alliage qui est utilisé dans le processus de

brasage est l'alliage eutectique Sn-37Pb. Notre visite à Condor nous a permis d'identifier visuellement la manière de chaque type de brasage. La figure III.1 montre les étapes par lesquelles traverse le PCB jusque qu'elle arrive à la machine de brasage à la vague. Par contre la figure III.2 montre les étapes principales par lesquelles traverse le PCB à l'intérieur de la machine de brasage à la vague (les étapes de brasage).



**Fig. III.1** Les étapes principales par lesquelles traverse le PCB jusque quelle arrive à la machine de brasage à la vague : (a) PCB vierge. (b), (c), (d), (e), (f) et (g) La mise des composants. (h) PCB valable au brasage à la vague.



**Fig. III.2** Les étapes principales par lesquelles traverse le PCB à l'intérieur de la machine de brasage à la vague : (a) PCB non brasé. (b) machine de brasage à la vague. (c) entrée de PCB à la machine de brasage. (d) étape de fluxage. (e) étape de préchauffage. (f) étape de brasage. (g) et (h) sort de PCB. (i) et (j) élimination des pattes supplémentaires de composants et remplissage des points non brasés manuellement. (k) PCB brasé à la vague.

### 3.1.3 Prélèvement des échantillons :

Après avoir identifié les types et les méthodes de brasage, au sein de l'entreprise, nous avons essayé de prélever quelques échantillons de chaque type, et de la matière de brasage (Sn-37Pb). A titre indicatif la figure III.3 présente la matière de brasage sous forme de barre.



**Fig. III.3** Alliage de brasage Sn-37Pb sous forme de barre.

### 3.2. L'étude expérimentale :

L'étude expérimentale comportait deux parties, la première partie est l'étude de la matière de brasage, qui représente la partie principale dans notre travail de recherche, et ceci par l'étude de l'évolution de la microstructure (par le microscope optique et le microscope électronique à balayage) et l'évolution de la microdureté Vickers (par le microduromètre), après avoir fait des traitements thermiques dans des températures bien définies. L'analyse par DRX est aussi utilisée. La deuxième étape est l'étude de joints brasés, à travers des cycles thermiques pour connaître la fiabilité des joints.

#### 3.2.1 L'alliage de brasage Sn-37Pb :

- Nous avons préparé trois échantillons de Sn-37Pb, nous avons pris le premier comme témoin, et les deux autres ont subis des traitements thermiques de vieillissement à 60°C et 100°C.

-L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies et attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces pour nos échantillons nécessite différentes étapes :

1-dans un premier temps, nous faisons une ébauche de façon à polir brièvement et grossièrement les faces et à régler la forme de l'échantillon. Puis les échantillons subissent un pré polissage, qui s'effectue en plusieurs étapes avec des grains abrasifs de plus en plus fins (200, 400, 600, 800, 1000, 1200), disposés sur les disques de la polisseuse.

2-Apres chaque polissage les échantillons sont nettoyés de tout résidu à l'aide de l'eau distillée, et s'èchés à l'aide d'un séchoir.

3-Le polissage de finition se fait à l'aide de la pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque ; la granulométrie utilisée est  $1\mu\text{m}$ .

4-Avant l'étude micrographique, il nous faut procéder à une attaque chimique. Le réactif d'attaque utilisé pour notre alliage (Sn-37Pb) se compose de ; 92%  $\text{H}_2\text{O}$ , 6%  $\text{HNO}_3$  et 2%  $\text{HCl}$ , avec un temps d'attaque de 15 à 20 seconde. Les échantillons sont ensuite nettoyés à l'eau distillé et séchés à l'aide d'un séchoir. Cette dernière opération est délicate, car il ne faut laisser aucune trace sur la surface.

- Des traitements thermiques sont appliqués sur les échantillons à deux températures  $60^\circ\text{C}$  et  $100^\circ\text{C}$  durant les périodes de temps 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 8 h, 10 h.

### 3.2.2 L'étude du joint brasé :

Dans but de voir le comportement du joint brasé lors d'une fatigue thermique de différents types de coposants (CMS et traversants), nous faisant des multitudes de cycles thermiques (jusqu'à on observe des fissure dans le joint de brasure), pour chaque type de composant, comme elle est montrée dans la figure IV.4.

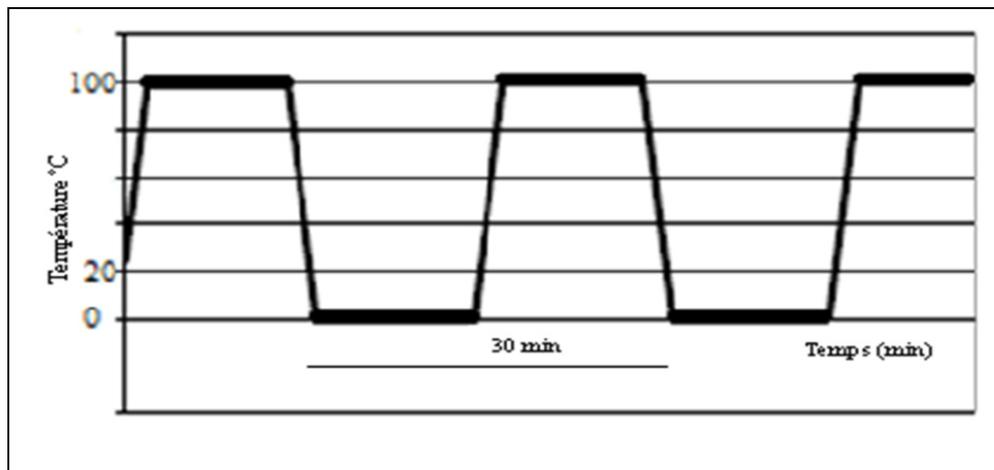


Fig. III.4. Profil des cycles thermiques  $0^\circ\text{C}/100^\circ\text{C}$ .

**3. Les moyens utilisés :**

Toute cette partie expérimentale, (le polissage, l'observation des échantillons au microscope optique et électronique, l'analyse par DRX, les mesures de la microdureté), est réalisée dans les laboratoires de l'Université Mohamed Khider-Biskra.

**3.1. Polisseuse :**

Les échantillons sont polis à l'aide d'une polisseuse de type **MECAPOL P 220 S** (Fig. III.5)



**Fig. III.5.** La polisseuse utilisée de type MECAPOL P 220 S.

**3.2. Microscope optique :**

L'analyse micrographique s'effectue à l'aide d'un microscope optique de type : **HUND** (Fig. III.6). Il a pour principale but la mise en évidence de la structure de l'échantillon.

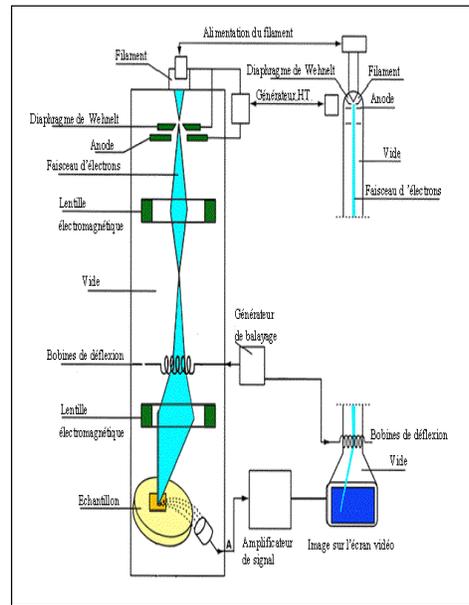


**Fig. III.6.** Microscope optique de type HUND.

### **3.2. Microscopie électronique à balayage (MEB) :**

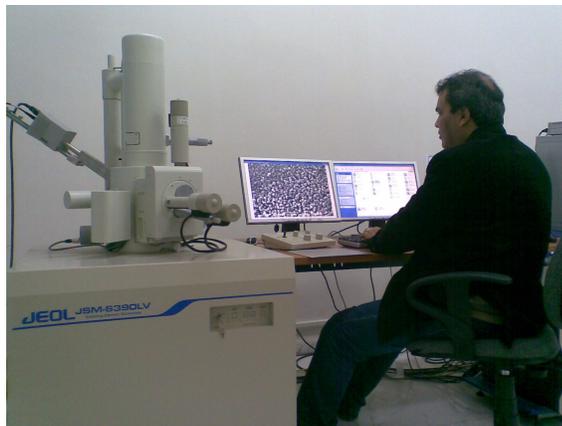
La microscopie électronique à balayage est une méthode à haute résolution qui est utilisée pour visualiser l'image d'une surface d'un échantillon à l'échelle micrométrique ou nanométrique.

Le fonctionnement du microscope électronique à balayage MEB est basé sur l'émission d'électrons produits par une cathode et la détection de signaux provenant de l'interaction de ces électrons avec l'échantillon. Ces électrons qui irradiant la surface de l'échantillon pénètrent profondément dans le matériau et affectent un volume appelé poire d'interaction. Le volume de cette poire dépend du numéro atomique moyen de l'échantillon et de l'énergie des électrons incidents. Dans ce volume d'interaction les électrons de faisceau vont perdre leur énergie par collisions multiples avec les atomes du matériau générant ainsi de nombreux phénomènes secondaires : réflexion d'électrons et de photons, absorption d'électrons, courants induits, potentiels électriques, élévation de température locale, vibration du réseau. La présentation schématique du principe de MEB est illustrée sur la figure III.7.



**Fig. III.7.** Schéma du principe et éléments d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB).

La figure III.8 présente le microscope électronique à balayage utilisé dans notre étude, de type **JSM-6390LV**, dont son accélération allant jusqu'à 30KV.

