

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Ecole Nationale Polytechnique**

Département de Métallurgie

Mémoire de Fin d'Etudes  
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
Métallurgie

*Thème*

**Etude des propriétés électriques des  
alliages eutectiques Pb-Sn et Sn-Zn  
élaborés par la méthode classique**

*Réalisé par :*

- *NAILI Meriem*
- *SETTOUF Ilyes*

*Proposé et encadré par :*

*Mr. M.CHITROUB*

Promotion Juin 2011

Ecole Nationale Polytechnique, Hacén Badi, B.P.182, El-Harrach, 16200 Alger  
Tel: 021.52.53.01-03, Fax: 021.52.29.73 [www.enp.edu.dz](http://www.enp.edu.dz)

## • الملخص :

الهدف من هذا العمل هو تدليل القدرة الكهربائية لسبائك Sn-Zn و Pb-Sn الووتكتيكية رخيصة الثمن، جدارة الدراسة التجريبية التي تركزت على فهم التباين في المقاومة الكهربائية بعد الاعداد والتشويه التصفيحي على البارد (laminage) ثم المعالجة الحرارية، لدراسة التأثير على معظم المعايير لتحسين الناقلية للسبائك المستعملة.

**كلمات مفتاحية:** المقاومة الكهربائية، الناقلية الكهربائية ... الخ

## • *Résumé*

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de mettre en évidence la capacité électrique des deux alliages semi-conducteurs eutectiques, en l'occurrence le Pb-Sn et Sn-Zn peu coûteux. L'étude expérimentale a porté sur la compréhension de la variation de la résistivité électrique après élaboration et différents traitements entre autres : la déformation à froid, ainsi que le traitement thermique, afin d'étudier au mieux les paramètres influençant sur l'amélioration de la conductivité de chacun des deux alliages.

**Mots clés :** la résistivité électrique, conductivité électrique...etc.

## • *Abstract*

The aim of this final project study is to demonstrate ability of the two thermoelectric semiconductor alloys in this case the eutectic Pb-Sn and Sn-Zn. The experimental study concerned the understanding of the variation of the electric resistivity after elaboration and different treatment among others: the cold deformation, as well as the heat treatment, in order to study at best the parameters influencing on the improvement of the conductivity of each of both alloys.

**Keywords:** the electric resistivity, the electric conductivity, and so on.

## *Dédicaces*

*Le succès, c'est d'avoir réussi à faire ce que l'on aime*

*La patience est un arbre dont les racines sont amères, et dont les fruits  
sont très doux*

*Ce travail n'est que le fruit d'un acharnement et d'une volonté d'un but tant espéré, qui n'a pu se réaliser sans la présence de tous ceux qui contribué de près ou de loin par leur aide, soutien, encouragement dans les moments les plus difficiles ; c'est pour tout cela que je dédie ce mémoire :*

○ *À mes chers parents, qui m'ont apportée de l'aide et m'ont toujours poussée vers l'avant. Pour tous leurs sacrifices, leur inquiétude, que je leur suis à jamais reconnaissante ;*

○ *À mes chères tantes : Mazora, Henda, Nadjia, Rachida, Nabila*

○ *À mes oncles, mes cousins et cousines ;*

○ *À ma tata Houria ainsi qu'à ses enfants qui sont pour moi des sœurs et frères : Wassila, Manel, Omar, Fethi ;*

○ *À mes très chers amis, et plus particulièrement à Yacine, Walid, Farhat, Omar, Nassim, Imad, Imene, Maria, Lynda, Djazia, Widad, Nassrine, Ferial.*

*Meriem*



## *Dédicaces*

*Il ne suffit pas d'engranger les récoltes du savoir, du savoir-faire, ni de vendanger les fruits du savoir-être et du savoir devenir, encore faut il accepter de les offrir pour s'agrandir ensemble.*

*Jacques Salomé*

*La reconnaissance est la mémoire du cœur, donc soyons reconnaissant aux personnes qui nous donnent du bonheur ; ils sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries ; c'est pour tout celà que je dédie ce mémoire à :*

- ✓ *Mon adorable maman, mon très cher papa qui ont toujours crus en moi et qui m'ont toujours encouragé.*
- ✓ *Ma cher sœur Djazira Kenza*
- ✓ *Mon adorable frère El Hadi.*
- ✓ *La mémoire de mes grands parents paternels et à mes grands parents maternels.*
- ✓ *Toutes mes tantes, oncles, cousins et cousines.*
- ✓ *Aux êtres les plus chers à mon cœur : Hafsa, la JST qui se reconnaîtront.*
- ✓ *Mes amis les plus adorables et généreux que j'ai eu la chance de connaître :*

*Ahmed alias Hmiti, Badise, Hanafi, Abd El Hak, mohamed, Chiha, Djamel, à tous mes amis de polytechnique, tous les membre de Mont Riant, à tous nos amis du sud entre autre la wilaya de ilizi, ihrir, djanet et à tous ceux que j'ai oublié de site et qui se reconnaîtront...*

*Ilyes*





*Une âme délicate est gênée de savoir qu'on lui doit des remerciements, une âme grossière, de savoir qu'elle en doit.*

*Friedrich Nietzsche*

Nos sincères remerciements et profonde gratitude à Mr M. CHITROUB notre encadreur, pour nous avoir dirigés et soutenus tout au long de ce travail. Ses qualités intellectuelles et sa modestie ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

On remercie par anticipation, Monsieur le président du jury, Pr F. HELLAL, ainsi que tous les membres du jury à savoir, Dr A. Daimellah et Dr N. KECHOUD, d'avoir bien voulu siéger notre jury.

On tient à témoigner notre profonde reconnaissance à Mme KECHOUD, Mr F. HELLAL, Mr N. MESRATI, Mr K. ABADLI, Mr SALHI, Mr DJAGHLAL pour leur disponibilité, leur aide, leurs précieux conseils et les orientations qu'ils nous ont prodigués, qu'ils trouvent ici notre gratitude et sympathie.

Sans oublier de remercier Mr KECHOUAN, Chef de Laboratoire des Couches Minces au sein de l'USTHB pour nous avoir permis de réaliser des mesures indispensables à notre thème, ainsi que Abderahman pour sa disponibilité et orientation.

Un grand merci à Mr OUABDESSERAM Abd Malek Technicien du Département de Génie Mécanique pour sa précieuse aide et disponibilité.

Une reconnaissance aux deux sociétés ALUMET<sub>spa</sub>-filiale-annabib et SOUTHELEC<sub>spa</sub> avec leur aide concernant les produits utilisés au sein de ce mémoire.

# Sommaire

|                            |    |
|----------------------------|----|
| Introduction générale..... | 01 |
|----------------------------|----|

## ***CHAPITRE 1 : Etat de l'art***

|  |    |
|--|----|
| <b>I.1.</b> Origines.....  | 03 |
| <b>I.2.</b> Effets thermoélectrique.....   | 05 |
| <i>I.2.1.</i> Effet Seebeck.....   | 06 |
| <i>I.2.2.</i> Effet Peltier.....   | 07 |
| <i>I.2.3.</i> Effet Thomson.....   | 08 |
| <i>I.2.4.</i> Relation entre les coefficients Seebeck, Peltier et Thomson.....                   | 08 |
| <i>I.2.5.</i> Le facteur de mérite adimensionnel $Z$ .....                                       | 08 |
| <i>I.2.6.</i> Le rendement.....  | 09 |
| <b>I.3.</b> Principe de la conversion de l'énergie par effet thermoélectrique.....               | 10 |
| <b>I.4.</b> Matériaux conventionnels et leurs applications.....                                  | 11 |
| <i>I.4.1.</i> Matériaux conventionnels.....  | 11 |
| <i>I.4.2.</i> Matériaux avancés et nouvelles orientations.....                                   | 15 |
| <b>I.5.</b> Applications thermoélectriques.....  | 20 |
| <b>I.6.</b> Optimisation des matériaux thermoélectriques.....                                    | 23 |
| <b>I.7.</b> Caractérisation des propriétés structural, électrique et thermique du Sn, Pb, Zn.... | 25 |

## ***CHAPITRE 2 : Techniques expérimentales***

|   |    |
|---|----|
| <b>II.1.</b> Elaboration des alliages eutectiques Pb-Sn et Sn-Zn par la méthode classique.... | 27 |
| <b>II.2.</b> Etude métallographique.....  | 35 |
| <b>II.3.</b> Microdureté.....   | 36 |
| <b>II.4.</b> Laminage.....  | 37 |
| <b>II.5.</b> Traitement thermique.....  | 37 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>II.6. Mesure de la résistivité électrique.....</b> | <b>38</b> |
|---|-----------|

### ***CHAPITRE 3 : Résultats et interprétations***

|   |           |
|---|-----------|
| <b>III.1. Echantillons bruts de coulée.....</b>                           | <b>39</b> |
| <b>III.2. Echantillons laminés.....</b>                                   | <b>45</b> |
| <b>III.3. Echantillons après laminage et recuit.....</b>                  | <b>48</b> |
| <b>III.4. Interprétations des résultats de l'état bruts.....</b>          | <b>51</b> |
| <i>III.4.1. Pb-Sn.....</i>  | <i>51</i> |
| <i>III.4.2. Sn-Zn.....</i>  | <i>54</i> |
| <b>III.5. Interprétations des résultats après laminage.....</b>           | <b>59</b> |
| <i>III.5.1. Pb-Sn.....</i>  | <i>59</i> |
| <i>III.5.2. Sn-Zn.....</i>  | <i>60</i> |
| <b>III.6. Interprétations des résultats après laminage et recuit.....</b> | <b>63</b> |
| <i>III.5.1. Pb-Sn.....</i>  | <i>63</i> |
| <i>III.5.2. Sn-Zn.....</i>  | <i>65</i> |
| Conclusion générale.....  | 68        |

Bibliographie

Annexes

De nos jours, tout développement économique induit une forte demande en matière d'énergie ; pour cela, le besoin à vouloir diversifier la nature des ressources énergétiques prend tout son sens ; et surtout avec l'épuisement des réserves fossiles accompagnées de toutes leurs répercussions environnementales ; ont donné lieu à une nouvelle renaissance aux énergies renouvelables telles que : l'éolien, le photovoltaïque et le thermoélectrique.

Bien que la conversion thermoélectrique ait été découverte il y a plus d'un siècle; elle n'a pas fait l'objet d'application à grande échelle ; due aux performances limitées de ses générateurs; cela est reflété par un faible facteur de mérite  $Z$ .

Entre autres, un axe très important d'investigation dans cette problématique traite la récupération de quantités gaspillées par effet Joule, lors de nombreux processus industriels.

A cet effet, une effervescence des chercheurs s'est traduite par la découverte de nouveaux alliages, élaborés à partir d'éléments communs ou par dopage, pour une éventuelle augmentation du facteur de mérite adimensionnel.

L'objectif de notre travail porte sur l'étude des propriétés électriques de deux alliages semi-conducteurs binaires eutectiques Pb-Sn (intrinsèque) et Sn-Zn (extrinsèque) élaborés par la méthode classique. Cela nous a induit à la caractérisation de ces derniers, en vue d'indexer la possibilité d'utilisation de ces matériaux peu coûteux et facilement disponibles dans le domaine thermoélectrique.

Dans le premier chapitre, nous présentons les origines de la thermoélectricité, ses principes de bases et les paramètres importants qui permettent d'optimiser les matériaux thermoélectriques, ainsi que le choix des matériaux utilisés seront justifiés en faisant le point sur leurs propriétés générales.

Dans le deuxième chapitre et dans un premier temps, nous présenterons la technique d'élaboration de nos échantillons, en passant par la microstructure, les distances interlamellaires ainsi que de la mesure de la résistivité électrique. En second lieu, une déformation à froid par laminage sera effectuée afin d'étudier le comportement de la résistivité électrique et de la microstructure des deux alliages, et en troisième lieu, les échantillons laminés subiront un recuit, afin de définir le meilleur traitement aboutissant aux basses résistivités électriques.

Le troisième chapitre quant à lui, est consacré aux résultats des mesures accompagnés de commentaires qui illustrent les données obtenues, afin d'indexer le potentiel électrique des métaux étudiés. Ce même chapitre résume toutes les données avec les différentes interprétations.

Ce document finalisé par une conclusion générale, donnera lieu à une comparaison entre le comportement des deux alliages durant toute la partie expérimentale, et qui sera mis en évidence, afin d'indexer le potentiel électrique de chacun d'eux, ainsi que d'éventuelles propositions pour la poursuite de cette étude dans le domaine thermoélectrique.

La thermoélectricité a déjà derrière elle une longue histoire. Si ses applications restent jusqu'à aujourd'hui cantonnées aux riches technologies, celle-ci ne manque pas de prestige, puisque les matériaux thermoélectriques bénéficient, entre autres, de la confiance de la NASA qui se présente comme étant une référence incontournable.

L'effet thermoélectrique est un phénomène physique caractéristique de certains matériaux contribuant à la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique, ou réciproquement, par le déplacement des calories par l'application d'un courant électrique. Cet effet est à la base d'applications de réfrigération et de génération d'électricité [1].

### I.1. Origines

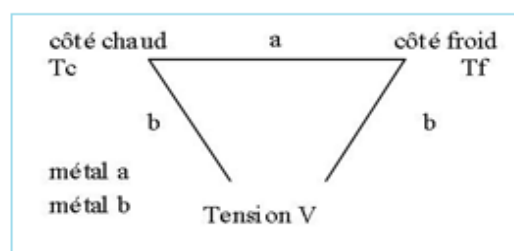
L'histoire de la thermoélectricité a débuté à l'aube du XIX<sup>ème</sup> siècle avec les découvertes des effets de Seebeck, Peltier et Thomson.

Cependant, Volta semble être le premier à avoir mis en évidence le phénomène thermoélectrique en 1794. Mario Glozzi, dans son livre '*Storia della Fisica*', paru en 1796, rapporte que Volta avait relevé l'effet d'un courant électrique sur une grenouille à une extrémité d'un conducteur en fer quand l'autre était plongée dans de l'eau bouillante. Il s'agit bel et bien d'un phénomène thermoélectrique [2].

En 1821, le physicien allemand Thomas Johann Seebeck remarqua la déviation d'une aiguille métallique placée près d'une spire faite de deux conducteurs de nature différente, et dont les deux jonctions sont soumises à un gradient de température, et qui est représenté dans la *figure 1*.

Il constata aussi que la magnitude de cette déviation est proportionnelle à la différence de température, et dépend des propriétés de conduction des matériaux. Il assigna d'abord cette déviation à l'action du champ magnétique induit par la température, mais réalisa par la suite qu'elle est le résultat d'un courant électrique produit par le gradient de température présent dans le circuit fermé, qui génère une différence de potentiel proportionnelle au gradient de température ( $\Delta T = T_C - T_F$ ) entre les deux jonctions chaude et froide.

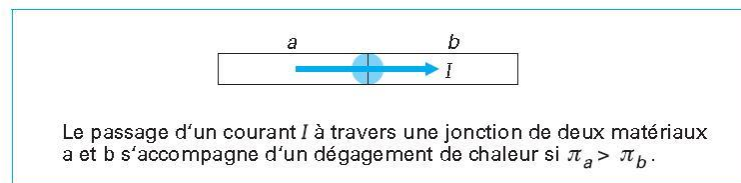
L'application la plus fréquente de l'effet Seebeck est la mesure de température à l'aide d'un thermocouple [3,4].



**Figure 1.** Schéma descriptif de l'effet Seebeck [2].

Quelques années plus tard, en 1834, le physicien français Jean Peltier découvrit le second effet thermoélectrique, et qui fut correctement interprété par Lenz en 1938. Celui-ci stipule qu'une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux de natures différentes soumis à un courant électrique selon la direction du courant, la chaleur est absorbée ou dégagée au niveau de la jonction entre les deux conducteurs, comme illustré dans la *figure 2*.

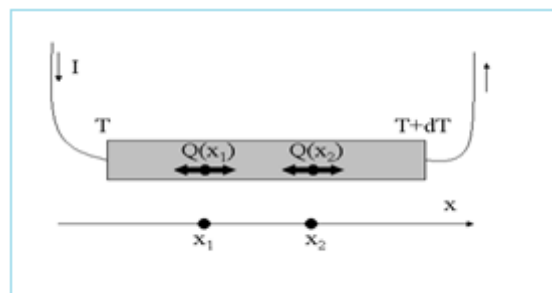
Ce qu'il démontre en gelant de l'eau autour d'une jonction de Bismuth-Antimoine, et en la décongelant en inversant le sens du courant [1, 3, 5].



**Figure 2.** Schéma descriptif de l'effet Peltier [6].

En 1851, le physicien anglais William Thomson montra que les effets Seebeck et Peltier sont liés : un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique, échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Réciproquement, un courant électrique est généré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur.

La différence fondamentale entre les effets Seebeck et Peltier considérés séparément et l'effet Thomson est l'existence de ce dernier pour un seul matériau et l'inutilité d'une jonction, son principe est illustré dans la *figure 3* [1].



**Figure 3.** Schéma descriptif de l'effet Thomson [7].

Les seules applications pratiques de ces découvertes se sont longtemps limitées au thermocouple pour la mesure des températures. L'idée pour la production de l'électricité ne se dessina que bien plus tard [8].

En 1909, et pour la première fois, Altenkirch a calculé correctement le rendement d'un générateur thermoélectrique fondé sur l'effet Seebeck. L'idée d'utiliser cet effet pour produire de l'électricité fut rejeté à cause du faible rendement 0,1%, elle était plutôt destinée à l'utilisation des métaux pour la construction des générateurs.

Altenkirch réussit seulement à montrer quelles devraient être les propriétés d'un bon matériau thermoélectrique, à savoir un coefficient Seebeck ' $\alpha$ ' grand, avec une faible conductivité thermique ' $\lambda$ ' afin de maintenir un gradient de température important, et une faible résistivité électrique ' $\rho$ ' de manière à minimiser les pertes à effet de joule [8]. Ceci a conduit à définir le facteur de mérite englobant toutes ces propriétés ( $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ ) [5].

En 1954, Maria Telkes réussit à convertir de l'énergie solaire en énergie thermoélectrique, en utilisant un couple formé d'antimoniure de Zinc et de l'alliage Bismuth-antimoine ayant un rendement de 3,3%. Ce fut le premier générateur thermoélectrique à rendement acceptable [8].

Deux années plus tard, Loffe développe sa théorie de thermo-éléments semi-conducteurs, il démontre également que la conductivité thermique des semi-conducteurs peut être réduite d'avantage en faisant des alliages avec des éléments ou composés isomorphes [5].

La réfrigération par effet Peltier trouve un développement dans des applications en liaison avec l'électronique, alors que la génération d'électricité trouve débouché dans les applications spatiales de la NAZA, avec les RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator) qui ont démontré leur grande fiabilité par la durée de fonctionnement pendant plus de 17 ans, embarqué dans les sondes voyager en 1977.

A la suite du crash pétrolier en 1974, la question d'industrialiser à grande échelle ces matériaux commence à germer, cependant, l'industrie thermoélectrique reste cantonnée aux riches technologies : Refroidissement de composant pour l'électro-optique, applications spatiales à cause du cout de production des semi-conducteur qui reste encore très élevé.

Dans la foulée des accords de Kyoto en 1994, qui préconise le remplacement des combustibles fossiles par des moyens plus écologiques de conversion d'énergie, plusieurs gouvernements se sont lancés sur la piste d'énergies propres et renouvelables. Il s'insuffle ainsi une dynamique autour de la recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques à haute performance, qui débute avec des programmes de recherches ambitieux : Programme du DOE (Departement Of Energy) aux Etats Unis, NEDO (Organisation Gouvernementale en Charge des Energies Nouvelles) au Japon, ainsi de nouveaux matériaux sont explorés et des avancées significatives sont constatées, en laissant espérer de nouveaux champs d'application dans les domaines civil et spatial [8].

Au cours des 80 années suivantes, une seule contribution a eu lieu, c'est celle d'Altenkirch, qui en 1911 établit les bases d'efficacité des générateurs et réfrigérateurs thermoélectriques.

## **I.2. Les effets thermoélectriques**

Les applications des effets thermoélectriques nécessitent la présence de deux matériaux différents a et b qui constitueront la jonction [9].



### I.2.1. Effet Seebeck

Un circuit formé de deux matériaux conducteurs différents A et B, auxquels un gradient de température  $\Delta T$  est appliqué aux extrémités d'un barreau conducteur, engendre spontanément une différence de potentiel  $\Delta V$  proportionnelle à la différence de température [9].

Lorsqu'une face d'un matériau thermoélectrique est chauffée, les électrons, porteurs de charges négatives, acquièrent plus d'énergie cinétique, et se déplacent par conséquent, plus facilement dans le matériau. Ils diffusent de la face chaude vers la face froide et s'accumulent ensuite à celle-ci. Les trous, porteurs de charges positives, s'amoncellent par conséquent à la face chaude. Cette accumulation de charges sur les deux faces génère une différence de potentiel entre les deux jonctions et un courant électrique, lorsque les deux faces sont connectées. Ce courant est maintenu tant que le gradient de température existe entre les deux faces du matériau [3].

Cette proportionnalité est traduite par le coefficient Seebeck  $S$  [ $V.K^{-1}$ ], souvent appelé pouvoir thermoélectrique, est représenté dans l'équation (1) [9].

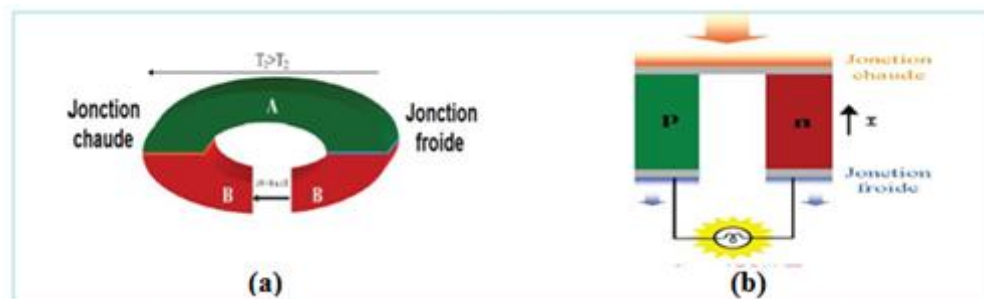
$$S_{ab} = \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

Les coefficients Seebeck des deux matériaux sont reliés au coefficient Seebeck du couple selon l'équation (2) [7].

$$S_{ab} = S_a - S_b \quad (2)$$

Le signe du coefficient Seebeck est positif si le courant électrique, provoqué par la différence de potentiel, circule dans le sens opposé à celui du flux de chaleur qui va de la jonction chaude  $T_1$  vers la jonction froide  $T_2$  [3].

Le schéma ci-dessous illustre l'effet Seebeck ainsi que le mode de génération thermoélectrique.



**Figure 4.** Schéma descriptif de l'effet Seebeck (a), et du Mode de conversion thermoélectrique (b) [3].

### I.2.2. Effet Peltier

Il décrit le phénomène de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique à la jonction de deux métaux différents. En effet, lorsqu'un courant électrique passe à travers la jonction reliant deux conducteurs, on observe un dégagement de chaleur ou une absorption de chaleur selon le sens du courant [10].

Lorsque le courant circule du semi-conducteur N (coefficient Peltier le plus faible) vers le P (coefficient de Peltier le plus grand), la jonction refroidit, et si l'on inverse le sens du courant, la jonction chauffe [3,5].

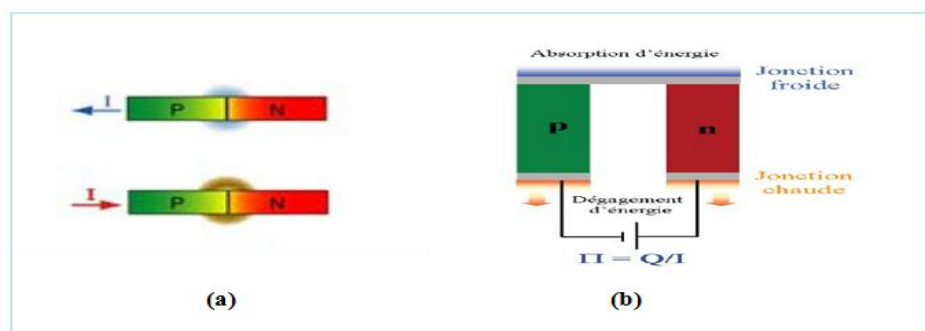
En effet, lorsque les électrons traversent le matériau de type N, le milieu étant riche en électrons, il y a plus de chocs entre les particules. Les électrons étaient donc porteurs d'une grande énergie cinétique. En passant vers un milieu P, les électrons subissent moins de chocs, et transmettent leur énergie cinétique dans la jonction entre les deux matériaux, cette perte d'énergie cinétique se traduisant par une augmentation de l'agitation thermique des particules au niveau de la jonction, il y a donc un dégagement de chaleur. Inversement, lorsque les électrons passent d'un milieu pauvre en électrons P vers un milieu riche en électrons N, le courant imposant le passage dans le matériau dopé négativement, les électrons absorbent l'énergie cinétique des particules du milieu ambiant, gagnant l'énergie cinétique nécessaire au passage dans le matériau de type N [10].

La quantité de chaleur absorbée  $Q$  ou générée est proportionnelle au courant électrique selon l'équation (3) [9].

$$\pi_{ab} = \frac{Q}{I} \quad (3)$$

$I$  : La constante de proportionnalité,

$\pi$  : Coefficient de Peltier.



**Figure 5.** Schéma représentatif de l'effet Peltier selon le sens du courant (a) ainsi que de la réfrigération (b) [3,5].

### I.2.3. Effet Thomson

Cet effet thermoélectrique met en évidence le lien entre l'effet Seebeck et l'effet Peltier. Si on fait passer un courant électrique dans un matériau soumis à un gradient de température, de la chaleur  $Q$  sera produite ou absorbée, en fonction du sens du courant [3]. Dans chaque segment ( $dx$ ) du matériau, le gradient de flux thermique est donné l'équation (4).

$$\frac{dQ}{dx} = I \frac{dT}{dx} \tau \quad (4)$$

Ou :

$x$  : la coordonnée spatiale,

$\tau$  : le facteur de Thomson donné par la relation (5) [9].

$$\pi_a - \pi_b = T \frac{dS_{ab}}{dT} \quad (5)$$

### I.2.4. Relation entre les coefficients Seebeck, Peltier et Thomson

Les trois coefficients absolus  $S$ ,  $\Pi$  et  $\tau$  sont liés par les relations (6) et (7) [9].

$$\Pi = \tau S T \quad (6)$$

$$\tau = T \frac{dS}{dT} \quad (7)$$

### I.2.5. Le facteur de mérite adimensionnel $Z$

Le facteur de mérite est le facteur permettant de classer le matériau thermoélectrique comme étant bon ou non, car sa relation est donnée en fonction des propriétés de transport de matière caractérisant le matériau.

L'optimisation de matériau pour une utilisation en conversion d'énergie par effet thermoélectrique passe par l'optimisation de leurs propriétés de transport, de manière à maximiser le facteur de mérite adimensionnel  $ZT$  donné par la relation (8) [6].

$$ZT = \frac{S^2 T \sigma}{\lambda} \quad (8)$$

Avec :

$T$  : la température absolue (en Kelvin),

$S$  : le pouvoir thermoélectrique (ou coefficient de Seebeck),

$\sigma$  : la conductivité électrique,

$\lambda$  : la conductivité thermique.

Pour un module thermoélectrique constitué de deux matériaux, types p et n, le facteur de mérite peut être déterminé par la relation (9).

$$ZT = T \times \frac{(S_p - S_n)^2}{\left(\left(\frac{\kappa_n}{\sigma_n}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\kappa_p}{\sigma_p}\right)^{\frac{1}{2}}\right)^2} \quad (9)$$

ZT est d'autant plus grand que le matériau est un bon matériau thermoélectrique, et comme ZT est dépendant de la température, il est souvent présenté sous la forme de facteur de mérite adimensionnel ZT [5].

Il apparaît clairement alors, qu'une meilleure efficacité thermoélectrique peut être atteinte, si les trois conditions ci-dessous sont remplies :

- Un coefficient Seebeck  $S$  élevé dans le but de générer une différence de potentielle élevée.
- Une faible résistivité électrique  $\rho$  afin de minimiser les pertes de chaleur par effet Joule.
- Une faible conductivité thermique  $\kappa$  en vue de maintenir un gradient de température suffisant entre les deux jonctions chaude et froide et de réduire la perte de chaleur [3].

Depuis plusieurs décennies, l'amélioration du facteur de mérite a été au cœur des efforts dans la recherche scientifique, malgré cela, pour que le rendement des systèmes thermoélectrique rivalise avec celui des systèmes de réfrigération de grande échelle, il faudrait l'augmenter, d'où l'importance de la caractérisation des propriétés concernées.

### I.2.6. Le rendement

Le rendement de la thermo-génération  $\eta$  exploitant l'effet Seebeck et le coefficient de performance en mode de réfrigération  $\phi$  utilisant l'effet Peltier, sont directement liés à la valeur de ZT.

- $\eta$  est défini comme le rapport de la puissance électrique  $W$  générée par le module, (qui doit être la plus élevée possible) sur la puissance thermique  $Q_C$  absorbée du côté chaud (que l'on souhaite minimiser), illustré dans la relation (10).
- $\phi$  est caractérisé par le rapport de la puissance thermique émise du côté froid  $Q_F$ , (que l'on essaie de maximiser) divisée par la puissance électrique  $W$  fournie au module (que l'on souhaite minimiser), illustré dans la relation (11).

$$\eta = \frac{W}{Q_C} = \frac{T_C - T_F}{T_C} \times \frac{(1 + ZT)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + ZT)^{\frac{1}{2}} + \frac{T_F}{T_C}} \quad (10)$$

$$\phi = \frac{Q_F}{W} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \times \frac{(1 + ZT)^{\frac{1}{2}} - \frac{T_C}{T_F}}{(1 + ZT)^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (11)$$

Avec :

Zt : le facteur de mérite,

T<sub>c</sub> : température chaude,

T<sub>F</sub> : température froide.

Et :

$$T = \frac{T_C + T_F}{2}$$

Un générateur, exploitant l'effet Seebeck, aura un rendement 'η' d'autant meilleur que l'écart de température appliqué est grand. D'autre part, plus ZT sera élevé et plus grand sera 'η'.

Un réfrigérateur, utilisant l'effet Peltier, aura un coefficient de performance 'φ' d'autant meilleur pour un rapport de température donné, si le facteur de ZT est élevé, il produira des écarts de température plus importants [3].

### I.3. Principe de conversion de l'énergie par effet thermoélectrique

Pour la réfrigération ou la génération d'électricité par effet thermoélectrique, un module est constitué de couples connectés électriquement, tels que les couples thermoélectriques sont constitués de deux matériaux semi-conducteurs, l'un de type P (S>0) et l'autre de type N (S<0), joints par un matériau conducteur, dont le pouvoir thermoélectrique est supposé nul.

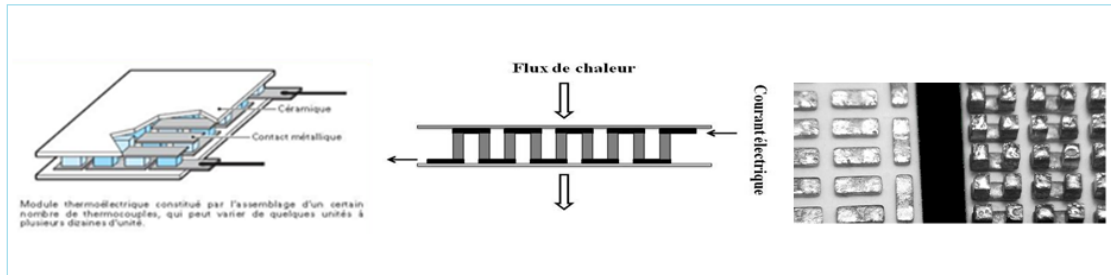
La *Figure 6* représente un module Thermoélectrique, dont les couples sont connectés en série électriquement et en parallèle thermiquement, afin d'optimiser le flux thermique et la résistance électrique du module, et La *figure 7* représente le principe de la réfrigération et de la génération thermoélectrique en considérant des convertisseurs élémentaires, c'est-à-dire constitués d'un seul thermocouple [6].

Dans le cas de la réfrigération, le courant électrique est imposé de telle manière que les porteurs de charge (électrons et trous) se déplacent de la source froide à la source chaude, dans les deux branches du couple.

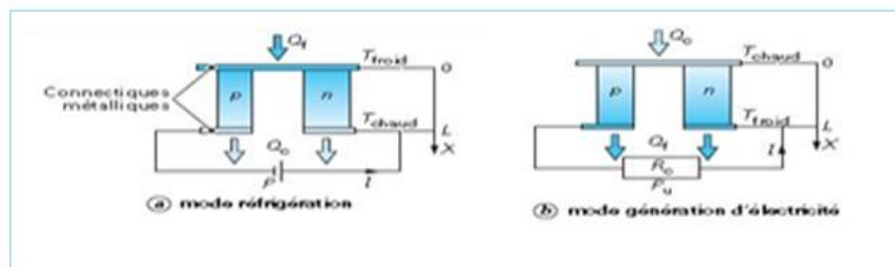
Ce faisant, ils contribuent à un transfert d'entropie de la source froide à la source chaude, et donc à un flux thermique qui va s'opposer à celui de la conduction thermique. Si les matériaux choisis ont de bonnes propriétés thermoélectriques, ce flux thermique créé par le mouvement des porteurs de charge sera plus important que celui

de la conductivité thermique, le système permettra donc, d'évacuer de la chaleur depuis la source froide vers la source chaude, et agira alors comme un réfrigérateur.

Dans le cas de la génération d'électricité, c'est le flux de chaleur qui entraîne un déplacement des porteurs de charge et donc l'apparition d'un courant électrique [9].



**Figure 6.** Représentation schématique d'un module Thermoélectrique [6, 7, 11].



**Figure 7.** Thermocouple p et n configuré en mode réfrigération (a) et en mode génération d'électricité (b) [4].

## I.4. Matériaux thermoélectriques et leurs applications

### I.4.1. Matériaux conventionnels

En vue d'application thermoélectrique, un grand nombre de matériaux ont été étudiés au cours du siècle dernier, ces matériaux dits « conventionnels » peuvent être préparés soit sous forme de monocristaux, à partir d'une technique de croissance cristalline adaptée, soit sous forme de poly-cristaux, obtenus en général par métallurgie de poudres. Le monocristal sera favorisé si le matériau a des propriétés de transport anisotropes, et que l'on recherche des performances thermoélectriques optimales. Si, au contraire, le matériau a des propriétés isotropes, le poly-Crystal sera privilégié, car plus simple à élaborer et possédant en plus une meilleure tenue mécanique que le monocristal [4].

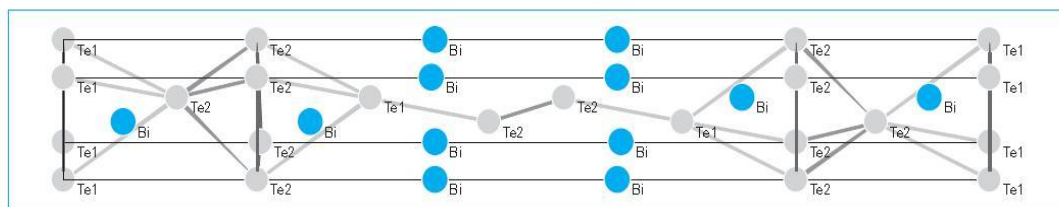
Les alliages bismuth-antimoine, la famille des tellures de bismuth et de plomb ainsi que les alliages de silicium-germanium constituent l'essentiel des matériaux de référence aux applications thermoélectriques [8].

#### I.4.1.1. $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ et ses dérivés $(\text{Bi}, \text{Sb})_2(\text{Te}, \text{Se})_3$

C'est l'archétype des bons matériaux thermoélectriques au voisinage de la température ambiante, donc utilisable en refroidissement et en génération sous faible gradient de température, et dont la structure est illustrée dans la *figure 8*.

La structure rhomboédrique est fortement anisotrope (paramètres de maille  $a \approx 0,438$  nm,  $c \approx 3,036$  nm), ce qui a une forte incidence sur le type de matériau à utiliser (monocristal ou texturé), sur les propriétés TE ( $Z$  dépend de l'orientation).

Les types p et n sont obtenus par écart à la stœchiométrie (un excès de Bi ou Te favorise l'obtention du type p ou n respectivement), le coefficient Seebeck évolue de  $\approx -200$  à  $\approx +200$   $\mu\text{V}/\text{K}$  en fonction du rapport Bi/Te. Les composés  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ont la même structure et des paramètres de maille voisins. Les effets d'alliage sont aisément réalisables (Sb sur le site Bi et Se sur le site Te1) pour diminuer la conductivité thermique et accroître  $ZT$  [6].



**Figure 8.** Structure rhomboédrique anisotrope de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  et liaisons Te-Te [6].

Le facteur de mérite de ce matériau varie entre 0,5 et 1,4 variant selon la composition de chaque élément constituant l'alliage [6].

#### I.4.1.2. $\text{PbTe}$ et ses dérivés

$\text{PbTe}$  a été l'un des premiers matériaux à être étudié pour son intérêt en thermoélectricité autour de  $400^\circ\text{C}$ . Sa structure NaCl permet au matériau d'être aussi bon à l'état poly-cristallin que monocristallin.  $\text{PbTe}$  vérifie les critères de masse atomique élevée et a une faible conductivité thermique ( $\lambda L \approx 2$   $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  à 300 K).

Le gap de ce matériau semi-conducteur croît de 0,19 eV à basse température à 0,50 eV à 650 K, et ses propriétés dans le domaine réel ont aussi été étudiées. La valeur de  $ZT$  approche de 1 en type n mais n'est que de 0,7 en type p.

Les effets d'alliage, par exemple avec  $\text{SnTe}$ , réduisent la conductivité thermique et améliorent  $ZT$  sauf si le gap diminue (le gap s'annule dans  $\text{Pb}_{0,6}\text{Sn}_{0,4}\text{Te}$ ) et la meilleure valeur de  $ZT$  ( $= 1$  à  $\approx 800$  K) est obtenue pour  $x = 0,25$ .