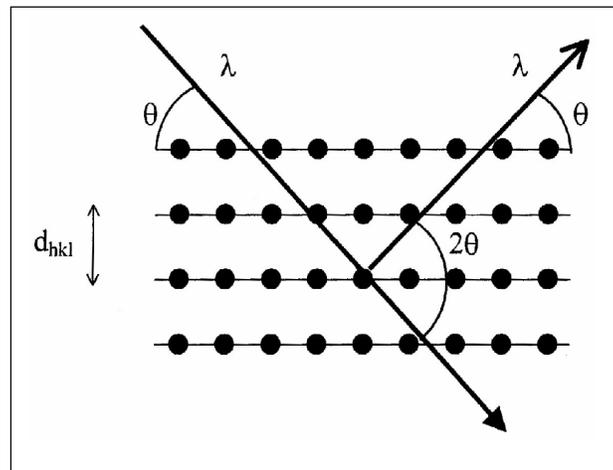


**Fig. III.8.** MEB de type JSM-6390LV.

### 3.1. Diffraction de rayons X :

#### 3.1.2. Principe :

Lorsqu'un faisceau de rayons X frappe un cristal sous un angle  $\theta$  (Fig.III.9), des interférences constructives et un pic dans l'intensité de réflexion sont observés si la loi de Bragg est vérifiée.



**Fig.III.9.** Géométrie ( $\theta$ - $2\theta$ ) pour la diffraction des rayons X.

Cette loi relie la distance  $d$  entre les plans cristallins parallèles, la longueur d'onde  $\lambda$  des rayons X et l'angle  $\theta$  par :

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$$

Où  $d_{hkl}$  est la distance interréticulaire séparant les plans définis par les indices de Miller ( $h$ ,  $k$  et  $l$ ),  $\theta$  l'angle d'incidence et donc de réflexion par rapport à ces plans et, enfin,  $\lambda$  la longueur d'onde des photons X.

$n=1,2,\dots$  ordre de la diffraction.

Le diffractogramme est un enregistrement de l'intensité diffractée en fonction de l'angle  $2\theta$  formé avec le faisceau direct. L'étude du diffractogramme permet de remonter à un grand nombre d'informations sur les caractéristiques structurales et microstructurales de l'échantillon telles que les structures cristallines, la taille des cristallites, les taux de défauts

structuraux, les macros et micro-contraintes et la présence d'une texture. Les positions angulaires des raies de diffraction sont caractéristiques des paramètres du réseau cristallin. L'étude des positions des raies de diffraction permet donc de remonter au réseau cristallin de chacune des phases cristallisées de l'échantillon. Une fois le réseau déterminé, les positions angulaires des raies permettent de calculer les distances interréticulaires des plans atomiques diffractant et ainsi d'accéder aux paramètres de maille. Les positions et les intensités des raies de diffraction de la plupart des matériaux connus ont été étudiées et elles sont répertoriées dans des bases de données. La comparaison d'un diffractogramme expérimental avec ces données permet de retrouver la nature de chaque phase constitutive de l'échantillon.

Dans notre étude, on a été utilisé un diffractomètre **D8 ADVANCE** (fig. III.10). Les rayons ont été produits à partir d'une source de radiation  $CuK_{\alpha 1}$ ,  $CuK_{\alpha 2}$ ,  $CuK_{\beta}$  avec des longueurs d'ondes de  $\lambda=1.5410603$ ,  $1,54443$ ,  $1,39225$  Å. Respectivement.



**Fig. III.10.** Diffractomètre de type (D8 ADVANCE).

### 3.5. Essais de Microduretés Vickers :

Les essais de microduretés Vickers consistent à mesurer les longueurs des diagonales de l'empreinte laissées à la surface de l'échantillon après application d'une charge constante d'un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée en diamant (Fig. III.11). Le temps

de mise en charge est de 15 secondes, tout comme le temps de maintien de la charge. L'empreinte est d'autant plus grande que le matériau est mou.

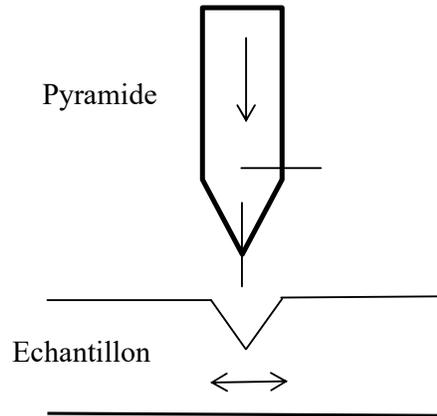


Fig. IV.III.11. Essai de dureté Vickers.

La dureté Vickers est donnée par la formule :

$$HV = 1,85 F/d^2$$

Avec F : charge d'essai en kilogramme force

Et :  $d = (d_1 + d_2)/2$  (en mm).

Le pénétrateur de type Vickers est utilisé pour les essais de dureté et les essais de microdureté. Les essais de dureté correspondent à des charges comprises entre 5 et 100 kilogramme force et les essais de microdureté correspondent à des charges inférieures à 1000 g et relatent la dureté sur des domaines microscopiques.

Nous avons utilisé une charge de 50 grammes force. L'appareil utilisé est de marque **Wolpert Wilson** (Fig. III.12), elle est équipée d'un microscope optique pour permettre de positionner l'empreinte sur la phase désirée.



Fig. III.12. Le microduromètre utilisé de marque Wolpert Wilson.

### 3.6. Le four :

Le four utilisé dans notre travail est de maque **21100 Tube Furnace** (Fig. III.13).



Fig. III.13. Four utilisé de marque 21100 Tube Furnace.

## 1. Cas de l'alliage de brasure Sn-37Pb :

Dans cette partie, notre travail de recherche est concentrée à l'étude de la matière de brasage de côté métallurgique, à travers le suivi des modifications et le comportement de ce dernière lorsqu'elle est exposée à des traitements thermiques à deux températures de vieillissement (60 et 100°C). Ces températures sont choisies, car elles correspondent aux conditions réelles d'utilisation.

On note que, notre échantillon de référence est un morceau d'alliage Sn-37Pb.

### 1.1. L'analyse de l'échantillon de référence :

#### 1.1.1. L'analyse chimique :

L'analyse chimique par l'EDX nous a permet de confirmer, approximativement, que notre alliage est l'alliage eutectique 63Sn-37Pb (Fig. IV.1), car les valeurs de composition chimique par l'analyse EDX est effectuée sur un seul point de l'échantillon.

La figure IV.1 représente le spectre de l'analyse chimique EDX de l'échantillon de référence Sn-37Pb.

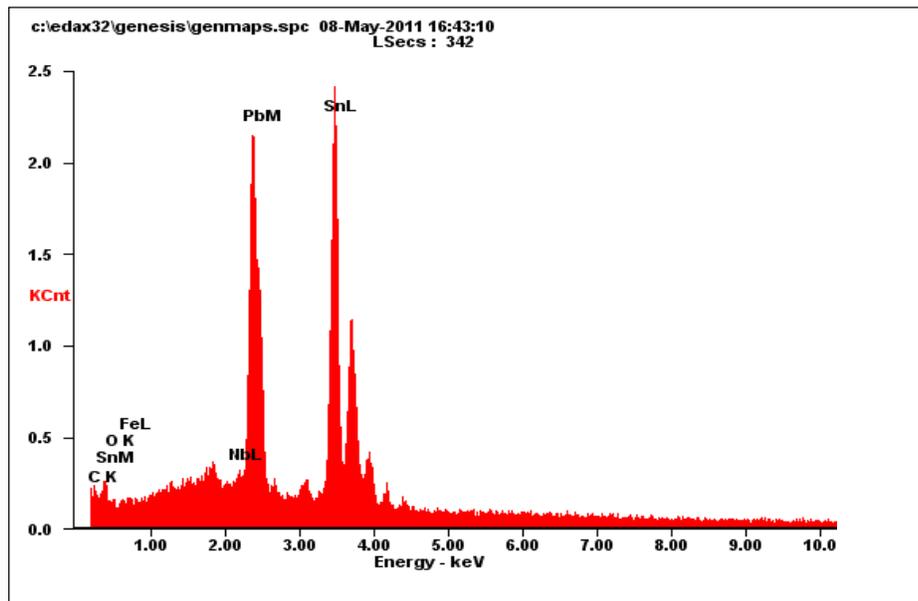


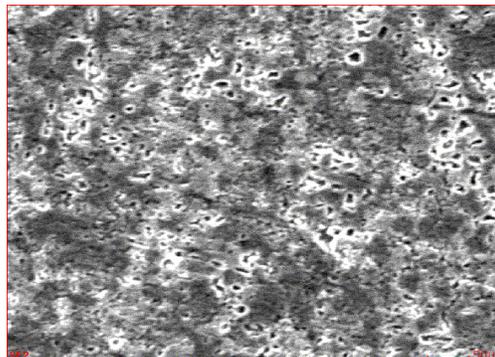
Fig. IV.1. Spectre d'analyse chimique de l'alliage Sn-37Pb.

Le tableau IV.1 représente les valeurs de composition chimique de l'alliage de référence Sn-37Pb.

Eléments	Mass.%	At.%
CK	01.06	10.37
OK	00.57	04.18
FeL	01.36	02.88
NbL	00.98	01.25
PbM	32.80	18.63
SnL	63.23	62.70
Matrix	Correction	ZAF

**Tableau. IV.1.** Les valeurs de composition chimique de l'alliage Sn-37Pb.

La figure IV.2 présente la microstructure de l'alliage Sn-37Pb au point de l'analyse chimique.

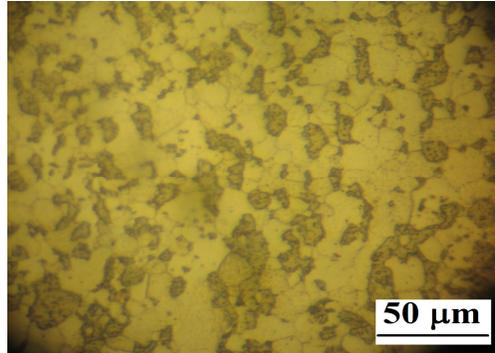


**Fig. IV.2.** Microstructure de l'alliage Sn-37Pb au point de l'analyse chimique.

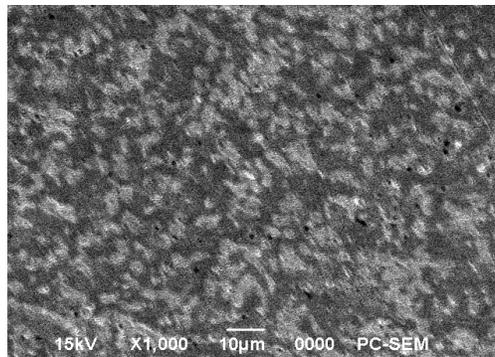
### 1.1.2. L'analyse micrographique :

L'examen métallographique à l'aide d'un microscope optique (Fig.IV.3) et électronique (Fig.IV.4) montre bien qu'il y a deux phases : phase riche en Pb, c'est la phase

$\alpha$  (régions foncées dans la figure IV.3 et claires dans la figure IV.4) et phase riche en Sn, c'est la phase  $\beta$  (régions claires dans la figure IV.3 et foncées dans la figure IV.4).