Les effets de mélange avec  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ont fait l'objet de nombreuses études depuis celles menées en Bulgarie.

$\text{PbTe}$  a aussi été utilisé comme dopant de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  avec un  $ZT$  supérieur ou égal à 1 à 350 K dans  $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0,2}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0,8} + 0,3$  % en masse de  $\text{PbTe}$  [6].

### I.4.1.3. TAGS (Te-Ag-Ge-Sb)

AgSbTe<sub>2</sub> est un bon matériau thermoélectrique TE en raison de sa conductivité thermique faible, son mélange avec GeTe, conduit à la série appelée TAGS (Te-Ag-Ge-Sb) qui présente de bonnes valeurs de  $ZT$ . Une partie des matériaux a la structure NaCl de GeTe et les plus fortes valeurs de  $ZT$  sont obtenues au voisinage de la transition rhomboédrique à 80 % de GeTe, ce qui induirait une diminution de la conductivité thermique. Cependant, l'alliage à 85 % de GeTe a une meilleure résistance mécanique associée à un minimum de dilatation thermique. Des mélanges plus sophistiqués ont conduit récemment à des valeurs de  $ZT$  élevées [6].

### I.4.1.4. Si-Ge

Les alliages de Si-Ge sont utilisés pour la génération de puissance électrique à haute température, principalement, dans les RTG (Radio Thermonuclear Generator). Un cœur radioactif fournit la source chaude par sa désintégration, et les éléments thermoélectriques, la puissance électrique. Les deux composants n'ayant pas de parties mobiles et dont le temps de décroissance de PuO<sub>2</sub> étant très long, la fiabilité est remarquable : Des durées de vie de 30 ans ont été atteintes.

Les meilleures compositions sont voisines de Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>. Les applications concernent la fourniture de puissance électrique pour les appareils des véhicules spatiaux ou de surveillance en milieu hostile. Les études actuelles autour des compositions classiques, concernent les effets de nanostructure [6].

Dès 1960, la plupart des matériaux thermoélectriques actuellement utilisés étaient connus et leurs performances, liées à un facteur de mérite thermoélectrique stagnant à la valeur 1, illustré dans le *tableau I*, ont peu évolué jusqu'en 1990 (sauf dans les TAGS). La seule application d'importance était fondée sur Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> pour le refroidissement. On remarque également l'absence de matériaux dans le domaine 400-700 K [6].

**Tableau I.** Représentation des matériaux conventionnels en 1960 à leur température optimale d'utilisation  $T_u$  [6].

| Caractéristiques | Bi Sb  | Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> -Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> | (Bi,Sb) <sub>2</sub> (Te,S) <sub>3</sub> | PbTe | Te Ag Ge Sb | Si Ge |
|------------------|--------|--|--|------|-------------|-------|
| Type             | n      | n, p   | n, p                                     | n    | p           | n, p  |
| $T (T_u)$        | 200    | < 300  | ≈ 300-400                                | 700  | 750         | 1 000 |
| $Z_T$ à $T_u$    | 1,1(H) | 0,8  | 0,9                                      | 0,9  | 1,1         | 0,6   |

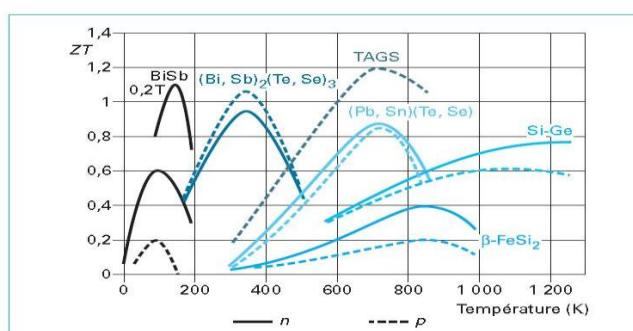
NB : *H* signifie que cette valeur de  $ZT$  n'est obtenue que sous champ magnétique.

La *figure 8* représente les dépendances en température du facteur de mérite  $ZT$  des meilleurs matériaux thermoélectriques conventionnels *n* et *p*. Ce sont tous des semi-conducteurs avec un faible gap ( $0 < E_g < 1$  eV), mis en évidence dans le *tableau I* [4].



**Tableau II.** Les valeurs du gap dans les semi-conducteurs thermoélectriques conventionnels [6].

| Semi-conducteur  | EG (eV) | Tmax pour ZT max |
|--|---------|------------------|
| <b>Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub></b>                                | 0,16    | 300              |
| <b>Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> + Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub></b> | 0,25    |                  |
| <b>PbTe</b>  | 0,50    | 650              |
| <b>AgSbTe<sub>2</sub></b>  | 0,30    | 650              |
| <b>GeTe</b>  | 0,40    | 700              |
| <b>Si-Ge</b>   | 0,70    | 1 100            |



**Figure 8.** Dépendance en température du facteur  $ZT$  des matériaux conventionnels de type  $n$  et  $p$  [4].

- A basses températures, les meilleurs matériaux sont les alliages semi-conducteurs à base de bismuth et d'antimoine de type  $n$ . L'utilisation des alliages  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  dans des modules thermoélectriques a cependant été très restreinte, à cause d'une part des faibles performances des matériaux dopés de type  $p$  ( $ZT \sim 0,2$ ) dans le domaine de température envisagé et à cause d'autre part, de la fragilité des monocristaux.

- Pour des températures comprises entre 200 et 450 K, ce sont les composés à base de tellure de bismuth ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) qui sont les plus adaptés. Ces composés sont encore jusqu'à aujourd'hui, quelques soixante années après la découverte de leur potentiel pour la conversion thermoélectrique, les matériaux les plus utilisés dans les modules commerciaux pour des applications tournées essentiellement vers la réfrigération.

Il a été montré que la formation de solutions solides, avec l'ajout à  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  d'un composé isomorphe comme le tellure d'antimoine ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ) ou le sélénure de bismuth ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ), améliore le facteur  $ZT$  en réduisant la conductivité thermique sans affecter notablement la résistivité électrique.

Les compositions conduisant aux meilleures performances thermoélectriques sont voisines de  $(\text{Sb}_{0,8}\text{Bi}_{0,2})_2\text{Te}_3$  et  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0,8}\text{Se}_{0,2})_3$  pour des matériaux de type  $p$  et  $n$ , respectivement.

- Au-delà de 450 K, les alliages à base de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ne sont plus stables chimiquement. Il faut alors se tourner vers les composés à base de  $\text{PbTe}$  qui sont les meilleurs candidats tout indiqués dans la gamme 450-800 K.

Les deux types de conduction  $p$  et  $n$  peuvent être obtenus avec des propriétés thermoélectriques voisines. Pour cette raison, que ces matériaux ont connu des développements industriels. Ils ont été employés dans des générateurs thermoélectriques dont la source chaude est un radio-isotope pour des applications spatiales aux USA et en ex-URSS durant la période 1961-1975. De nos jours ils continuent d'être utilisés dans des générateurs terrestres.

- À plus haute température, les matériaux les plus couramment utilisés sont les alliages  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  dopés au bore ou au phosphore. Ils peuvent opérer jusqu'à 1300 K sans dégradation notable. Les compositions les plus intéressantes sont celles qui sont riches en silicium ( $x=0,1-0,3$ ). Depuis 1976, ces matériaux ont définitivement remplacé la famille des PbTe dans les applications spatiales aux USA.

Nous pouvons constater que les matériaux conventionnels possèdent des valeurs expérimentales de  $ZT$  limitées au voisinage de l'unité, alors que ni la thermodynamique, ni la physique de l'état solide ne prévoient de limite. Bien qu'acceptable pour certaines applications spécialisées, cette valeur reste trop faible pour concurrencer économiquement les systèmes de refroidissement à compression ou de génération traditionnels [4].

#### I.4.2. Matériaux avancés et nouvelles orientations

De nos jours, comme cela c'est déjà passé jadis, la thermoélectricité vit une période d'effervescence, malgré ses limitations, elle connaît actuellement des applications très diverses, avec l'ambition ultime de développer des matériaux présentant des  $ZT$  supérieurs à 1. Mais le passage à des marchés de plus grande ampleur nécessite encore des avancées, notamment en matière de performances des matériaux utilisés.

Les courbes des meilleures valeurs de  $ZT$  ( $T$ ) actuellement obtenues dans des matériaux massifs sont reportées dans les figures 9, 10 pour les types  $p$  et  $n$  respectivement.

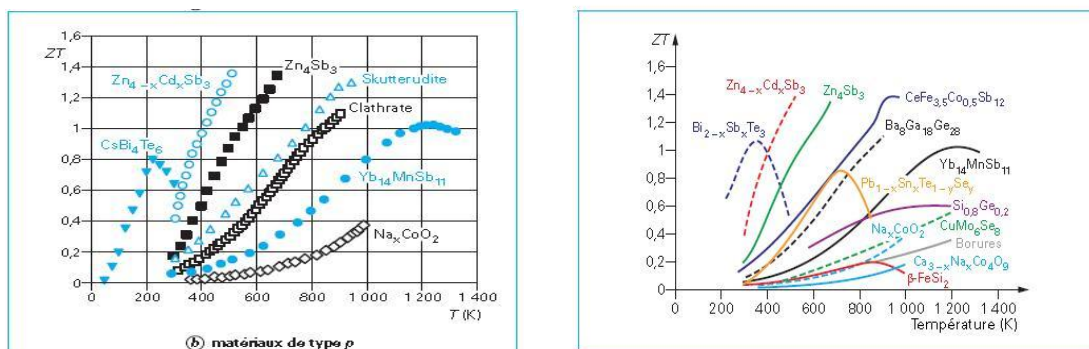
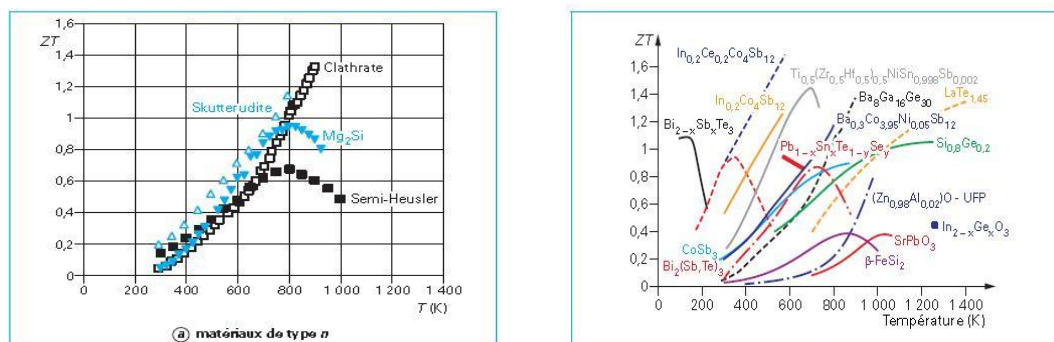


Figure 9. Les plus grandes valeurs de  $ZT$  pour les matériaux thermoélectriques de type P[4,6].



**Figure 10.** Les plus grandes valeurs de  $ZT$  pour les matériaux thermoélectriques de type N [4,6].

Remarquons de suite, que le facteur de mérite des anciennes familles a pu être augmenté, mais surtout que la découverte de nouvelles familles a non seulement accru  $ZT$ , mais a étendu les domaines de température où la thermoélectricité peut être utilisée. La valeur maximale de  $ZT$  dans plusieurs familles dépasse 1,3 (soit 30 % d'amélioration en 10 ans environ).

La meilleure valeur atteinte dans un matériau massif est actuellement de 1,7.

Les performances améliorées de ces nouveaux matériaux ont été obtenues :

- dans des structures cristallines complexes (clathrates,  $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$ , phases de Chevrel, oxydes à désaccord de paramètres (« misfits ») ;
- par la présence de cages vides dans la structure (skutterudites, clathrates, pentatellures...);
- avec des défauts de stœchiométrie (skutterudites,  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$ , oxydes) ;
- par des substitutions atomiques élaborées (semi-Heusler) [6].

### I.4.2.1. Phases lacunaires

#### I.4.2.1.1. Semi-Heusler

Les composés de Heusler ont pour formule  $\text{X}_2\text{YZ}$ , tel que (X : métal de transition ou métal noble ; Y : métal de transition métal noble ou métal de terre rare ; Z : un metalloïde sp ou un métal) [8].

Parmi ces composés, ceux avec 18 électrons de valence ont une structure de bande de type semi-conducteur et de forts coefficients Seebeck. La diminution de la conductivité thermique est alors obtenue par des substitutions complexes favorisant la diffusion des phonons par les fluctuations de masse [6].

Bien que la valeur du facteur de puissance soit prometteuse, la conductivité thermique des composés ternaires tel que  $\text{ZrNiSn}$  ou  $\text{HfNiSn}$  est plutôt élevée. La conductivité thermique totale varie de 5,9 à 17W/mK pour  $\text{ZrNiSn}$ . Cette disparité des valeurs est liée à la différence de qualité cristalline des échantillons produits qui peut par exemple, résulter des recuits [8].

#### I.4.2.1.2. $Zn_4Sb_3$

$Zn_4Sb_3$  existe sous trois variétés :

- $\alpha$  stable en dessous de  $-10^\circ C$  ;
- $\beta$  de  $-10^\circ C$  à  $+492^\circ C$  ;
- $\gamma$  de  $492^\circ C$  au point de fusion à  $566^\circ C$ .

La phase  $\beta$  a permis d'obtenir des matériaux avec de fortes valeurs de  $ZT$  en type p avec des maxima de 1,2 à 650 K environ dans  $\beta-Zn_4Sb_3$  augmentant par substitution à  $ZT = 1,4$  à plus basse température ( $\approx 525$  K) dans  $Zn_{3,2}Cd_{0,8}Sb_3$ . L'observation de lacunes et d'interstitiels sur le site de Zn et de deux types d'atomes Sb, entraînent un désordre important, qui contribue à la diminution de la conductivité thermique [6].

#### I.4.2.3. Solution solides complexes dérivées des matériaux conventionnels

##### I.4.2.3.1. Dérivés de $Bi_2Te_3$

A basse température, les propriétés thermoélectriques de  $CsBi_4Te_6$  dopé par 0,05 % de  $SbI_3$  équivalent à celles des anciennes compositions des alliages  $Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$ , avec un  $ZT \approx 0,8$  à 225 K, susceptibles d'être utilisées pour la réfrigération. Dans le système  $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$  dérivé de  $Bi_2Te_3$ , l'archétype des thermoélectriques utilisés dans des applications « niche » en réfrigération, la croissance de monocristaux fortement dopés a conduit à l'obtention de valeurs très supérieures à la valeur  $ZT \approx 0,8$  à 0,9 anciennement obtenue autour de la température ambiante.

Les meilleures valeurs en type n concernent des cristaux de  $(Bi_{0,25}Sb_{0,75})_2Te_3$  dopés fortement avec 0,07 % (en masse) I, 0,02 % Te et 0,03 % CuBr et un  $ZT$  de 1,1 à environ 300 K. Tandis que le dopage par 8 % en masse de Te conduit à un type p avec un  $ZT$  de 1,4 aux mêmes températures. En revanche, l'addition de quelques pourcent en masse de PbTe dans  $Bi_{0,4}Sb_{1,6}Te_3$  ne conduisait pas à une amélioration de  $ZT$  à 300K[6].

##### I.4.2.3.2. Dérivés de TAGS

Les meilleures valeurs de  $ZT$  en type p ont été obtenues pour une composition complexe dérivant des TAGS ( $GeTe + AgSbTe_2$ ), une valeur de  $ZT \approx 2$  avec une erreur expérimentale d'environ 20 % a été trouvée dans  $GeTe + 20\% AgSbTe_2$  [6].

##### I.4.2.3.3. Dérivés de PbTe et TAGS (Te-Ag-Ge-Sb)

La série de matériaux de structure cubique  $AgPb_mSbTe_{2+m}$  dopée a donné naissance à des semi-conducteurs de type n avec de fortes valeurs de  $ZT$ , lorsque  $m = 10$  ( $ZT = 1$  à 700 K) ou  $m = 18$  ( $ZT = 2,2$  à 800 K).

Des valeurs plus faibles ont été observées dans les échantillons déficients en Ag et recuits :  $Ag_{1-x}Pb_{18}SbTe_{20}$  ( $ZT = 1,1$  à 670 K pour  $x = 0,4$ , ou  $ZT = 0,3$  pour  $x = 0,3$ ). Cependant, ces matériaux ne sont pas des matériaux massifs conventionnels, mais des composites [6].

#### I.4.2.4. Autres matériaux intermétalliques

Récemment plusieurs composés à base d'antimoine ont présenté de bonnes caractéristiques thermoélectriques, ces caractéristiques semblent dues à la propriété de Sb de diffuser les phonons, de manière plus efficace qu'un ion plus léger de même configuration électronique. De plus, les matériaux constitués de métalloïdes et d'éléments légèrement plus électropositifs semblent avoir de grands  $ZT$  [6].

##### I.4.2.4.1. $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$

La structure Tétragonal d' $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$  est complexe, la flexibilité pour accommoder divers éléments ont conduit à l'obtention d'un  $ZT$  supérieur à 1 dans ce matériau de type p. La caractéristique essentielle est d'obtenir le maximum de  $ZT$  à plus hautes températures que les skutterudites et avec un  $ZT$  fortement accru, par rapport aux matériaux à base de Si-Ge ou aux meilleures valeurs actuelles, dans les phases de Chevrel.

##### I.4.2.4.2. $\text{Mo}_3\text{Sb}_{7-x}\text{Te}_x$ ( $x = 1,5$ et $1,6$ )

La structure  $\text{Ir}_3\text{Ge}_7$  des composés  $\text{Nb}_3\text{Te}_{7-x}\text{Sb}_x$  et  $\text{Mo}_3\text{Sb}_{7-x}\text{Te}_x$  ( $x = 1,5$  et  $1,6$ ), forme des chaînes infinies dans les trois directions. Avec un  $ZT$  de 0,8 dans  $\text{Mo}_3\text{Sb}_{5,4}\text{Te}_{1,6}$  à 1050 K, et dans  $\text{Mo}_{3-y-z}\text{Ru}_y\text{Fe}_z\text{Sb}_7$  à 1000 K pour  $(y;z) = (0.16;0.5)$  et  $(0.1;0.7)$  ces matériaux sont supérieurs aux meilleurs matériaux de type p à base de Si-Ge.

##### I.4.2.4.3. $\text{Mg}_2\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$

Dans les années 1960, l'Institut Ioffe démontrait que les composés  $\text{Mg}_2\text{X}$  ( $\text{X} = \text{Si}, \text{Ge}, \text{Sn}$ ) sont semi-conducteurs avec des propriétés de la structure de bandes devant favoriser des propriétés thermoélectriques. Divers types de substitution (Si, Ge, Sn, Al, Ca, Sb...) ont été testés, le meilleur résultat étant obtenu, lorsque la différence de masse est la plus forte et contribue à diminuer la conductivité thermique, c'est-à-dire avec Si-Sn. La meilleure valeur de  $ZT$  ( $\approx 1,1$  à 800 K) était obtenue en 2006 dans le même Institut.

#### I.4.2.5. Oxydes

L'avantage principal attendu des oxydes réside dans leur stabilité chimique en atmosphère oxydante. Si de nombreux oxydes possèdent de grands coefficients Seebeck ( $S > 100 \mu\text{V/K}$ ), de faibles conductivités thermiques [ $\approx 1 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ ] leurs performances sont actuellement limitées par des résistivités électriques, beaucoup plus fortes, que dans les matériaux TE précédemment décrits [6].

##### I.4.2.5.1. Cobaltites

Parmi les oxydes de type p les plus prometteurs, les cobaltites à base de couches conductrices de  $\text{CoO}_2$  ont été le point de départ de l'intérêt pour les oxydes en thermoélectricité avec  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  : Un oxyde métallique avec un fort coefficient Seebeck.

#### I.4.2.5.2. Oxydes à misfit

Parmi ces cobaltites, le composé en couches  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  appartient en fait à la famille des oxydes lamellaires à structure désaccordée de formule générale :  $[(\text{AO})_n]\text{RS}[\text{CoO}_2]_{b1/b2}$  avec des valeurs possibles  $n = 2, 3$  et  $4$ . Mais les valeurs de  $ZT$  restent relativement faibles, principalement à cause de la trop forte résistivité électrique.

La plus forte valeur de  $ZT$  dans un oxyde a été obtenue sur un monocristal de  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  (valeur estimée  $\approx 1,2$  à  $800\text{ K}$ ) de petite taille.

#### I.4.2.5.3. Autres oxydes

D'autres familles d'oxydes ont également été étudiées pérovskites type  $\text{ACoO}_3$ , manganites  $\text{AMnO}_3$ , delafossite  $\text{CuFeO}_2$ , YBCO ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+y}$ ),  $\text{ZnO}$ , ruthénates  $\text{ARuO}_3$  et  $\text{A}_2\text{RuO}_4$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ , etc. Les meilleures valeurs de  $ZT$  atteignent  $0,4$  en type p et  $0,3$  en type n dans les oxydes conventionnels et  $0,6$  dans les misfits.

#### I.4.2.6. Verres semi-conducteurs

Un certain nombre des caractéristiques favorisant une faible conductivité thermique, et de bonnes propriétés thermoélectriques, telles que structure complexe, inclusions, impuretés, fluctuations de masse, désordre..., se retrouve dans les verres.

Ceux-ci sont généralement des isolants, sauf les verres métalliques, lesquels ont cependant des coefficients Seebeck faibles comme dans les métaux.

De nombreux verres semi-conducteurs avec un petit gap pouvant favoriser des coefficients Seebeck forts, existent notamment dans les pnictures et chalcogénures. Leur étude préliminaire a mis en exergue des résultats encourageants, même si les valeurs de résistivité restent souvent trop fortes [6].

#### I.4.2.7. Nanomatériaux thermoélectriques

Les propriétés de transport dans les nanostructures et les macrostructures diffèrent notablement. La conductivité thermique des nanostructures, telles que les super-réseaux (matériau alternant périodiquement des couches nanométriques de divers éléments ou substances) reste plus faible au regard des les matériaux massifs.

Ceci constitue un aspect potentiellement positif pour la thermoélectricité. Cependant, ces nanostructures, généralement obtenues par des techniques de dépôts de films minces (épitaxie par jet moléculaire, cellules de Knudsen, laser pulsé, CVD...) demeurent trop coûteuses pour la production de matériaux pour des applications de grande taille ; de plus, leurs faibles épaisseurs sont peu compatibles avec l'établissement de gradients de température importants. Elles sont, en revanche, adaptées au refroidissement en micro-électronique. Les propriétés de transport électronique sont aussi modifiées par les effets de dimensionnalité sur la structure de bandes.

En résumé, alors que dans un matériau tridimensionnel,  $S$ ,  $\sigma$  et  $\lambda$  étant reliés, il est difficile d'ajuster les trois quantités, dans les cas de plus basse dimensionnalité, de nouvelles possibilités existent de les ajuster indépendamment.



De plus, les nouvelles interfaces créées peuvent augmenter la diffusion des phonons plus que celle des porteurs de charges, contribuant ainsi, à l'accroissement de  $ZT$  [6].

La microélectronique a tout de suite profité de cette relance avec la construction de micro réfrigérateur intégré pour des besoins de refroidissement très localisé dans les microcircuits.

## **I.5. Applications thermoélectriques**

Les progrès des matériaux permettent maintenant d'envisager des dispositifs dans divers domaines de températures, d'où de nombreux groupes industriels et laboratoires s'attèlent à travailler sur la réalisation d'appareils défiant le conventionnel et menant vers l'avancée technologique.

### **I.5.1. La génération thermoélectrique**

Depuis la première lampe russe à kérosène 1960 alimentant une radio, les applications bien qu'encore limitées se sont développées.

Dans ce domaine, les marchés existants sont à base de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  autour de la température ambiante.

#### **I.5.1.1. La thermoélectricité au profit de l'espace**

La génération thermoélectrique a découvert ses premières applications dans l'espace. Les générateurs RTG 'Radio-isotope Thermoelectric Generators' utilisaient comme source de chaleur la désintégration nucléaire des radio-isotopes ( $\text{PuO}_2$  généralement) pour alimenter un nombre d'instruments électriques des sondes spatiales [3].

Les avantages de ces systèmes sont multiples : Non soumis aux vents de particules stellaires ou à la disparition de la lumière dans les voyages lointains comme les panneaux PV, leur fiabilité est incomparable (certains fonctionnent depuis plus de 25 ans) [6].

#### **I.5.1.2. L'électricité à partir de la chaleur rejetée**

De nombreux secteurs d'activités industrielles ou même domestiques produisent une quantité importante d'énergie perdue sous forme de chaleur. L'effet Seebeck, par le biais des générateurs thermoélectriques, permet d'exploiter la chaleur émise, pour la transformer en énergie électrique, notamment la récupération de l'énergie thermique perdue dans les automobiles [3].

Environ deux tiers de l'énergie produite lors de la combustion du carburant est rejetée sous forme de chaleur au niveau des pots d'échappement du moteur et d'autres points chauds du véhicule, dont seulement un tiers est utilisé pour l'automatisation.

De nombreux laboratoires industriels et académiques (États-Unis « Workshop : DOE/EPRI 2004 High efficiency Thermoelectrics », Japon) travaillent sur le problème de la récupération d'électricité depuis la chaleur des pots d'échappement des voitures et camions [6].

Les générateurs thermoélectriques, même avec leur efficacité encore insuffisante, pourront récupérer l'énergie thermique rejetée et fournir une puissance électrique pour recharger la batterie par exemple, et cela soulagera l'alternateur, voire entraînera sa suppression.

Le projet du constructeur allemand BMW, inscrit dans le programme 'EfficientDynamics' et lancé en 2005, vise à doter la ligne d'échappement d'un générateur ou d'un ensemble des générateurs thermoélectriques capable de générer suffisamment d'électricité à 125 km/h pour entraîner le véhicule sans recourir à l'alternateur, comme montré dans la *figure 11* [3].

Les profils de température des pots d'échappement montrent que les matériaux fonctionnant entre 200 et 500°C sont les plus utiles, car devant se placer surtout après les pots catalytiques. Les données actuelles indiquent que près de 300 W et 1 kW peuvent être récupéré sur une voiture ou un camion respectivement, limitant d'autant l'usage de l'alternateur, donc contribuant aux économies d'énergie et à une moindre émission de CO<sub>2</sub> [6].

L'intégration des réfrigérateurs thermoélectriques pour la climatisation est aussi envisagée et un gain total de 10 % de carburant est attendu [3].

De façon équivalente, la production d'électricité à partir de la chaleur des moteurs de bateaux est aussi étudiée (par exemple Académie Maritime du Maine, États-Unis).



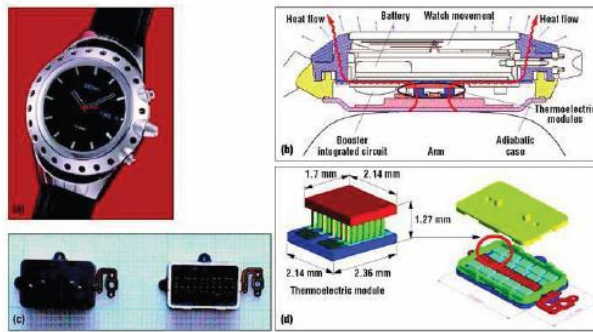
**Figure 11.** Conception d'un générateur thermoélectrique produisant de l'électricité de la chaleur perdue au niveau du pot d'échappement d'un véhicule (source BMW) [3].

### I.5.1.3. L'électricité à partir de la chaleur humaine

L'une des applications innovante utilisant des générateurs thermoélectriques est celle des montres de marque Seiko Thermic15, présenté dans la *figure 12*. Cette montre est constituée de 10 modules thermoélectriques, en tellure de bismuth  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , qui génère une puissance électrique de 22  $\mu\text{W}$  à partir du gradient thermique entre l'air ambiant et le corps humain pour entretenir le mouvement mécanique de la montre, tel que le gradient thermique est de 1.5 K dans les modules, la tension du circuit ouvert est de 300 mV et l'efficacité de conversion de 1%.

Le schéma illustrant la montre et son générateur est montré dans la figure 4d [3].





**Figure 12.** Montre Thermique Seiko : (a) le produit ; (b) coupe transversale; (c) modules thermoélectriques ; (d) schéma d'un module thermoélectrique. (Source Seiko) [3].

Une autre montre thermoélectrique de marque Citizen est aussi commercialisée depuis 2001, tel que le générateur fournit une puissance électrique de  $13.8 \mu\text{W}$  pour une tension de 515 mV.

✚ Un système de communication sans fil a été développé par Douski *et al*, étant constitué d'un dispositif énergiquement autonome, grâce à une puissance électrique de sortie de 1.6 mW fournie par un module thermoélectrique à travers un gradient thermique entre l'environnement ambiant et le corps humain [3].

✚ Des développements sont à l'étude pour des capteurs autoalimentés, pour des thermopiles sur film polymère également pour montres, implants, pacemakers [6].

#### I.5.1.4. La thermoélectricité au profit de l'électronique

La génération dans la gamme de Watt trouve ses applications dans le secteur de l'électronique portable (micro-ordinateur, téléphonie...), mais aussi pour l'alimentation de systèmes mécaniques miniaturisés (petits robots, robots d'exploration, avions...) [6].

#### I.5.1.5. Autres profits

- L'échauffement accidentel lors du stockage de produits chimiques, nucléaires pourrait aussi déclencher un courant dans une alarme.
- La thermoélectricité sert aussi pour actualiser des alliages à mémoire de forme [6].

### I.5.2. La réfrigération thermoélectrique

Le matériau thermoélectrique le plus utilisé actuellement en réfrigération à basses températures est à base de bismuth et de tellure  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , de meilleures performances sont obtenues lorsqu'il est combiné à  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  qui possède la même structure cristalline HC [9].

#### I.5.2.1. Au profit de l'électronique

Le domaine de l'électronique exploite l'effet Peltier pour refroidir par exemple les transistors de puissance ou les détecteurs optoélectroniques, ou dans le domaine de l'instrumentation pour ajuster la température des cellules détectrices infrarouge ou des lasers de télécommunication.

Les modules thermoélectriques ont des performances intéressantes, telle que la capacité de refroidissement allant jusqu'à  $30 \text{ W/cm}^2$  et dont la stabilité en température est meilleure que  $0,01^\circ\text{C}$  [6].

### **I.5.2.2. Au profit de la médecine**

Ils sont également utilisés dans les dispositifs portatifs, pour entretenir le refroidissement des enceintes servant au transport du plasma sanguin, ou pour des platines de microscopes, des glacières commerciales...etc. [3].

Une application intéressante concerne le couplage avec le photovoltaïque PV pour des valises médicales (coopération Université de Guangzhou, Chine, et LOCIE en France, sociétés Mecon en Inde, FridgeFreeze aux États-Unis...). Le courant est produit par PV et le froid par TE, ce qui est primordial pour conserver des vaccins dans des pays sans réseau étendu de distribution d'électricité [6].

### **I.5.2.3. Autres profits**

- ✚ Des unités de forte puissance ont été testées pour le refroidissement des gaz radioactifs à la centrale nucléaire en Russie 20 kW.

- ✚ Dans le domaine du contrôle de températures, la société américaine Amerigon a développé un siège de voitures à température contrôlée à partir de TE (moins coûteux que de thermaliser l'ensemble).

- ✚ Dans le domaine militaire, la climatisation des soldats blessés fait aussi appel à la thermoélectricité ainsi que le refroidissement des viseurs IR.

- ✚ La plupart de ces applications restent des niches. La thermoélectricité trouvera sa place dans la climatisation des bâtiments en fonction de l'amélioration des performances des matériaux, et des transferts thermiques. Des prototypes de fenêtres thermiques sont aussi étudiés [6].

La liste des applications est appelée à s'allonger avec les performances des matériaux, mais aussi avec l'urgence de la demande en sources d'énergie durant le XXI<sup>e</sup> siècle. L'amélioration récente des performances des matériaux a déjà permis d'atteindre une efficacité de 15 % dans le domaine spatial (Jet Propulsion Lab., aux États-Unis). Le renouveau des études sur la thermoélectricité et notamment sur les aspects nano-structuraux, devrait permettre de générer de telles efficacités, à des coûts raisonnables [6].

On imagine bien que tout ceci à un coût qui peut se justifier pour des applications spatiales par la fiabilité des systèmes thermoélectriques, mais qui sera peu compatible avec des applications 'grand public'.

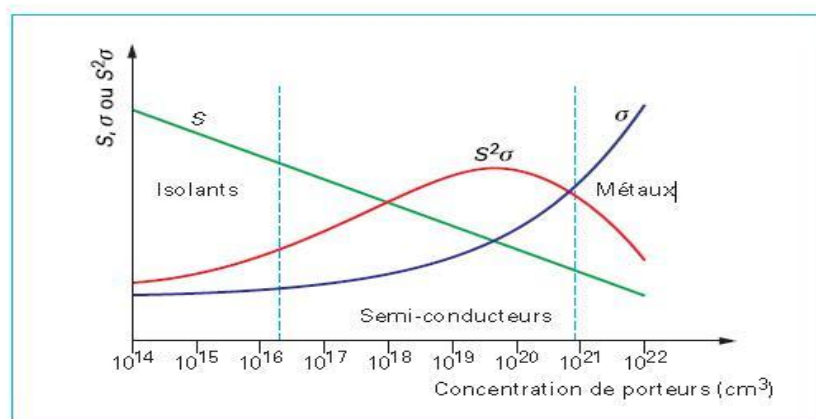
## **I.6. Optimisation des matériaux thermoélectriques**

Selon l'expression du facteur de mérite, l'optimisation des propriétés de transport d'un matériau est difficile, car il est difficile de trouver pour un matériau donné, simultanément, une bonne conductivité électrique caractéristique d'un métal et une mauvaise conductivité thermique caractéristique des isolants [6].

Comme proposé par Slack, un bon matériau thermoélectrique aura la conductivité thermique d'un verre et la conductivité électrique d'un bon conducteur, mais malheureusement, le pouvoir thermoélectrique et la conductivité électrique varient de manière opposée avec la concentration en porteurs de charge.

Donc l'optimisation des matériaux nécessitera la recherche pour diminuer la conductivité thermique, qui tend à s'opposer à l'établissement d'un gradient thermique, sans dégrader la conductivité électrique [6].

La *figure13* présente l'évolution du pouvoir thermoélectrique, de la conductivité électrique et du facteur de puissance en fonction du logarithme de la concentration de porteurs de charge du système. Les meilleurs pouvoirs thermoélectriques seront obtenus avec des matériaux à faible concentration en porteurs, alors que les meilleures conductivités électriques le seront dans des matériaux de forte concentration de porteurs, et donc on réalise que les meilleurs matériaux thermoélectriques appartiendront donc à la classe des semi-conducteurs [9].



**Figure13.** Influence de la concentration de porteurs de charges sur le pouvoir thermoélectrique, la conductivité électrique et le facteur de puissance [6].

La plupart des semi-conducteurs sont des éléments de numéro atomique élevé. Pour un semi-conducteur, il est important de choisir un élément de numéro atomique supérieur et donc de masse atomique supérieure, afin d'obtenir une conductivité thermique aussi faible que possible. Cela conduit sans doute à choisir un élément lourd tel que: Plomb, Bismuth, Antimoine, Tellure et Sélénium [9].

Il est nécessaire de mentionner que la bande d'énergie est le facteur le plus important dans la conception de nouveaux matériaux semi-conducteurs utilisés pour la conversion de l'énergie thermoélectrique, car la largeur de la bande interdite d'énergie est cruciale pour les matériaux thermoélectriques [9].

Un matériau avec une bande d'énergie étroite est indésirable, car ceci implique que le matériel deviendra dégénéré ou intrinsèque à une température relativement basse.

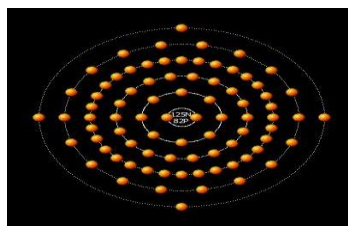
Une large bande d'énergie d'environ 0,6 eV est suffisante pour la conversion d'énergie thermoélectrique [9].

## I.7. Caractérisation des propriétés structural, électrique et thermique du Pb, Zn, Sn

Le plomb est un élément chimique, malléable, de la famille des cristallogènes, du Groupe 14, Période 6, Bloc p. C'est un métal gris bleuâtre, blanchissant lentement en s'oxydant, et est toxique et mutagène. Ses différentes propriétés sont illustrées dans le *tableau III* et la *figure 14* présentée ci-dessous.

**Tableau III.** Propriétés physiques du plomb [7,11].

| Structure cristalline | Masse atomique | Masse volumique [g·cm <sup>-3</sup> ] | Résistivité électrique [Ω.m] | Conductivité thermique [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | Configuration électronique  | Température de fusion |
|-----------------------|----------------|---------------------------------------|------------------------------|--|---|-----------------------|
| CFC                   | 207,2 ± 0,1    | 11,35 (20 °C)                         | 21. 10 <sup>-8</sup>         | 35,3   | [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup> | 327,462 °C            |

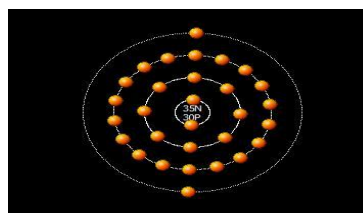


**Figure14.** Structure électronique du Plomb.

Le zinc est un élément chimique de la série chimique des métaux de transition, Groupe 12, Période 4, Bloc d. Ses différentes propriétés sont illustrées dans le tableau et la figure ci-dessous.

**Tableau IV.** Propriétés physiques du zinc [7,11].

| Structure cristalline | Masse atomique | Masse volumique [g·cm <sup>-3</sup> ] | Résistivité électrique [Ω.m] | Conductivité thermique [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | Configuration électronique            | Température de fusion |
|-----------------------|----------------|---------------------------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| HC                    | 65,409 ± 0,004 | 7,134 (25 °C)                         | 6×10 <sup>-8</sup>           | 116  | [Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> | 419,53 °C             |

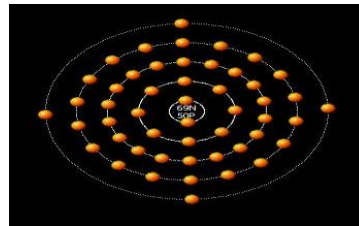


**Figure15.** Structure électronique du zinc.

L'étain est un élément chimique du Groupe 14, Période 5, Bloc p, de série chimique des métaux pauvres, malléable, moyennement ductile à température ambiante, de la famille des cristallogènes. Ses différentes propriétés son illustrées dans le tableau et la figure ci-dessous.