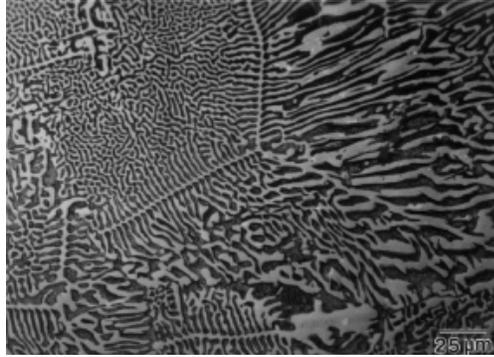
**Fig. IV.3.** Microstructure de l'alliage Sn-37Pb par le microscope optique.



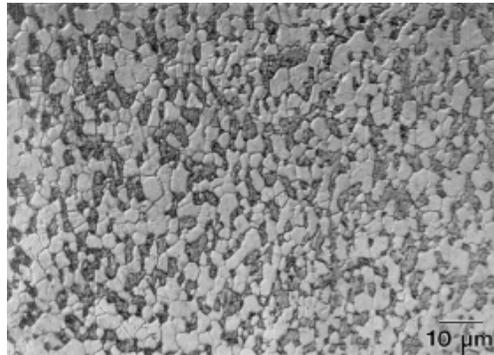
**Fig. IV.4.** Microstructure de l'alliage Sn-37Pb par le MEB.

La figure IV.3, et la figure IV.4 montrent que notre alliage (Sn-37Pb) est un alliage eutectique, et qui correspond aux mêmes observations effectuées par Abell et Shen [1].

On note que ces mêmes observations ont été déjà observées par [2]. Ils ont montrés que l'eutectique a le point de fusion le plus bas, et qu'il y a deux types d'eutectique : l'eutectique lamellaire (Fig. IV.5), et l'eutectique divorcée (après une solidification rapide) (Fig. IV.6).



**Fig. IV.5.** Microstructure de Sn-43 Bi [2]



**Fig. IV.6.** Microstructure de Sn-37Pb (Grains fins après solidification rapide) [2]

### **1.1.3. L'analyse de diffractogramme de rayon X :**

D'après l'analyse par diffraction des rayons X de l'échantillon de référence, on constate que le diffractogramme (Fig. IV.7) est composé de deux catégories de pics : les pics de la phase  $\alpha$ , et de la phase  $\beta$ . Ce qui confirme l'observation microscopique.

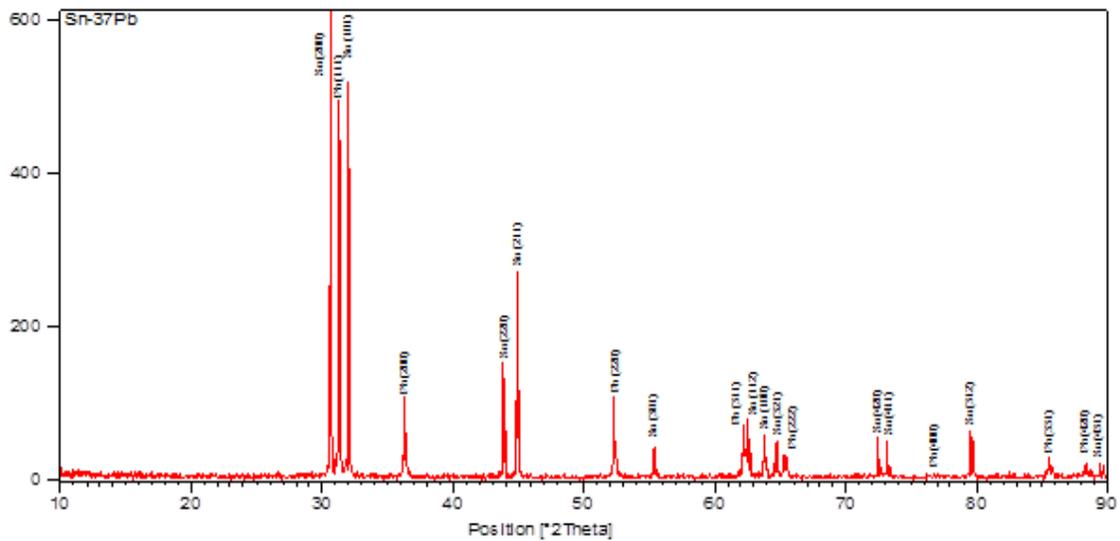


Fig. IV.7. Spectre de RX de l'alliage Sn-37Pb.

#### 1.1.4. La mesure de la microdureté :

Les mesures de la microdureté nous permettent de mesurer une des propriétés mécaniques de l'alliage Sn-37Pb à l'état initial, qu'est la dureté Vickers, telle que la valeur moyenne est :  $HV = 10,63$ .

#### 1.2. Traitements thermiques de vieillissement :

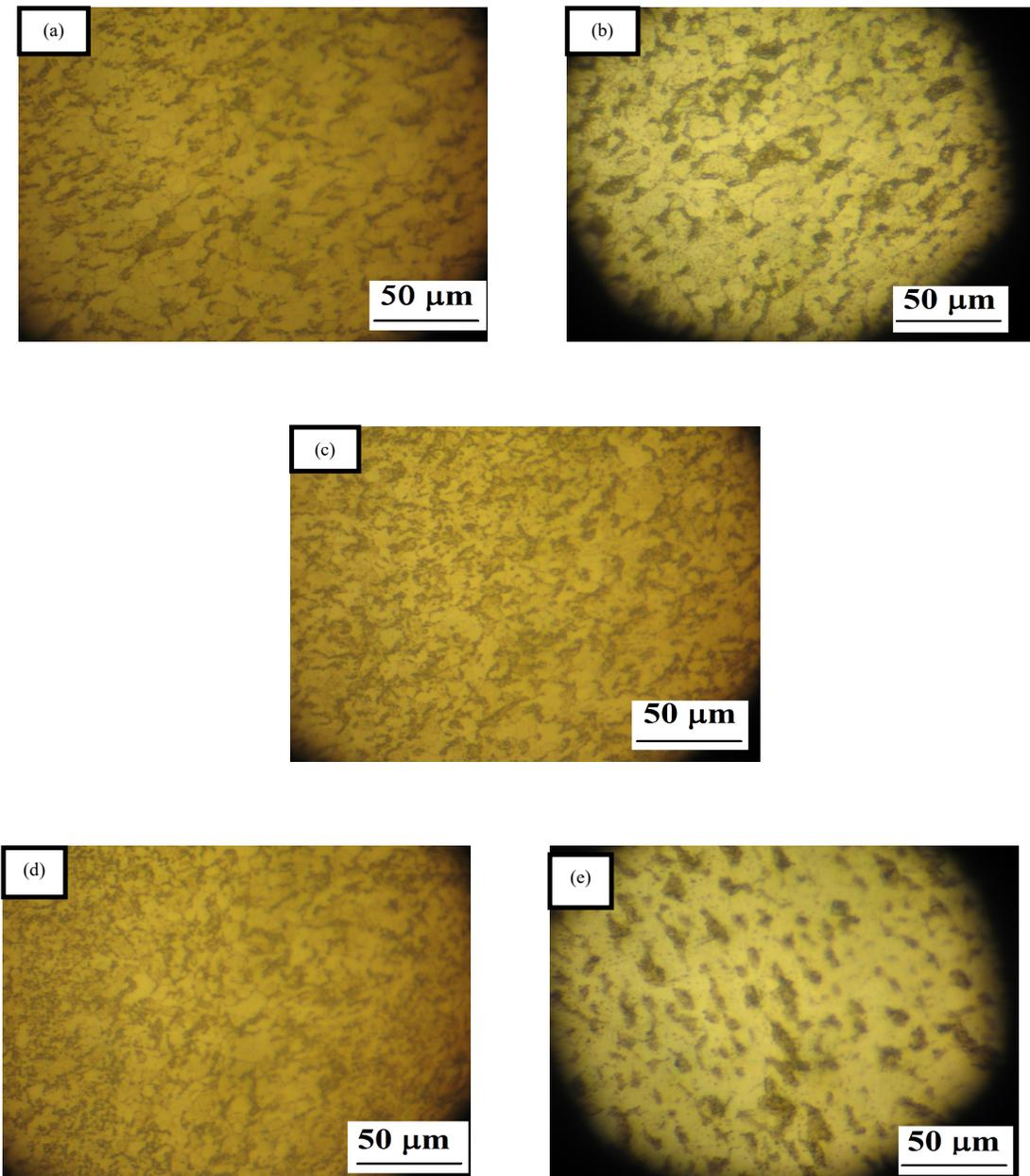
##### 1.2.1. Cas de vieillissement à 100°C de brasure Sn-37Pb :

##### 1.2.1.1. Observations micrographiques :

L'évolution de la microstructure au cours de vieillissement à 100°C pendant : 10 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h, et 10h, est représentée dans les figures suivantes :

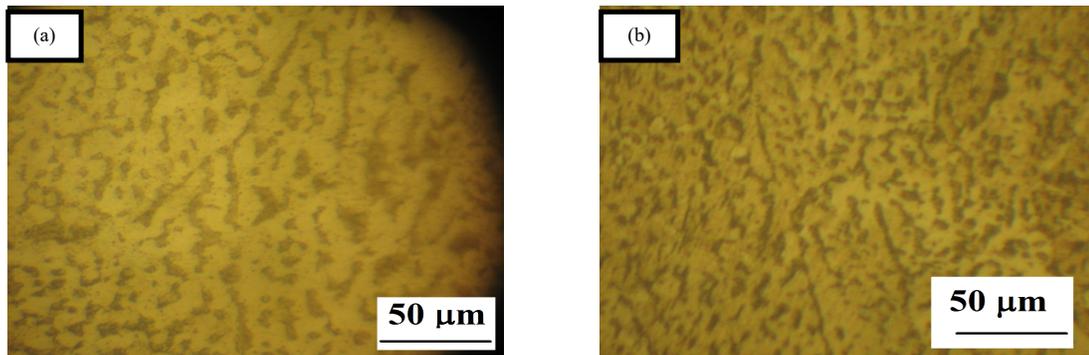
-On observe d'après les figures IV. 8. a, b, c, d, et e, qu'il y a un changement de la taille et de la forme de la phase  $\alpha$ .