**Tableau V.** propriétés physiques de l'étain [7,11].

| Structure cristalline | Masse atomique | Masse volumique [g·cm <sup>-3</sup> ] | Résistivité électrique [ $\Omega\cdot m$ ] | Conductivité thermique [ $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$ ] | Configuration électronique                            | Température de fusion |
|-----------------------|----------------|---------------------------------------|--|--|---|-----------------------|
| Tétragonal            | 118,710        | 7,29(bleu)                            | $18\times 10^{-8}$                         | 66,6   | [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> | 231,93 °C             |
| Structure diamant     | 118,710        | 5,77(gris)                            | $18\times 10^{-8}$                         | 66,6   | [Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> | 231,93 °C             |



**Figure 16.** Structure électronique de l'étain.

Dans le chapitre qui suivra, dont l'objectif est d'arriver à étudier les propriétés thermoélectriques du Pb-Sn et Sn-Zn (eutectique), en s'attachant à obtenir des matériaux de bonne qualité et à comprendre les mécanismes de transport qui régissent la performance thermoélectrique de ces matériaux.

Ce chapitre est consacré à l'énumération détaillée des différentes étapes de l'étude ainsi que la présentation du dispositif expérimental exploité, réalisées au sein du laboratoire de génie métallurgie ainsi qu'aux deux laboratoires : couches minces et solutions solides (faculté de physique) à l'USTHB.

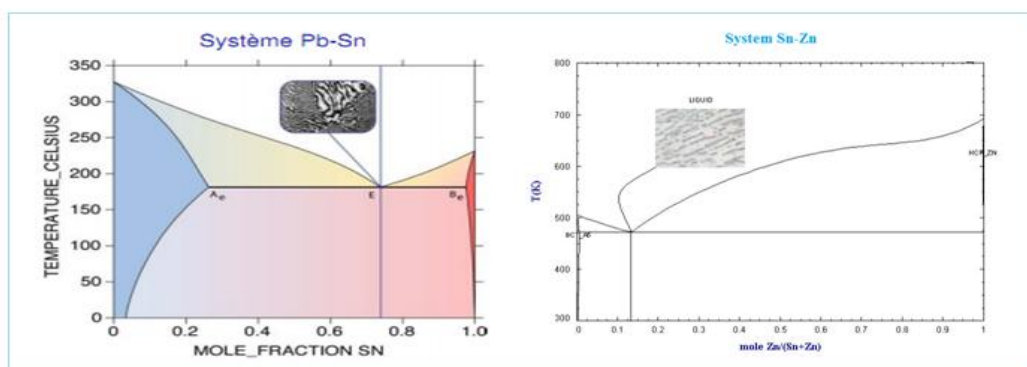
L'étude de chaque alliage a suivi les étapes suivantes tout en commençant par leur élaboration en se référant à la méthode classique ; suivie d'analyse métallographique dans le but d'évaluer la distribution de l'eutectique des différentes plages de la plaquette obtenue (lingot) et la détermination des distances inter-lamellaires, accompagnées de mesures de la résistivité électrique de chaque échantillon.

Après avoir obtenu les résultats adéquats, nous avons entamé une série de traitements de déformation à froid dans le but de voir l'évolution des résultats obtenus et éventuellement, réduire le maximum de facteurs influençant, engendrés par l'étape d'élaboration ; cela à travers une analyse métallographique suivie des mesures de la résistivité électrique de tous les échantillons.

En sachant que la déformation à froid n'est pas un remède pour tous les inconvénients de l'état brut ; on a décidé de poursuivre nos traitements à travers un recuit d'homogénéisation, cela dans le but d'évacuer tous les facteurs influençant, non corrigés par le traitement de déformation à froid. Tout en gardant un œil sur l'évolution tant sur la microstructure que sur la résistivité électrique.

## II.1. Elaboration des alliages eutectiques Pb-Sn et Sn-Zn par la méthode classique

D'après les diagrammes d'équilibre du Pb-Sn et Sn-Zn représentés ci-dessous dans la figure 17, on calcule les masses correspondantes à chaque point d'eutectique dans le volume de la lingotière dont nous disposons.



**Figure 17.** Les diagrammes d'équilibres binaires du Pb-Sn; Sn-Zn respectivement [12, 13].

### II.1.1. Calcul du volume de la lingotière

En étant équipé d'un pied à coulisse, menant à la précision et en doublant la prise de mesure, les résultats obtenus pour les mesures de la lingotière illustrée sur la *figure 18*, sont représentés ci après.



**Figure18.** La lingotière.

- Longueur : 5,835 cm ; 5,880 cm
- Profondeur : 8,550 cm ; 8,525 cm
- Epaisseur : 0,280 cm ; 0,270 cm

Donc le volume est exprimé comme suit :  $V_{\text{lingotière}} = 13.968 \text{ cm}^3$  ;  $13,872 \text{ cm}^3$

Ça nous a induit à un volume moyen :  $V_{\text{lingotière moy}} = (V_{\text{lingotière}} + V'_{\text{lingotière}})/2$

Donc:  $V_{\text{lingotière moy}} = 13.920 \text{ cm}^3$ .

Le calcul des masses s'est fait suivant deux méthodes, présentées ci dessous:

### II.1.2. Calcul des masses eutectiques

Se fait pour les deux semi-conducteurs Pb-Sn et Sn-Zn respectivement.

#### II.1.2.1. Alliage eutectique Pb-Sn

Pour se rapprocher des résultats théoriques, on a opté pour l'utilisation de deux méthodes différentes énoncées comme suit :

##### II.1.2.1.1. Méthode 1

En se référant au diagramme d'équilibre établi en fraction molaire, la composition de l'alliage eutectique se définit comme suit:

15 mm  $\rightarrow$  0.1 mole

113 mm  $\rightarrow$   $n_{\text{Sn}}$

Donc  $n_{\text{Sn}} = (113.0,1)/15 \rightarrow n_{\text{Sn}} = 0.753 \text{ mole.}$

On peut déterminer le nombre de moles du plomb contenu dans la composition eutectique

$$1 \text{ mole d'alliage eutectique} = n_{\text{Pb}} + n_{\text{Sn}}$$

Donc  $n_{\text{Pb}} = 1 - n_{\text{Sn}} \rightarrow n_{\text{Pb}} = 1 - 0.753 \rightarrow n_{\text{Pb}} = 0.247 \text{ mole.}$

On a  $\rho_{\text{Pb}} = 11.330 \text{ g.cm}^{-3}$   $M_{\text{Pb}} = 207.200 \text{ g.mol}^{-1}$

$\rho_{\text{Sn}} = 7.290 \text{ g.cm}^{-3}$   $M_{\text{Sn}} = 118.710 \text{ g.mol}^{-1}$

- **Calcul de la masse appropriée au nombre de moles déduit du diagramme d'équilibre Pb-Sn**

- Le plomb

$$m_{\text{Pb}} = n_{\text{Pb}} * M_{\text{Pb}} \rightarrow m_{\text{Pb}} = 0.247 * 207.200 \rightarrow m_{\text{Pb}} = 51.178 \text{ g.}$$

- L'étain Sn

$$m_{\text{Sn}} = n_{\text{Sn}} * M_{\text{Sn}} \rightarrow m_{\text{Sn}} = 0.753 * 118.710 \rightarrow m_{\text{Sn}} = 89.388 \text{ g.}$$

- **Calcul du volume occupé par ces masses**

- Le plomb

$$\rho_{\text{Pb}} = m_{\text{Pb}} / V_{\text{Pb}} \rightarrow V_{\text{Pb}} = m_{\text{Pb}} / \rho_{\text{Pb}} \rightarrow V_{\text{Pb}} = 51.178 / 11.330$$

$$\rightarrow V_{\text{Pb}} = 4.517 \text{ cm}^3.$$

- L'étain

$$\rho_{\text{Sn}} = m_{\text{Sn}} / V_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{Sn}} = m_{\text{Sn}} / \rho_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{Sn}} = 89.388 / 7.290$$

$$\rightarrow V_{\text{Sn}} = 12.261 \text{ cm}^3.$$

- **Calcul du volume total occupé par une mole d'eutectique**

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{Pb}} + V_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{tot}} = 4.517 + 12.261 \rightarrow V_{\text{tot}} = 16.778 \text{ cm}^3.$$

- **Calcul du volume excédentaire**

$$V_{\text{excédentaire}} = V_{\text{tot}} - V_{\text{lingotière}} \rightarrow V_{\text{excédentaire}} = 16.778 - 13.920$$

$$\rightarrow V_{\text{excédentaire}} = 2.858 \text{ cm}^3$$



- **Calcul des masses des éléments composant l'eutectique occupant ce volume excédentaire**

- Le plomb

On a  $51.178 \text{ g} \rightarrow 16.778 \text{ cm}^3$

$$M_{\text{Pb excédentaire}} \rightarrow 2.858 \text{ cm}^3$$

Donc  $m_{\text{Pb excédentaire}} = (2.858 * 51.178)/16.778$   
 $\rightarrow m_{\text{Pb excédentaire}} = 8.717 \text{ g.}$

- L'étain

On a  $89.388 \text{ g} \rightarrow 16.778 \text{ cm}^3$

$$m_{\text{Sn excédentaire}} \rightarrow 2.858 \text{ cm}^3$$

Donc  $m_{\text{Sn excédentaire}} = (2.858 * 89.388)/16.778$   
 $\rightarrow m_{\text{Sn excédentaire}} = 15.226 \text{ g.}$

- **Calcul des masses des éléments formant l'eutectique occupant le volume de la lingotière**

- Le plomb

$$M_{\text{Pb utilisée}} = m_{\text{Pb}} - m_{\text{Pb excédentaire}} \rightarrow m_{\text{pb utilisée}} = 51.178 - 8.717$$

$$\rightarrow m_{\text{Pn utilisée}} = 42.461 \text{ g.}$$

- L'étain

$$M_{\text{Sn utilisée}} = m_{\text{Sn}} - m_{\text{Sn excédentaire}} \rightarrow m_{\text{Sn utilisée}} = 89.388 - 15.226$$

$$\rightarrow m_{\text{Sn utilisée}} = 74.162 \text{ g.}$$

### II.1.2.1.2. Méthode 2

D'après le diagramme d'équilibre, dans 100%, les masses correspondant à l'eutectique sont :

$$M_{\text{sn}}=61,9\%$$

$$M_{\text{pb}}=100-61,9=38,1\%$$

$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow v = \frac{m}{\rho}$$

$$\begin{aligned} \text{Et donc : } \quad V_{\text{sn}} &= 8,491 \text{ cm}^3 \\ V_{\text{pb}} &= 3,356 \text{ cm}^3 \\ V_{\text{tot}} &= V_{\text{pb}} + V_{\text{sn}} = 11,847 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

En sachant que la concentration de l'eutectique reste inchangée en variant la masse suivant le volume de la lingotière, on a donc :

$$\frac{M_{\text{eut}}}{M \cdot V_{\text{tot}}} = \frac{m}{M \cdot V_{\text{ling}}} \quad \rightarrow \quad m = \mathbf{117,092 \text{ g}}$$

On pose  $\alpha$  : le coefficient de changement du volume ou de la masse :

$$\alpha = \frac{V_{\text{ling}}}{V_{\text{tot}}} = \frac{m}{m_{\text{eut}}} = \mathbf{1,175}$$

$$M_{\text{pb utilisée}} = \alpha \cdot M_{\text{pb}} = \mathbf{44,748 \text{ g}}$$

$$M_{\text{sn utilisée}} = \alpha \cdot M_{\text{sn}} = \mathbf{72,701 \text{ g}}$$

## II.1.2.2. alliage eutectique Sn-Zn

### I.1.2.2.1. Méthode 1

En se basant sur le diagramme d'équilibre établi en fraction molaire, la composition de l'alliage eutectique se définit comme suit

$$14 \text{ mm} \rightarrow 0.1 \text{ mole}$$

$$19 \text{ mm} \rightarrow n_{\text{Zn}}$$

$$\text{Donc : } n_{\text{Zn}} = (19 * 0.1)/14 \quad \rightarrow \quad n_{\text{Zn}} = \mathbf{0.135 \text{ mole.}}$$

On peut déterminer le nombre de moles de l'étain contenu dans la composition eutectique :

$$\mathbf{1 \text{ mole d'alliage eutectique}} = n_{\text{Zn}} + n_{\text{Sn}}$$

$$\text{Donc } n_{\text{Sn}} = 1 - n_{\text{Zn}} \quad \rightarrow \quad n_{\text{Sn}} = 1 - 0.135 \quad \rightarrow \quad n_{\text{Sn}} = \mathbf{0.865 \text{ mole.}}$$

$$\text{On a } \rho_{\text{Zn}} = 7.157 \text{ g.cm}^{-3} \quad M_{\text{Zn}} = 65.389 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$\rho_{\text{Sn}} = 7.290 \text{ g.cm}^{-3} \quad M_{\text{Sn}} = 118.710 \text{ g.mol}^{-1}$$

- **Calcul de la masse appropriée au nombre de mole déduit du diagramme d'équilibre**

- Le Zinc

$$m_{\text{Zn}} = n_{\text{Zn}} * M_{\text{Zn}} \quad \rightarrow \quad m_{\text{Zn}} = 0.137 * 65.389 \quad \rightarrow \quad m_{\text{Zn}} = \mathbf{8.958 \text{ g.}}$$

- L'étain

$$M_{\text{Sn}} = n_{\text{Sn}} * M_{\text{Sn}} \rightarrow m_{\text{Sn}} = 0.865 * 118.710 \rightarrow m_{\text{Sn}} = \mathbf{102.684 \text{ g.}}$$

- **Calcul du volume occupé par ces masses**

- Le Zinc

$$\rho_{\text{Zn}} = m_{\text{Zn}} / V_{\text{Zn}} \rightarrow V_{\text{Zn}} = m_{\text{Zn}} / \rho_{\text{Zn}} \rightarrow V_{\text{Zn}} = 8.958 / 7.157$$

$$\rightarrow V_{\text{Zn}} = \mathbf{1.2516 \text{ cm}^3}.$$

- L'étain Sn

$$\rho_{\text{Sn}} = m_{\text{Sn}} / V_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{Sn}} = m_{\text{Sn}} / \rho_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{Sn}} = 102.684 / 7.290$$

$$\rightarrow V_{\text{Sn}} = \mathbf{14.085 \text{ cm}^3}.$$

- **Calcul du volume total occupé par une mole d'eutectique**

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{Zn}} + V_{\text{Sn}} \rightarrow V_{\text{tot}} = 1.2516 + 14.085 \rightarrow V_{\text{tot}} = \mathbf{15.336 \text{ cm}^3}.$$

- **Calcul du volume excédentaire**

$$V_{\text{excédentaire}} = V_{\text{tot}} - V_{\text{lingotière}} \rightarrow V_{\text{excédentaire}} = 15.336 - 13.920$$

$$\rightarrow V_{\text{excédentaire}} = \mathbf{1.406 \text{ cm}^3}.$$

- **Calcul des masses des éléments composant l'eutectique occupant ce volume excédentaire**

- Le Zinc

On a  $8.958 \text{ g} \rightarrow 15.336 \text{ cm}^3$

$$m_{\text{Zn excédentaire}} \rightarrow 1.406 \text{ cm}^3$$

Donc  $m_{\text{Zn excédentaire}} = (1.406 * 8.958) / 15.336$

$$\rightarrow m_{\text{Zn excédentaire}} = \mathbf{0.821 \text{ g.}}$$

- L'étain

On  $102.684 \text{ g} \rightarrow 15.336 \text{ cm}^3$

$$m_{\text{Sn excédentaire}} \rightarrow 1.406 \text{ cm}^3$$

Donc  $m_{\text{Sn excédentaire}} = (1.406 * 102.684) / 15.336$

$$\rightarrow m_{\text{Sn excédentaire}} = \mathbf{9.414 \text{ g.}}$$

- **Calcul des masses des éléments formant l'eutectique occupant le volume de la lingotière**

- Le Zinc

$$m_{\text{Zn utilisée}} = m_{\text{Zn}} - m_{\text{Zn excédentaire}} \rightarrow m_{\text{Zn utilisée}} = 8.958 - 0.821$$

$$\rightarrow m_{\text{Zn utilisée}} = \mathbf{8.137 \text{ g.}}$$

- L'étain

$$M_{\text{Sn utilisée}} = m_{\text{Sn}} - m_{\text{Sn excédentaire}} \rightarrow m_{\text{Sn utilisée}} = 102.684 - 9.414$$

$$\rightarrow m_{\text{Sn utilisée}} = \mathbf{93.270 \text{ g.}}$$

### II.1.2.2.2. Méthode 2

D'après le diagramme d'équilibre massique, dans 100%, les masses correspondant à l'eutectique sont :

$$M_{\text{Zn}} = 8\% \quad ; \quad M_{\text{pb}} = 100 - 7,92 = 92,08\%$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \rightarrow \quad v = \frac{m}{\rho}$$

Donc  $V_{\text{zn}} = \mathbf{1,110 \text{ cm}^3}$

$$V_{\text{sn}} = \mathbf{12,631 \text{ cm}^3}$$

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{zn}} + V_{\text{sn}} = \mathbf{13,741 \text{ cm}^3}$$

En sachant que la concentration de l'eutectique reste inchangée en variant la masse suivant le volume de la lingotière, on a donc :

$$\frac{M_{\text{eut}}}{M \cdot V_{\text{tot}}} = \frac{m}{M \cdot V_{\text{ling}}} \rightarrow m = \mathbf{100,953 \text{ g}}$$

On pose  $\alpha$  : le coefficient de changement du volume ou de la masse :

$$\alpha = \frac{V_{\text{ling}}}{V_{\text{tot}}} = \frac{m}{m_{\text{eut}}} = \mathbf{1,013}$$

$$M_{\text{zn utilisée}} = \alpha \cdot M_{\text{zn}} = \mathbf{8,022 \text{ g}}$$

$$M_{\text{sn utilisée}} = \alpha \cdot M_{\text{sn}} = \mathbf{93,277 \text{ g}}$$

### II.1.2.3. Calcul des masses utilisées pour former les deux alliages

Pour plus de précision, on calcule les masses moyennes suivant la somme des résultats des masses de chaque méthode que l'on divise par 2, le résultat est tel que :

- Pb-Sn :

$$m_{\text{Pb}} \text{ utilisée moy} = 43.605 \text{ g} \quad ; \quad m_{\text{Sn}} \text{ utilisée moy} = 73.432 \text{ g}$$

Car  $m_{\text{Pb}} \text{ utilisée} = 42.461 \text{ g} \quad ; \quad 44,612\text{g}$

$m_{\text{Sn}} \text{ utilisée} = 74.162 \text{ g} \quad ; \quad 72,478\text{g}$

- Sn-Zn :

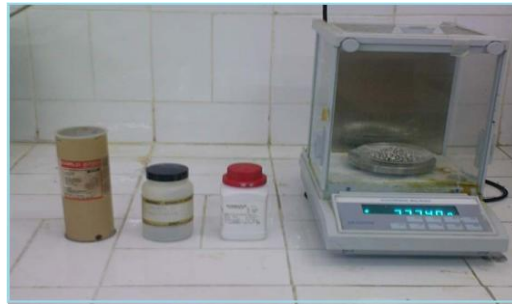
$$m_{\text{Sn}} \text{ utilisée moy} = 93.274 \text{ g} \quad ; \quad m_{\text{Zn}} \text{ utilisée moy} = 8.080 \text{ g}$$

Car  $m_{\text{Zn}} \text{ utilisée} = 8.137 \text{ g} \quad ; \quad 8,022\text{g}$

$m_{\text{Sn}} \text{ utilisée} = 93.270 \text{ g} \quad ; \quad 93,277\text{g}$

### II.1.3. Elaboration des deux alliages

Avant de passer à l'élaboration des deux échantillons, on effectue la pesée à l'aide d'une balance électronique de précision de l'ordre du centième, comme montré dans la *figure 19*.



*Figure 19.* Balance électronique.

L'élaboration s'est faite en disposant de :

- Un four à creuset en graphite illustré dans la *figure 20*, dans lequel les masses précédemment calculées et pesées ont été mises, suivies d'un flux de couverture (matière réfractaire non fusible) servant à isoler l'alliage à l'état liquide de l'air contenu dans le four, et plus précisément pour empêcher l'évaporation du Zn qui a la propriété de s'évaporer dès sa fusion. Puis la température d'élaboration est portée légèrement supérieure à celle de fusion de l'élément caractérisé par la plus faible température de fusion constituant l'alliage binaire, dans notre cas, les températures de travail sont similaires et égales à 250°C.



*Figure 20.* Four à creuset.

- Un thermocouple pour vérifier la température du four illustré dans la figure 21.



**Figure 21.** thermocouple.

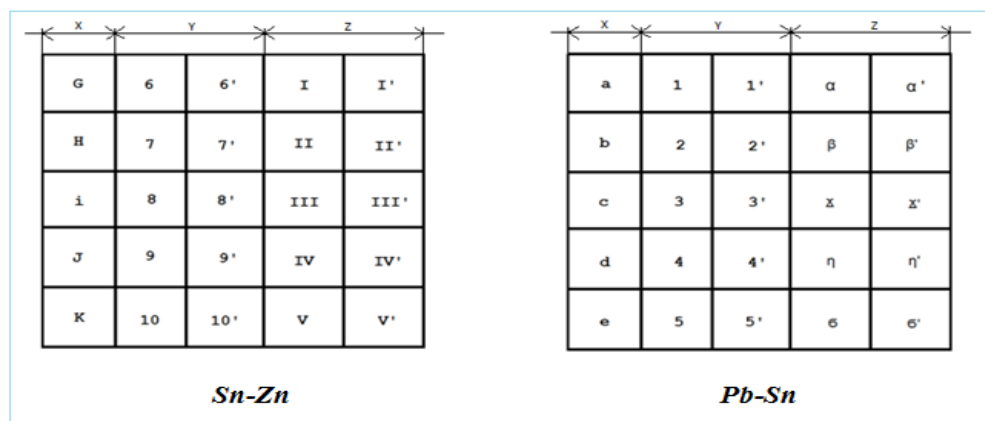
- Une lingotière préchauffé à une température légèrement inférieure à l'eutectique (Pb-Sn 180°C ; Sn-Zn 203°C) dans notre cas, pour éviter le choc thermique lors de la coulée de chaque alliage.

Le temps de la fonte des éléments n'a pas dépassé les 30 minutes et le refroidissement à l'air libre dans la lingotière, n'excéda pas les 50 minutes.

## II.2. Etude métallographique

### II.2.1. L'échantillonnage

Après refroidissement des deux alliages, ils sont découpés à l'aide d'une scie à métaux suivant la *figure 22*.



**Figure 22.** Distribution des échantillons du Sn-Zn ; Pb-Sn respectivement.

### II.2.2. L'enrobage

L'enrobage s'est fait à froid pour éviter tout traitement thermique des alliages élaborés, vu que les températures de l'eutectique sont basses (180°C Pb-Sn ; 203°C Sn-Zn).

### II.2.3. Le polissage

Au moyen d'une polisseuse et munie de papier abrasif allant de 400 à 1200, achevé par l'alumine (0,3 μm) en suspension en vue d'obtenir le meilleur état de surface possible. Le dispositif est illustré dans la *figure 23*.



**Figure 23.** Polisseuse mono-plateau.

#### II.2.4. L'attaque chimique

Le but de l'attaque chimique est de créer un contraste révélant la microstructure du matériau.

- Pour l'alliage Pb-Sn

100 ml d'eau distillé + 25 ml d'acide nitrique + 16 ml d'acide acétique, pendant 15s [14].

- Pour l'alliage Sn-Zn

L'attaque chimique s'est faite par le biais du Nital à 5% c.-à-d. :

5ml d'acide nitrique + 95 ml d'éthanol.

#### II.2.5. L'observation au microscope optique

Après l'attaque, les échantillons sont passés au microscope optique de marque 'OLYMPUS' assisté par ordinateur, muni d'un appareil de capture d'images (*figure 24*) pour la visualisation des différentes phases, puis traités au moyen d'un logiciel de traitement d'images 'Image J' pour avoir le pourcentage des phases de chaque échantillon.



**Figure 24.** Microscope optique.

### II.3. Microdureté

Après avoir préparé les échantillons et pour renforcer les informations et la caractérisation de ces derniers obtenus par la microscopie optique, on a fait intervenir la microdureté, et cela à travers un microduromètre Vickers de marque 'SHUMATZUHMV-M3' montré dans la *figure 25*.

L'empreinte est réalisée à l'aide du pénétrateur pyramidale en diamant, sous une charge de 50g pour le Pb-Sn et 100g pour le Sn-Zn pendant 15s. Nous mesurons les deux diagonales de l'empreinte, et en déduisant la moyenne,  $d$ , qui nous permet de lire directement la valeur HV sur les catalogues de l'appareillage.



*Figure 25.* Microduromètre.

#### **II.4. Laminage (déformation à froid)**

Au moyen d'un laminoir semi-automatique à double cylindres (*Figure 26*), afin de faire subir aux échantillons un taux de déformation égal à 30% pour le Pb-Sn et 70% pour l'Sn-Zn constant à travers une seule passe.



*Figure 26.* Laminoir à double cylindre semi-automatique.

#### **II.5. Traitement thermique**

Au moyen d'une cuve (*Figure 27*) à double zones de chauffage présélectionnées, équipée d'un thermocouple, on a effectué des recuits d'homogénéisation à nos échantillons, à 130°C pour le Pb-Sn, et 150°C pour l'Sn-Zn durant 2h.

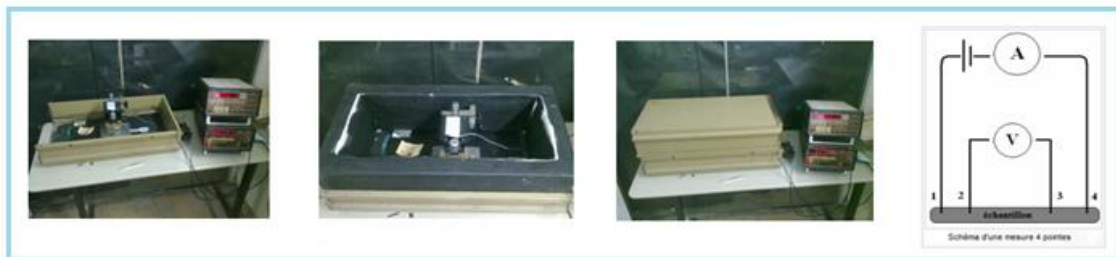


*Figure 27.* Cuve à double zones de chauffage.



## II.6. Mesure de la résistivité électrique

Pour ce qui concerne la partie mesure, tous les échantillons que ça soit à l'état brut, laminé et traité thermiquement, ont été objet de mesure de résistivité électrique, et cela à travers l'appareillage de la méthode des 4 points sous chambre noire avec une source de courant comprise entre ( $10^{-9}A$  à  $10^{-3}A$ ) connecté aux deux pointes externes (1,4) et voltmètre numérique connecté aux deux pointes internes (2,3) comme illustré dans les figures 28.



**Figure 28.** Montage de la méthode des 4 points pour la mesure de la résistivité électrique.

En finalisant notre caractérisation à travers toutes les manipulations citées ci-dessus, notre étude s'est orientée vers le suivi des comportements de nos échantillons, tout au long des traitements subis.

Ce chapitre est consacré à mettre en évidence l'évolution de tous les résultats obtenu suivant le taux de l'eutectique à travers la caractérisation et les mesures faites sur les deux alliages semi-conducteur Pb-Sn et Sn-Zn à 300K tous au long de la plaquette obtenu par la fonderie. Ces résultats sont présentés sous forme de graphes en 3D suivant la position des échantillons dans la plaquette de coulée, classé par ordre de traitement subi (brut, laminé et traité), tout en figurant la fraction de l'eutectique, la micrographie, la dureté, la résistivité et conductivité électrique.

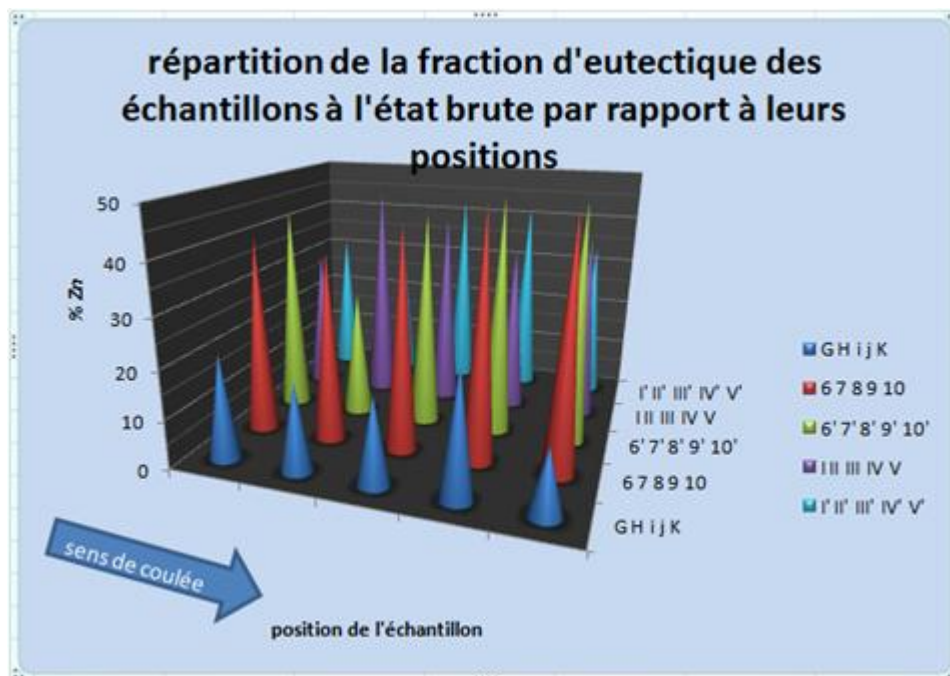
### III.1.Echantillons brutes

#### III.1.1. distribution d'eutectique

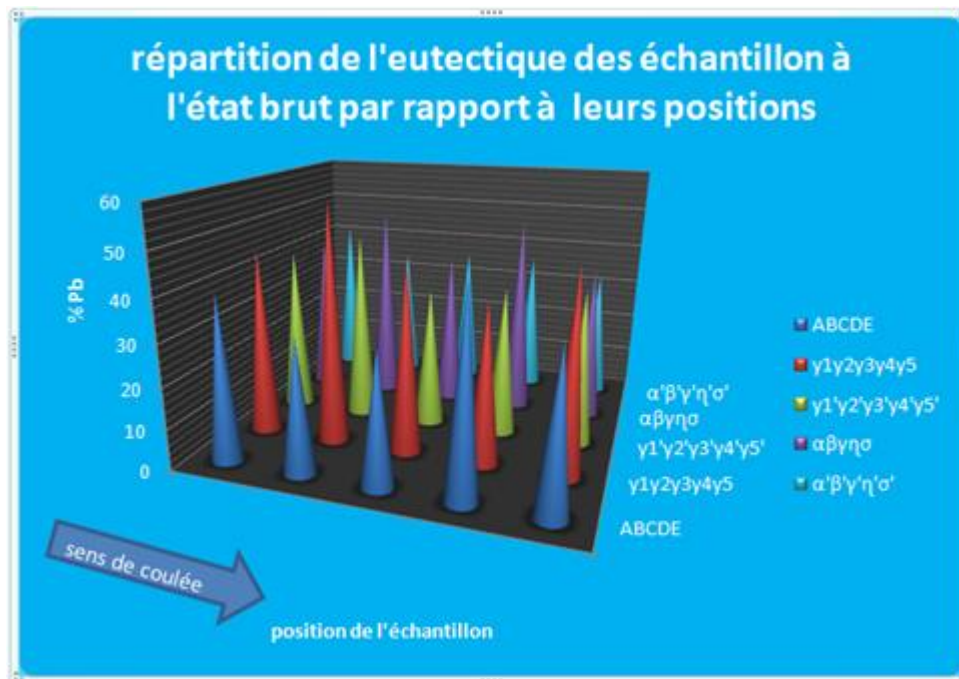
Les résultats de la micrographie et de la fraction de l'eutectique obtenu après élaboration et suivant le sens de coulée en ayant utilisée le logiciel « Imagej », sont illustrés dans les *Tableaux (VII à XV)*

Sachant que le refroidissement se fait des parties externes de la plaquette aux parties internes de celle-ci, les micrographies reflètent un eutectique pas trop dense et des lamelles fines et régulières.

Le résumé de tous les résultats des tableaux de la fraction d'eutectique des deux alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement, suivant le positionnement des échantillons est modélisé suivant un repère en trois dimensions illustrées dans les *figures 29, 30*.



**Figure 29.** Distribution de la fraction d'eutectique du Sn-Zn brut suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.



**Figure 30.** Distribution de la fraction d'eutectique du Pb-Sn brut suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.

On remarque que la distribution obtenue dans tous les échantillons des deux lingots bruts sont caractérisés par une distribution aléatoire, avec des valeurs d'eutectique très rapprochées entre elles par rapport à l'état brut, cependant marqué par des pics au niveau des paliers J, II, III' et IV' pour le Sn-Zn et au niveau de B, D, 1, 2', β, η' pour le Pb-Sn.

### III.1.2. Distance inter-lamellaire

Les résultats de la micrographie et de la distribution de la distance inter-lamellaire obtenu après élaboration et suivant le sens de coulée en ayant utilisée le logiciel « Imagej », sont illustrés dans les *tableaux* (XVI-XXV). Des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

A première vue, on remarque déjà que point de vue forme des lamelles c'est plutôt uniforme et réguliers de taille relativement différentes et de volume relativement constant; avec une distance inter lamellaire décroissante suivant le sens de coulée.

Le résumé de tous les résultats des tableaux de la distribution de la distance interlamellaire des deux alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement, suivant le positionnement des échantillons respectivement est modélisé suivant un repère en trois dimensions illustrées dans la *figure 31,32*.

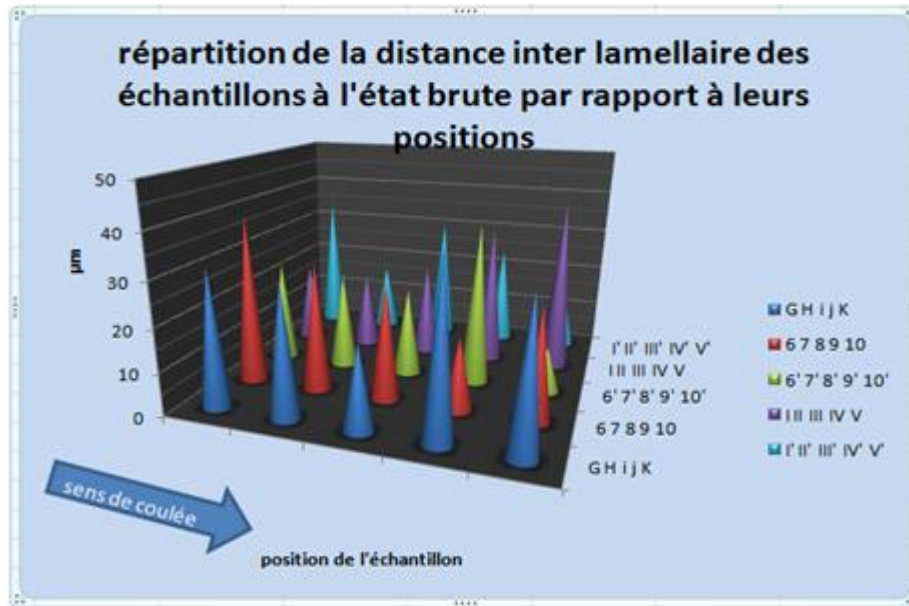


Figure 31. Distribution de la distance interlamellaire suivant le positionnement des échantillons dans le lingot pour le Sn-Zn brut.

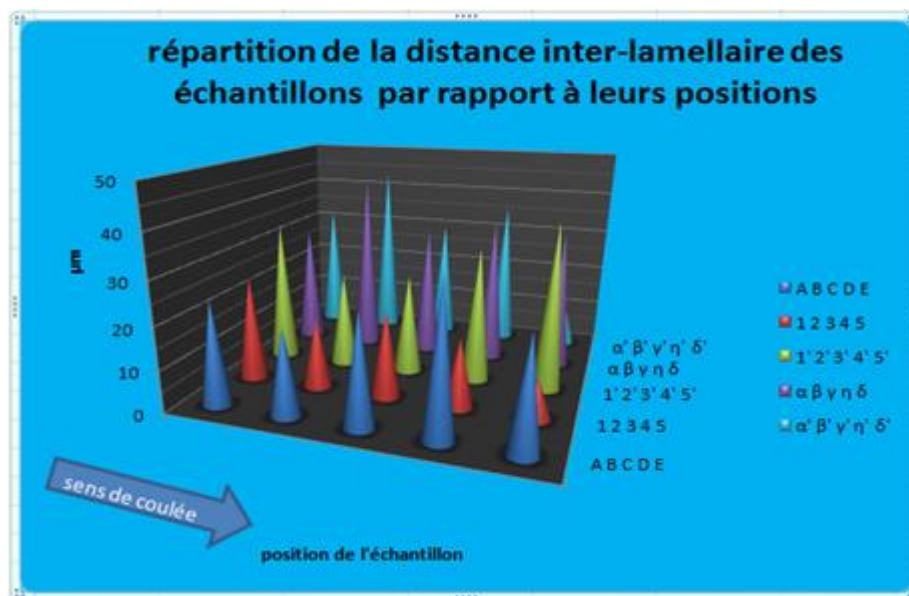


Figure 32. Distribution de la distance interlamellaire suivant le positionnement des échantillons dans le lingot pour le Pb-Sn brut.

En tenant compte de la position des l'échantillons, et en se basant sur les distances inter-lamellaires des deux alliages, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier j, 10, 9', I et V' pour le Sn-Zn et au niveau D, 1, 5',  $\beta$  et  $\beta'$  pour le Pb-Sn.

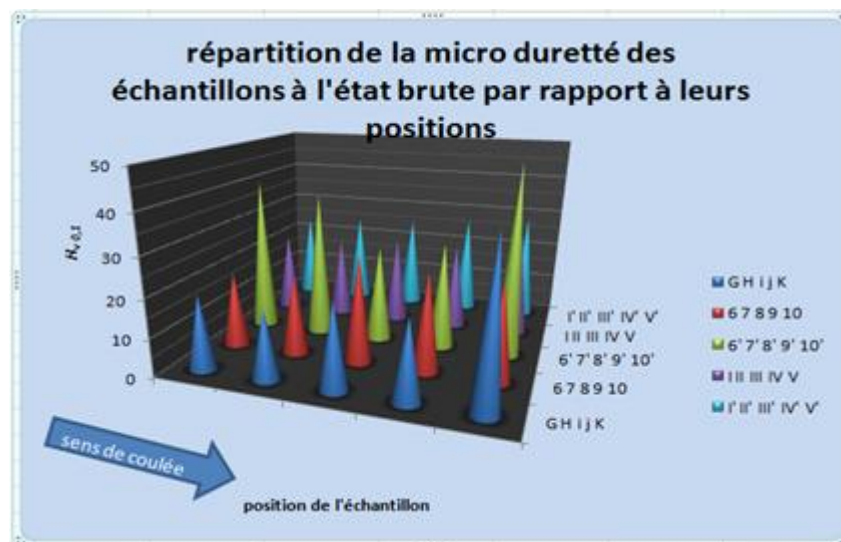
### III.3. Micro-dureté

Les résultats de la micro-dureté obtenue après élaboration et suivant le sens de coulée sont illustrés dans les *tableaux* (XXVI-XXVII). Des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

Point vue répartition de la micro-dureté au niveau de toute la plaquette, on remarque qu'on parlant de la colonne adjacente X à la source de coulée c'est plutôt une distribution aléatoire. Pour ce qui concerne les colonnes intermédiaires Y et Z et celle à l'opposé de la source de coulée Z', on tend vers une distribution croissante suivant le sens de coulée. Concernant la colonne centrale Y', elle est caractérisée par une décroissance de la micro-dureté marqué par un maximum au palier le plus bas 10'.

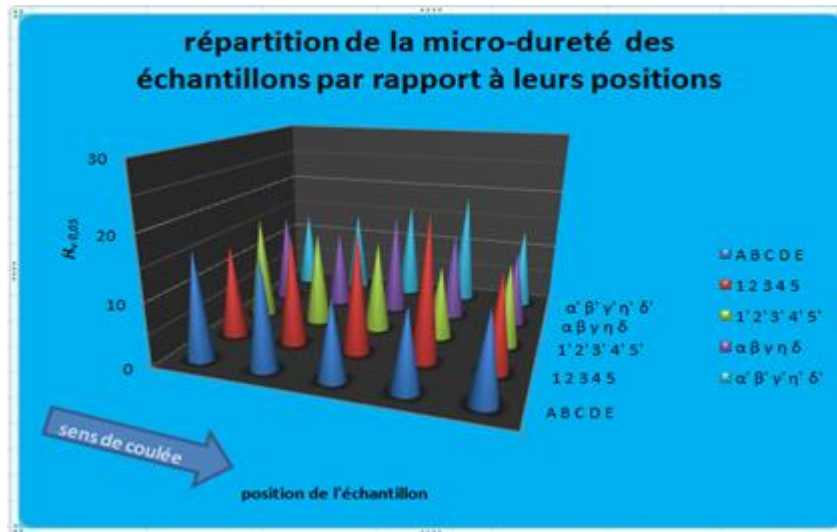
Et pour ce qui concerne Pb-Sn, la répartition de la micro-dureté au niveau de toute la plaquette, la pratique vient conforter la théorie pour ce qui concerne l'hétérogénéité à l'état brute. On remarque que plus on se rapproche du centre de la plaquette plus la dureté augmente, ainsi que le fond de la plaquette regroupe les plus basses duretés, qui fait référence à la densité du Plomb plus lourd que l'Etain.

Le résumé de tous les résultats des tableaux de la micro-dureté des deux alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement, suivant le positionnement des échantillons est modélisé suivant un repère en trois dimensions illustrées dans les *figures* 33, 34.



**Figure 33.** Distribution de la microdureté du Sn-Zn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.





**Figure 34.** Distribution de la microdureté du Pb-Sn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.

Du point de vue répartition de la micro-dureté au niveau de toute la plaquette, on remarque qu'on parlant de la colonne adjacente X à la source de coulée, c'est plutôt une distribution aléatoire. Pour ce qui concerne les colonnes intermédiaires Y et Z et celles à l'opposé de la source de coulée Z', on tend vers une distribution croissante suivant le sens de coulée. Concernant la colonne centrale Y', elle est caractérisée par une décroissance de la micro-dureté marquée par un maximum au palier le plus bas 10'.

Et pour ce qui concerne le deuxième alliage, la répartition de la micro-dureté au niveau de toute la plaquette, la pratique vient conforter la théorie pour ce qui concerne l'hétérogénéité à l'état brut. On remarque, que plus on se rapproche du centre de la plaquette, plus la dureté augmente, ainsi que le fond de la plaquette regroupe les plus basses duretés qui fait référence à la densité du Plomb plus lourd que l'Etain.

### III.4. Résistivité électrique

Les résultats de résistivité électrique obtenue après élaboration et suivant le sens de coulée sont illustrés dans les *tableaux* (XXVIII-XXXVII), Des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

Le résumé de tous les résultats des tableaux de la résistivité électrique des deux alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement, suivant le positionnement des échantillons est modélisé suivant un repère en trois dimensions illustrées dans les *figures* 35,36.

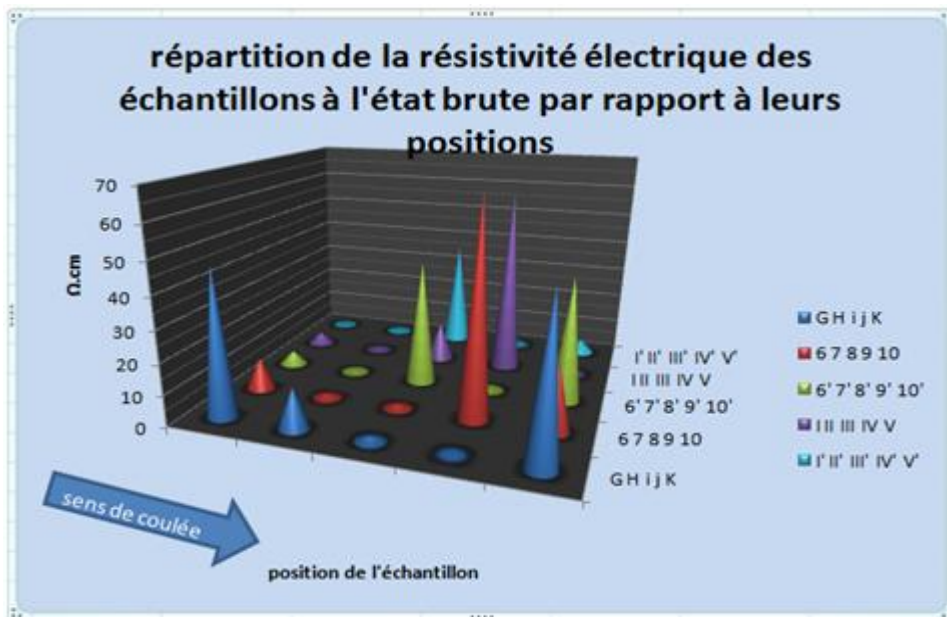


Figure 35. Distribution de la résistivité du Sn-Zn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.

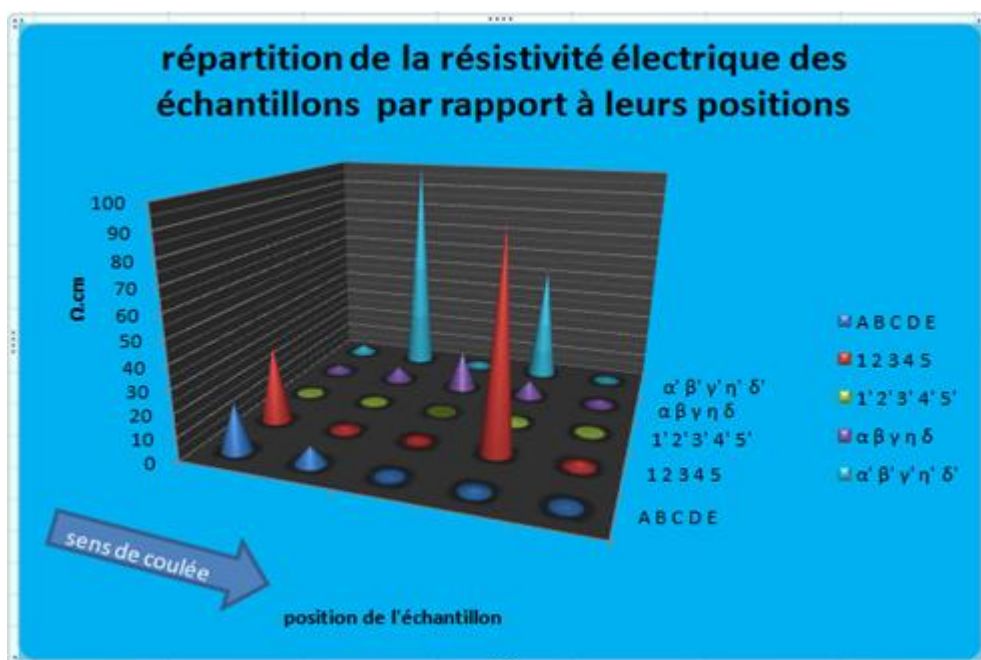


Figure 36. Distribution de la résistivité du Pb-Sn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.

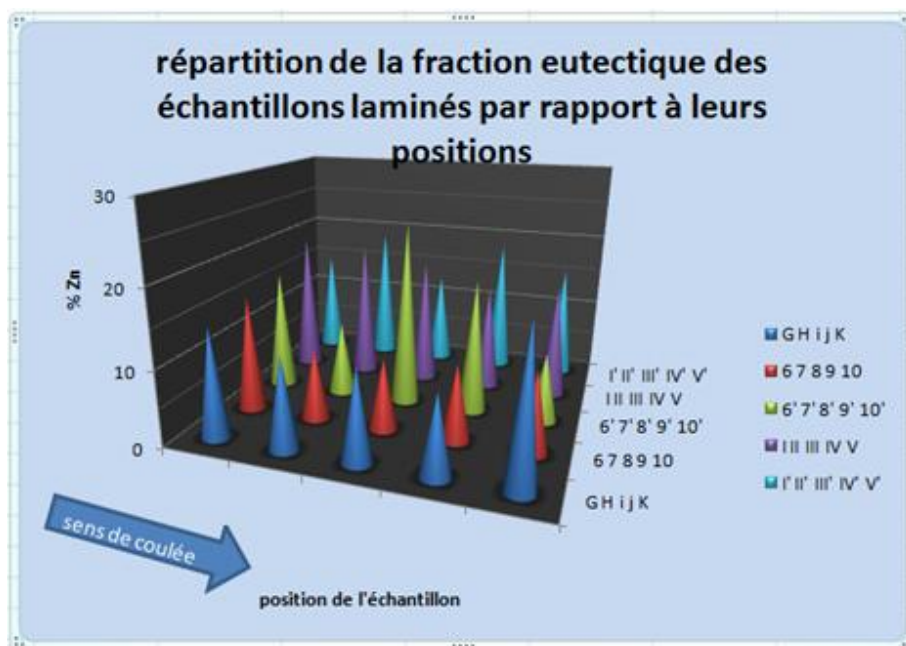
On remarque qu'à l'état brut, la distribution obtenue suivant le sens de coulée est relativement basse sur toute la surface de chaque alliage, avec quelques valeurs de résistivité assez hautes, représentées au niveau du palier A, 4, 4',  $\gamma$  et  $\beta'$  pour l'alliage Pb-Sn et au niveau de j, 9, 10', 8', IV et III' pour l'alliage Sn-Zn.

### III.2. Echantillons laminés

#### III.2.1. Distribution de l'eutectique

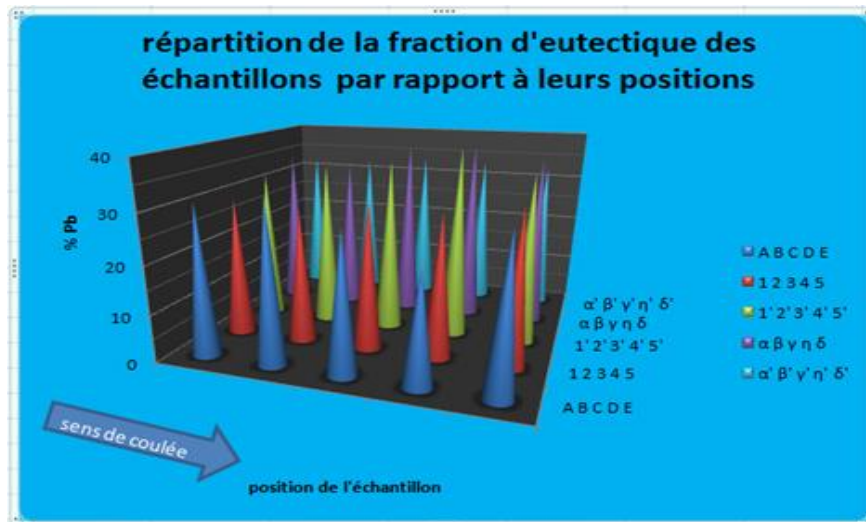
Les résultats de la micrographie et de la fraction de l'eutectique obtenus après déformation à froid (laminage) et suivant le sens de coulée en ayant utilisé le logiciel "Imagej", sont illustrés dans les *tableaux (XXXVIII à XLVII)* ; des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

Le résumé de tous les résultats de la distribution d'eutectique après déformation à froid des deux alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement, suivant le positionnement des échantillons est modélisé suivant un repère en trois dimensions illustrées dans les *figures 37, 38*.



**Figure 37.** Distribution de la fraction d'eutectique après laminage du Sn-Zn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.





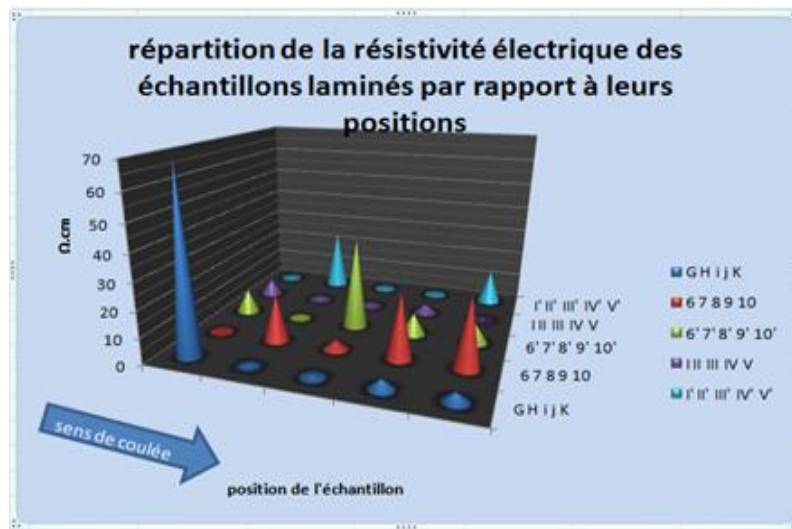
**Figure 38.** Distribution de la fraction d'eutectique après laminage du Pb-Sn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot

On remarque que la distribution obtenue dans tous les échantillons des deux lingots après laminage sont caractérisés par une distribution aléatoire, amoindrie par la déformation avec des valeurs d'eutectique très rapprochées entre elles par rapport à l'état brut, cependant marqué par des pics au niveau des paliers K, 6, 8', I, II' pour le Sn-Zn et au niveau de E, 5, 4', η, γ, η', γ' pour le Pb-Sn.

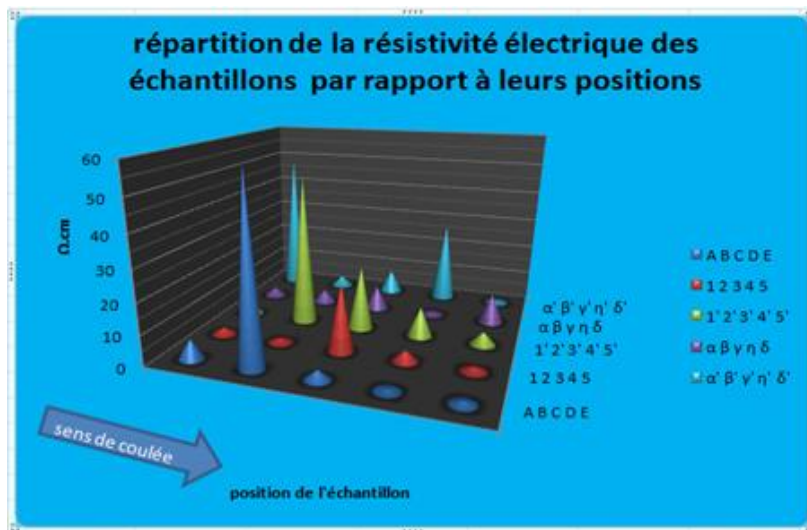
### III.2.2. Résistivité électrique

Les résultats de résistivité électrique obtenus après laminage et suivant le sens de coulée sont illustrés dans les *tableaux (XLVIII à LVII)*; Des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

Le résumé de tous les résultats de la distribution d'eutectique après déformation à froid des deux alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement, suivant le positionnement des échantillons, est modélisé suivant un repère en trois dimensions illustrées dans les *figures 39, 40*.



**Figure 39.** Distribution de la résistivité électrique après laminage du Sn-Zn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot



**Figure 40.** Distribution de la résistivité électrique après laminage du Pb-Sn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot

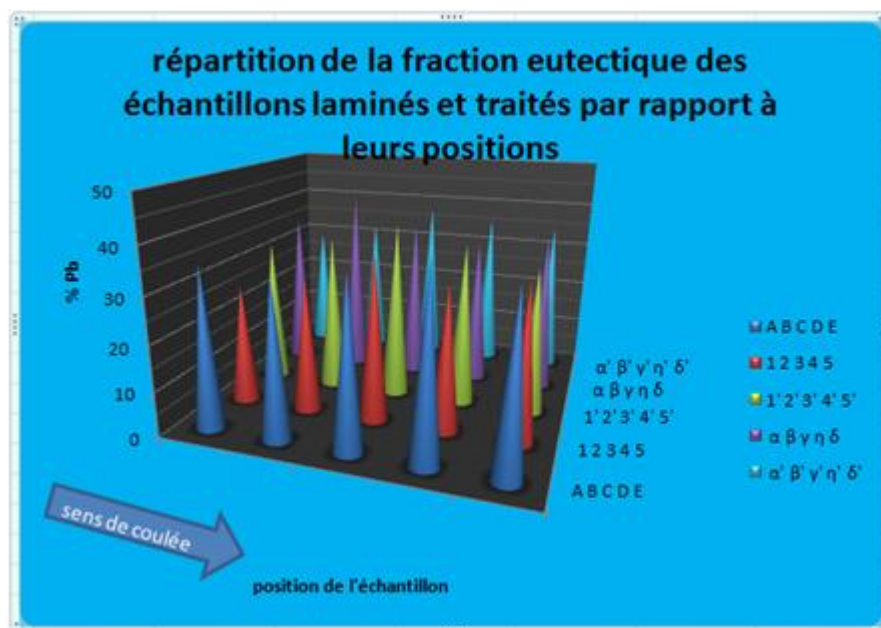
En tenant compte de la position des l'échantillons, et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage des deux alliages, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier G, 10, 8', IV, II' pour le Sn-Zn et au niveau B, 3, 2', α', de pour le Pb-Sn.

### III.3. échantillons recuits

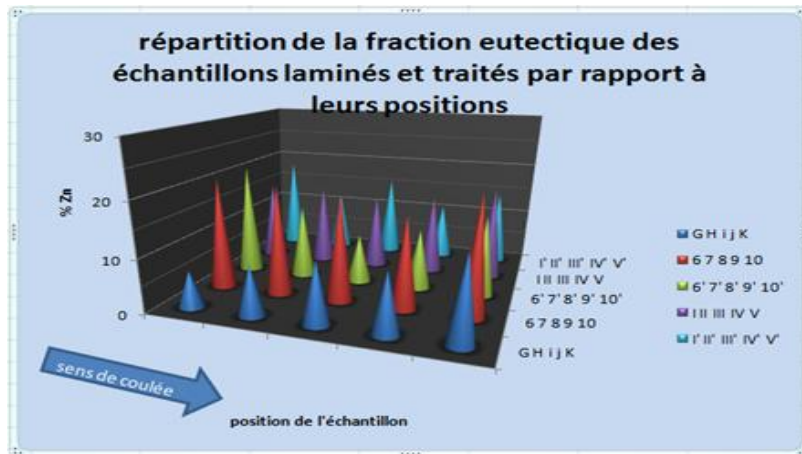
#### III.3.1. Distribution de l'eutectique

Les résultats de la micrographie et de la fraction de l'eutectique obtenu après traitement thermique (recuit) et suivant le sens de coulée, en ayant utilisée le logiciel "Imagej" pour traiter les images, sont illustrés dans les *tableaux (LVIII à LXVII)* ; des alliages Pb-Sn et Sn-Zn respectivement.

Le résumé de tous les résultats des tableaux de la distribution d'eutectique après traitement d'homogénéisation des alliages Pb-Sn et Sn-Zn respectivement, suivant le positionnement des échantillons est modélisé suivant un repère en trois dimensions illustrées dans les *figures 41, 42*.



**Figure 41.** Distribution de la fraction d'eutectique après traitement d'homogénéisation du Pb-Sn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.



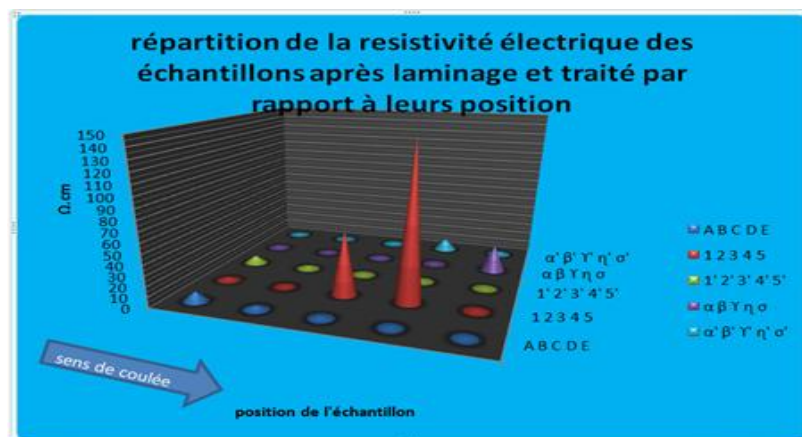
**Figure 42.** Distribution de la fraction d’eutectique après traitement d’homogénéisation du Sn-Zn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.

On remarque qu’après traitement d’homogénéisation que la distribution obtenue suivant le sens de coulée est relativement homogènes sur toute la surface de chaque alliage, avec des valeurs de fraction d’eutectique relativement proches de la théorie, tout en remarquant des pics de fraction au niveau du palier D , 3 , 3’ ,  $\beta$  ,  $\delta'$  pour l’alliage Pb-Sn et au niveau de K, 10, 6’, 10’, V ,pour l’Sn-Zn.

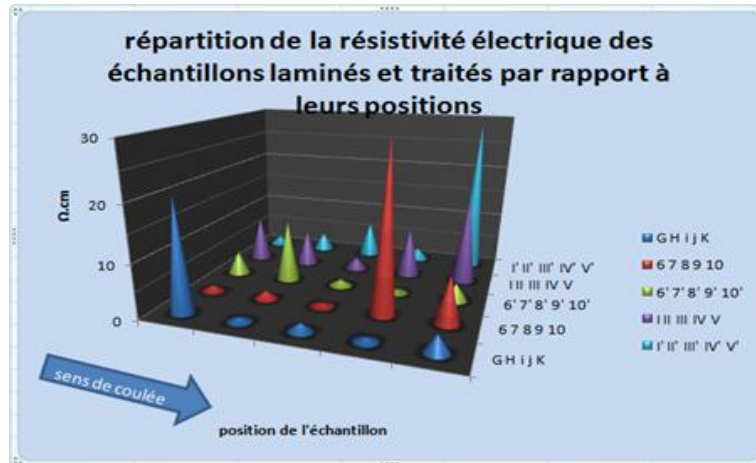
### III.2. Résistivité électrique

Les résultats de la résistivité électrique obtenue après recuit et suivant le sens de coulée sont illustrés dans les *tableaux (LXVIII à LVII)* ; Des alliages Pb-Sn et Sn-Zn respectivement.

Le résumé de tous les résultats des tableaux de la variation de la résistivité électrique après traitement d’homogénéisation de l’alliage binaire Sn-Zn suivant le positionnement des échantillons respectivement est modélisé suivant un repère en trois dimensions illustrées dans les *figures 43, 44*.



**Figure 43.** Distribution de la résistivité électrique après traitement d’homogénéisation du Pb-Sn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.



**Figure 44.** Distribution de la résistivité électrique après traitement d'homogénéisation du Sn-Zn suivant le positionnement des échantillons dans le lingot.

On remarque qu'après traitement d'homogénéisation, et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après traitement thermique, que la répartition est aléatoire suivant le sens de coulée, marqué par des pics au niveau des paliers A, 4, 1',  $\delta$ ,  $\eta'$  pour le Pb-Sn, et au niveau de G, 9, 7', V, V' pour le Sn-Zn.



### III.4. Interprétations des résultats de l'état brut

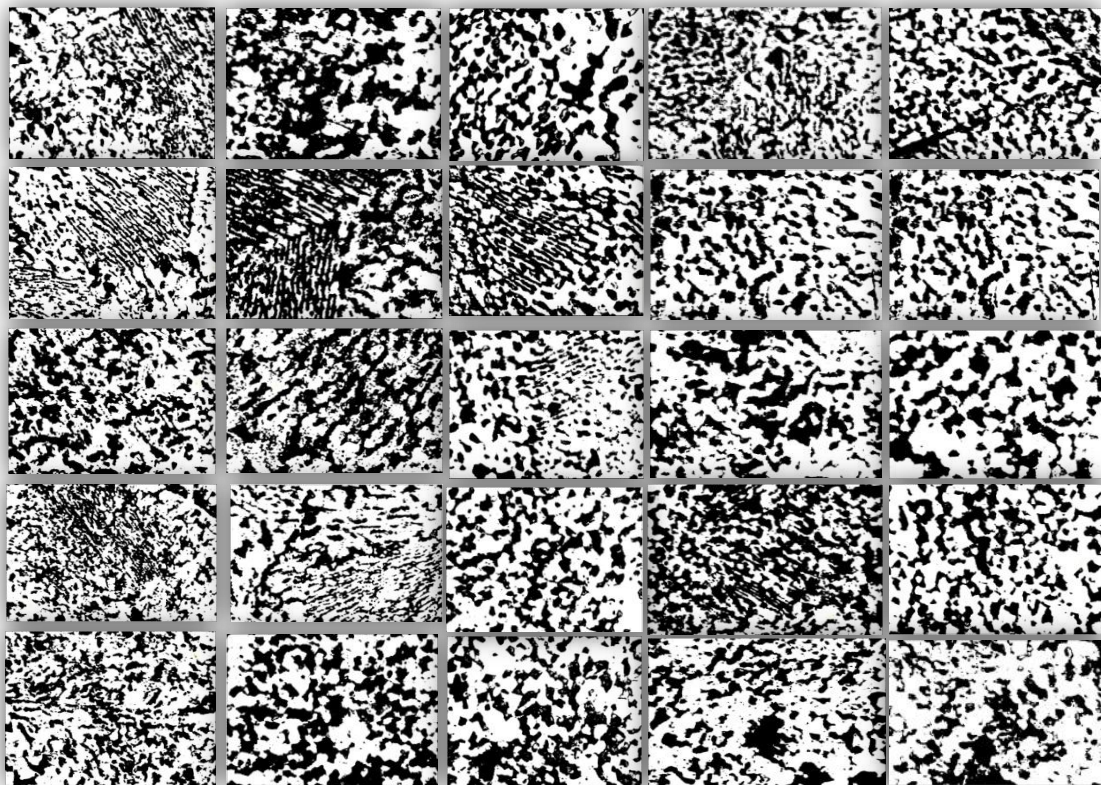
Nous allons tout d'abord interpréter les résultats à l'état brut, à l'état laminé et à l'état laminé traité, ensuite nous ferons une comparaison entre eux.

#### III.4.1. Pb-Sn

Nous interprétons les microstructures obtenus, les résultats des mesures de la micro dureté et les résultats des mesures de la résistivité électrique  $\rho$ .

##### III.4.1.1. Microstructure

Les microstructures des 25 échantillons étudiés sont représentées sur la *figure 45*.

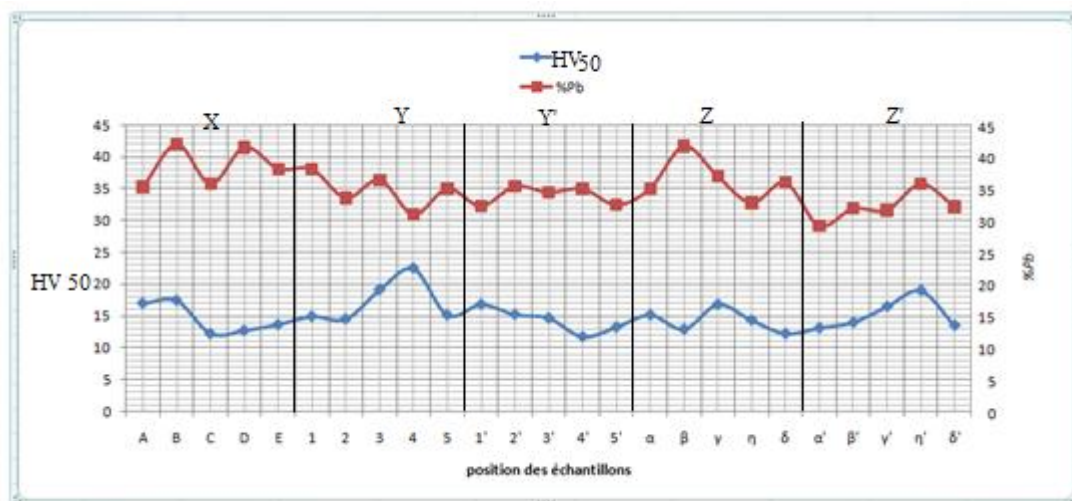


*Figure 45.* Les microstructures (X1000) de l'intégralité du lingot de Pb-Sn à l'état brut de coulée.

Les microstructures obtenues montrent que le lingot est globalement hétérogène. En effet, les plages eutectiques (des lamelles de Pb parallèles avec celles de Sn) sont majoritaires au centre et à l'extrémité gauche du lingot en forme de plaquette à l'état brut. Par contre, à l'extrémité droite et la partie basse de ce lingot, des amas de Pb et d'Sn apparaissent et sont nettement observables ; Ceci est dû au fait que les conditions de refroidissement d'équilibre ne sont pas atteintes et que notre liquide n'a pas été secoué et agité convenablement pour lui permettre d'être homogène. L'analyse d'image réalisée par le logiciel "imagej" montre que les atomes de Pb (en noir) occupent une surface de 39% du lingot en moyenne.

### III.4.1.2. Microdureté

La *figure 46* représente les résultats des mesures de la microdureté Vickers sur toute la surface du lingot à l'état brut. On observe que la valeur de la microdureté reste constante, de l'ordre de  $HV_{50} = 15$ . On remarque aussi, que la proportion entre la microdureté et la fraction de l'eutectique confirme la bonne distribution des lamelles de Pb sur la plupart de la plaquette, avec quelques pics marqués au niveau des échantillons (4 et  $\eta'$ ) confirmant une concentration de défauts.



**Figure 46.** Représentation simultanée des valeurs de la micro-dureté et de la fraction de l'eutectique aux différents endroits du lingot à l'état brut du Pb-Sn.

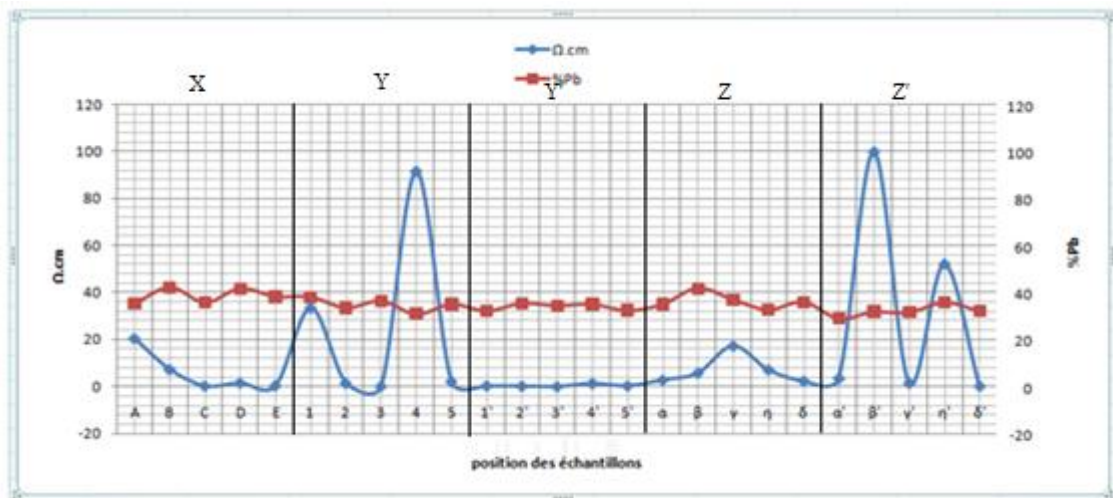
### III.4.1.3. Résistivité électrique

La *figure 47* représente les valeurs des mesures de la résistivité électrique  $\rho$  sur toute la surface du lingot à l'état brut. La majorité des échantillons ont une valeur moyenne de l'ordre de  $2 \Omega \cdot \text{cm}$ , ce qui correspond à une conductivité électrique  $\sigma$  de l'ordre de  $0,34 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

On remarque que la fraction obtenue est dans l'intervalle de l'eutectique théorique avec des écarts de 10% en moyenne ; cela est dû en partie aux conditions de refroidissement non contrôlées, temps de solidification relativement court ; et sachant que le Pb est dense, donc diffusion restreinte de ce dernier, accompagné d'une mauvaise évacuation que ça soit des dislocations ou des défauts.

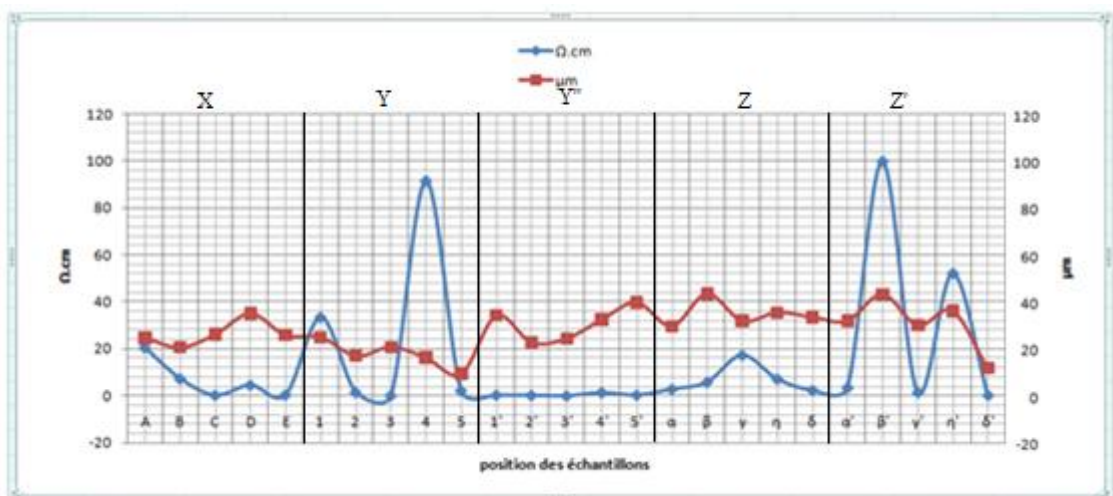
Et en se basant sur le refroidissement non contrôlé (fonderie), on met en évidence une structure basaltique, c'est-à-dire qu'au fur et à mesure qu'on se rapproche du centre du lingot, les grains sont de plus en plus allongés et d'orientation suivant le sens de dégagement de la chaleur, que ceux positionnés au niveau des parois de la lingotière ; en sachant que plus les tailles des grains sont grandes, plus la résistivité électrique est petite, cela donne lieu à des pics de résistivité de position aléatoire reflétant l'état brut (4, 1,  $\beta'$ ,  $\eta'$ ).

Toutefois, il y a lieu de valeurs de résistivité basses comme les échantillons (C, D, 3', 4',  $\gamma'$ ,...etc.) de position centrale.



**Figure 47.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique  $\rho$  et de la fraction d'eutectique aux différents endroits du lingot à l'état brut du Pb-Sn.

Nous avons jugé utile de représenter les valeurs de la résistivité électrique  $\rho$  obtenues aux différents endroits de notre lingot à l'état brut de coulée en fonction de la distance inter-lamellaire représentée dans la *figure 48* que ça soit pour affirmer nos résultats que de les ou les compléter. On constate que la distribution de cette distance est relativement variable entre les différents échantillons, avec un écart de  $25\mu\text{m}$  engendrant des valeurs de résistivité relativement basses ; marquées par un pic au niveau des l'échantillons 4 et  $\beta'$  reflétant bien un taux de défauts considérablement haut, donnant lieu à une résistivité électrique élevée, confirmant les interprétations des graphes de la variation de la fraction de l'eutectique, en fonction de la résistivité électrique.