Ces changements de la taille et de la forme s'appellent coalescence qui apparaît Spécifiquement, d'après Ubachs, Schreurs, et Geers [3], dans les brasures étain-plomb en raison de la solubilité élevée de l'étain en plomb et vice versa.



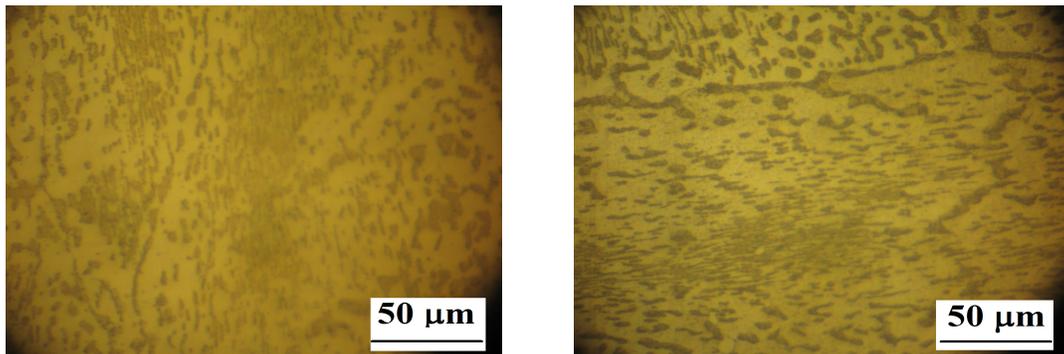
**Fig. IV.8.** Microstructures de l'alliage Sn-37Pb à 100°C pendant : (a) 10min. (b) 30min. (c) 1h. (d) 2h. (e) 3h.

-On observe d'après la figure IV.9 le début de formation des zones, et que la morphologie de la phase  $\alpha$  prend la forme des bâtonnets.

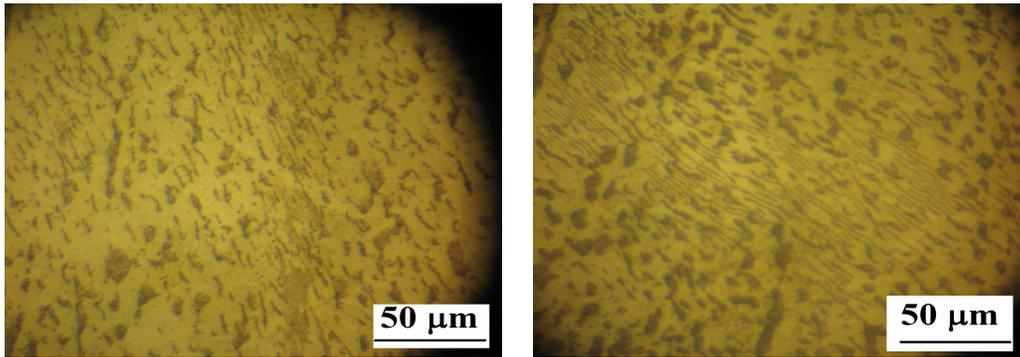


**Fig. IV.9.** Microstructure de l'alliage Sn-37Pb à 100°C pendant : (a) 4h. (b) 5h.

-On observe d'après la figure IV.10 et la figure IV.11 qu'il y a le début de formation de structure lamellaire.



**Fig. IV.10.** Microstructure de l'alliage Sn-37Pb à 100°C pendant 6h (dans deux zones différentes)

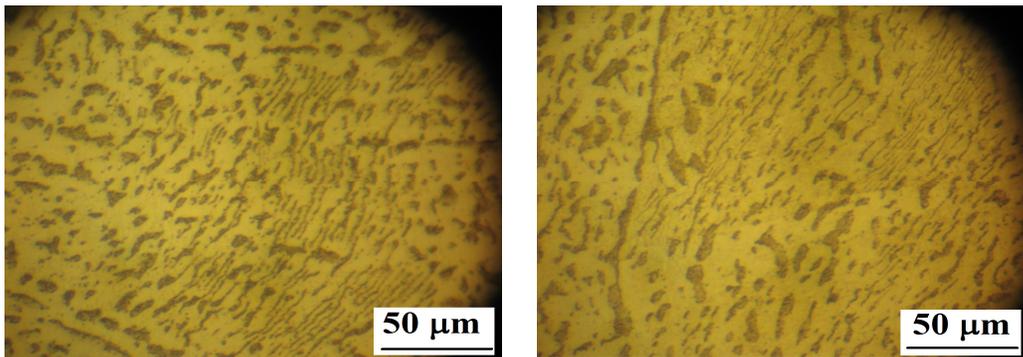


**Fig. IV.11.** Microstructure de l'alliage Sn-37Pb à 100°C pendant 7h (dans deux zones différentes).

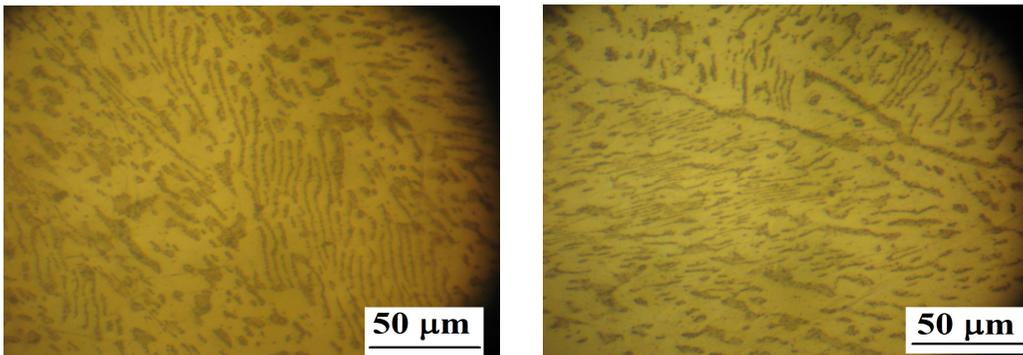
-Le prolongement du temps de vieillissement à 100°C conduira la formation de structure lamellaire (Fig.IV.12, 13).

Donc la structure lamellaire se constitue de lamelles de solution solide riche en Pb alternent avec des lamelles de solution solide riche en Sn. Ce système de lamelles qui se forment par vieillissement, n'est pas identique à celui qui se forme à 180°C. Car, d'après Blanchin et al. [4], les lamelles contiennent 29% d'étain et les lamelles Sn 2,5% de plomb; à 20°C, à l'équilibre thermodynamique, elles n'en contiennent plus respectivement que 4 et 1%.

Donc, La structure des lamelles est donc modifiée par tout traitement thermique et aussi par vieillissement, car, la solubilité de l'un des constituants dans l'autre varie avec la température [4].

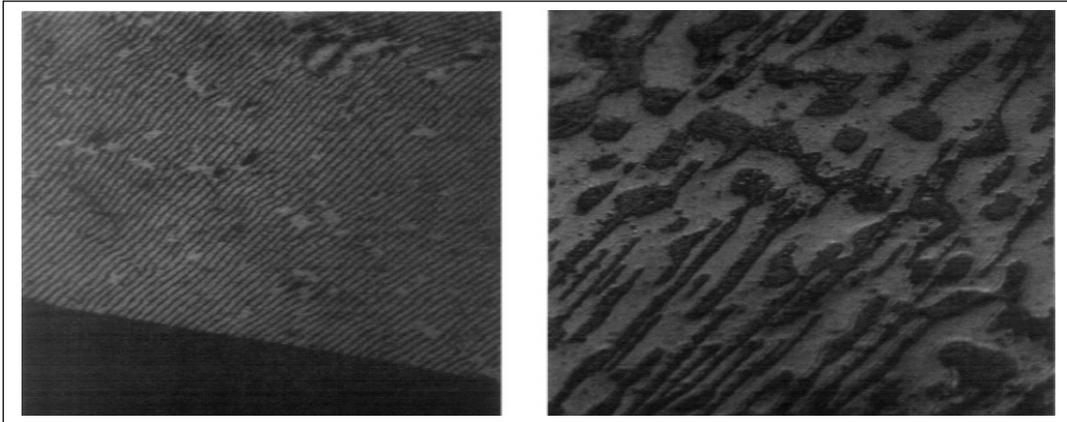


**Fig. IV.12.** Microstructure de l'alliage Sn-37Pb vieilli à 100°C pendant 8h (dans deux zones différentes).



**Fig. IV.13.** Microstructure de l'alliage Sn-37Pb vieilli 100°C pendant 10h (dans deux zones différentes).

On note que Cette structure lamellaire a été déjà observée par Blanchin et al. [4]. Mais, pendant un temps de vieillissement 16h et 2 mois à 150°C (Fig. IV.14).