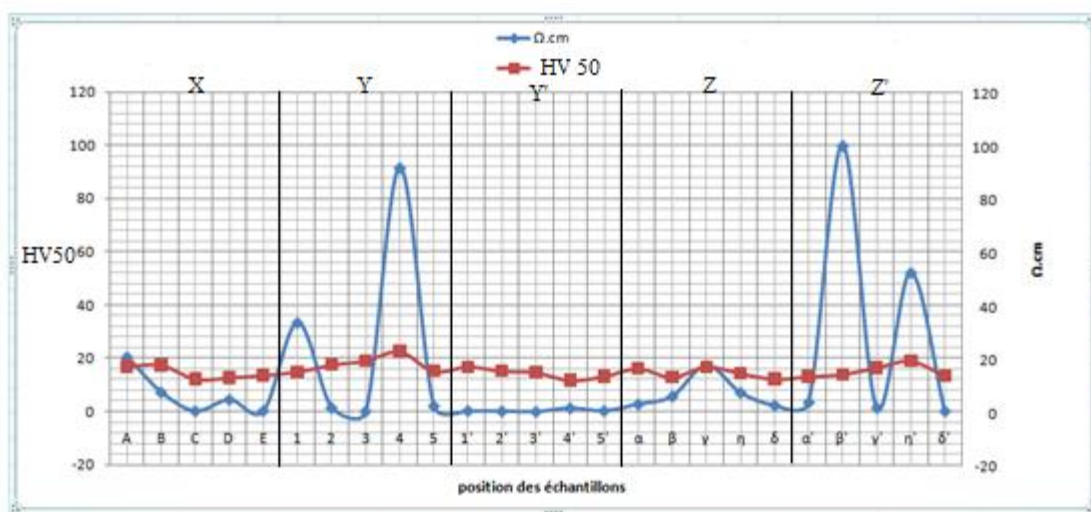


**Figure 48.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la distance inter-lamellaire aux différents endroits du lingot à l'état brut du Pb-Sn.



La représentation de la variation de la résistivité électrique en fonction de la micro-dureté vient conforter nos interprétations et cela à travers la *figure 49*.

On constate que la distribution de la micro-dureté est relativement homogène accompagnée généralement de valeurs de résistivité relativement basses ; marquées par un pic au niveau des échantillons (1, 4,  $\beta'$  et  $\eta'$ ) associé à une micro-dureté relativement élevée reflétant bien un taux de défauts considérablement haut, donnant lieu à une résistivité électrique élevée, confirmant les interprétations des graphes de la variation de la fraction de l'eutectique, en fonction de la résistivité électrique et reflètent la densité considérable des joints de grains donnant lieu à des grains fins confirmant la structure basaltique.



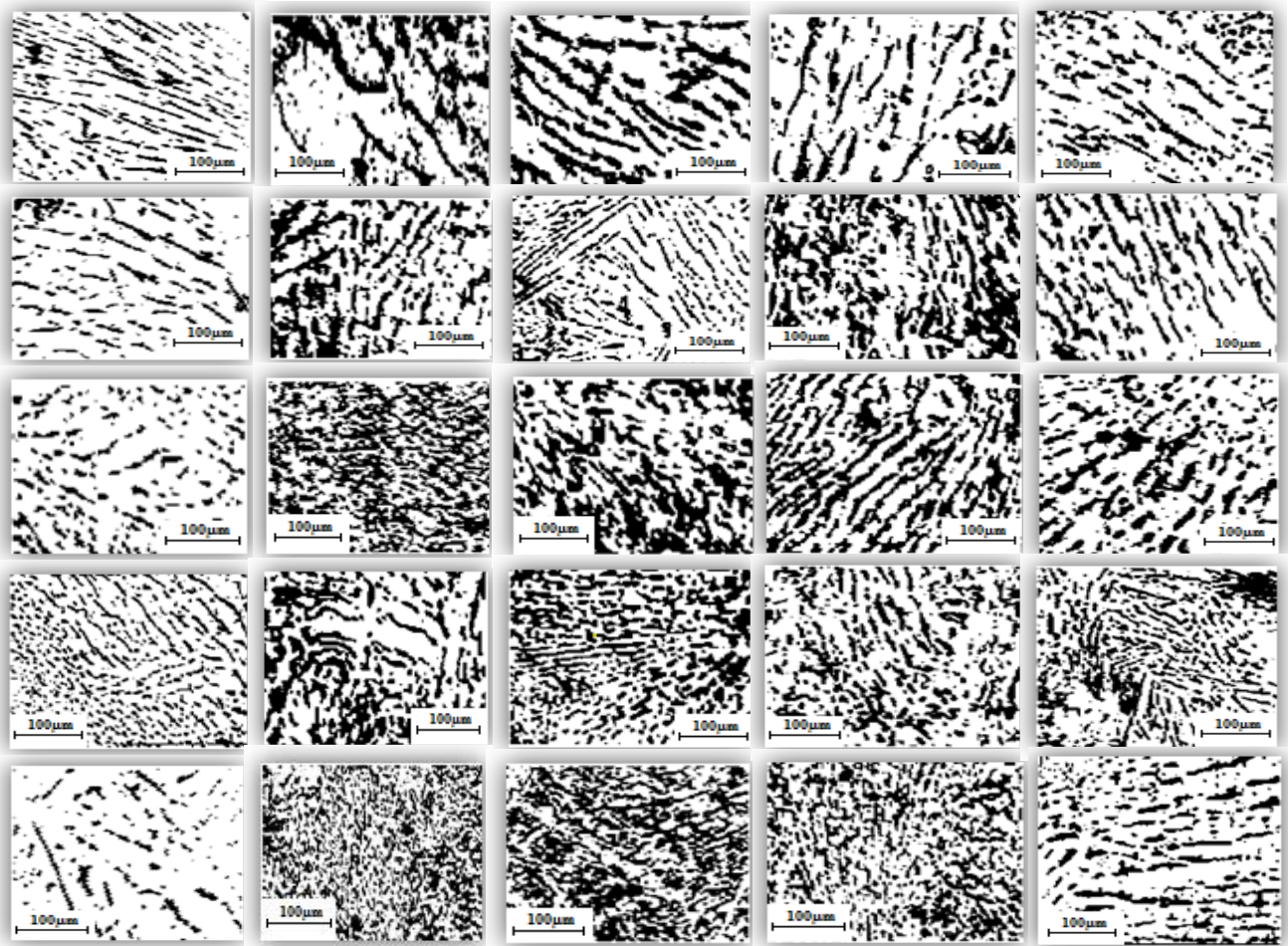
**Figure 49.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la micro-dureté aux différents endroits du lingot à l'état brut du Pb-Sn.

### III.4.2. Zn-Sn

Nous interprétons les microstructures obtenus, les résultats des mesures de la micro-dureté et les résultats des mesures de la résistivité électrique  $\rho$ .

#### III.4.2.1. Microstructure

Les microstructures des 25 échantillons sont représentées dans la *figure 50*.



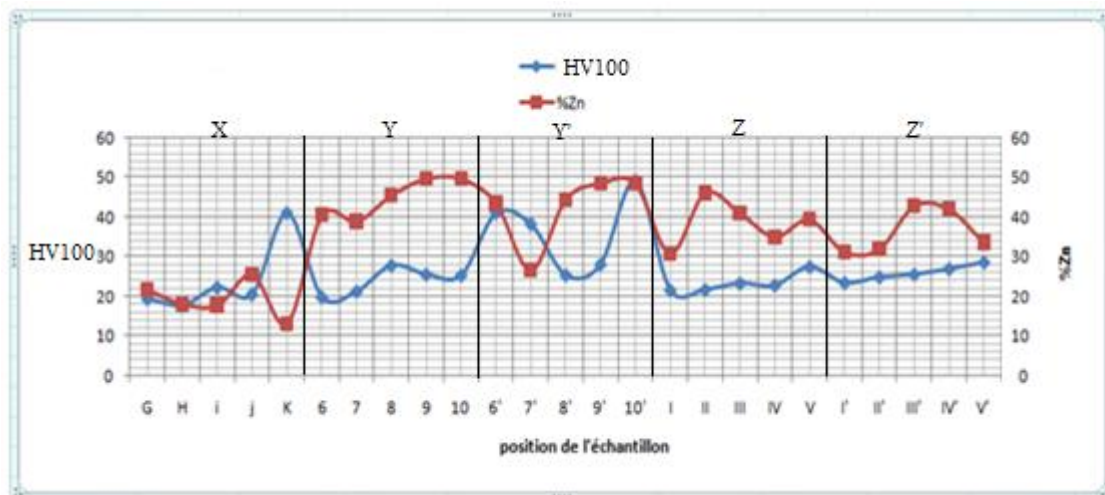
**Figure 50.** Les microstructures de l'intégralité du lingot à l'état brut de l'alliage eutectique Sn-Zn.

Les microstructures obtenues montrent que le lingot est globalement homogène. En effet, les plages eutectiques (des lamelles de Zn parallèles avec celles de Sn) sont largement majoritaires, à l'exception des extrêmes où la phase mère (Sn) est prédominante. Ici les distances inter-lamellaires sont plus nettes et plus larges que dans le cas des alliages Pb-Sn. L'analyse d'image réalisée par le logiciel "imagej" montre que les atomes de Zn (en noir) occupent une surface de 30% du lingot en moyenne. Ceci est dû au fait que les conditions de refroidissement d'équilibre ne sont pas atteintes et que notre liquide n'a pas été secoué et agité convenablement pour lui permettre d'être homogène.

#### III.4.2.2. Micro-dureté

La *figure 51* représente les résultats des mesures de la microdureté Vickers sur toute la surface du lingot à l'état brut. On observe que les valeurs de la microdureté oscillent entre 20 et 40  $HV_{100}$ , reflétant bien la structure hexagonale compacte du Zn caractérisée par une dureté plus grande que celle de la dureté de l'étain de structure cubique à faces centrées ; moyennant une valeur de 26.5  $HV_{100}$ .

On remarque que pour ce qui concerne la proportion de la micro-dureté par rapport à la fraction de l'eutectique est vraiment basse, surtout dans les régions centrales ; confirmant que les lamelles de Zn ont eu tendance à ne pas occuper tous les sites du réseau cristallin, engendrant un volume conséquent des lamelles de Zinc. Toutefois, on constate des pics de la micro-dureté dus entre autres, à l'accumulation des défauts.



**Figure 51.** Représentation simultanée des valeurs de la micro-dureté et de la fraction de l'eutectique aux différents endroits du lingot à l'état brut du Sn-Zn.

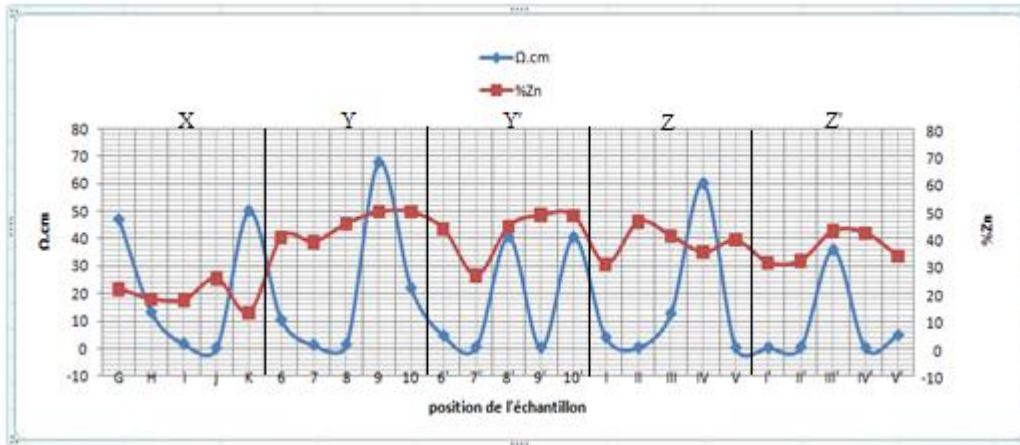
### III.4.2.3. Résistivité électrique

La *figure 52* représente les valeurs des mesures de la résistivité électrique  $\rho$  sur toute la surface du lingot à l'état brut. Ces valeurs, à l'inverse de celles de Pb-Sn sont dispersées et oscillent entre 1 et 50  $\Omega \cdot \text{cm}$ , ce qui correspond à une conductivité électrique comprise entre 0,34 et 0,02  $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

On remarque aussi que la fraction de l'eutectique à l'état brut est généralement au dessus de l'intervalle toléré théoriquement, moyennant des écarts de l'ordre de 25%, avec des valeurs accentuées aux colonnes centrales ; cela est causé entre autres, par des conditions de refroidissement non contrôlées, temps de solidification relativement court, engendrant d'une part, un taux de défauts et dislocations relativement conséquent reflété par la formation de lamelle de Zn relativement volumineuse, tout en sachant que pas tous les sites préférentiels dans le réseau cristallin n'ont été occupés, donnant lieu à une augmentation de la résistivité électrique.

Néanmoins, on remarque des résistivités basses dans les échantillons des colonnes externes (i, j, 7, 8,...etc.) et ceux des paliers les plus hauts (I, II, 6', 7',...etc.)

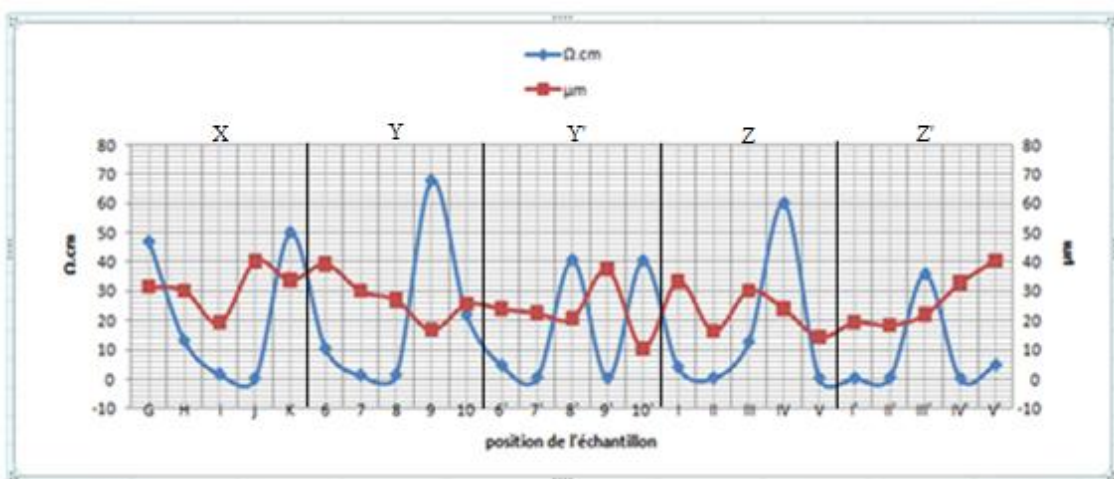




**Figure 52.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la fraction de l'eutectique aux différents endroits du lingot à l'état brut du Sn-Zn.

Nous avons jugé utile de représenter les valeurs de la résistivité électrique  $\rho$  obtenues aux différents endroits de notre lingot à l'état brut de coulée, en fonction de la distance inter-lamellaire représentée dans la *figure 53* que ça soit pour confirmer nos résultats ou les compléter ; on constate que la distribution de la distance inter-lamellaire fluctue entre les différents échantillons, moyennant un écart de  $30\mu\text{m}$  engendrant des valeurs de résistivité relativement basses ; marquées par des pics conséquents au niveau des échantillons (K, 8' et IV) caractérisés par des distance inter-lamellaires relativement grandes justifiant la hausse de la résistivité électrique engendrée.

Toutefois, on remarque des pics de résistivité associés à des distances inter-lamellaires relativement petites, causés par un taux de défauts assez conséquent.

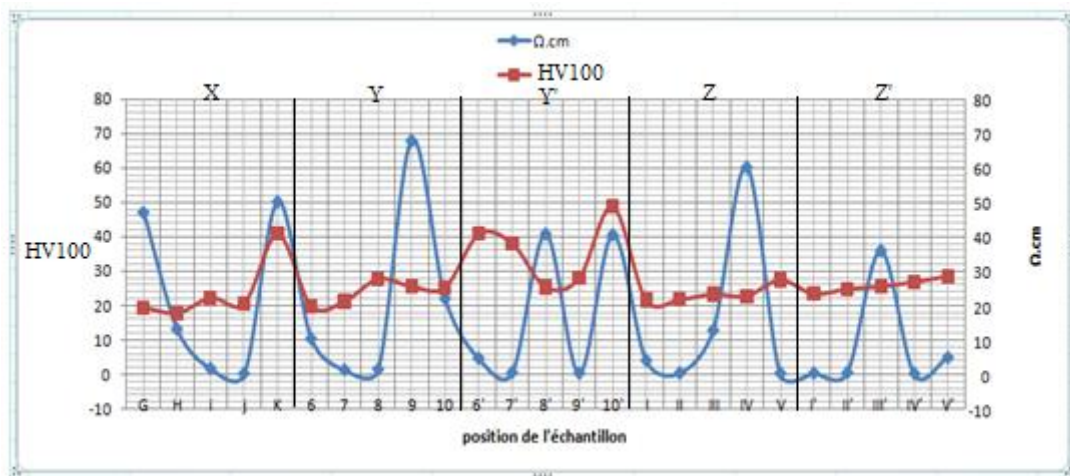


**Figure 53.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la distance inter-lamellaire aux différents endroits du lingot à l'état brut du Sn-Zn.

On a opté aussi pour une comparaison entre la résistivité électrique en fonction de la micro-dureté, dans le but d'avoir plus d'éclaircissement dans nos interprétations et cela à travers la *figure 54*.

On remarque que la micro-dureté est relativement constante en partant des échantillons des colonnes extérieures de la plaquette (X et Z'), marquée par des pics au niveau des échantillons (K et 10') reflétant une densité de joint de grain assez conséquente, diminuant la mobilité des porteurs de charge qui fait augmenter la résistivité électrique.

Toutefois, il y a des valeurs de micro-dureté relativement basses reflétant bien un taux de défauts considérablement haut, donnant lieu à une résistivité électrique élevée, confirmant les interprétations des graphes de la variation de la fraction de l'eutectique en fonction de la résistivité électrique.



**Figure 54.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la micro-dureté aux différents endroits du lingot à l'état brut du Sn-Zn.

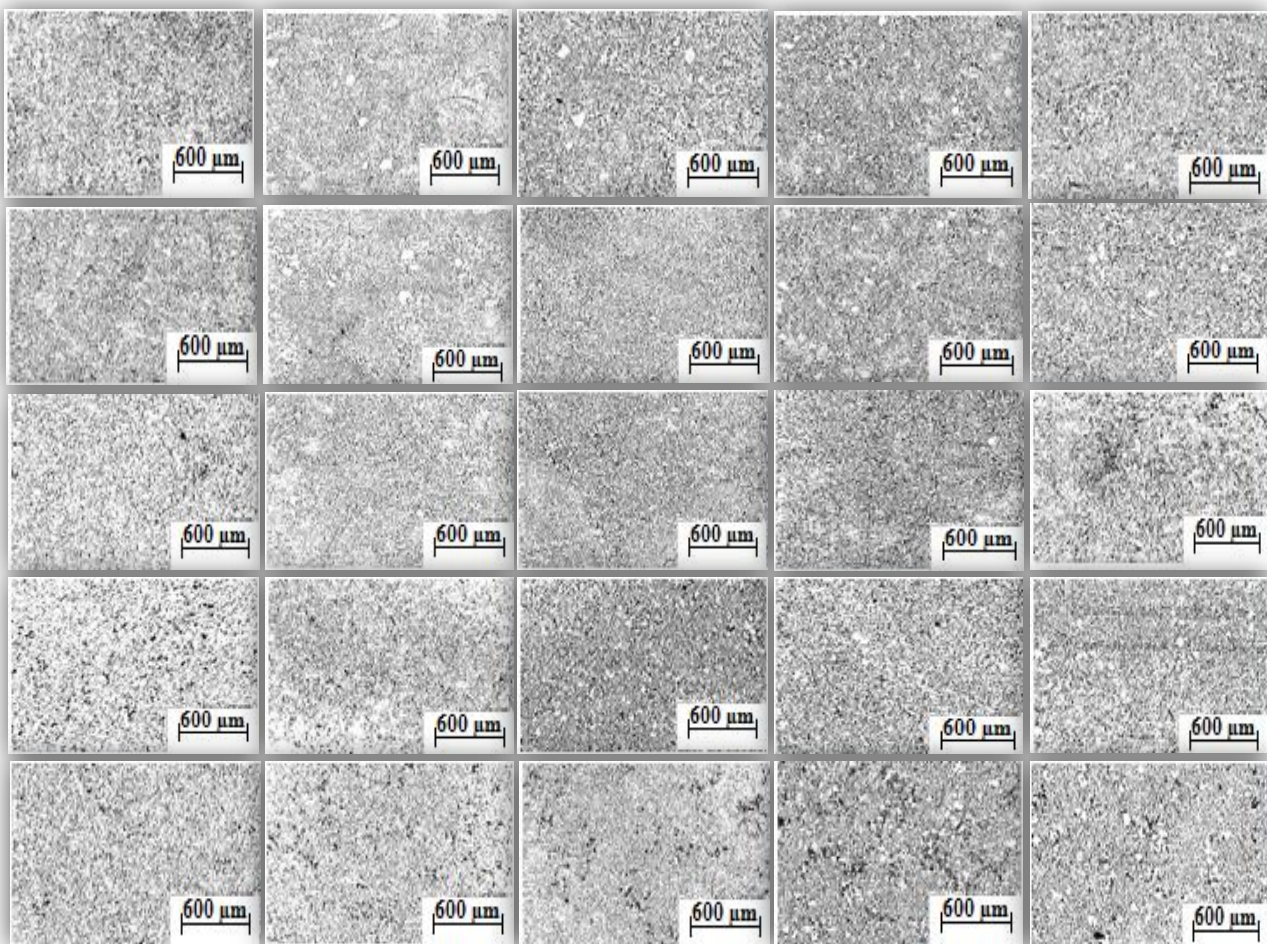
### III.5. Interprétations des résultats après laminage

Dans le but de donner une direction privilégiée à nos grains et de diminuer les défauts engendrés par l'élaboration (état de coulée), nous avons laminé à froid notre lingot brut de coulée. Nous commencerons à interpréter les microstructures obtenues, puis les valeurs des mesures de la résistivité électrique à l'état laminé.

#### III.5.1. Pb-Sn

##### III.5.1.1. Microstructure

Les microstructures des 25 échantillons laminés sont représentées sur la *figure 55*.



*Figure 55.* Les microstructures de tout le lingot du Pb-Sn à l'état laminé.

Les microstructures obtenues nous montrent une distribution aléatoire de la distribution de l'eutectique et une structure plus fine par rapport à celle du lingot à l'état brut. L'analyse d'image réalisée par le logiciel "imagej" met en évidence le changement morphologique de la distribution du Pb. En effet, elle montre que les atomes de Pb (en



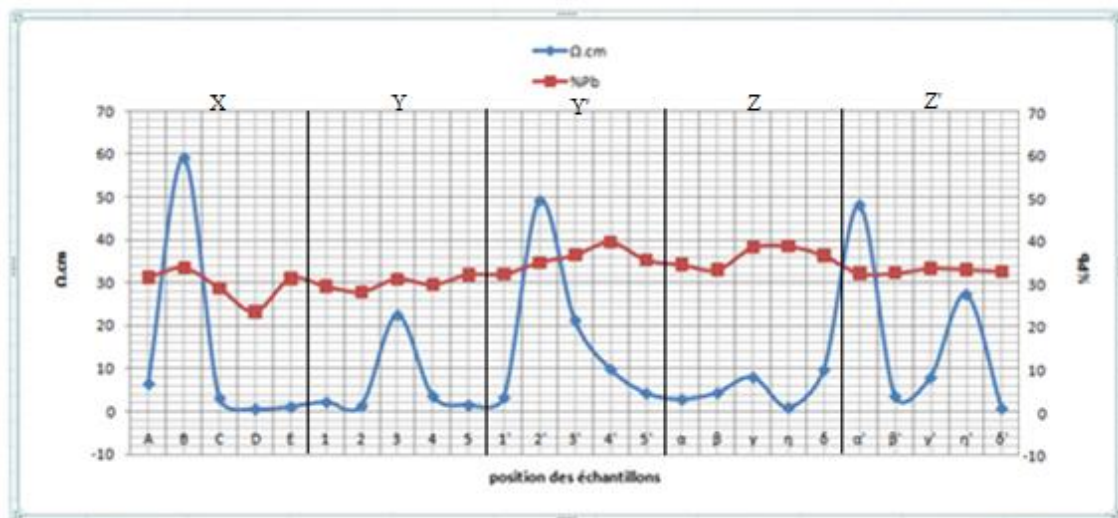
noir) occupent une surface de 33% du lingot en moyenne. Alors qu'elle était de l'ordre de 39% dans le lingot à l'état brut.

### III.5.1.2. Résistivité électrique

La *figure 56* représente les valeurs des mesures de la résistivité électrique  $\rho$  sur toute la surface du lingot à l'état laminé. Ces valeurs sont dispersées et varient entre 3 et 50  $\Omega.cm$ , ce qui correspond à une conductivité électrique  $\sigma$  entre 0,34 et 0,02  $\Omega.cm$ .

Après avoir appliqué un taux de déformation constant sur tous les échantillons afin d'orienter les grains et de diminuer les défauts causés par l'élaboration, ainsi que de minimiser la résistivité électrique initiale ; on remarque d'une part, que la fraction de l'eutectique s'est rapprochée relativement de l'intervalle théorique cela est dû à la diminution des défauts par le glissement des différents grains à travers les dislocations, en les évacuant vers l'extérieure du grain. Et d'autre part, on remarque que les échantillons qui ont eu des valeurs de résistivité bas à l'état brut, présentent une hausse de cette dernière due notamment à un écrasement du réseau cristallin.

La dispersion et l'augmentation des valeurs de la résistivité électrique à l'état laminé par rapport à celle de l'état brut, étaient prévisibles. En effet, la déformation plastique crée et multiple les sources de défauts ponctuels et linéaires.



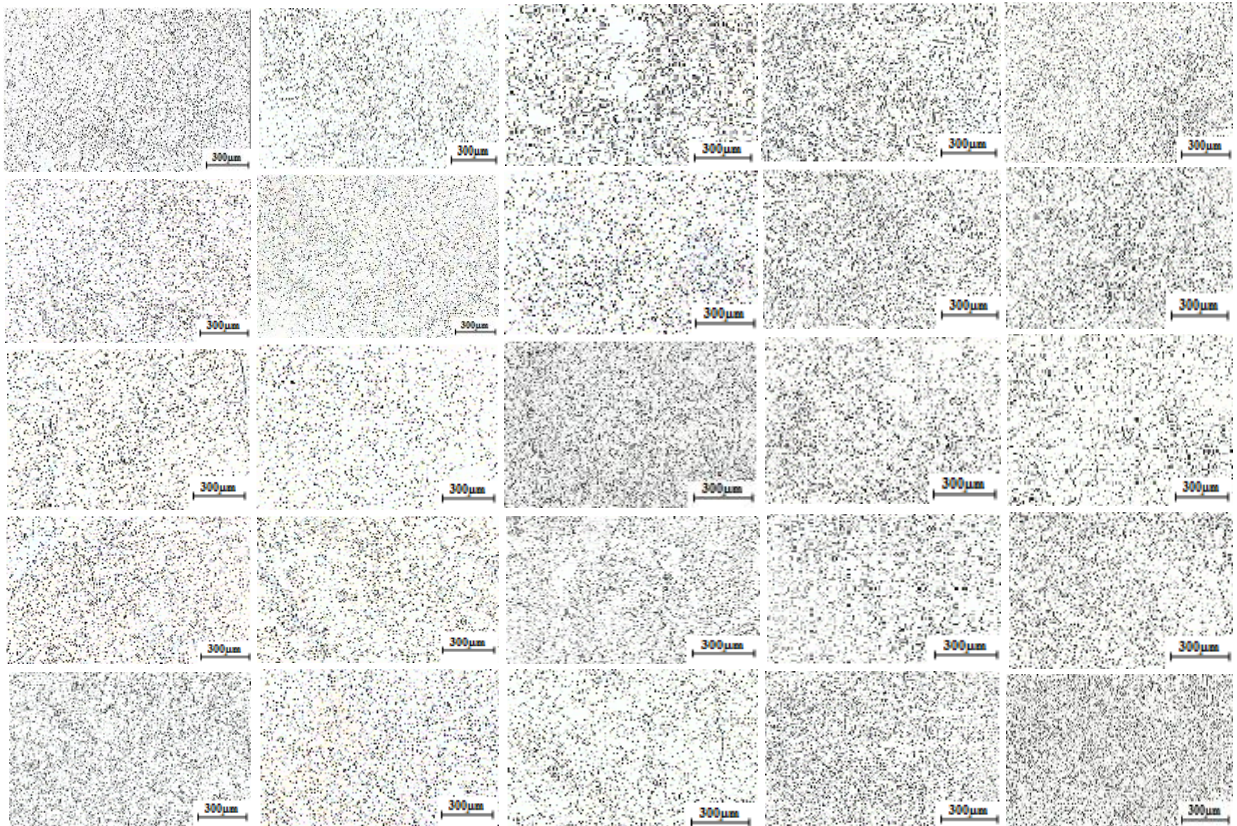
**Figure 56.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la fraction de l'eutectique aux différents endroits du lingot de Pb-Sn à l'état brut.

### III.5.2. Etat laminé de l'eutectique de l'alliage Zn-Sn

Comme dans le cas de l'eutectique de l'alliage Pb-Sn, nous avons laminé à froid notre lingot brut. Nous commencerons à interpréter les microstructures obtenues puis les valeurs des mesures de la résistivité électrique à l'état laminé.

### III.5.2.1. Microstructure

Les microstructures des 25 échantillons laminés sont représentées sur la *figure 57*.



*Figure 57.* Les microstructures de tout le lingot du Sn-Zn à l'état laminé.

Les microstructures obtenues ne montrent pas une orientation privilégiée des grains. Au contraire, on observe une distribution aléatoire de ces derniers dans toutes les directions possibles et une structure plus fine par rapport à celle du lingot à l'état brut de coulée. Donc l'aspect lamellaire de l'eutectique disparaît sous l'effet du laminage, néanmoins, le taux de déformation n'est pas suffisant pour imposer une texture. L'analyse d'image réalisée par le logiciel "imagej" met en évidence le changement morphologique des grains de Zn. En effet, elle montre que les atomes de Zn (en noir) occupent une surface de 15% du lingot en moyenne. Alors qu'elle était de l'ordre de 30% dans le lingot à l'état brut.

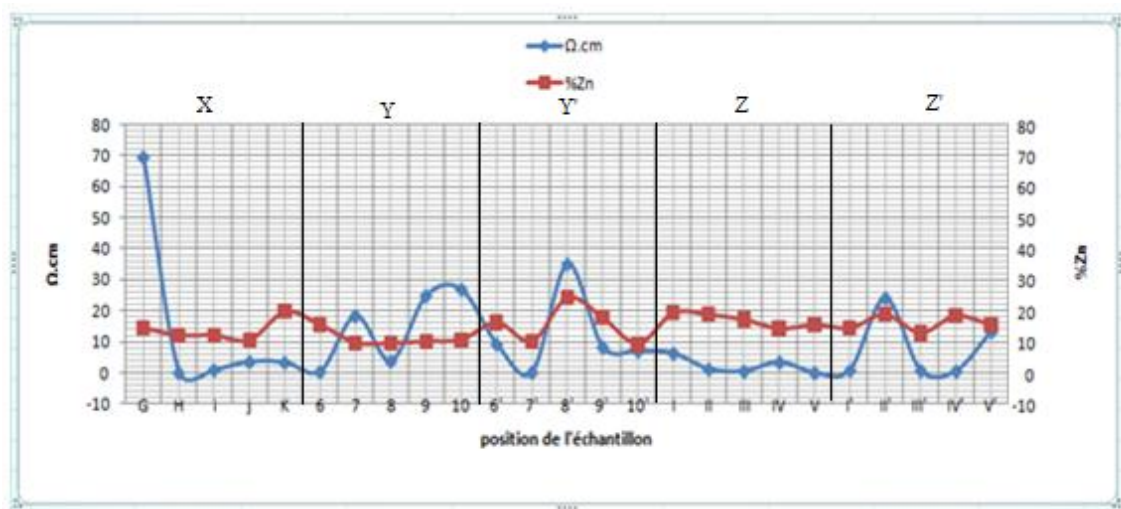
### III.5.2.2. Résistivité électrique

La *figure 58* représente les valeurs des mesures de la résistivité électrique  $\rho$  sur toute la surface du lingot à l'état laminé. Ces valeurs sont légèrement dispersées par rapport à celles de l'état brut et oscillent entre 3 et 30  $\Omega \cdot \text{cm}$ , ce qui correspond à une conductivité électrique  $\sigma$  entre 0,34 et 0,02  $\Omega \cdot \text{cm}$ .



Après avoir appliqué un taux de déformation constant sur tous les échantillons afin d'orienter les grains et de diminuer les défauts causés par l'élaboration, ainsi que de minimiser la résistivité électrique initiale ; on remarque d'une part, que la fraction de l'eutectique s'est rapprochée généralement de l'intervalle théorique, cela est dû à la diminution des défauts par glissement des différents grains à travers les dislocations en les évacuant vers l'extérieur ; et aussi à travers le changement de la morphologie des grains de Zn ne crée pas des défauts de distorsion ou d'encombrement.

Au contraire, elle soulage la structure, à cause du remplacement des atomes de Zn dans l'espace qui existe au sein de celle-ci, induisant une diminution considérable de la résistivité électrique. Et d'autre part, on remarque que quelques échantillons qui ont eu des valeurs de résistivité basse à l'état brut, présentent une hausse de cette dernière, due notamment à un écrasement du réseau cristallin.



**Figure 58.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la fraction de l'eutectique aux différents endroits du lingot d'Sn-Zn à l'état brut.

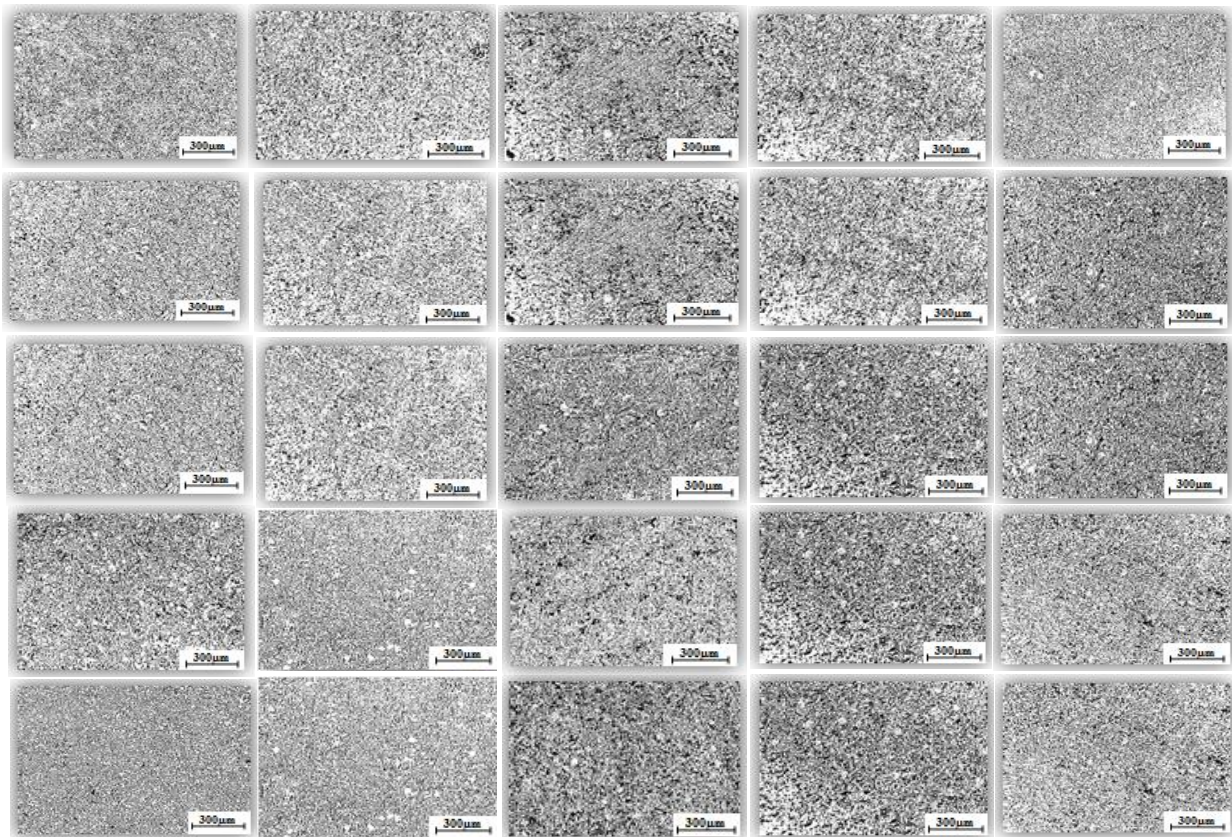
### III.6. Interprétations des résultats après laminage et recuit

Dans le but de diminuer la valeur de la résistivité électrique, nous avons fait subir à nos échantillons laminés un traitement de recuit à la température de 450K pendant 2 heures. Nous commencerons à interpréter les microstructures obtenues, puis les valeurs des mesures de la résistivité électrique à l'état traité thermiquement.

#### III.6.1. Pb-Sn

##### III.6.1.1. Microstructure

Les microstructures des 25 échantillons laminés et recuit sont représentées sur la *figure 59*.



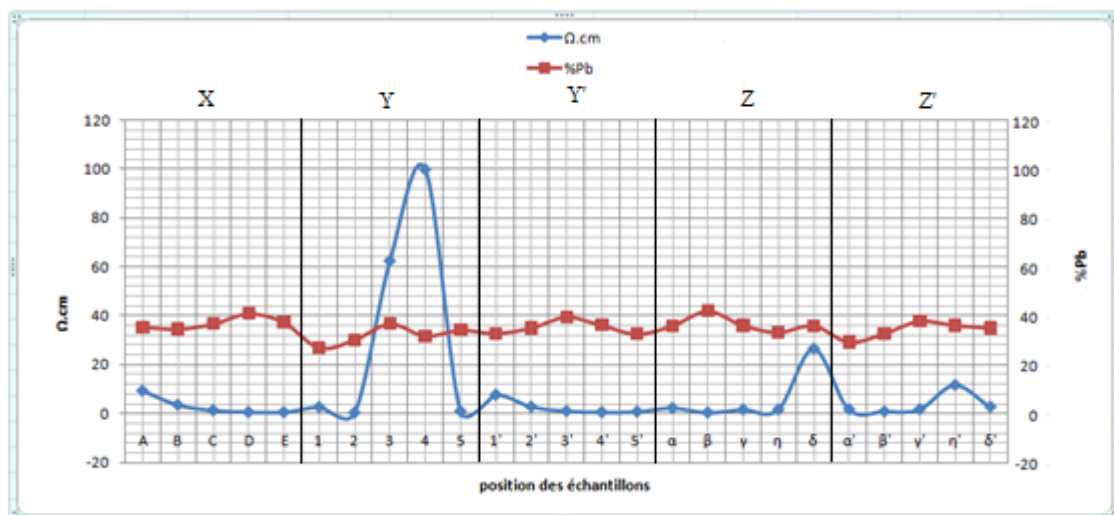
**Figure 59.** Les microstructures de tout le lingot de Pb-Sn à l'état laminé et recuit.

Les microstructures obtenues montrent que le processus de coalescence s'est déclenché et on a tendance à avoir une seule microstructure homogène pour tous les échantillons. En effet, les atomes de Pb de l'eutectique commencent à se coalescer pour former des globules qu'on peut les distinguer de la matrice. L'analyse d'image réalisée par le logiciel "imagej" met en évidence la coalescence des grains de Pb, tout en constatant que les atomes de Pb (en noir) occupent une surface de 39% du lingot plat en moyenne, alors qu'elle était de l'ordre de 33% dans le lingot à l'état laminé.

### III.6.1.2. Résistivité électrique

La *figure 60* représente les valeurs des mesures de la résistivité électrique  $\rho$  sur toute la surface du lingot traité. La majorité des valeurs sont constantes de l'ordre de  $1 \Omega \cdot \text{cm}$ , ce qui correspond à une conductivité électrique  $\sigma$  de l'ordre de  $1 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  en moyenne.

Après avoir appliqué ce traitement thermique d'homogénéisation avec refroidissement long dans le four afin d'atteindre des états proches de l'équilibre thermodynamique en minimisant tous les hétérogénéités de l'état basaltique, on remarque que du point de vue fraction eutectique, on a une augmentation du pourcentage du Pb jusqu'à atteindre les seuils des 40%, due entre autres, à la diffusion des atomes de Pb et à la relaxation (contraintes résiduelles, dislocations) du matériau accompagné d'une résistivité généralement basse engendrée par une élimination des ségrégations apparues au cours du processus de solidification (fonderie) et grossissement des grains par adoucissement (recristallisation statique).



**Figure 60.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la fraction de l'eutectique aux différents endroits du lingot du Pb-Sn à l'état laminé et recuit.

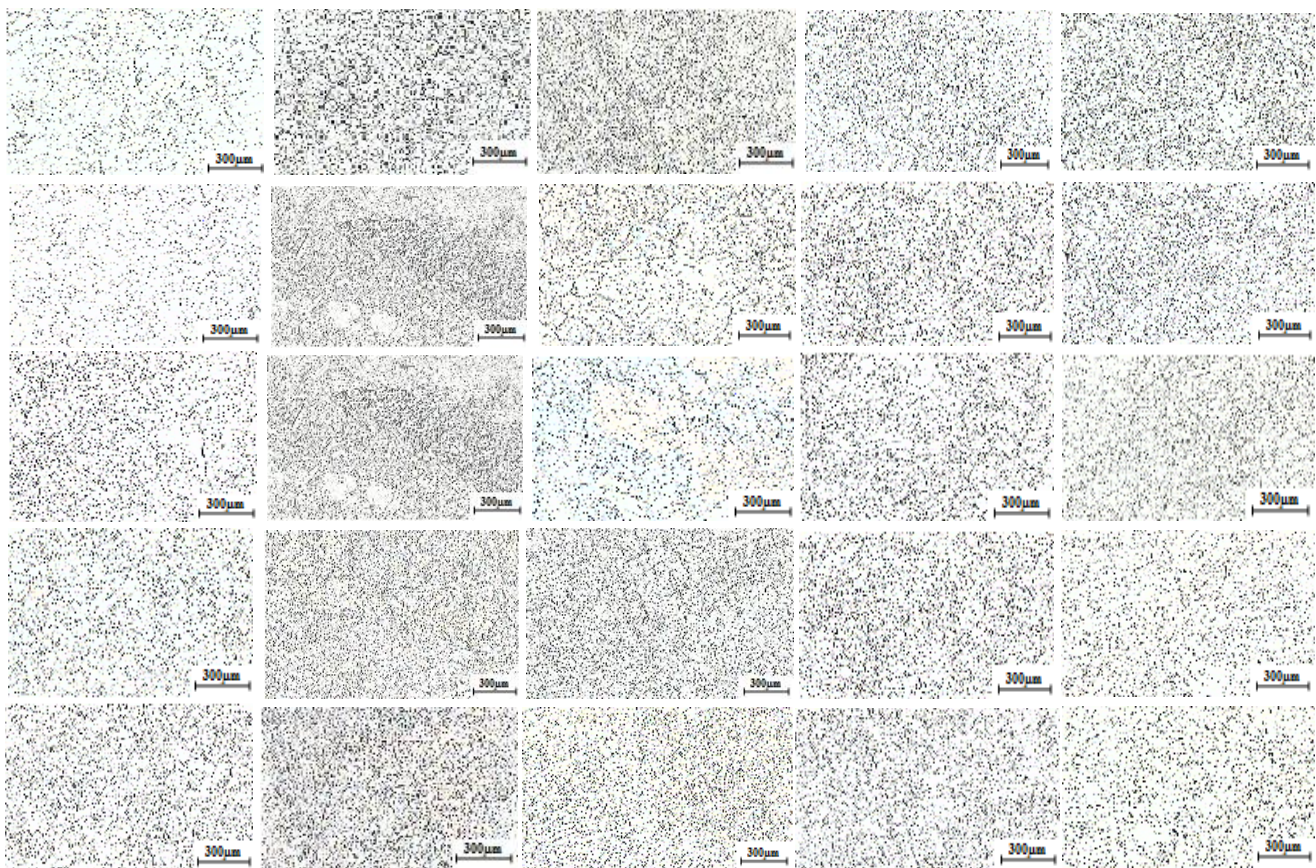


### III.6.2. Etat laminé puis recuit de l'eutectique de l'alliage Zn-Sn

Comme dans le cas de l'eutectique de l'alliage Pb-Sn, nous avons recuit les échantillons laminés à 450K pendant 2 heures. Nous commencerons à interpréter les microstructures obtenues puis les valeurs des mesures de la résistivité électrique à l'état laminé et recuit.

#### III.6.2.1. Microstructure

Les microstructures des 25 échantillons laminés sont représentées sur la *figure 61*.



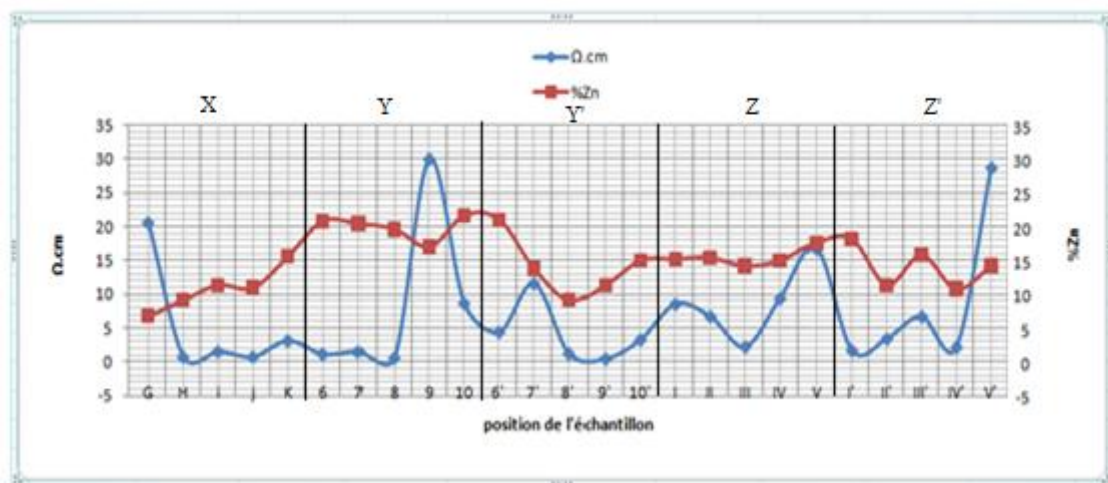
**Figure 61.** Les microstructures de tout le lingot d'Sn-Zn à l'état laminé puis recuit.

Les microstructures obtenues montrent que le processus de polygonalisation s'est déclenché avec des taux relativement accentués au niveau des colonnes centrales accompagnés d'une homogénéisation au niveau des colonnes périphériques. En effet, les atomes de Zn de l'eutectique proche des joints de grains commencent à diffuser pour se condenser au niveau de ces joints plus stables que les grains eux-mêmes.

L'analyse d'image réalisée par le logiciel "imagej" met en évidence la coalescence timide des grains de Zn. En effet, elle montre que les atomes de Zn (en noir) occupent une surface sensiblement la même que dans l'état laminé, moyennant un taux de 15 %.

### III.6.2.2. Résistivité électrique

La *figure 62* représente les valeurs des mesures de la résistivité électrique  $\rho$  sur toute la surface du lingot à l'état de recuit. Après avoir appliqué un traitement thermique d'homogénéisation avec refroidissement long dans le four afin d'atteindre des états proches de l'équilibre thermodynamique en minimisant tous les hétérogénéités de l'état de coulée, on remarque que du point de vue fraction eutectique, on a une fluctuation entre les valeurs de 6%<sub>Zn</sub> et plus ou moins supérieure à 20%<sub>Zn</sub>, due d'une part, à la relaxation du matériau tout en maintenant les valeurs de la résistivité, relativement basses, et d'autre part, à la polygonalisation du Zn (*Figure 63, 64 et 65*) avec des taux relativement différents engendrant l'appauvrissement des grains en diffusant en profondeur dans les joints de grains dus à leur stabilité, donnant lieu à la mise en évidence, de la résistivité électrique intrinsèque du Sn comme pour l'échantillon G, et aussi une hausse de la résistivité due à la réorganisation des dislocations non évacuées.

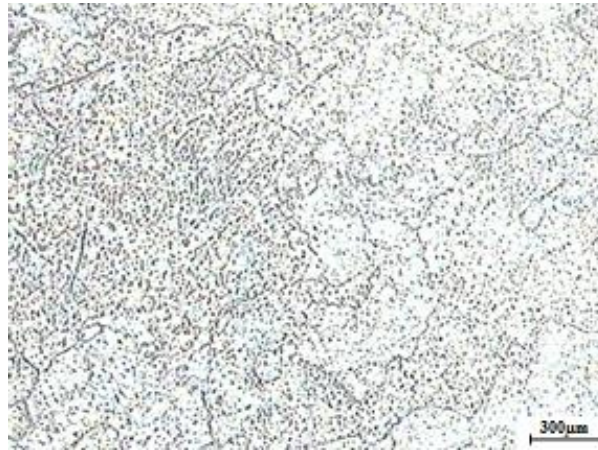


**Figure 62.** Représentation simultanée des valeurs de la résistivité électrique et de la fraction de l'eutectique aux différents endroits du lingot d'Sn-Zn à l'état laminé et recuit.



**Figure 63.** Micrographie reflétant un début de la polygonalisation du Zn caractérisant les échantillons K et III'.





**Figure 64.** Micrographie reflétant un état assez avancé de la polygonalisation du Zn caractérisant les échantillons 9 et V'.



**Figure 65.** Micrographie reflétant un état avancé de la polygonalisation du Zn caractérisant les échantillons 7', V et G.

Toutefois, on constate que les valeurs de la résistivité électrique stagnent en les comparant à ceux de l'état laminé, reflétant un taux de déformation appliqué pas assez conséquent pour induire des défauts ponctuels ou linéaires relativement grands à cause de la structure espacée de l'eutectique de l'alliage Zn-Sn.

La recherche de nouvelles sources d'énergies non polluantes est devenue un enjeu majeur pour l'écologie du système, c'est pourquoi la production d'électricité à partir de chaleur perdue aux moyens de modules thermoélectriques, apparaît à ce jour, comme un élément déclencheur dans une voie très prometteuse. L'inconvénient principal qui réside et qui constitue par ailleurs une barrière à une utilisation potentielle pour l'industrialisation, c'est de le cantonner toujours au stade de la recherche, mais qui néanmoins, n'est pas infranchissable.

Au cours de notre étude, nous avons élaboré les deux alliages, et ensuite par une étude comparative des apports respectifs des trois cas, lors de la mesure de la résistivité électrique, à savoir échantillons brut, laminé, recuit, en vue d'atteindre des performances électriques optimales et fiables, particulièrement dans le domaine de la micro-électronique.

Malheureusement, nos mesures n'ont pas abouti au point culminant, celui des valeurs du facteur de mérite, intrinsèque aux deux, dû soit à l'absence du matériel expérimental performant et adéquat ou à son état défectueux, qui nous a induit à ne pas comparer le rendement de nos deux semi-conducteurs, par rapport à ceux des modules thermoélectriques, utilisés actuellement.

En étant dans ce cas de figure, on a décidé de compenser ce déficit par une approche purement théorique, en se basant sur les références bibliographiques, qui a consisté à prendre en considération les valeurs des coefficients de SEEBECK des trois éléments usuels utilisés dans l'élaboration de nos échantillons, suivie du calcul de la résistivité thermique correspondante, en incluant tous les traitements et en tenant compte des valeurs obtenues en résistivité électrique, cela en passant par la loi empirique de Wiedemann et Franz, qui s'est traduite par des résultats non cohérents ; s'expliquant par l'application de cette dernière, uniquement pour des matériaux métalliques.

Cela nous a malheureusement amené à nous contenter uniquement des résultats obtenus qui se sont restreints à ceux exprimés dans notre présent document.

La mesure préliminaire de la résistivité électrique montre une cohérence avec la littérature, c'est-à-dire que l'hétérogénéité due aux conditions d'élaboration donnant lieu à l'état basaltique induit à des résistivités aléatoires sur toute la surface de nos deux plaquettes.

En conséquence des différents essais, analyses et observations, il y a lieu de retenir :

#### ***Pb-Sn :***

Comparée à l'état brut, la résistivité  $\rho$  augmente remarquablement après laminage. En revanche, cette dernière diminue considérablement après l'adoucissement qui permet une réduction remarquable de la densité des dislocations et des tensions résiduelles, ainsi que de jouer sur la taille des grains.

**Sn-Zn :**

Contrairement au Pb-Sn, et toujours comparée à l'état basaltique, la résistivité électrique  $\rho$  diminue après déformation à froid, et rehaussée légèrement après recuit, donc l'orientation des grains prime sur cet échantillon pour éviter le phénomène de polygonalisation.

Ainsi, les premiers résultats de cette étude, confirment les potentialités thermoélectriques des alliages binaires Pb-Sn ; Sn-Zn, et révèlent que ses performances et sa fiabilité peuvent être améliorées davantage, en combinant étude approfondie et bonnes conditions expérimentales.

Parmi les perspectives envisageables, il faut retenir :

- La réalisation des mesures du coefficient de Seebeck, de la conductivité thermique, qui enduiront le calcul du facteur de mérite adimensionnel indispensable pour la validation de l'applicabilité de ces matériaux dans le domaine de la thermoélectricité.
- Augmenter le temps de recuits et étudier les mécanismes d'adoucissement qui s'y produisent surtout concernant l'alliage Pb-Sn.
- Etude plus poussée pour mieux mettre en évidence le comportement de l'alliage Sn-Zn par rapport à la déformation à froid avec des taux de déformation variables.
- Etudier le comportement électrique du semi-conducteur Pb-Sn en fonction de la température, en sachant que ce dernier est intrinsèque.
- Elaboration des deux alliages par la monocristallisation afin de mieux se rapprocher des conditions d'équilibre thermodynamique et comparer les éventuels facteurs de mérite des deux techniques d'élaboration.



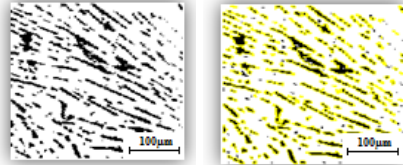
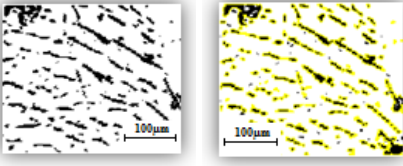
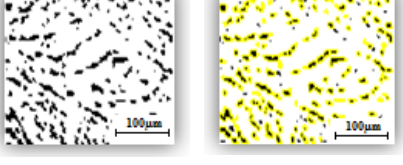
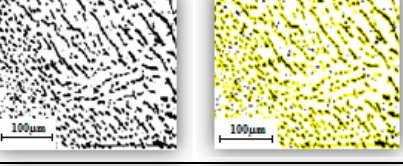
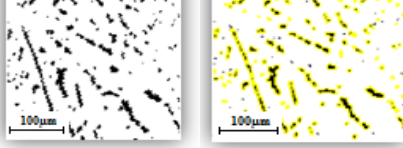
L'évolution de tous les résultats obtenus suivant le taux de l'eutectique à travers la caractérisation et les mesures faites sur les deux alliages semi-conducteur Pb-Sn et Sn-Zn à 300K tout au long du lingot obtenu par la fonderie. Ces résultats sont présentés sous forme de tableau englobant tous les échantillons, classés par ordre de traitements subis (brut, laminé et traité), tout en figurant la fraction de l'eutectique, la micrographie, la dureté, la résistivité et conductivité électrique.

## 1. Echantillons bruts de coulée

### 1.1. Distribution de l'eutectique

Les résultats de la micrographie et de la fraction de l'eutectique obtenus après élaboration et suivant le sens de coulée par l'utilisation du logiciel « Imagej », sont illustrés dans les *tableaux (VI-XV)* ; des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

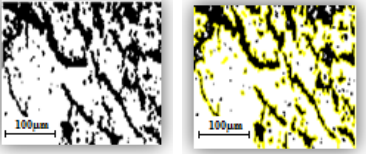
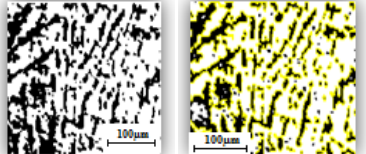
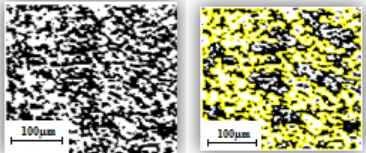
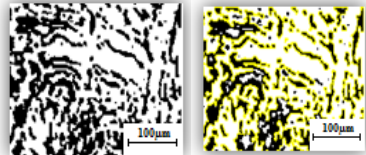
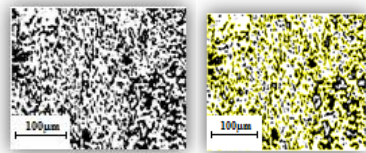
**Tableau VI.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne X de l'alliage Sn-Zn.

| Colonne X    |   |                                   |                               |
|--------------|---|-----------------------------------|-------------------------------|
| Échantillons | Micrographie  | Le % du Zn des différentes plages | % moyen en Zn de l'eutectique |
| G            |  | 19.00%                            | 21.57%                        |
|              |   | 23.26%                            |                               |
|              |   | 23.23%                            |                               |
|              |   | 19.46%                            |                               |
|              |   | 22.91%                            |                               |
| H            |  | 16.10%                            | 18.00%                        |
|              |   | 26.37%                            |                               |
|              |   | 14.97%                            |                               |
|              |   | 19.18%                            |                               |
|              |   | 13.37%                            |                               |
| i            |  | 14.20%                            | 17.68%                        |
|              |   | 15.57%                            |                               |
|              |   | 19.97%                            |                               |
|              |   | 18.37%                            |                               |
|              |   | 20.30%                            |                               |
| J            |  | 22.50%                            | 25.46%                        |
|              |   | 23.05%                            |                               |
|              |   | 28.30%                            |                               |
|              |   | 26.90%                            |                               |
|              |   | 26.56%                            |                               |
| K            |  | 9.60%                             | 13.05%                        |
|              |   | 13.02%                            |                               |
|              |   | 12.76%                            |                               |
|              |   | 17.10%                            |                               |
|              |   | 12.75%                            |                               |

La distribution obtenue est relativement aléatoire suivant le sens de coulée tout en remarquant un pic de la fraction au niveau de l'avant dernier palier J.

Sachant que cette distribution fait office d'un positionnement à la colonne X adjacente à la source de coulée et en sachant que le refroidissement se fait des parties externes de la plaquette aux parties internes de celle-ci, les micrographies reflètent un eutectique pas trop dense et des lamelles fines et régulières.

**Tableau VII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne Y de l'alliage Sn-Zn.

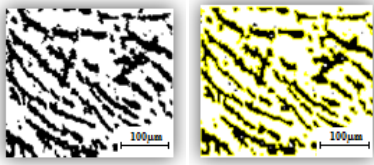
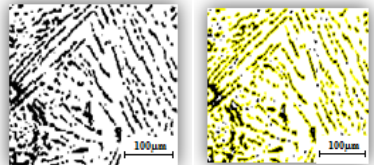
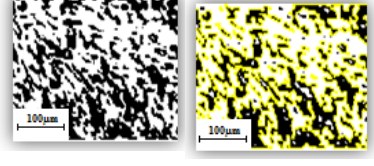
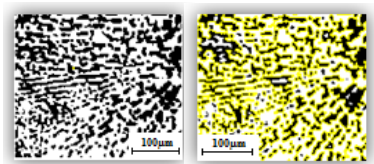
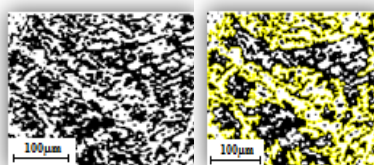
| <i>Colonne Y</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| 6                   |    | 31.60%                                   | 40.43%                               |
|                     |   | 43.92%                                   |                                      |
|                     |   | 44.23%                                   |                                      |
|                     |   | 38.74%                                   |                                      |
|                     |   | 43.66%                                   |                                      |
| 7                   |   | 36.20%                                   | 38.82%                               |
|                     |   | 42.53%                                   |                                      |
|                     |   | 40.58%                                   |                                      |
|                     |   | 37.82%                                   |                                      |
|                     |   | 36.96%                                   |                                      |
| 8                   |  | 55.60%                                   | 45.47%                               |
|                     |   | 58.13%                                   |                                      |
|                     |   | 51.80%                                   |                                      |
|                     |   | 34.61%                                   |                                      |
|                     |   | 27.22%                                   |                                      |
| 9                   |  | 40.80%                                   | 49.65%                               |
|                     |   | 46.95%                                   |                                      |
|                     |   | 49.17%                                   |                                      |
|                     |   | 56.86%                                   |                                      |
|                     |   | 54.45%                                   |                                      |
| 10                  |  | 37.30%                                   | 49.62%                               |
|                     |   | 57.87%                                   |                                      |
|                     |   | 54.27%                                   |                                      |
|                     |   | 39.02%                                   |                                      |
|                     |   | 59.65%                                   |                                      |

La distribution obtenue est relativement aléatoire tout en remarquant une augmentation de la fraction, suivant le sens de coulée avec une légère baisse de celle-ci au niveau du palier 7.

Sachant que cette distribution fait office d'un positionnement à la colonne Y, celle-ci fait figure de colonne intermédiaire proche de la source de coulée.

En tenant compte du sens du refroidissement, les micrographies reflètent un eutectique relativement dense avec des lamelles grossières et irrégulières.

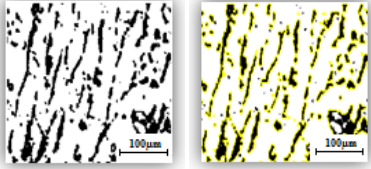
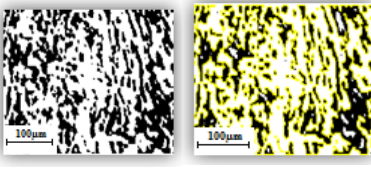
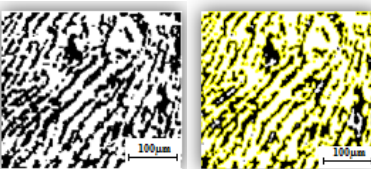
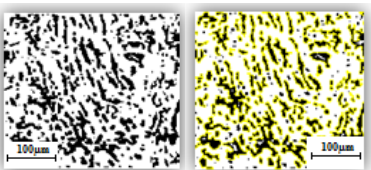
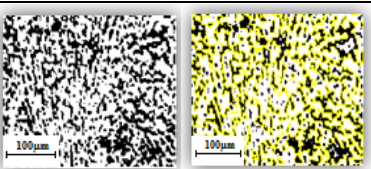
**Tableau VIII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne Y' de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Y'</i>   |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| 6'                  |    | 34.70%                                   | 43.42%                               |
|                     |   | 41.71%                                   |                                      |
|                     |   | 49.78%                                   |                                      |
|                     |   | 47.97%                                   |                                      |
|                     |   | 42.94%                                   |                                      |
| 7'                  |    | 23.00%                                   | 26.50%                               |
|                     |   | 30.30%                                   |                                      |
|                     |   | 24.22%                                   |                                      |
|                     |   | 22.67%                                   |                                      |
|                     |   | 32.29%                                   |                                      |
| 8'                  |   | 46.80%                                   | 44.39%                               |
|                     |   | 49.17%                                   |                                      |
|                     |   | 32.12%                                   |                                      |
|                     |   | 44.79%                                   |                                      |
|                     |   | 49.07%                                   |                                      |
| 9'                  |  | 43.30%                                   | 48.50%                               |
|                     |   | 52.10%                                   |                                      |
|                     |   | 50.90%                                   |                                      |
|                     |   | 46.22%                                   |                                      |
|                     |   | 50.00%                                   |                                      |
| 10'                 |  | 61.70%                                   | 48.42%                               |
|                     |   | 37.01%                                   |                                      |
|                     |   | 48.51%                                   |                                      |
|                     |   | 48.45%                                   |                                      |
|                     |   | 46.44%                                   |                                      |

La distribution obtenue est relativement aléatoire tout en remarquant une augmentation de la fraction, suivant le sens de coulée, avec une légère baisse au niveau du palier 7'.

Sachant que cette distribution fait office d'un positionnement à la colonne Y'. Celle-ci fait figure de colonne centrale. En tenant compte du sens de refroidissement, les micrographies reflètent un eutectique relativement dense avec des lamelles grossières et irrégulières, accompagnées d'un appauvrissement au niveau des paliers les plus hauts.

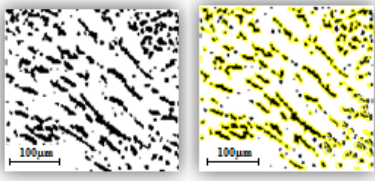
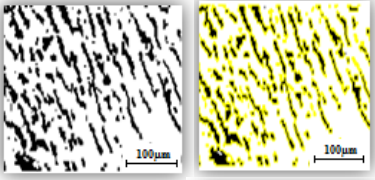
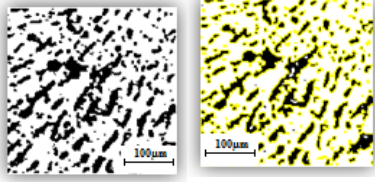
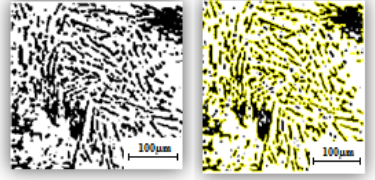
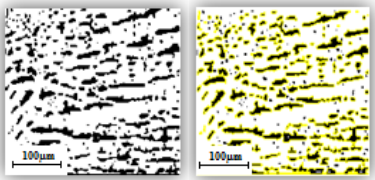
**Tableau IX.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne Z de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Z</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| <b>I</b>            |    | 22.60%                                   | 30.75%                               |
|                     |   | 30.52%                                   |                                      |
|                     |   | 29.75%                                   |                                      |
|                     |   | 33.61%                                   |                                      |
|                     |   | 37.25%                                   |                                      |
| <b>II</b>           |    | 44.10%                                   | 46.05%                               |
|                     |   | 49.81%                                   |                                      |
|                     |   | 40.81%                                   |                                      |
|                     |   | 53.34%                                   |                                      |
|                     |   | 42.18%                                   |                                      |
| <b>III</b>          |   | 42.90%                                   | 41.02%                               |
|                     |   | 38.45%                                   |                                      |
|                     |   | 39.25%                                   |                                      |
|                     |   | 48.13%                                   |                                      |
|                     |   | 36.35%                                   |                                      |
| <b>IV</b>           |  | 30.70%                                   | 34.97%                               |
|                     |   | 41.73%                                   |                                      |
|                     |   | 40.72%                                   |                                      |
|                     |   | 32.32%                                   |                                      |
|                     |   | 29.47%                                   |                                      |
| <b>V</b>            |  | 36.10%                                   | 39.34%                               |
|                     |   | 36.75%                                   |                                      |
|                     |   | 39.23%                                   |                                      |
|                     |   | 46.95%                                   |                                      |
|                     |   | 37.66%                                   |                                      |

La distribution obtenue est relativement aléatoire suivant le sens de coulée marqué par un maximum au niveau du palier II.

Sachant que cette distribution fait office d'un positionnement à la colonne Z. Celle-ci fait figure de colonne intermédiaire et loin de la source de coulée. En tenant compte du sens de refroidissement, les micrographies reflètent un eutectique relativement dense avec des lamelles grossières et irrégulières avec un appauvrissement du premier palier I.

**Tableau X.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne Z' de l'alliage Sn-Zn.

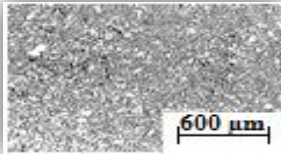
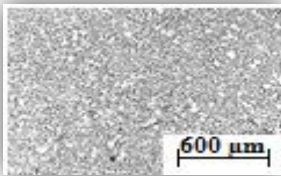
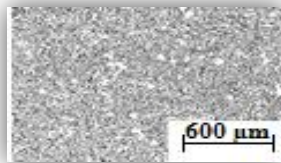
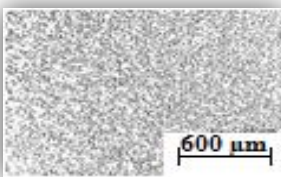
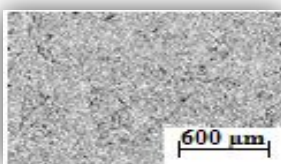
| <i>Colonne Z'</i>   |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| I'                  |    | 20.50%                                   | 31.19%                               |
|                     |   | 38.60%                                   |                                      |
|                     |   | 36.63%                                   |                                      |
|                     |   | 30.00%                                   |                                      |
|                     |   | 30.20%                                   |                                      |
| II'                 |    | 25.60%                                   | 31.81%                               |
|                     |   | 43.11%                                   |                                      |
|                     |   | 31.13%                                   |                                      |
|                     |   | 30.39%                                   |                                      |
| III'                |   | 28.82%                                   | 42.69%                               |
|                     |   | 30.50%                                   |                                      |
|                     |   | 39.17%                                   |                                      |
|                     |   | 48.41%                                   |                                      |
| IV'                 |  | 44.49%                                   | 41.98%                               |
|                     |   | 50.86%                                   |                                      |
|                     |   | 33.30%                                   |                                      |
|                     |   | 44.73%                                   |                                      |
|                     |   | 45.81%                                   |                                      |
| V'                  |  | 43.19%                                   | 33.58%                               |
|                     |   | 42.87%                                   |                                      |
|                     |   | 23.80%                                   |                                      |
|                     |   | 38.22%                                   |                                      |
|                     |   | 34.99%                                   |                                      |

La distribution obtenue est relativement aléatoire suivant le sens de coulée marqué par un maximum au niveau du palier III'.

Sachant que cette distribution fait office d'un positionnement à la colonne Z'. Celle-ci fait figure de dernière colonne à l'opposé de la source de coulée. En tenant compte du sens de refroidissement, les micrographies reflètent un eutectique relativement dense au niveau des paliers (III' et IV') avec un appauvrissement en se dirigeant vers le haut, marqué par des lamelles relativement fines et régulière.



**Tableau XI.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne X de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne X</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| A                   |    | 36.822                                   | 35,253 %                             |
|                     |   | 36.167                                   |                                      |
|                     |   | 33.941                                   |                                      |
|                     |   | 35.398                                   |                                      |
|                     |   | 33.941                                   |                                      |
| B                   |    | 40.477                                   | 41,968 %                             |
|                     |   | 42.558                                   |                                      |
|                     |   | 44.256                                   |                                      |
|                     |   | 41.901                                   |                                      |
|                     |   | 40.651                                   |                                      |
| C                   |   | 38.548                                   | 35,715 %                             |
|                     |   | 36.983                                   |                                      |
|                     |   | 36.424                                   |                                      |
|                     |   | 35.908                                   |                                      |
|                     |   | 35.716                                   |                                      |
| D                   |  | 42.898                                   | 41,518 %                             |
|                     |   | 41.999                                   |                                      |
|                     |   | 41.900                                   |                                      |
|                     |   | 40.425                                   |                                      |
|                     |   | 40.372                                   |                                      |
| E                   |  | 40.348                                   | 38,135 %                             |
|                     |   | 39.212                                   |                                      |
|                     |   | 37.670                                   |                                      |
|                     |   | 37.049                                   |                                      |
|                     |   | 36.396                                   |                                      |

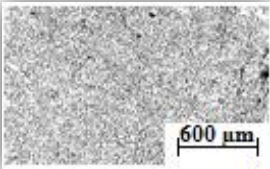
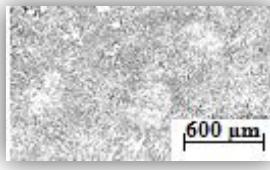
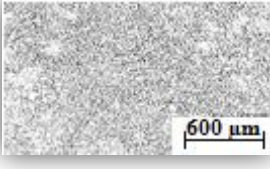
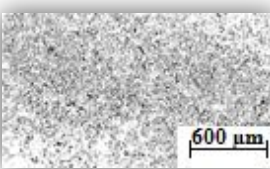
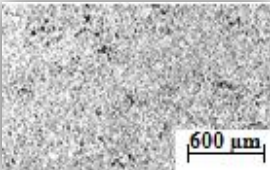
La distribution obtenue est relativement aléatoire suivant le sens de coulée marqué par une alternance, croissance décroissance tout au long de la colonne.

Sachant que cette distribution fait office d'un positionnement à la colonne X.

De la colonne extérieure à la position de la source de coulée qui est centrale, en tenant compte du sens de refroidissement, les micrographies reflètent un eutectique relativement dense au niveau des paliers (B, D), ainsi qu'un minimum au niveau des paliers (A, C).



**Tableau XII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne Y de l'alliage Pb-Sn.

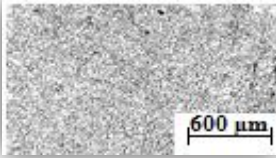
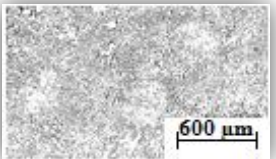
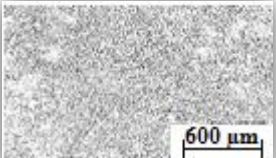
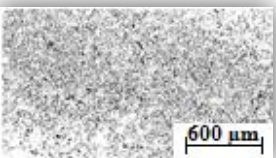
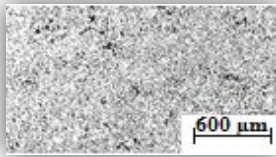
| <i>Colonne Y</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| 1                   |    | 39.768                                   | 38,033 %                             |
|                     |   | 38.952                                   |                                      |
|                     |   | 37.894                                   |                                      |
|                     |   | 37.342                                   |                                      |
|                     |   | 36.209                                   |                                      |
| 2                   |    | 35.652                                   | 33,527 %                             |
|                     |   | 34.384                                   |                                      |
|                     |   | 33.529                                   |                                      |
|                     |   | 32.575                                   |                                      |
|                     |   | 31.496                                   |                                      |
| 3                   |   | 37.601                                   | 36,365 %                             |
|                     |   | 37.128                                   |                                      |
|                     |   | 36.951                                   |                                      |
|                     |   | 35.629                                   |                                      |
|                     |   | 34.520                                   |                                      |
| 4                   |  | 34.361                                   | 30,934 %                             |
|                     |   | 32.462                                   |                                      |
|                     |   | 31.735                                   |                                      |
|                     |   | 28.771                                   |                                      |
|                     |   | 27.345                                   |                                      |
| 5                   |  | 37.063                                   | 34,992 %                             |
|                     |   | 35.366                                   |                                      |
|                     |   | 34.929                                   |                                      |
|                     |   | 33.350                                   |                                      |
|                     |   | 34.254                                   |                                      |

La distribution obtenue est relativement aléatoire suivant le sens de coulée marqué par une alternance, croissance décroissance tout au long de la colonne.

Sachant que cette distribution fait office d'un positionnement à la colonne Y.

De la colonne adjacente à la position de la source de coulée qui est centrale, en tenant compte du sens de refroidissement, les micrographies reflètent un eutectique relativement dense, marqué par un maximum au niveau du palier 1 et un minimum au niveau du palier 4.