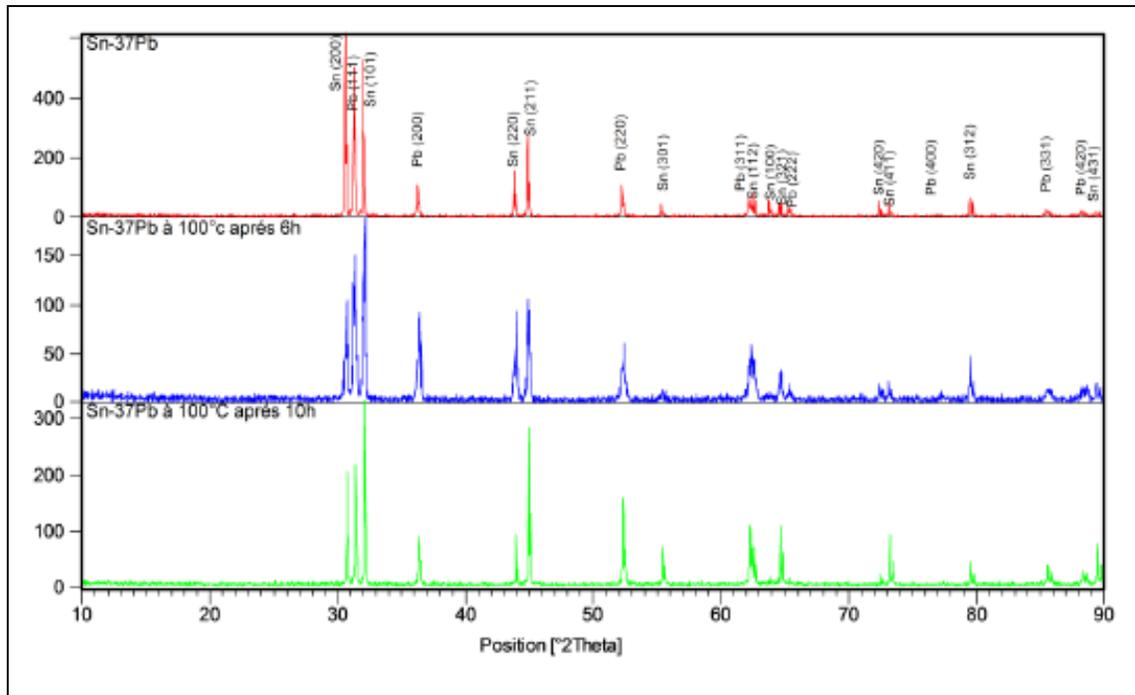


**Fig. IV.14.** Micrographies représentant l'eutectique Pb-Sn après recuit à 150°C: (a) 16 h. (b) 2 mois [4].

#### 1.2.1.2. Analyse par diffraction de rayons X :

D'après les diffractogrammes de rayons X de l'alliage Sn-37Pb (Fig.IV.15) au cours de vieillissement à 100°C, on constate que par rapport à l'échantillon de référence (non traité), les pics de faibles angles nous indiquent une réorientation des grains, et ceci est en accord avec le changement morphologique observé par le microscope optique. Par contre les autres pics, ont subi un rétrécissement, ce qui correspond aussi au changement de la taille des grains.

On constate que les intensités et les positions des pics sont variées. Ces variations sont liées aux changements microstructuraux de l'alliage Sn-37Pb lors de ce traitement de vieillissement. On note aussi que les dédoublements des pics sont liés aux plusieurs radiations ;  $\text{CuK}\alpha_1$ ,  $\text{CuK}\alpha_2$ , et  $\text{CuK}\beta$ .

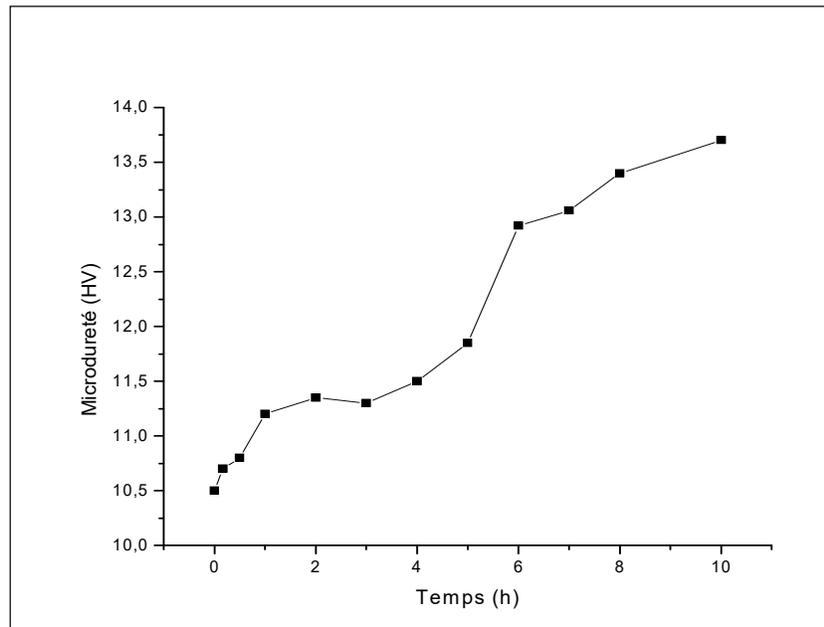


**Fig. IV.15.** La variation des spectres de RX en fonction de temps de vieillissement à 100°C de l'alliage Sn-37Pb.

### 1.2.1.3. Mesures de microdureté :

La variation de la microdureté au court de vieillissement à 100°C pendant : 10 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h et 10h est représenté dans la figure IV.16.

On constate que la dureté augmente avec le prolongement du temps de vieillissement. Ce durcissement est lié au changement microstructural de l'alliage lors de ce traitement de vieillissement.



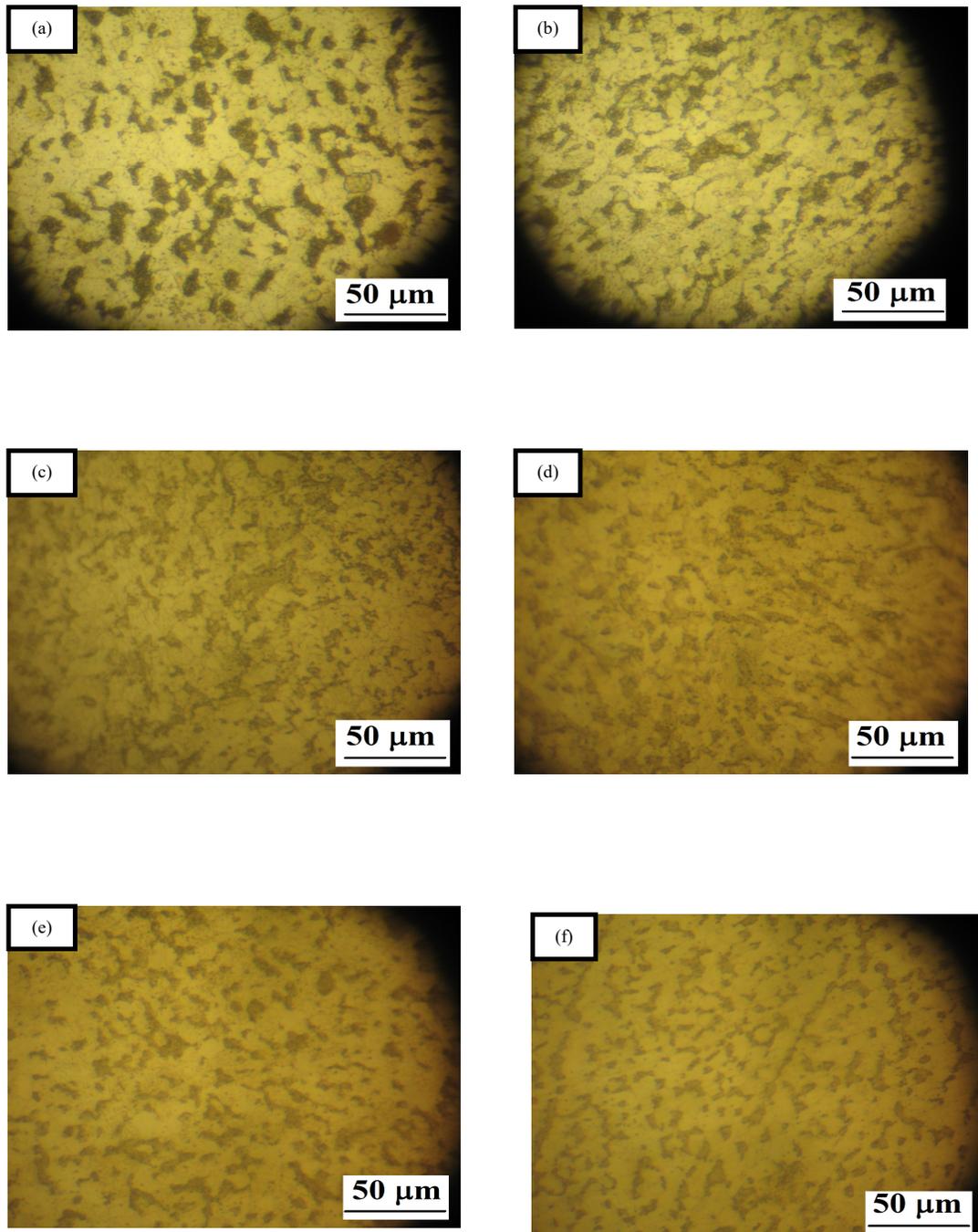
**Fig. IV.16.** La variation de la microdureté de l'alliage Sn-37Pb en fonction de temps de vieillissement à 100°C.

## 1.2.2. Cas Vieillissement à 60°C de brasure Sn-37Pb :

### 1.2.2.1. Observations micrographiques :

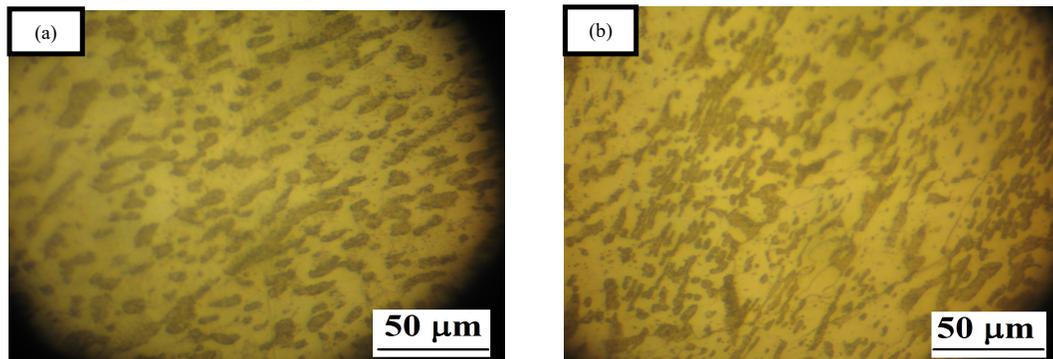
La variation de la microstructure au cours de vieillissement de l'alliage Sn-37Pb à 60°C pendant : 10min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h et 10h) est représentée dans les figures suivantes :

-On observe d'après la figure IV.17 qu'il y a un changement de la taille et de la forme de la phase  $\alpha$ .