**Tableau XIII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne Y' de l'alliage Pb-Sn.

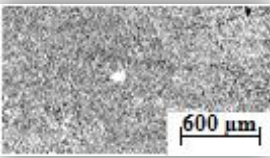
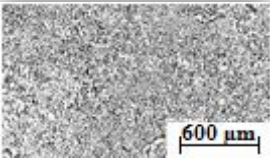
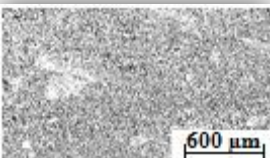

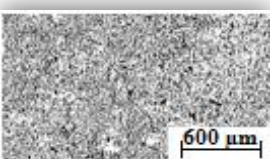
| <i>Colonne Y'</i>   |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| 1'                  |    | 36.780                                   | 32,257 %                             |
|                     |   | 35.477                                   |                                      |
|                     |   | 30.589                                   |                                      |
|                     |   | 29.926                                   |                                      |
|                     |   | 28.513                                   |                                      |
| 2'                  |    | 37.912                                   | 35,356 %                             |
|                     |   | 36.784                                   |                                      |
|                     |   | 34.095                                   |                                      |
|                     |   | 34.484                                   |                                      |
|                     |   | 33.505                                   |                                      |
| 3'                  |   | 42.028                                   | 34,386 %                             |
|                     |   | 41.795                                   |                                      |
|                     |   | 40.624                                   |                                      |
|                     |   | 39.550                                   |                                      |
|                     |   | 40.624                                   |                                      |
| 4'                  |  | 39.915                                   | 34,965 %                             |
|                     |   | 37.349                                   |                                      |
|                     |   | 34.865                                   |                                      |
|                     |   | 32.634                                   |                                      |
|                     |   | 30.066                                   |                                      |
| 5'                  |  | 34.837                                   | 32,444 %                             |
|                     |   | 32.866                                   |                                      |
|                     |   | 32.666                                   |                                      |
|                     |   | 31.339                                   |                                      |
|                     |   | 30.513                                   |                                      |

On remarque que l'hétérogénéité de la distribution est moins marquée, et que celle-ci tend plus à se stabiliser autour de 35%.

Sachant que cette distribution fait office d'un positionnement à la colonne Y'.

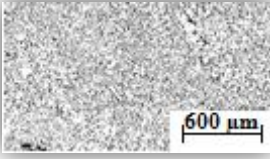
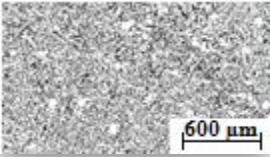
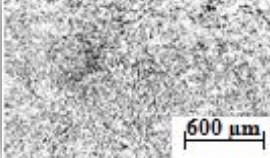
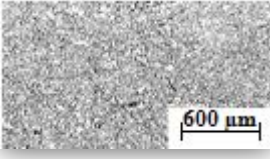
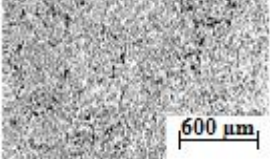
De la colonne centrale, en tenant compte du sens de refroidissement les micrographies reflètent un maximum au niveau du palier 2' et un minimum au niveau de (1,5).

**Tableau XIV.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne Z de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Z</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| $\alpha$            |    | 38.431                                   | 34,993 %                             |
|                     |   | 37.928                                   |                                      |
|                     |   | 34.584                                   |                                      |
|                     |   | 32.737                                   |                                      |
|                     |   | 31.288                                   |                                      |
| $\beta$             |    | 42.615                                   | 41,659 %                             |
|                     |   | 42.203                                   |                                      |
|                     |   | 42.615                                   |                                      |
|                     |   | 41.381                                   |                                      |
|                     |   | 39.482                                   |                                      |
| $\gamma$            |   | 39.996                                   | 36,894 %                             |
|                     |   | 37.222                                   |                                      |
|                     |   | 36.506                                   |                                      |
|                     |   | 35.880                                   |                                      |
|                     |   | 34.866                                   |                                      |
| $\eta$              |  | 32.649                                   | 32,742 %                             |
|                     |   | 33.578                                   |                                      |
|                     |   | 32.769                                   |                                      |
|                     |   | 30.905                                   |                                      |
|                     |   | 33.811                                   |                                      |
| $\delta$            |  | 37.201                                   | 35,945 %                             |
|                     |   | 36.630                                   |                                      |
|                     |   | 35.251                                   |                                      |
|                     |   | 39.293                                   |                                      |
|                     |   | 31.353                                   |                                      |

La distribution obtenue est relativement aléatoire. Sachant que celle-ci fait office d'un positionnement à la colonne Z. En tenant compte du sens de refroidissement, les micrographies reflètent un eutectique relativement dense marqué par un pic au niveau de  $\beta$  et un minimum au niveau de  $\eta$ .

**Tableau XV.** Micrographie des lamelles de l'eutectique et fraction des échantillons bruts de la colonne Z' de l'alliage Pb-Sn.

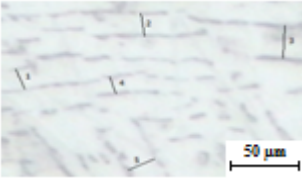
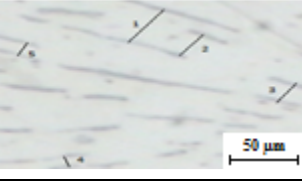

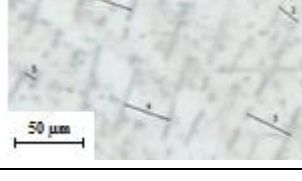

| <i>Colonne Z'</i>   |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| $\alpha'$           |    | 30.476                                   | 29,144 %                             |
|                     |   | 32.918                                   |                                      |
|                     |   | 29.532                                   |                                      |
|                     |   | 27.661                                   |                                      |
|                     |   | 25.134                                   |                                      |
| $\beta'$            |    | 33.663                                   | 31,856 %                             |
|                     |   | 32.810                                   |                                      |
|                     |   | 31.473                                   |                                      |
|                     |   | 31.000                                   |                                      |
|                     |   | 30.337                                   |                                      |
| $\gamma'$           |   | 33.859                                   | 31,601 %                             |
|                     |   | 32.439                                   |                                      |
|                     |   | 30.207                                   |                                      |
|                     |   | 31.579                                   |                                      |
|                     |   | 29.922                                   |                                      |
| $\eta'$             |  | 37.920                                   | 35,734 %                             |
|                     |   | 36.445                                   |                                      |
|                     |   | 37.894                                   |                                      |
|                     |   | 34.336                                   |                                      |
|                     |   | 32.076                                   |                                      |
| $\delta'$           |  | 34.118                                   | 32,187 %                             |
|                     |   | 33.530                                   |                                      |
|                     |   | 32.394                                   |                                      |
|                     |   | 31.893                                   |                                      |
|                     |   | 29.004                                   |                                      |

La distribution obtenue est relativement aléatoire, sachant que celle-ci fait office d'un positionnement à la colonne Z' (*figure 21*). En tenant compte du sens de refroidissement, les micrographies reflètent un eutectique relativement dense marqué par une augmentation tout au long de la colonne, reflétée par un pic au niveau  $\eta'$  et d'un minimum au niveau de  $\alpha'$ .

## 1.2. Distance interlamellaire

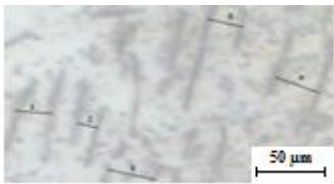

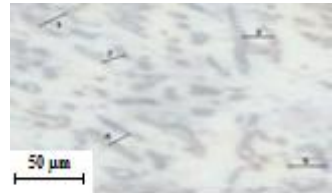
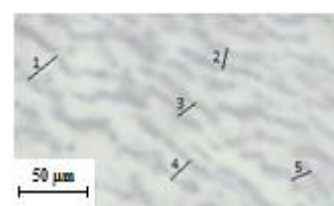

Les résultats de la micrographie et de la distribution de la distance interlamellaire obtenus après élaboration et suivant le sens de coulée à l'aide du logiciel « Imagej », sont illustrés dans les *tableaux* (XVI-XXV). Des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

**Tableau XVI.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne X de la plaquette de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne X</i>    |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| G                   |    | 20.0                                   | 31.6  |
|                     |   | 30.0                                   |   |
|                     |   | 44.0                                   |   |
|                     |   | 23.0                                   |   |
|                     |   | 33.0                                   |   |
| H                   |   | 52.0                                   | 30.2  |
|                     |   | 34.0                                   |   |
|                     |   | 32.0                                   |   |
|                     |   | 14.0                                   |   |
|                     |   | 19.0                                   |   |
| I                   |  | 20.0                                   | 19.2  |
|                     |   | 21.0                                   |   |
|                     |   | 21.0                                   |   |
|                     |   | 16.0                                   |   |
|                     |   | 18.0                                   |   |
| J                   |  | 54.0                                   | 40.2  |
|                     |   | 26.0                                   |   |
|                     |   | 52.0                                   |   |
|                     |   | 54.0                                   |   |
|                     |   | 15.0                                   |   |
| K                   |  | 39.0                                   | 33.8  |
|                     |   | 43.0                                   |   |
|                     |   | 44.0                                   |   |
|                     |   | 24.0                                   |   |
|                     |   | 19.0                                   |   |

A première vue, on remarque déjà que du point de vue forme, les lamelles sont plutôt uniformes et régulières, de tailles relativement différentes et de volume constant ; avec une distance interlamellaire décroissante suivant le sens de coulée, avec un maximum atteint au palier j.


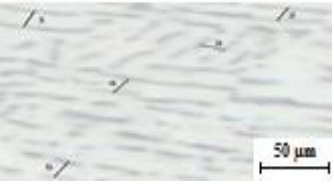
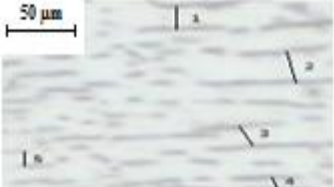
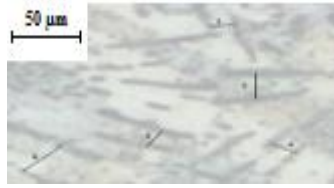

**Tableau XVII.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne Y de la plaquette de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Y</i>    |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| 6                   |    | 37.0                                   | 39.2  |
|                     |   | 23.0                                   |   |
|                     |   | 37.0                                   |   |
|                     |   | 49.0                                   |   |
|                     |   | 50.0                                   |   |
| 7                   |    | 30.0                                   | 30.0  |
|                     |   | 19.0                                   |   |
|                     |   | 23.0                                   |   |
|                     |   | 46.0                                   |   |
|                     |   | 32.0                                   |   |
| 8                   |  | 29.0                                   | 27.0  |
|                     |   | 22.0                                   |   |
|                     |   | 28.0                                   |   |
|                     |   | 22.0                                   |   |
|                     |   | 34.0                                   |   |
| 9                   |  | 25.0                                   | 16.8  |
|                     |   | 14.0                                   |   |
|                     |   | 15.0                                   |   |
|                     |   | 15.0                                   |   |
|                     |   | 15.0                                   |   |
| 10                  |  | 27.0                                   | 25.6  |
|                     |   | 26.0                                   |   |
|                     |   | 29.0                                   |   |
|                     |   | 25.0                                   |   |
|                     |   | 21.0                                   |   |

A première vue, on remarque déjà que du point de vue forme des lamelles, c'est transitoire. Des lamelles rectilignes et uniformes aux lamelles de formes aléatoires et irrégulières avec des tailles différentes et un volume relativement constant accompagné par une distance interlamellaire décroissante suivant le sens de coulée, avec un maximum atteint au palier le plus bas 10.

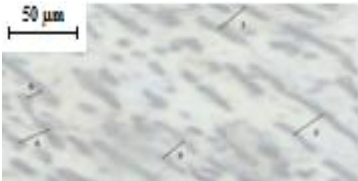






**Tableau XVIII.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne Y' de la plaquette de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Y'</i>   |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| 6'                  |    | 25.0                                   | 24.0  |
|                     |   | 28.0                                   |   |
|                     |   | 21.0                                   |   |
|                     |   | 22.0                                   |   |
|                     |   | 24.0                                   |   |
| 7'                  |   | 25.0                                   | 22.6  |
|                     |   | 21.0                                   |   |
|                     |   | 20.0                                   |   |
|                     |   | 23.0                                   |   |
|                     |   | 24.0                                   |   |
| 8'                  |  | 23.0                                   | 20.8  |
|                     |   | 32.0                                   |   |
|                     |   | 20.0                                   |   |
|                     |   | 14.0                                   |   |
|                     |   | 15.0                                   |   |
| 9'                  |  | 24.0                                   | 37.4  |
|                     |   | 46.0                                   |   |
|                     |   | 31.0                                   |   |
|                     |   | 27.0                                   |   |
|                     |   | 59.0                                   |   |
| 10'                 |  | 13.0                                   | 10.6  |
|                     |   | 10.0                                   |   |
|                     |   | 12.0                                   |   |
|                     |   | 09.0                                   |   |
|                     |   | 09.0                                   |   |






A première vue, on remarque déjà que du point de vue forme des lamelles, c'est plutôt rectiligne, de taille et de volume différents, accompagnée par une distance interlamellaire décroissante suivant le sens de coulée, avec un maximum atteint au palier 9'.

**Tableau XIX.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne Z de la plaquette de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Z</i>    |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| <b>I</b>            |    | 40.0                                   | 33.4  |
|                     |   | 43.0                                   |   |
|                     |   | 30.0                                   |   |
|                     |   | 36.0                                   |   |
|                     |   | 18.0                                   |   |
| <b>II</b>           |    | 20.0                                   | 16.4  |
|                     |   | 19.0                                   |   |
|                     |   | 14.0                                   |   |
|                     |   | 15.0                                   |   |
|                     |   | 14.0                                   |   |
| <b>III</b>          |  | 32.0                                   | 30.2  |
|                     |   | 19.0                                   |   |
|                     |   | 28.0                                   |   |
|                     |   | 33.0                                   |   |
|                     |   | 39.0                                   |   |
| <b>IV</b>           |  | 27.0                                   | 24.0  |
|                     |   | 33.0                                   |   |
|                     |   | 24.0                                   |   |
|                     |   | 20.0                                   |   |
|                     |   | 16.0                                   |   |
| <b>V</b>            |  | 11.0                                   | 14.4  |
|                     |   | 19.0                                   |   |
|                     |   | 16.0                                   |   |
|                     |   | 13.0                                   |   |
|                     |   | 13.0                                   |   |

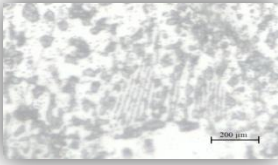
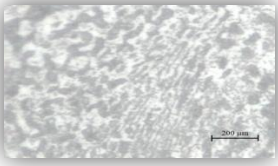
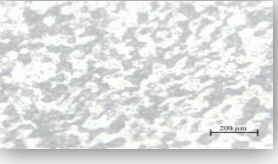


A première vue, on remarque déjà que du point de vue forme des lamelles, c'est plutôt uniforme, caractérisée par des lamelles rectilignes avec des tailles et des volumes différents, accompagnées par une distance interlamellaire décroissante suivant le sens de coulée, avec un maximum atteint au palier le plus haut I.

**Tableau XX.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne Z' de la plaquette de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Z'</i>   |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| I'                  |    | 18.0                                   | 19.4  |
|                     |   | 27.0                                   |   |
|                     |   | 20.0                                   |   |
|                     |   | 17.0                                   |   |
|                     |   | 15.0                                   |   |
| II'                 |    | 16.0                                   | 18.4  |
|                     |   | 15.0                                   |   |
|                     |   | 26.0                                   |   |
|                     |   | 20.0                                   |   |
|                     |   | 15.0                                   |   |
| III'                |  | 23.0                                   | 22.0  |
|                     |   | 26.0                                   |   |
|                     |   | 21.0                                   |   |
|                     |   | 17.0                                   |   |
|                     |   | 23.0                                   |   |
| IV'                 |  | 36.0                                   | 32.8  |
|                     |   | 35.0                                   |   |
|                     |   | 23.0                                   |   |
|                     |   | 31.0                                   |   |
|                     |   | 39.0                                   |   |
| V'                  |  | 39.0                                   | 40.6  |
|                     |   | 46.0                                   |   |
|                     |   | 13.0                                   |   |
|                     |   | 21.0                                   |   |
|                     |   | 84.0                                   |   |

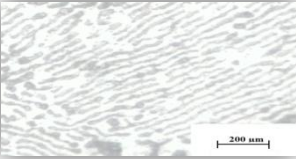
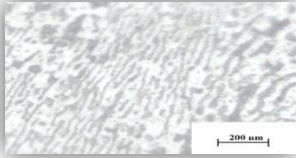
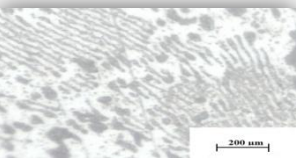
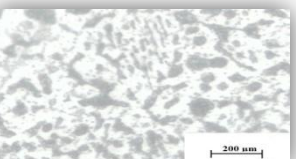
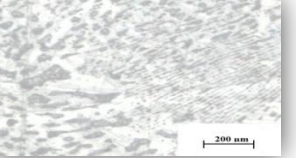
A première vue, on remarque déjà que du point de vue forme des lamelles, c'est plutôt uniforme, caractérisée par des lamelles rectilignes avec des taille différentes et un volume relativement constant, accompagnées par une distance interlamellaire croissante suivant le sens de coulée, avec un maximum atteint au palier le plus bas V'.

**Tableau XXI.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne X de la plaquette de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne X</i>    |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| <b>A</b>            |    | 16.209                                 | 24,642  |
|                     |   | 20.968                                 |   |
|                     |   | 22.638                                 |   |
|                     |   | 30.567                                 |   |
|                     |   | 32.828                                 |   |
| <b>B</b>            |    | 14.426                                 | 20,581  |
|                     |   | 18.574                                 |   |
|                     |   | 20.967                                 |   |
|                     |   | 21.639                                 |   |
|                     |   | 27.301                                 |   |
| <b>C</b>            |  | 15.301                                 | 26,154  |
|                     |   | 19.276                                 |   |
|                     |   | 23.483                                 |   |
|                     |   | 30.131                                 |   |
|                     |   | 42.580                                 |   |
| <b>D</b>            |  | 12.597                                 | 34,964  |
|                     |   | 21.214                                 |   |
|                     |   | 39.834                                 |   |
|                     |   | 48.520                                 |   |
|                     |   | 52.659                                 |   |
| <b>E</b>            |  | 20.236                                 | 25,749  |
|                     |   | 22.225                                 |   |
|                     |   | 25.796                                 |   |
|                     |   | 25.295                                 |   |
|                     |   | 35.195                                 |   |

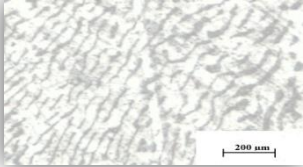
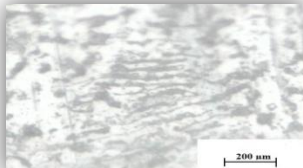

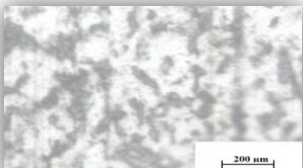
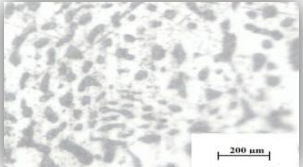
A première vue, on remarque que du point de vue forme, plus on se rapproche du centre, plus les lamelles sont grossières et les distances entre elles sont grandes, avec un pic au niveau du palier D et un minimum au niveau de B.

**Tableau XXII.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne Y de la plaquette de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Y</i>    |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| <b>1</b>            |    | 17.889                                 | 24,983  |
|                     |   | 20.861                                 |   |
|                     |   | 26.046                                 |   |
|                     |   | 28.615                                 |   |
|                     |   | 31.506                                 |   |
| <b>2</b>            |    | 8.130                                  | 17,022  |
|                     |   | 13.988                                 |   |
|                     |   | 17.588                                 |   |
|                     |   | 20.374                                 |   |
|                     |   | 24.172                                 |   |
| <b>3</b>            |  | 9.330                                  | 20,765  |
|                     |   | 16.473                                 |   |
|                     |   | 20.861                                 |   |
|                     |   | 26.388                                 |   |
|                     |   | 30.777                                 |   |
| <b>4</b>            |  | 8.158                                  | 16,241  |
|                     |   | 11.224                                 |   |
|                     |   | 14.634                                 |   |
|                     |   | 18.578                                 |   |
|                     |   | 28.615                                 |   |
| <b>5</b>            |  | 6.650                                  | 9,426   |
|                     |   | 8.224                                  |   |
|                     |   | 8.065                                  |   |
|                     |   | 11.290                                 |   |
|                     |   | 12.903                                 |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon, on remarque une distribution aléatoire des distances interlamellaires, ainsi que point de vue forme, plus on se rapproche du milieu, plus les lamelles sont fines, et plus on descend vers le sens de coulée, plus les lamelles sont proches entre elles, avec un pic au niveau du palier 1; et un minimum au niveau de 5.

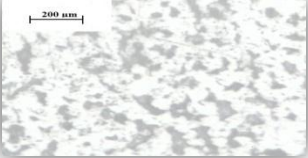
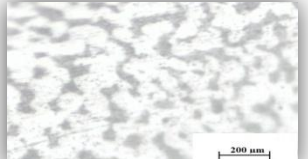

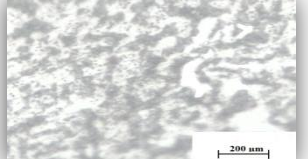
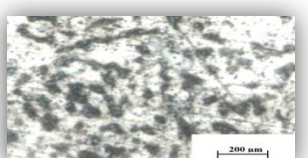
**Tableau XXIII.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne Y' de la plaquette de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Y'</i>   |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| <b>1'</b>           |    | 24.619                                 | 34,060  |
|                     |   | 29.739                                 |   |
|                     |   | 32.658                                 |   |
|                     |   | 38.472                                 |   |
|                     |   | 44.813                                 |   |
| <b>2'</b>           |    | 17.884                                 | 22,737  |
|                     |   | 19.510                                 |   |
|                     |   | 21.198                                 |   |
|                     |   | 26.013                                 |   |
|                     |   | 29.083                                 |   |
| <b>3'</b>           |  | 13.763                                 | 24,308  |
|                     |   | 19.530                                 |   |
|                     |   | 22.285                                 |   |
|                     |   | 30.188                                 |   |
|                     |   | 35.776                                 |   |
| <b>4'</b>           |  | 17.815                                 | 32,358  |
|                     |   | 26.034                                 |   |
|                     |   | 29.739                                 |   |
|                     |   | 36.566                                 |   |
|                     |   | 51.636                                 |   |
| <b>5'</b>           |  | 35.090                                 | 39,645  |
|                     |   | 36.096                                 |   |
|                     |   | 38.532                                 |   |
|                     |   | 43.228                                 |   |
|                     |   | 45.282                                 |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon, on remarque une distribution aléatoire des distances interlamellaires, ainsi, plus on se rapproche du centre du lingot, plus les lamelles sont fines et plus les distances entre elles sont moindres, avec un pic au niveau du palier 5'; et un minimum au niveau de 2'.

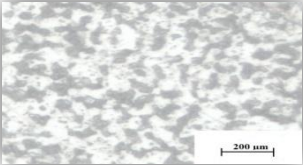
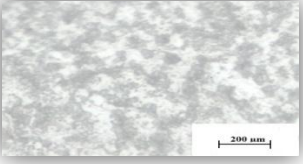
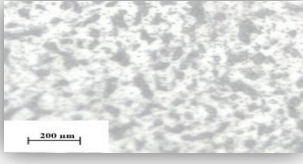
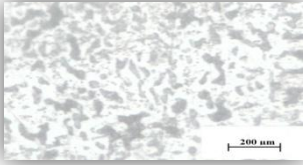



**Tableau XXIV.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne Z de la plaquette de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Z</i>    |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| <b>α</b>            |    | 18.243                                 | 29,598  |
|                     |   | 25.298                                 |   |
|                     |   | 27.388                                 |   |
|                     |   | 36.556                                 |   |
|                     |   | 40.509                                 |   |
| <b>β</b>            |    | 32.649                                 | 43,377  |
|                     |   | 35.363                                 |   |
|                     |   | 43.025                                 |   |
|                     |   | 47.423                                 |   |
|                     |   | 58.427                                 |   |
| <b>γ</b>            |  | 22.399                                 | 31,832  |
|                     |   | 24.370                                 |   |
|                     |   | 27.988                                 |   |
|                     |   | 37.351                                 |   |
|                     |   | 47.056                                 |   |
| <b>η</b>            |  | 15.999                                 | 35,388  |
|                     |   | 26.045                                 |   |
|                     |   | 37.317                                 |   |
|                     |   | 43.228                                 |   |
|                     |   | 54.351                                 |   |
| <b>δ</b>            |  | 22.115                                 | 33,480  |
|                     |   | 28.393                                 |   |
|                     |   | 34.023                                 |   |
|                     |   | 39.091                                 |   |
|                     |   | 43.780                                 |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon, on remarque une distribution aléatoire des distances interlamellaires, ainsi plus on s'approche du milieu de la colonne, plus les lamelles sont grossières et éloignées les unes des autres, avec un pic au niveau du palier β; et un minimum au niveau de α.

**Tableau XXV.** Micrographie et distance interlamellaire des échantillons bruts de la colonne Z' de la plaquette de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Z'</i>   |   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Distances interlamellaires (μm)</i> | <i>Distance moyenne inter lamellaire (μm)</i> |
| $\alpha'$           |    | 21.693                                 | 31,878  |
|                     |   | 25.495                                 |   |
|                     |   | 31.570                                 |   |
|                     |   | 35.802                                 |   |
|                     |   | 44.830                                 |   |
| $\beta'$            |    | 35.235                                 | 43,199  |
|                     |   | 41.599                                 |   |
|                     |   | 42.088                                 |   |
|                     |   | 44.252                                 |   |
|                     |   | 52.823                                 |   |
| $\gamma'$           |  | 21.688                                 | 29,892  |
|                     |   | 25.181                                 |   |
|                     |   | 28.352                                 |   |
|                     |   | 31.999                                 |   |
|                     |   | 42.241                                 |   |
| $\eta'$             |  | 23.811                                 | 36,094  |
|                     |   | 29.073                                 |   |
|                     |   | 37.614                                 |   |
|                     |   | 40.317                                 |   |
|                     |   | 52.232                                 |   |
| $\delta'$           |  | 6.786                                  | 11,688  |
|                     |   | 9.327                                  |   |
|                     |   | 12.493                                 |   |
|                     |   | 14.747                                 |   |
|                     |   | 15.090                                 |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon, on remarque une distribution aléatoire des distances interlamellaires avec un pic au niveau du palier  $\beta'$ ; et un minimum au niveau de  $\delta'$ .

### 1.3. Microdureté

Les résultats de la microdureté des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement, obtenus après élaboration et suivant le sens de coulée sont reportés dans les *tableaux* (XXVI-XXVII).

**Tableau XXVI.** Microdureté des échantillons bruts de toute la plaquette de l'alliage Sn-Zn.

| Colonne X    |                               |       |       |       |       |              |
|--------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Échantillons | Microdureté HV <sub>100</sub> |       |       |       |       | La moyenne   |
| <b>G</b>     | 18.18                         | 28.26 | 20.55 | 7.89  | 22.05 | <b>19.39</b> |
| <b>H</b>     | 17.55                         | 18.54 | 15.19 | 18.92 | 18.54 | <b>17.75</b> |
| <b>i</b>     | 21.91                         | 20.12 | 22.59 | 24.17 | 22.44 | <b>22.25</b> |
| <b>j</b>     | 24.39                         | 17.51 | 23.10 | 17.96 | 19.79 | <b>20.55</b> |
| <b>K</b>     | 24.39                         | 21.77 | 65.28 | 71.86 | 20.85 | <b>40.83</b> |
| Colonne Y    |                               |       |       |       |       |              |
| Échantillons | Microdureté HV <sub>100</sub> |       |       |       |       | La moyenne   |
| <b>6</b>     | 22.49                         | 22.39 | 17.82 | 18.54 | 17.89 | <b>19.83</b> |
| <b>7</b>     | 26.79                         | 16.63 | 23.52 | 20.72 | 18.54 | <b>21.24</b> |
| <b>8</b>     | 28.97                         | 22.74 | 28.26 | 25.49 | 33.32 | <b>27.76</b> |
| <b>9</b>     | 27.31                         | 27.58 | 23.20 | 22.94 | 26.53 | <b>25.51</b> |
| <b>10</b>    | 29.12                         | 25.07 | 25.31 | 24.17 | 22.69 | <b>25.27</b> |
| Colonne Y'   |                               |       |       |       |       |              |
| Échantillons | Microdureté HV <sub>100</sub> |       |       |       |       | La moyenne   |
| <b>6'</b>    | 35.38                         | 41.42 | 38.75 | 48.55 | 40.10 | <b>40.84</b> |
| <b>7'</b>    | 43.22                         | 38.50 | 33.32 | 40.82 | 34.23 | <b>38.09</b> |
| <b>8'</b>    | 23.62                         | 25.19 | 24.28 | 26.79 | 26.72 | <b>25.32</b> |
| <b>9'</b>    | 31.85                         | 25.31 | 28.26 | 22.79 | 31.85 | <b>28.01</b> |
| <b>10'</b>   | 65.03                         | 49.35 | 51.51 | 37.95 | 40.96 | <b>48.96</b> |
| Colonne Z    |                               |       |       |       |       |              |
| Échantillons | Microdureté HV <sub>100</sub> |       |       |       |       | La moyenne   |
| <b>I</b>     | 21.63                         | 24.96 | 18.71 | 20.55 | 21.75 | <b>21.55</b> |
| <b>II</b>    | 17.96                         | 19.31 | 23.10 | 26.28 | 21.81 | <b>21.69</b> |
| <b>III</b>   | 26.53                         | 22.00 | 20.72 | 28.60 | 18.54 | <b>23.28</b> |
| <b>IV</b>    | 20.72                         | 28.97 | 19.47 | 25.31 | 19.31 | <b>22.76</b> |
| <b>V</b>     | 23.15                         | 27.25 | 37.31 | 24.61 | 24.73 | <b>27.41</b> |
| Colonne Z'   |                               |       |       |       |       |              |
| Échantillons | Microdureté HV <sub>100</sub> |       |       |       |       | La moyenne   |
| <b>I'</b>    | 25.49                         | 22.30 | 24.90 | 22.74 | 21.49 | <b>23.39</b> |
| <b>II'</b>   | 24.90                         | 28.97 | 18.18 | 27.99 | 24.06 | <b>24.82</b> |
| <b>III'</b>  | 26.98                         | 28.06 | 31.94 | 34.33 | 21.21 | <b>25.50</b> |
| <b>IV'</b>   | 25.37                         | 27.25 | 26.60 | 27.25 | 27.85 | <b>26.86</b> |
| <b>V'</b>    | 26.98                         | 28.06 | 31.94 | 34.33 | 21.21 | <b>28.50</b> |

Du point de vue répartition de la microdureté au niveau de toute la plaquette, on remarque qu'on parlant de la colonne adjacente X à la source de coulée, c'est plutôt une distribution aléatoire. Pour ce qui concerne les colonnes intermédiaires Y et Z et celles à l'opposé de la source de coulée Z', on tend vers une distribution croissante suivant le sens de coulée. Concernant la colonne centrale Y', elle est caractérisée par une décroissance de la microdureté marquée par un maximum au palier le plus bas 10'.

**Tableau XXVII.** Microdureté des échantillons bruts de toute la plaquette de l'alliage Pb-Zn.

| <b>Colonne X</b>    |                                    |       |       |        |       |                   |
|---------------------|------------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Microdureté HV<sub>50</sub></i> |       |       |        |       | <i>La moyenne</i> |
| <b>A</b>            | 18,29                              | 11,65 | 14,89 | 19,47  | 20,59 | <b>16,978</b>     |
| <b>B</b>            | 19,53                              | 16,18 | 17,21 | 13,69  | 18,60 | <b>17,420</b>     |
| <b>C</b>            | 11,15                              | 12,54 | 14,24 | 12,74  | 10,30 | <b>12,194</b>     |
| <b>D</b>            | 13,66                              | 13,36 | 12,89 | 11,52  | 12,03 | <b>12,692</b>     |
| <b>E</b>            | 15,28                              | 11,32 | 15,93 | 11,87  | 13,76 | <b>13,632</b>     |
| <b>Colonne Y</b>    |                                    |       |       |        |       |                   |
| <i>Échantillons</i> | <i>Microdureté HV<sub>50</sub></i> |       |       |        |       | <i>La moyenne</i> |
| <b>1</b>            | 15,64                              | 18,60 | 12,99 | 13,62  | 13,72 | <b>14,914</b>     |
| <b>2</b>            | 17,84                              | 14,82 | 15,93 | 17,94  | 20,97 | <b>17,500</b>     |
| <b>3</b>            | 14,20                              | 15,64 | 13,02 | 17,74  | 34,96 | <b>19,112</b>     |
| <b>4</b>            | 18,50                              | 20,11 | 22,22 | 17,64  | 33,90 | <b>22,474</b>     |
| <b>5</b>            | 17,12                              | 12,83 | 20,65 | 11,40  | 13,62 | <b>15,124</b>     |
| <b>Colonne Y'</b>   |                                    |       |       |        |       |                   |
| <i>Échantillons</i> | <i>Microdureté HV<sub>50</sub></i> |       |       |        |       | <i>La moyenne</i> |
| <b>1'</b>           | 13,08                              | 28,34 | 13,46 | 16,62  | 12,48 | <b>16,796</b>     |
| <b>2'</b>           | 12,14                              | 14,56 | 12,83 | 14,42  | 22,08 | <b>15,206</b>     |
| <b>3'</b>           | 20,41                              | 13,82 | 12,86 | 13,59  | 12,59 | <b>14,654</b>     |
| <b>4'</b>           | 12,54                              | 12,68 | 11,03 | 11,42  | 10,84 | <b>11,702</b>     |
| <b>5'</b>           | 13,86                              | 12,86 | 12,25 | 13,52  | 13,59 | <b>13,216</b>     |
| <b>Colonne Z</b>    |                                    |       |       |        |       |                   |
| <i>Échantillons</i> | <i>Microdureté HV<sub>50</sub></i> |       |       |        |       | <i>La moyenne</i> |
| <b>α</b>            | 13,52                              | 18,81 | 14,86 | 14,49  | 13,99 | <b>15,134</b>     |
| <b>β</b>            | 12,99                              | 12,77 | 12,22 | 13,27  | 13,17 | <b>12,884</b>     |
| <b>γ</b>            | 16,09                              | 16,71 | 17,64 | 17,45  | 16,05 | <b>16,788</b>     |
| <b>η</b>            | 15,76                              | 15,40 | 16,27 | 12,83  | 11,30 | <b>14,312</b>     |
| <b>σ</b>            | 13,66                              | 11,87 | 12,99 | 1-0,65 | 11,78 | <b>12,190</b>     |
| <b>Colonne Z'</b>   |                                    |       |       |        |       |                   |
| <i>Échantillons</i> | <i>Microdureté HV<sub>50</sub></i> |       |       |        |       | <i>La moyenne</i> |
| <b>α'</b>           | 11,76                              | 13,79 | 13,82 | 13,79  | 12,28 | <b>13,088</b>     |
| <b>β'</b>           | 11,73                              | 14,45 | 13,76 | 12,99  | 16,89 | <b>13,964</b>     |
| <b>γ'</b>           | 17,35                              | 18,98 | 14,63 | 13,05  | 18,29 | <b>16,460</b>     |
| <b>η'</b>           | 27,66                              | 18,29 | 10,84 | 22,64  | 15,40 | <b>18,966</b>     |
| <b>σ'</b>           | 11,73                              | 18,29 | 10,19 | 14,71  | 12,57 | <b>13,498</b>     |

D'un point de vue général, la répartition de la microdureté au niveau de toute la plaquette, la pratique vient conforter la théorie pour ce qui concerne l'hétérogénéité à

l'état brut. On remarque, que plus on se rapproche du centre de la plaquette, plus la dureté augmente, ainsi que le fond de la plaquette regroupe les plus basses duretés qui fait référence à la densité du Plomb plus lourd que l'Etain.

#### 1.4. Résistivité électrique

Les résultats de résistivité électrique obtenus après élaboration et suivant le sens de coulée sont illustrés dans les *tableaux (XXVIII-XXXVII)*. Des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

**Tableau XXVIII.** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne X de l'alliage Sn-Zn.

| Colonne X            |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{mov}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| G                    | $10^{-5}$                     | 0.0018               | 0.1750                          | 112.5000   | 45.6300  | 46.9812   | 0.0213  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0037               |                                 | 115.6250   | 46.8975  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0056               |                                 | 116.6666   | 47.3199  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0074               |                                 | 115.6250   | 46.8975  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0095               |                                 | 118.7500   | 48.1650  |   |   |
| H                    | $10^{-5}$                     | 0.0009               | 0.1100                          | 56.5200  | 14.3504  | 13.0748   | 0.0764  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0016               |                                 | 50.2400  | 12.7559  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0024               |                                 | 50.2400  | 12.7559  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0032               |                                 | 50.2400  | 12.7559  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0040               |                                 | 50.2400  | 12.7559  |   |   |
| i                    | $10^{-4}$                     | 0.0010               | 0.1500                          | 6.2800   | 2.1741   | 1.6378  | 0.6106  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0.0014               |                                 | 4.3960   | 1.5219   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0.0020               |                                 | 4.1866   | 1.4494   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0.0028               |                                 | 4.3960   | 1.5218   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0035               |                                 | 4.3960   | 1.5218   |   |   |
| j                    | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0041               | 0.1200                          | 0.5150   | 0.1426   | 0.1430  | 6.9920  |
|                      | $6 \cdot 10^{-3}$             | 0.0049               |                                 | 0.5129   | 0.1420   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-3}$             | 0.0058               |                                 | 0.5203   | 0.1440   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-3}$             | 0.0066               |                                 | 0.5181   | 0.1435   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-3}$             | 0.0074               |                                 | 0.5164   | 0.1430   |   |   |
| K                    | $10^{-5}$                     | 0.0016               | 0.2250                          | 100.4800   | 52.1692  | 50.0824   | 0.0199  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0031               |                                 | 97.3400  | 50.5389  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0045               |                                 | 94.2000  | 48.9086  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0062               |                                 | 97.3400  | 50.5389  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0074               |                                 | 92.9440  | 48.2565  |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une décroissance soutenue et

conséquente suivant le sens de coulée, avec un pic au niveau du dernier palier K ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon j.