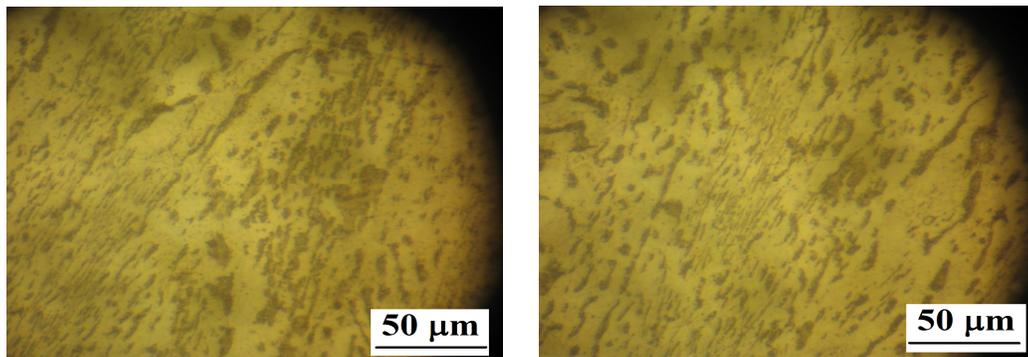
**Fig. IV.17.** Microstructures de l'alliage Sn-37Pb vieilli à 60°C pendant. (a) 10min. (b), 30min. (c) 1h, (d) 2h. (e) 3h. (f) 4h.

-On observe d'après la figure IV.18, le début de la formation des zones.

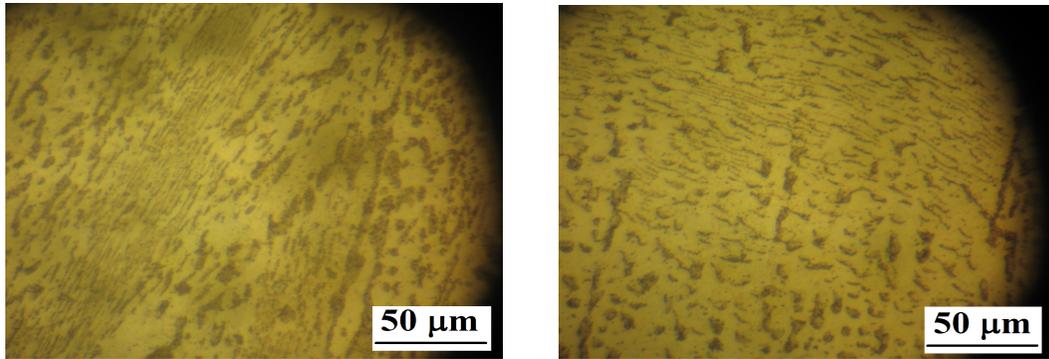


**Fig. IV.18.** Microstructures de l'alliage Sn-37Pb vieilli à 60°C pendant. (a), 5h. (b) 6h.

-On observe d'après la figure IV.19, et la figure IV.20 l'apparence des lamelles dans des zones particulières, et qui ont des orientations privilégiées.

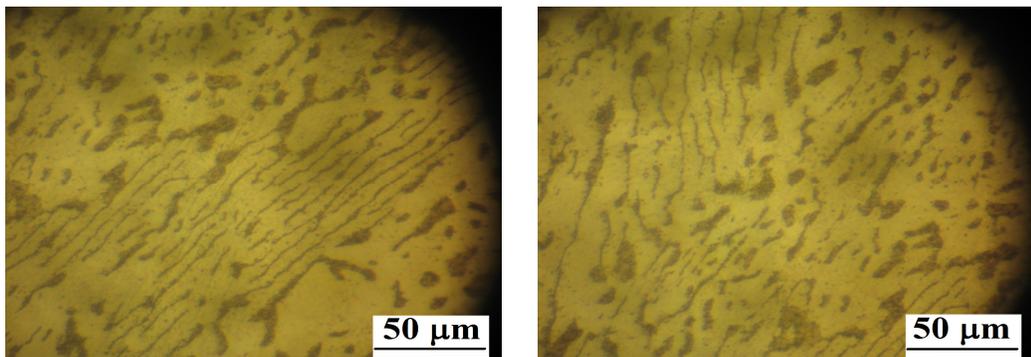


**Fig. IV.19.** Microstructures de l'alliage Sn-37Pb vieilli à 60°C pendant 7h (dans deux zones différentes).



**Fig. IV.20.** Microstructures de l'alliage Sn-37Pb à 60°C pendant 8h (dans deux zones différentes).

-On observe d'après la figure IV.21 que la structure lamellaire est claire dans la plus part de la surface de l'échantillon.



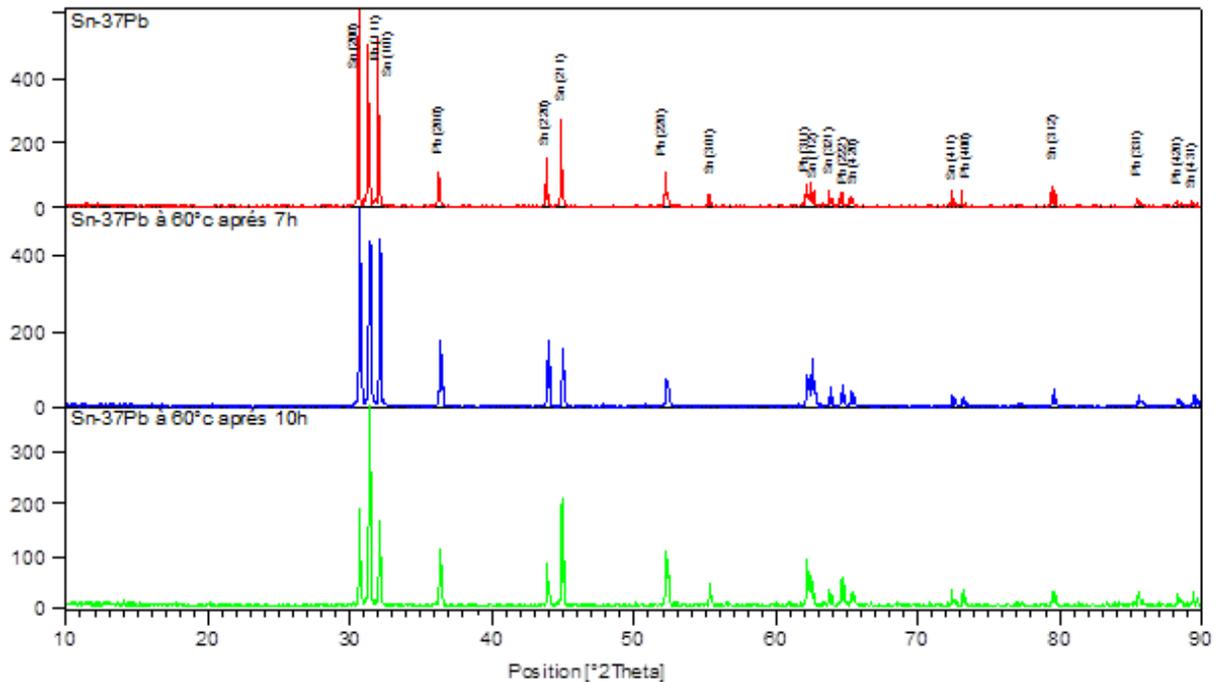
**Fig. IV.21.** Microstructures de l'alliage Sn-37Pb vieilli à 60°C pendant 10h (dans deux zones différentes).

On note, d'après l'analyse micrographique de vieillissement à 100 et 60°C de l'alliage Sn-37Pb, que l'apparence de la structure lamellaire est pendant un temps de vieillissement de

6h à 100°C, par contre à 60°C, est pendant 7h, Ce qui veut dire que la structure lamellaire dépend beaucoup avec de température de vieillissement.

### 1.2.2.2. L'analyse par diffraction de rayons X :

On constate que les intensités et les positions des pics varient au cours des traitements de vieillissement. Ces variations sont liées aux changements microstructuraux de l'alliage Sn-37Pb lors de ce traitement de vieillissement. On note aussi que les dédoublements des pics sont liés aux plusieurs radiations ;  $\text{CuK}\alpha_1$ ,  $\text{CuK}\alpha_2$ , et  $\text{CuK}\beta$ .

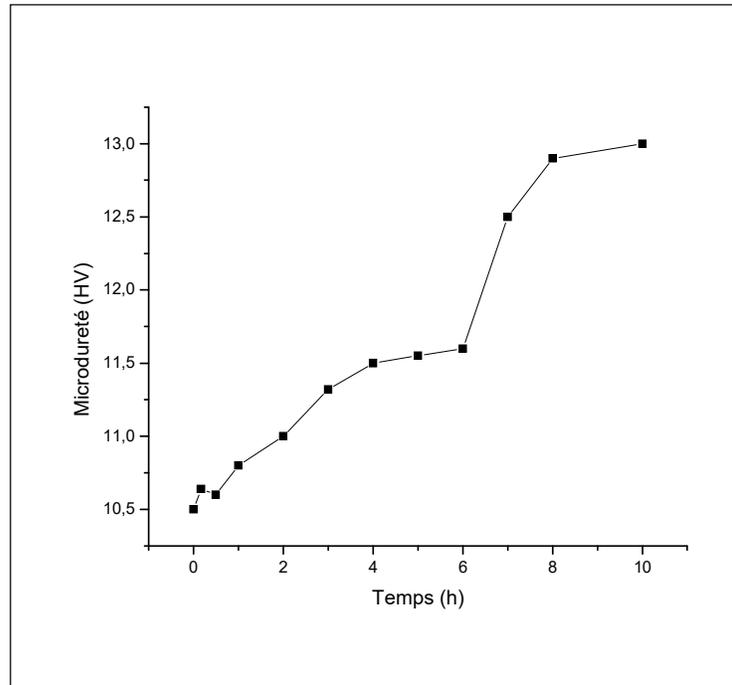


**Fig. IV.22.** La variation des diffractogrammes de RX de l'alliage Sn-37Pb en fonction de temps de vieillissement à température 60°C de l'alliage Sn-37Pb.

### 1.2.2.3. Mesures de microdureté :

La variation de la microdureté au court de vieillissement à 60°C pendant : 10 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h et 10h est représenté dans la figure IV.23.

On constate que la dureté augmente avec le prolongement du temps de vieillissement. Ce durcissement est lié au changement microstructural de l'alliage lors de ce traitement de vieillissement, c'est-à-dire la formation des lamelles.



**Fig. IV.23.** La variation de la microdureté de l'alliage S-37Pb en fonction de temps de vieillissement à température 60°C.

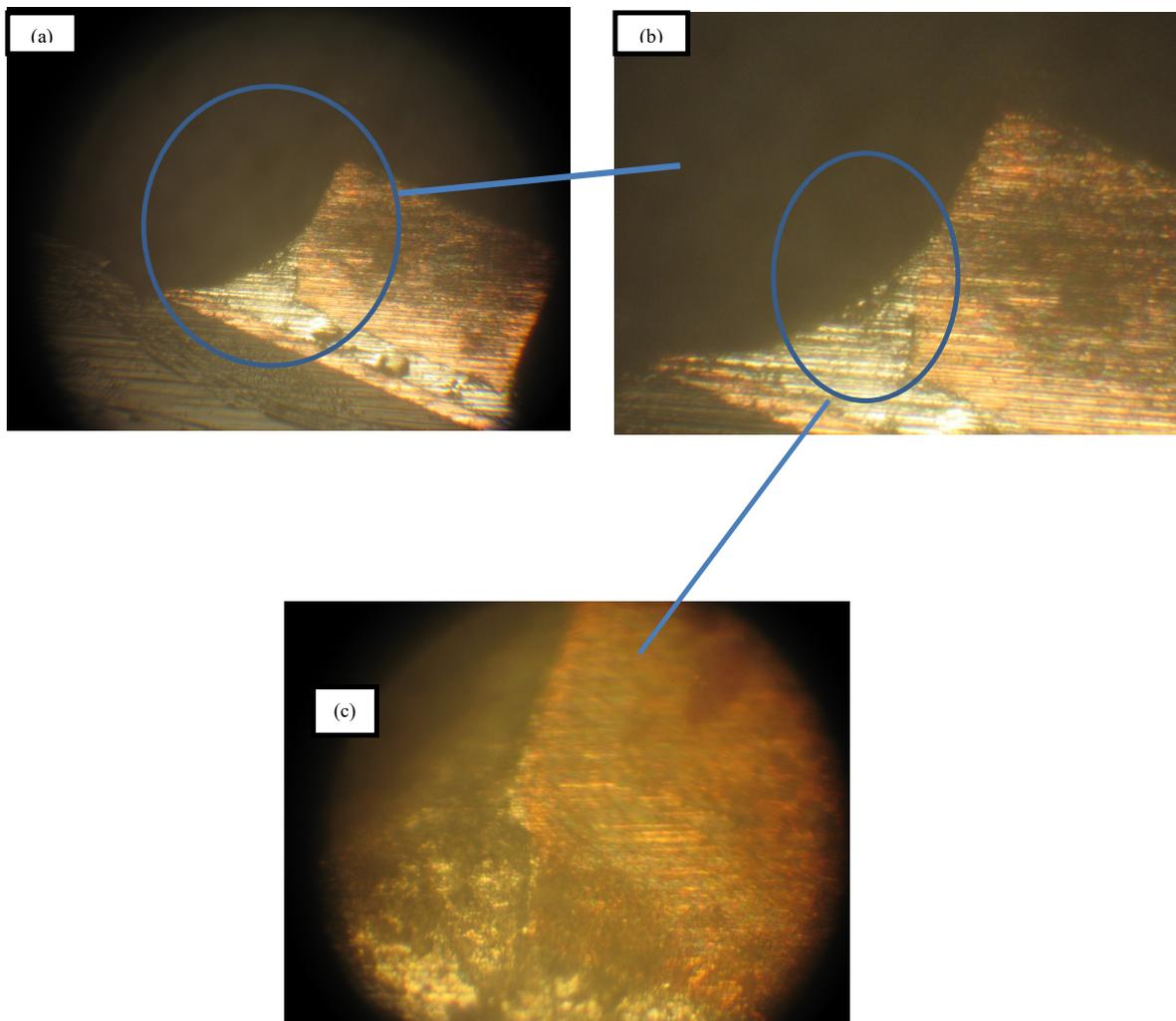
-On observe, d'après les courbes de microdureté de vieillissement entre 100 et 60°C de l'alliage Sn-37Pb, que la variation de la microdureté à 100°C est considérable à partir d'un temps de vieillissement de 6h, HV=13, qui correspond à l'apparition de la structure lamellaire, et augmente jusqu'à HV=14 à 10h, par contre à 60°C, la variation de la microdureté est considérable à partir d'un temps de vieillissement de 7h, HV=12,5, qui correspond à l'apparition de la structure lamellaire, et augmente jusqu'à HV=13 à 10h.

## 2. Cas de joint de brasure en Sn-37Pb :

Les figures IV.24, 26, et 27, sont des observations microscopiques des joints de brasure en Sn-37Pb, au cours d'une multitude de cycles thermiques (480 cycles thermiques) entre 0 et 100°C. Ces cycles thermiques ont pour but de voir le comportement du joint brasé lors d'une fatigue thermique de différents types de composants

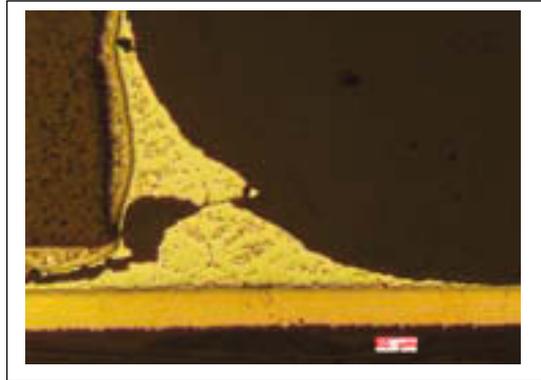
### 2.1. Composant de type CMS :

La figure IV.24 montre la formation des fissures après 480 cycles thermiques pour un composant de type CMS.



**Fig. IV.24.** La formation des fissures après 480cycles thermiques à 0°C-100°C dans un composant de type CMS. (a), avant les cycles thermiques. (b), la grandissement de (a). (c), après les cycles thermiques.

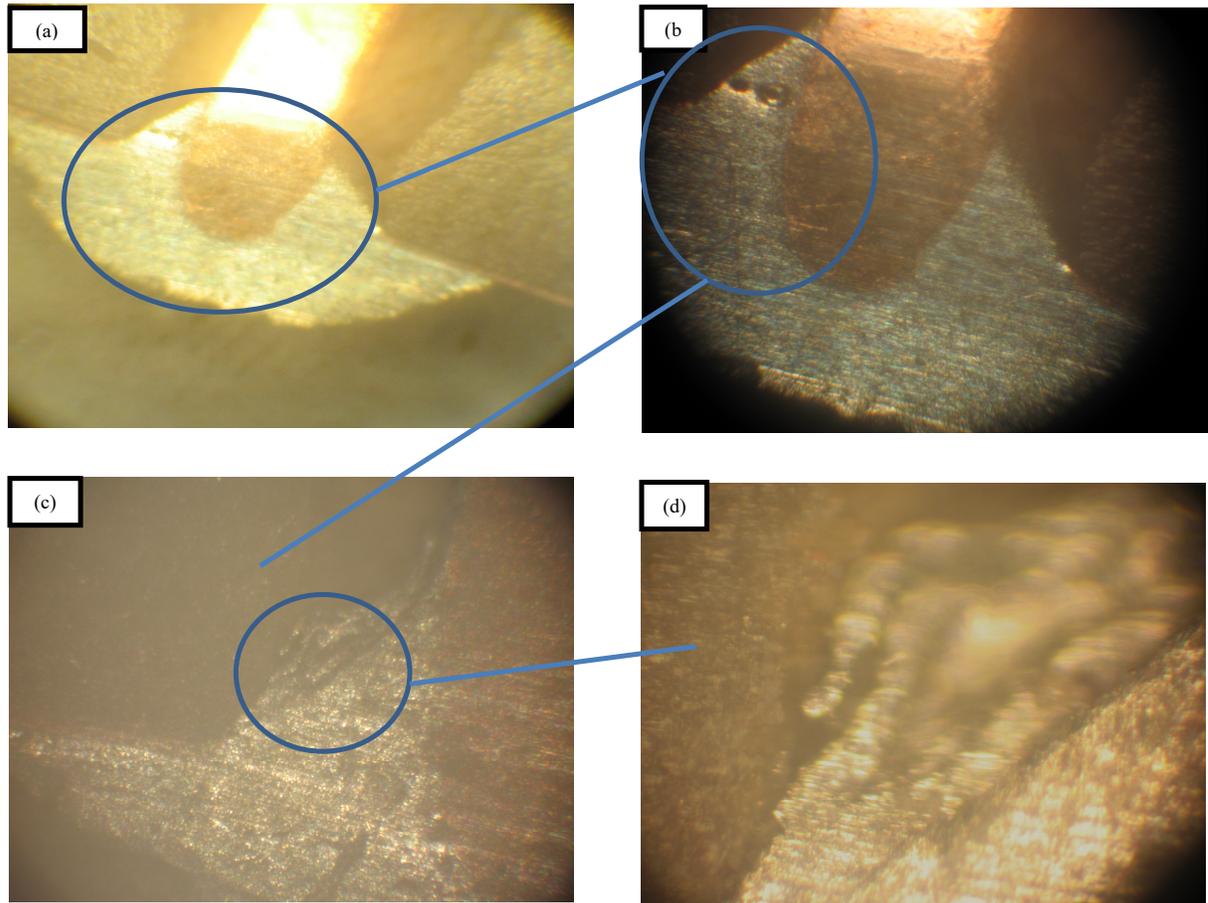
Ces fissures apparaissent entre le composant électronique et la brasure (Sn-37PB). Ces mêmes résultats ont été observés par Berthou et al. [5] (Fig.IV.25) dans un joint de brasure SAC (Sn-Ag-Cu) après 1000 cycles thermiques.



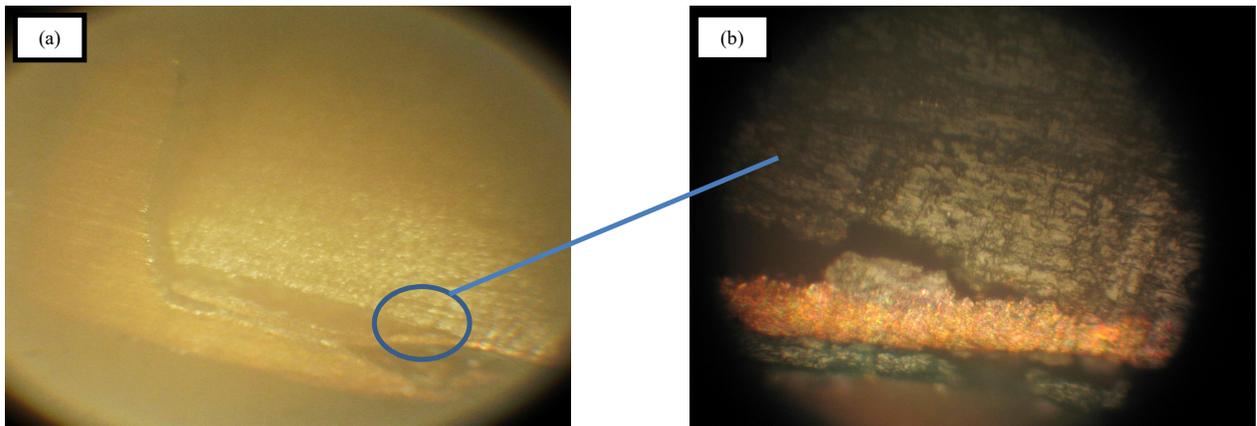
**Fig. IV.25.** Défaillance de joint de brasure SAC (Sn-Ag-Cu) après 1000 cycles thermiques [5].

## **2.2. Composants de type traversants :**

Les figures IV.26 et 27 montrent les fissures observées après 480 cycles dans deux composants de types traversants. Ces fissures apparaissent au niveau de 480 cycles thermiques.



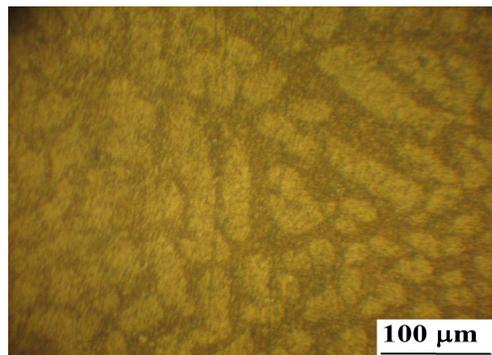
**Fig. IV.26.** La formation des fissures dans un composant de type traversant après 480 cycles thermiques à 0°C-100°C. (a) et (b), avant les cycles thermiques. (c) et (d), après les cycles thermiques.



**Fig. IV.27.** Rupture d'un composant de type traversant après 480 cycles thermiques à 0-100°C.

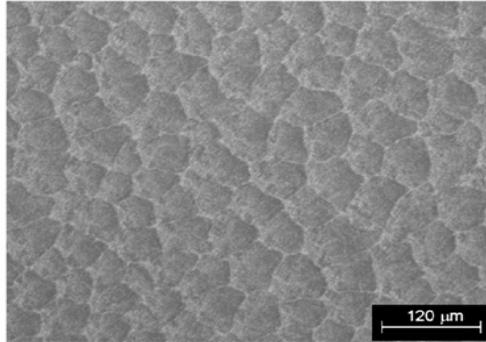
### 3. Elaboration de l'alliage de brasure Sn-0,7Cu :

Dans cette partie d'étude nous avons essayés d'élaborer un alliage de brasure Sn-0,7Cu qui remplace l'alliage Sn-37Pb. La figure IV.28 représente la microstructure de l'alliage élaboré Sn-0,7Cu. Cette microstructure se compose de mélange de deux phases : une phase riche en Sn (régions claires), et une phase qu'est des particules intermétalliques sous formes de fibre, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, (régions foncés). Cette microstructure a été déjà observée par Itamazeo T.L. Mouraa [6] (Fig.IV.27).



**Fig. IV.28.** Microstructure de l'alliage élaboré Sn-0,7Cu.

Dans la figure IV.29 les régions claires représentent la phase  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , et les régions foncées représentent la phase riche en Sn.



**Fig. IV.29.** Microstructure de l'alliage Sn-0,7Cu [6].

# Sommaire

<b><u>Introduction générale</u></b> .....	1
<b><u>Chapitre I : Notions générales</u></b>	
<b><u>Partie A : Généralités sur les assemblages électroniques</u></b>	
1. <u>Notion de brasage</u> .....	5
2. <u>Types de brasage</u> .....	5
3. <u>Comparaison entre les brasures tendres et fortes</u> .....	6
4. <u>La carte électronique (PCB)</u> .....	9
4.1. Définition.....	9
4.2. Différents types de PCB.....	9
5. <u>Les types de montage des composants sur le PCB</u> .....	10
6. <u>Procédés de brasage des composants</u> .....	12
6.1. Selon l'exécution du brasage.....	12
6.2. Selon la méthode de brasage.....	13
6.2.1. Procédé de brasage CS.....	13
6.2.1.1. Principe.....	13
6.2.1.2. Description du procédé.....	13
6.2.1.3. Principe de base d'une machine de brasage à la vague.....	14
6.2.1.4. Le profil de température.....	16
6.2.2. Procédé de brasage SC.....	16
6.2.2.1. Principe.....	16
6.2.2.2. Description du procédé.....	17
6.2.2.3. Principe de base d'une machine de brasage par refusion.....	18
6.2.2.3.1. Principe de base d'une machine de refusion au four à rayonnement infra-rouge.....	18
6.2.2.3.2. Principe de base d'une machine de refusion en phase vapeur.....	18
6.2.2.4. Le profil de température.....	19
7. <u>Les procédés de brasage des différents types de montage</u> .....	20

7.1. Montage traversants.....	20
7.2. Montage tout CMS.....	21
7.3. Montage mixte.....	22

## **Partie B : Les brasures et leur métallurgies**

<u>1. Les brasures Sn-Pb.....</u>	24
1.1. Histoire de brasures molles contenant le plomb et l'étain.....	24
1.2. Les attributs des brasures Sn-Pb.....	25
1.3. Métallurgie physique liée au système Sn-Pb.....	25
1.3.1. Microstructure et le diagramme de phase du système Sn-Pb.....	26
1.3.1.1. Exemples d'alliage de brasure Sn-Pb.....	27
1.4. Métallurgie physique de formation de composé intermétallique avec le système Sn-Pb.....	32
1.4.1. La réaction avec le cuivre (Cu).....	32
1.4.1.1. La réaction à l'état liquide.....	33
1.4.1.2. La réaction à l'état solide.....	35
1.4.2. L'interaction avec d'autres métaux.....	36
<u>2. Les brasures sans plomb.....</u>	37
2.1. Définition.....	38
2.2. L'interdiction de l'utilisation du plomb dans les équipements électriques.....	38
2.3. Alliages de brasures sans plomb, suppléants de l'eutectique Sn-37Pb.....	39
<b><u>Références du 1<sup>er</sup> chapitre.....</u></b>	41

## **Chapitre II : Fiabilité des assemblages électroniques**

<u>1. Définition.....</u>	44
<u>2. Historique de fiabilité.....</u>	44
<u>3. Statistiques.....</u>	45
3.1. Définitions.....	45
3.2. Distributions.....	48
<u>4. Fiabilité des assemblages électroniques.....</u>	50
4.1. Origine de défaillance.....	51
4.1.1. La fatigue.....	51

4.1.2. Fluage.....	54
4.2. Facteurs métallurgiques et structuraux.....	55
4.3. Testes accélérés.....	56
4.3.1. Fatigue thermique.....	56
4.3.1.1. Mécanisme de défaillance de fatigue.....	57
4.3.1.2. Test de la fatigue thermique.....	57
4.3.1.3. Normes de test de cycles thermiques.....	59
4.3.1.4. Détection de défaillance de fatigue.....	60
<b>Références du 2<sup>ème</sup> chapitre.....</b>	<b>62</b>

### **Chapitre III : Partie pratique et moyens utilisés**

<u>1. L'étude appliquée.....</u>	64
1.1. Présentation de l'entreprise de Condor.....	64
1.2. Techniques de brasage à Condor.....	64
1.3. Prélèvement des échantillons.....	67
<u>2. Partie expérimentale.....</u>	67
2.1. L'alliage de brasage Sn-37Pb.....	67
2.2. L'étude du joint brasé.....	68
<u>3. Les moyens utilisés.....</u>	69
3.1. Polisseuse.....	69
3.2. Microscopie optique.....	69
3.3. Microscope électronique à balayage (MEB).....	70
3.4. Diffraction de rayons X.....	72
3.5. Essais de micro dureté Vickers.....	73
3.6. Le four.....	75

### **Chapitre IV : Résultats expérimentaux et interprétation**

<u>1. Cas de l'alliage de brasure Sn-37Pb.....</u>	77
1.1. L'analyse de l'échantillon de référence.....	77
1.1.1. L'analyse chimique.....	77
1.1.2. L'analyse micrographique.....	78
1.1.3. L'analyse de diffractogramme de rayons X.....	80
1.1.4. La mesure de la micro dureté.....	81

1.2. Traitements thermiques de vieillissement.....	81
1.2.1. Cas de vieillissement à 100°C de brasure Sn-37Pb.....	81
1.2.1.1. Observations micrographiques.....	81
1.2.1.2. L'analyse par diffraction de rayons X.....	86
1.2.1.3. Mesures de micro dureté.....	87
1.2.2. Cas de vieillissement à 60°C de brasure Sn-37Pb.....	88
1.2.2.1. Observations micrographiques.....	88
1.2.2.2. L'analyse par diffraction de rayons X.....	92
1.2.2.3. Mesures de micro dureté.....	92
<u>2. Cas de joint de brasure Sn-37Pb.....</u>	<u>94</u>
2.1. Composant de type CMS.....	94
2.2. Composant de type traversant.....	95
<u>3. Elaboration de l'alliage de brasure Sn-0,7Cu.....</u>	<u>97</u>
<b><u>Références du 4<sup>ème</sup> chapitre.....</u></b>	<b><u>99</u></b>
<b><u>Conclusion générale.....</u></b>	<b><u>100</u></b>