**Tableau XXIX.** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne Y de l'alliage Sn-Zn.

| Colonne Y            |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| 6                    | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0019               | 0.185                           | 23.8640  | 10.1875  | 10.3239   | 0.0969  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0023               |                                 | 24.0733  | 10.2769  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0027               |                                 | 24.2229  | 10.3408  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0031               |                                 | 24.3350  | 10.3886  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0035               |                                 | 24.4222  | 10.4258  |   |   |
| 7                    | $10^{-4}$                     | 0.0005               | 0.1650                          | 3.1400   | 1.1957   | 1.2364  | 0.8088  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0.0010               |                                 | 3.1400   | 1.1957   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0.0015               |                                 | 3.1400   | 1.1957   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0.0021               |                                 | 3.2970   | 1.2555   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0028               |                                 | 3.5168   | 1.3392   |   |   |
| 8                    | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0024               | 0.1850                          | 3.0000   | 1.2867   | 1.3978  | 0.7154  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0.0031               |                                 | 3.2292   | 1.3850   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0.0037               |                                 | 3.3036   | 1.4169   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0.0043               |                                 | 3.3594   | 1.4408   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0.0049               |                                 | 3.4028   | 1.4595   |   |   |
| 9                    | $10^{-5}$                     | 0.0011               | 0.1300                          | 69.0800  | 2.6941   | 67.8449   | 0.0147  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0022               |                                 | 69.0800  | 2.6941   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0032               |                                 | 66.9866  | 2.6125   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0043               |                                 | 67.5100  | 2.6329   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0053               |                                 | 66.5680  | 2.5962   |   |   |
| 10                   | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0018               | 0.1850                          | 22.6080  | 9.6514   | 21.9511   | 0.0455  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0039               |                                 | 40.8200  | 17.4261  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0061               |                                 | 54.7257  | 23.3624  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0081               |                                 | 63.5850  | 27.1444  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0108               |                                 | 75.3600  | 32.1712  |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une décroissance soutenue suivant le sens de coulée, avec un pic au niveau du palier 9 ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 7.



**Tableau XXX. R** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne Y' de l'alliage Sn-Zn.

| Colonne Y'           |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| 6'                   | $5.10^{-4}$                   | 0.0088               | 0.1700                          | 11.0000   | 4.3362  | 4.6069  | 0.2170   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0.0113               |                                 | 11.7708   | 4.6400  |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0.0131               |                                 | 11.6964   | 4.6107  |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0.0153               |                                 | 11.9531   | 4.7119  |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0.0173               |                                 | 12.0139   | 4.7359  |   |  |
| 7'                   | $10^{-3}$                     | 0.0016               | 0.1950                          | 1.0048  | 0.4522  | 0.4477  | 2.2334   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0.0032               |                                 | 1.0048  | 0.4522  |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0.0047               |                                 | 0.9838  | 0.4427  |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0.0063               |                                 | 0.9891  | 0.4451  |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0.0079               |                                 | 0.9922  | 0.4465  |   |  |
| 8'                   | $10^{-5}$                     | 0.0013               | 0.2100                          | 81.6400   | 39.5627   | 40.7395   | 0.0245   |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0.0027               |                                 | 84.7800   | 41.0844   |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0.0040               |                                 | 83.7333   | 40.5772   |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0.0054               |                                 | 84.7800   | 41.0844   |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0.0068               |                                 | 85.4080   | 41.3887   |   |  |
| 9'                   | $5.10^{-3}$                   | 0.0046               | 0.2150                          | 0.5776  | 0.2710  | 0.2755  | 3.6303   |
|                      | $6.10^{-3}$                   | 0.0055               |                                 | 0.5756  | 0.2856  |   |  |
|                      | $7.10^{-3}$                   | 0.0064               |                                 | 0.5741  | 0.2849  |   |  |
|                      | $8.10^{-3}$                   | 0.0070               |                                 | 0.5495  | 0.2727  |   |  |
|                      | $9.10^{-3}$                   | 0.0076               |                                 | 0.5303  | 0.2631  |   |  |
| 10'                  | $10^{-5}$                     | 0.0014               | 0.2100                          | 87.9200   | 42.6060   | 40.496  | 0.0247   |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0.0026               |                                 | 81.6400   | 39.5627   |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0.0040               |                                 | 83.7333   | 40.5772   |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0.0052               |                                 | 81.6400   | 39.5627   |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0.0066               |                                 | 82.8960   | 40.1714   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une distribution aléatoire avec deux pics assez soutenus au niveau des deux paliers 8' et 10' ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 7'.

**Tableau XXXI.** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne Z de l'alliage Sn-Zn.

| Colonne Z            |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| I                    | $10^{-4}$                     | 0.0016               | 0.1700                          | 10.0480  | 3.9418   | 3.9640  | 0.2523  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0.0032               |                                 | 10.0480  | 3.9418   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0.0048               |                                 | 10.0480  | 3.9418   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0.0065               |                                 | 10.2050  | 4.0034   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0081               |                                 | 10.1736  | 3.9911   |   |   |
| II                   | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0041               | 0.1550                          | 0.5150   | 0.1842   | 0.3123  | 3.2020  |
|                      | $6 \cdot 10^{-3}$             | 0.0050               |                                 | 0.5233   | 0.1871   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-3}$             | 0.0058               |                                 | 0.5203   | 0.8718   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-3}$             | 0.0066               |                                 | 0.5181   | 0.1853   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-3}$             | 0.0074               |                                 | 0.5163   | 0.1331   |   |   |
| III                  | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0028               | 0.1500                          | 35.1680  | 12.1752  | 12.6990   | 0.0787  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0034               |                                 | 35.5866  | 13.3200  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0040               |                                 | 35.8857  | 12.4236  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0047               |                                 | 36.8950  | 12.7730  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0053               |                                 | 36.9822  | 12.8032  |   |   |
| IV                   | $10^{-5}$                     | 0.0021               | 0.1900                          | 131.8800   | 57.8293  | 60.1609   | 0.0166  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0043               |                                 | 135.0200   | 59.2063  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0067               |                                 | 140.2533   | 61.5011  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0084               |                                 | 131.8800   | 57.8294  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0117               |                                 | 146.9520   | 64.4385  |   |   |
| V                    | $10^{-3}$                     | 0.0011               | 0.1400                          | 0.6908   | 0.2231   | 0.2263  | 4.4185  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0.0022               |                                 | 0.6908   | 0.2231   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0.0034               |                                 | 0.7117   | 0.2299   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0.0045               |                                 | 0.7065   | 0.2282   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0056               |                                 | 0.7036   | 0.2273   |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une distribution aléatoire avec un pic au niveau du palier IV ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon V.

**Tableau XXXII.** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne Z' de l'alliage Sn-Zn.

| Colonne Z'           |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| I'                   | $10^{-3}$                     | 0.0008               | 0.2350                          | 0.5024   | 0.2724   | 0.2724  | 3.6711  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0.0016               |                                 | 0.5024   | 0.2724   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0.0024               |                                 | 0.5024   | 0.2724   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0.0032               |                                 | 0.5024   | 0.2724   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0040               |                                 | 0.5024   | 0.2724   |   |   |
| II'                  | $10^{-3}$                     | 0.0012               | 0.2450                          | 0.7536   | 0.4261   | 0.4304  | 2.3232  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0.0025               |                                 | 0.7850   | 0.4438   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0.0035               |                                 | 0.7326   | 0.4142   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0.0049               |                                 | 0.7693   | 0.4349   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0061               |                                 | 0.7662   | 0.4332   |   |   |
| III'                 | $10^{-5}$                     | 0.0012               | 0.2100                          | 75.3600  | 36.5195  | 35.8905   | 0.0279  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0023               |                                 | 72.2200  | 34.9978  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0035               |                                 | 73.2666  | 35.5049  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0048               |                                 | 75.3600  | 36.5195  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0059               |                                 | 74.1040  | 35.9108  |   |   |
| IV'                  | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0020               | 0.2200                          | 0.2512   | 0.1275   | 0.1233  | 8.1089  |
|                      | $6 \cdot 10^{-3}$             | 0.0023               |                                 | 0.2407   | 0.1222   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-3}$             | 0.0027               |                                 | 0.2422   | 0.1229   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-3}$             | 0.0031               |                                 | 0.2434   | 0.1236   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-3}$             | 0.0035               |                                 | 0.2372   | 0.1204   |   |   |
| V'                   | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0070               | 0.2400                          | 8.7500   | 4.8667   | 4.7860  | 0.2089  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0.0081               |                                 | 8.4375   | 4.6929   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0.0096               |                                 | 8.5714   | 4.7674   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0.0109               |                                 | 8.5156   | 4.7364   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0.0126               |                                 | 8.7500   | 4.8667   |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une distribution aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier III' ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon IV'.

**Tableau XXXIII.** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne X de l'alliage Pb-Sn.

| Colonne X            |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| A                    | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0,0029               | 0,24                            | 36,424   | 20,082   | 20,498  | 0,04878   |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0,0035               |                                 | 36,633   | 20,197   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0,0041               |                                 | 36,782   | 20,280   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0,0048               |                                 | 37,680   | 20,774   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0,0055               |                                 | 38,377   | 21,159   |   |   |
| B                    | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0,0011               | 0,225                           | 13,816   | 7,141  | 7,298   | 0,1370  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0,0014               |                                 | 14,653   | 7,574  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0,0016               |                                 | 14,354   | 6,492  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0,0019               |                                 | 14,915   | 7,709  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0,0021               |                                 | 14,653   | 7,574  |   |   |
| C                    | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0,0038               | 0,1961                          | 0,477  | 0,279  | 0,276   | 3,6127  |
|                      | $6 \cdot 10^{-3}$             | 0,0045               |                                 | 0,481  | 0,275  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-3}$             | 0,0053               |                                 | 0,475  | 0,278  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-3}$             | 0,0060               |                                 | 0,471  | 0,275  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-3}$             | 0,0058               |                                 | 0,404  | 0,277  |   |   |
| D                    | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0022               | 0,1923                          | 2,763  | 1,586  | 1,566   | 0,6384  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0,0026               |                                 | 2,721  | 1,562  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0,0030               |                                 | 2,691  | 1,545  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0,0035               |                                 | 2,747  | 1,577  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0,0039               |                                 | 2,721  | 1,562  |   |   |
| E                    | $10^{-3}$                     | 0,0014               | 0,245                           | 0,879  | 0,381  | 0,381   | 2,6246  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0,0028               |                                 | 0,879  | 0,381  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0,0042               |                                 | 0,879  | 0,381  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0,0056               |                                 | 0,879  | 0,381  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0,0070               |                                 | 0,879  | 0,381  |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une décroissance soutenue suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du premier palier A ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon C.

**Tableau XXXIV.** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne Y de l'alliage Pb-Sn.

| Colonne Y            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| 1                    | $5.10^{-5}$                   | 0,0043               | 0,245                           | 54,008  | 30,397  | 33,447  | 0,02989  |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0,0054               |                                 | 56,520  | 31,811  |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0,0068               |                                 | 61,005  | 34,336  |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0,0080               |                                 | 62,800  | 35,346  |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0,0090               |                                 | 62,800  | 35,346  |   |  |
| 2                    | $5.10^{-4}$                   | 0,0023               | 0,250                           | 2,888   | 1,659   | 1,478   | 0,6763   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0028               |                                 | 2,930   | 1,683   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0033               |                                 | 2,960   | 1,700   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0037               |                                 | 2,904   | 1,668   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0042               |                                 | 2,930   | 1,683   |   |  |
| 3                    | $5.10^{-3}$                   | 0,0023               | 0,255                           | 0,288   | 0,169   | 0,168   | 5,9523   |
|                      | $6.10^{-3}$                   | 0,0028               |                                 | 0,293   | 0,171   |   |  |
|                      | $7.10^{-3}$                   | 0,0032               |                                 | 0,287   | 0,168   |   |  |
|                      | $8.10^{-3}$                   | 0,0036               |                                 | 0,282   | 0,165   |   |  |
|                      | $9.10^{-3}$                   | 0,0041               |                                 | 0,286   | 0,167   |   |  |
| 4                    | $10^{-5}$                     | 0,0025               | 0,240                           | 157   | 86,561  | 91,662  | 0,01090  |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0,0050               |                                 | 157   | 86,561  |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0,0080               |                                 | 167,466   | 92,332  |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0,0110               |                                 | 172,700   | 95,217  |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0,0141               |                                 | 177,096   | 97,641  |   |  |
| 5                    | $5.10^{-4}$                   | 0,0029               | 0,265                           | 3,642   | 2,217   | 2,182   | 0,4582   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0033               |                                 | 3,454   | 2,103   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0040               |                                 | 3,588   | 2,184   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0046               |                                 | 3,611   | 2,198   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0052               |                                 | 3,628   | 2,208   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une décroissance soutenue suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier 4 ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 3.

**Tableau XXXV.** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne Y' de l'alliage Pb-Sn.

| Colonne Y'           |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| 1'                   | $10^{-3}$                     | 0,0012               | 0,210                           | 0,753   | 0,363   | 0,367   | 2,7188   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0,0024               |                                 | 0,753   | 0,363   |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0,0037               |                                 | 0,774   | 0,373   |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0,0049               |                                 | 0,769   | 0,371   |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0,0061               |                                 | 0,766   | 0,369   |   |  |
| 2'                   | $5.10^{-3}$                   | 0,0037               | 0,215                           | 0,464   | 0,229   | 0,233   | 4,2808   |
|                      | $6.10^{-3}$                   | 0,0045               |                                 | 0,471   | 0,232   |   |  |
|                      | $7.10^{-3}$                   | 0,0053               |                                 | 0,475   | 0,234   |   |  |
|                      | $8.10^{-3}$                   | 0,0061               |                                 | 0,478   | 0,236   |   |  |
|                      | $9.10^{-3}$                   | 0,0069               |                                 | 0,481   | 0,237   |   |  |
| 3'                   | $10^{-2}$                     | 0,0014               | 0,205                           | 0,087   | 0,041   | 0,0403  | 24,826   |
|                      | $2.10^{-2}$                   | 0,0027               |                                 | 0,084   | 0,0399  |   |  |
|                      | $3.10^{-2}$                   | 0,0041               |                                 | 0,085   | 0,0404  |   |  |
|                      | $4.10^{-2}$                   | 0,0054               |                                 | 0,084   | 0,0399  |   |  |
|                      | $5.10^{-2}$                   | 0,0068               |                                 | 0,085   | 0,0402  |   |  |
| 4'                   | $5.10^{-4}$                   | 0,0020               | 0,240                           | 2,512   | 1,385   | 1,385   | 0,7220   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0024               |                                 | 2,512   | 1,385   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0028               |                                 | 2,512   | 1,385   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0032               |                                 | 2,512   | 1,385   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0036               |                                 | 2,512   | 1,385   |   |  |
| 5'                   | $10^{-3}$                     | 0,0010               | 0,270                           | 0,628   | 0,389   | 0,356   | 2,8074   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0,0018               |                                 | 0,565   | 0,350   |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0,0027               |                                 | 0,565   | 0,350   |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0,0036               |                                 | 0,565   | 0,350   |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0,0044               |                                 | 0,552   | 0,342   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une décroissance suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier 4' ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 3'.



**Tableau XXXVI. R** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne Z de l'alliage Pb-Sn.

| Colonne Z            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| $\alpha$             | $5.10^{-4}$                   | 0,0039               | 0,250                           | 4,898   | 2,813   | 2,848   | 0,3510   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0047               |                                 | 4,919   | 2,825   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0055               |                                 | 4,934   | 2,833   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0064               |                                 | 5,024   | 2,885   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0072               |                                 | 5,024   | 2,885   |   |  |
| $\beta$              | $10^{-4}$                     | 0,0020               | 0,250                           | 12,560  | 7,213   | 5,803   | 0,1723   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0030               |                                 | 9,420   | 5,410   |   |  |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0045               |                                 | 9,420   | 5,410   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0,0061               |                                 | 9,577   | 5,500   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0,0076               |                                 | 9,545   | 5,482   |   |  |
| $\gamma$             | $5.10^{-5}$                   | 0,0025               | 0,245                           | 31,400  | 17,673  | 17,326  | 0,05771  |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0,0030               |                                 | 31,400  | 17,673  |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0,0034               |                                 | 30,502  | 17,168  |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0,0039               |                                 | 30,615  | 17,231  |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0,0043               |                                 | 30,004  | 16,887  |   |  |
| $\eta$               | $10^{-4}$                     | 0,0020               | 0,255                           | 12,560  | 7,357   | 7,190   | 0,13907  |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0039               |                                 | 12,246  | 7,173   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0,0058               |                                 | 12,141  | 7,112   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0,0078               |                                 | 12,246  | 7,173   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0,0097               |                                 | 12,183  | 7,137   |   |  |
| $\delta$             | $5.10^{-4}$                   | 0,0029               | 0,280                           | 3,642   | 2,342   | 2,406   | 0,4154   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0036               |                                 | 3,768   | 2,423   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0042               |                                 | 3,768   | 2,423   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0048               |                                 | 3,768   | 2,423   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0054               |                                 | 3,768   | 2,423   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une croissance soutenue suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier  $\gamma$  suivie d'une décroissance ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon  $\delta$ .

**Tableau XXXVII.** Résistivité électrique des échantillons bruts de coulée, pour la colonne Z' de l'alliage Pb-Sn.

| Colonne Z'           |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| $\alpha'$            | $10^{-4}$                     | 0,0012               | 0,220                           | 7,536  | 3,808  | 3,554   | 0,28134   |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0,0022               |                                 | 6,908  | 3,491  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0,0033               |                                 | 6,908  | 3,491  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0,0044               |                                 | 6,908  | 3,491  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0055               |                                 | 6,908  | 3,491  |   |   |
| $\beta'$             | $10^{-6}$                     | 0,0036               | 0,205                           | 2260,800   | 1064,708   | 617,530   | $1,6193 \cdot 10^{-3}$  |
|                      | $2 \cdot 10^{-6}$             | 0,0041               |                                 | 1287,400   | 606,292  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-6}$             | 0,0054               |                                 | 1130,400   | 532,354  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-6}$             | 0,0062               |                                 | 973,400  | 458,416  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-6}$             | 0,0072               |                                 | 904,320  | 425,883  |   |   |
| $\gamma'$            | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0024               | 0,210                           | 3,014  | 1,454  | 1,469   | 0,06806   |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0,0029               |                                 | 3,035  | 1,464  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0,0034               |                                 | 3,050  | 1,471  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0,0039               |                                 | 3,061  | 1,476  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0,0044               |                                 | 3,070  | 1,481  |   |   |
| $\eta'$              | $10^{-5}$                     | 0,0020               | 0,175                           | 125,600  | 50,494   | 52,211  | 0,0191  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0,0042               |                                 | 131,880  | 53,019   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0,0063               |                                 | 131,880  | 53,019   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0,0084               |                                 | 131,880  | 53,019   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0,0102               |                                 | 128,112  | 51,504   |   |   |
| $\delta'$            | $10^{-3}$                     | 0,0013               | 0,130                           | 0,816  | 0,243  | 0,236   | 4,2229  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0,0025               |                                 | 0,785  | 0,234  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0,0038               |                                 | 0,795  | 0,237  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0,0050               |                                 | 0,785  | 0,234  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0,0063               |                                 | 0,791  | 0,236  |   |   |




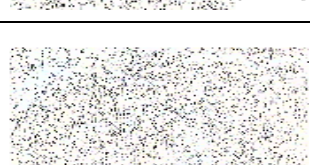
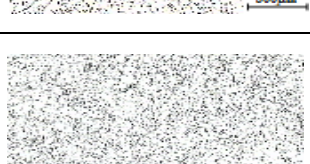
En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique à l'état brut, on remarque une distribution aléatoire avec un pic accès soutenu au niveau du palier  $\beta'$ ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon  $\delta'$ .

## 2. Echantillons laminés

### 2.1. Distribution de l'eutectique



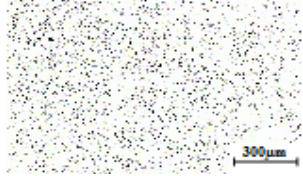
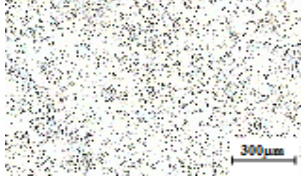

Les résultats de la micrographie et de la fraction de l'eutectique obtenus après déformation à froid (laminage) et suivant le sens de coulée en ayant utilisé le logiciel "Imagej", sont illustrés dans les *tableaux (XXXVIII à XLVII)* ; des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement.

**Tableau XXXVIII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne X de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne X</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Echantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| <b>G</b>            |   | 10%                                      | 14.4%                                |
|                     |   | 17%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
|                     |   | 14%                                      |                                      |
| <b>H</b>            |  | 07%                                      | 12.0%                                |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 13%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
| <b>i</b>            |  | 11%                                      | 12.0%                                |
|                     |   | 13%                                      |                                      |
|                     |   | 11%                                      |                                      |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
|                     |   | 09%                                      |                                      |
| <b>J</b>            |  | 13%                                      | 10.4%                                |
|                     |   | 09%                                      |                                      |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
|                     |   | 08%                                      |                                      |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
| <b>K</b>            |  | 21%                                      | 19.8%                                |
|                     |   | 19%                                      |                                      |
|                     |   | 17%                                      |                                      |
|                     |   | 21%                                      |                                      |
|                     |   | 21%                                      |                                      |

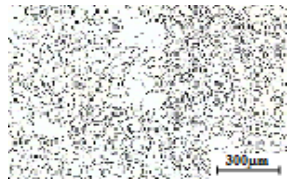
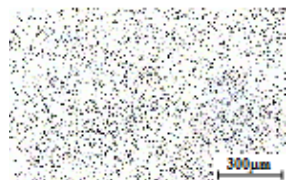
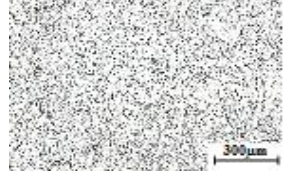
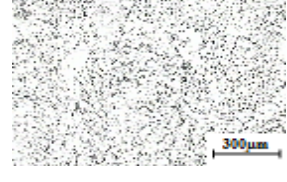

On remarque que la distribution obtenue est décroissante suivant le sens de coulée tout en remarquant un pic de la fraction au niveau du dernier palier K ; avec des valeurs d'eutectique relativement amoindries par rapport à l'état brut.

**Tableau XXXIX.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne Y de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Y</i>   |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>échantillon</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| 6                  |    | 12%                                      | 15.4%                                |
|                    |   | 10%                                      |                                      |
|                    |   | 12%                                      |                                      |
|                    |   | 15%                                      |                                      |
|                    |   | 17%                                      |                                      |
| 7                  |    | 10%                                      | 9.6%                                 |
|                    |   | 9%                                       |                                      |
|                    |   | 9%                                       |                                      |
|                    |   | 10%                                      |                                      |
|                    |   | 10%                                      |                                      |
| 8                  |   | 9%                                       | 9.4%                                 |
|                    |   | 8%                                       |                                      |
|                    |   | 8%                                       |                                      |
|                    |   | 10%                                      |                                      |
|                    |   | 12%                                      |                                      |
| 9                  |  | 10%                                      | 10.0%                                |
|                    |   | 9%                                       |                                      |
|                    |   | 9%                                       |                                      |
|                    |   | 10%                                      |                                      |
|                    |   | 12%                                      |                                      |
| 10                 |  | 12%                                      | 10.6%                                |
|                    |   | 14%                                      |                                      |
|                    |   | 12%                                      |                                      |
|                    |   | 6%                                       |                                      |
|                    |   | 9%                                       |                                      |



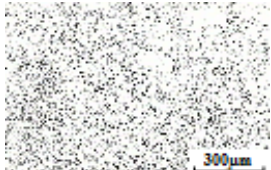
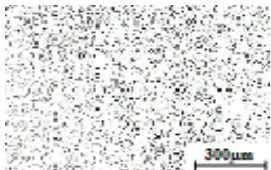

On remarque que la distribution obtenue est caractérisée par une décroissance suivie d'une croissance suivant le sens de coulée tout en remarquant un pic de la fraction au niveau du dernier palier 6 ; avec des valeurs d'eutectique relativement amoindries par rapport à l'état brut.

**Tableau XL.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne Y' de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Y'</i>  |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Echantillon</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| 6'                 |    | 17%                                      | 16.2%                                |
|                    |   | 14%                                      |                                      |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
|                    |   | 18%                                      |                                      |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
| 7'                 |    | 8%                                       | 10.0%                                |
|                    |   | 11%                                      |                                      |
|                    |   | 12%                                      |                                      |
|                    |   | 10%                                      |                                      |
|                    |   | 9%                                       |                                      |
| 8'                 |  | 24%                                      | 24.4%                                |
|                    |   | 26%                                      |                                      |
|                    |   | 20%                                      |                                      |
|                    |   | 24%                                      |                                      |
|                    |   | 28%                                      |                                      |
| 9'                 |  | 15%                                      | 17.8%                                |
|                    |   | 20%                                      |                                      |
|                    |   | 21%                                      |                                      |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
|                    |   | 17%                                      |                                      |
| 10'                |  | 12%                                      | 9.2%                                 |
|                    |   | 8%                                       |                                      |
|                    |   | 8%                                       |                                      |
|                    |   | 10%                                      |                                      |
|                    |   | 8%                                       |                                      |

On remarque que la distribution obtenue est aléatoire suivant le sens de coulée tout en remarquant un pic de la fraction au niveau du dernier palier 8' ; avec des valeurs d'eutectique relativement amoindries par rapport à l'état brut.

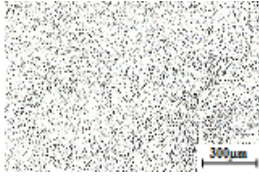
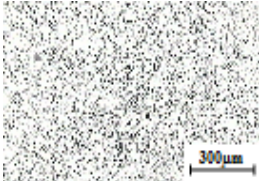



**Tableau XLI.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne Z de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Z</i>   |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>échantillon</i> | <i>micrographie</i>   | <i>le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| <b>I</b>           |    | 24%                                      | 19.4%                                |
|                    |   | 18%                                      |                                      |
|                    |   | 18%                                      |                                      |
|                    |   | 18%                                      |                                      |
|                    |   | 19%                                      |                                      |
| <b>II</b>          |    | 19%                                      | 18.8%                                |
|                    |   | 24%                                      |                                      |
|                    |   | 19%                                      |                                      |
|                    |   | 17%                                      |                                      |
|                    |   | 15%                                      |                                      |
| <b>III</b>         |   | 18%                                      | 17.2%                                |
|                    |   | 17%                                      |                                      |
|                    |   | 18%                                      |                                      |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
|                    |   | 17%                                      |                                      |
| <b>IV</b>          |  | 16%                                      | 14.2%                                |
|                    |   | 15%                                      |                                      |
|                    |   | 13%                                      |                                      |
|                    |   | 15%                                      |                                      |
|                    |   | 12%                                      |                                      |
| <b>V</b>           |  | 21%                                      | 15.4%                                |
|                    |   | 21%                                      |                                      |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
|                    |   | 20%                                      |                                      |
|                    |   | 18%                                      |                                      |

On remarque que la distribution obtenue est décroissante suivant le sens de coulée tout en remarquant un pic de la fraction au niveau du dernier palier le plus haut I ; avec des valeurs d'eutectique relativement amoindries par rapport à l'état brut.

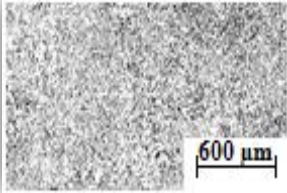
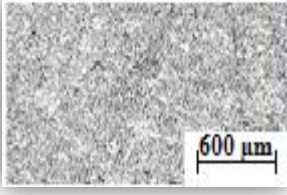
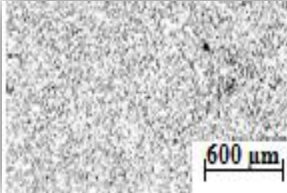
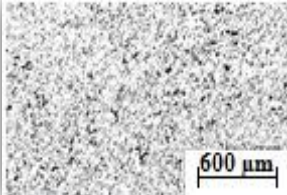
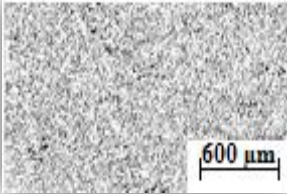


**Tableau XLII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne Z' de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Z'</i>  |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>échantillon</i> | <i>micrographie</i>   | <i>le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| I'                 |    | 17%                                      | 14.4%                                |
|                    |   | 13%                                      |                                      |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
|                    |   | 10%                                      |                                      |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
| II'                |    | 19%                                      | 18.8%                                |
|                    |   | 21%                                      |                                      |
|                    |   | 19%                                      |                                      |
|                    |   | 17%                                      |                                      |
|                    |   | 18%                                      |                                      |
| III'               |   | 15%                                      | 12.8%                                |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
|                    |   | 11%                                      |                                      |
|                    |   | 9%                                       |                                      |
|                    |   | 13%                                      |                                      |
| IV'                |  | 20%                                      | 18.4%                                |
|                    |   | 19%                                      |                                      |
|                    |   | 16%                                      |                                      |
|                    |   | 17%                                      |                                      |
|                    |   | 20%                                      |                                      |
| V'                 |  | 21%                                      | 15.4%                                |
|                    |   | 22%                                      |                                      |
|                    |   | 23%                                      |                                      |
|                    |   | 20%                                      |                                      |
|                    |   | 24%                                      |                                      |

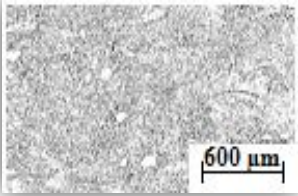
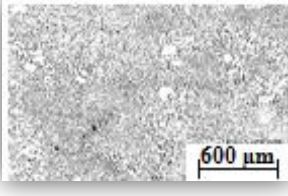
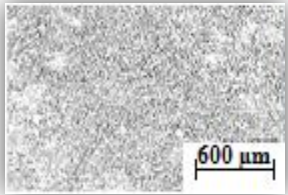
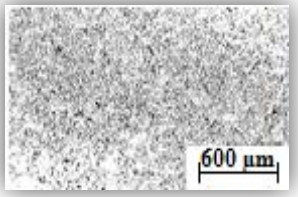
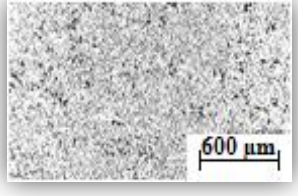
On remarque que la distribution obtenue dans tous les échantillons de la plaquette après laminage sont caractérisés par une distribution aléatoire avec un pic au niveau de l'échantillon II' suivant le sens de coulée; avec des valeurs d'eutectique relativement rapprochées et amoindries par rapport à l'état brut.

**Tableau XLIII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne X de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne X</i>   |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>échantillon</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| A                  |    | 31.163                                   | 31,266%                              |
|                    |   | 33.073                                   |                                      |
|                    |   | 32.291                                   |                                      |
|                    |   | 31.830                                   |                                      |
|                    |   | 27.977                                   |                                      |
| B                  |    | 33.923                                   | 33,448%                              |
|                    |   | 33.954                                   |                                      |
|                    |   | 32.028                                   |                                      |
|                    |   | 33.155                                   |                                      |
|                    |   | 34.181                                   |                                      |
| C                  |  | 29.031                                   | 28,780 %                             |
|                    |   | 29.645                                   |                                      |
|                    |   | 28.010                                   |                                      |
|                    |   | 29.645                                   |                                      |
|                    |   | 27.569                                   |                                      |
| D                  |  | 24.454                                   | 23,214%                              |
|                    |   | 23.281                                   |                                      |
|                    |   | 23.232                                   |                                      |
|                    |   | 22.572                                   |                                      |
|                    |   | 22.533                                   |                                      |
| E                  |  | 30.211                                   | 30,960%                              |
|                    |   | 30.438                                   |                                      |
|                    |   | 28.458                                   |                                      |
|                    |   | 35.007                                   |                                      |
|                    |   | 30.687                                   |                                      |

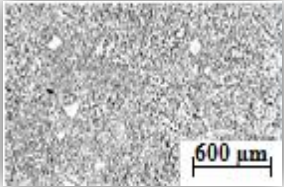
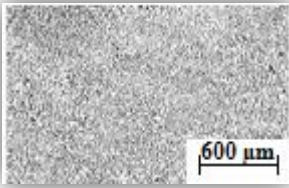
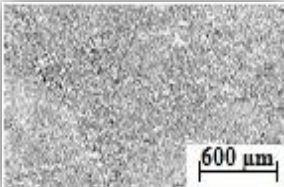
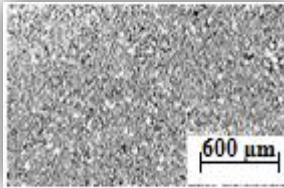
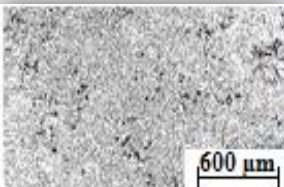
On remarque que la distribution obtenue dans tous les échantillons de la plaquelette après laminage sont caractérisés par une distribution décroissante accompagnée d'un pic au niveau du palier E suivant le sens de coulée; avec des valeurs d'eutectique relativement rapprochées et amoindries par rapport à l'état brut.

**Tableau XLIV.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne Y de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Y</i>   |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>échantillon</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| 1                  |    | 28.775                                   | 29,135 %                             |
|                    |   | 29.077                                   |                                      |
|                    |   | 29.123                                   |                                      |
|                    |   | 29.947                                   |                                      |
|                    |   | 28.775                                   |                                      |
| 2                  |    | 28.216                                   | 27,862%                              |
|                    |   | 28.250                                   |                                      |
|                    |   | 27.337                                   |                                      |
|                    |   | 27.904                                   |                                      |
|                    |   | 27.605                                   |                                      |
| 3                  |  | 29.101                                   | 30,898%                              |
|                    |   | 27.723                                   |                                      |
|                    |   | 30.327                                   |                                      |
|                    |   | 31.459                                   |                                      |
|                    |   | 35.882                                   |                                      |
| 4                  |  | 32.191                                   | 29,543%                              |
|                    |   | 29.025                                   |                                      |
|                    |   | 29.842                                   |                                      |
|                    |   | 28.811                                   |                                      |
|                    |   | 27.847                                   |                                      |
| 5                  |  | 31.811                                   | 31,883%                              |
|                    |   | 33.322                                   |                                      |
|                    |   | 32.370                                   |                                      |
|                    |   | 31.031                                   |                                      |
|                    |   | 30.881                                   |                                      |

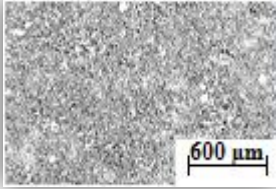
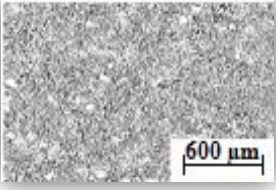
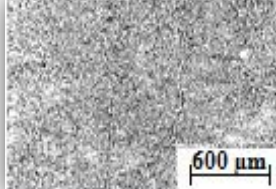

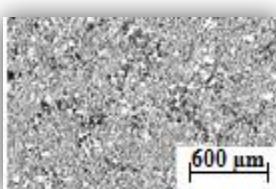
On remarque que la distribution obtenue dans tous les échantillons de la plaquette après laminage sont caractérisés par une distribution aléatoire accompagnée d'un pic au niveau du palier 5 suivant le sens de coulée; avec des valeurs d'eutectique relativement rapprochées et amoindries par rapport à l'état brut.

**Tableau XLV.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne Y' de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Y'</i>  |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>échantillon</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| 1'                 |    | 34.745                                   | 32,045%                              |
|                    |   | 33.173                                   |                                      |
|                    |   | 33.034                                   |                                      |
|                    |   | 31, 715                                  |                                      |
|                    |   | 27.558                                   |                                      |
| 2'                 |    | 34.284                                   | 34,7446%                             |
|                    |   | 34.123                                   |                                      |
|                    |   | 35.638                                   |                                      |
|                    |   | 35.920                                   |                                      |
|                    |   | 33.758                                   |                                      |
| 3'                 |   | 36.007                                   | 36,464%                              |
|                    |   | 36.763                                   |                                      |
|                    |   | 36.705                                   |                                      |
|                    |   | 35.622                                   |                                      |
|                    |   | 37.225                                   |                                      |
| 4'                 |  | 39.195                                   | 39,505%                              |
|                    |   | 40.205                                   |                                      |
|                    |   | 41.273                                   |                                      |
|                    |   | 39.441                                   |                                      |
|                    |   | 37.413                                   |                                      |
| 5'                 |  | 36.625                                   | 35,355%                              |
|                    |   | 35.818                                   |                                      |
|                    |   | 35.728                                   |                                      |
|                    |   | 34.640                                   |                                      |
|                    |   | 33.964                                   |                                      |

On remarque que la distribution obtenue dans tous les échantillons du lingot après laminage sont caractérisés par une distribution croissante suivie d'une chute de la fraction au niveau de l'échantillon 5' caractérisé d'un pic au niveau du palier 4' suivant le sens de coulée; avec des valeurs d'eutectique relativement rapprochées et amoindries par rapport à l'état brut.

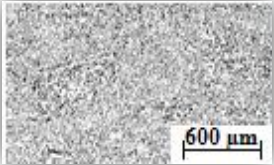
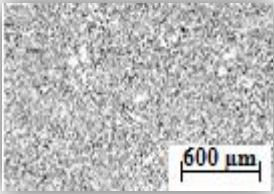
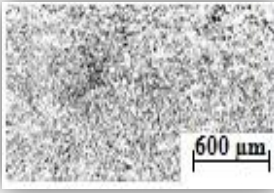
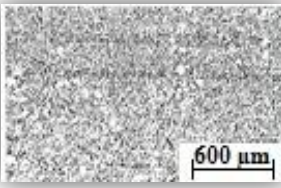
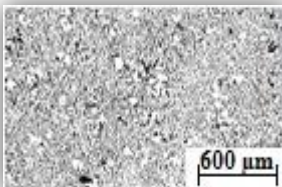
**Tableau XLVI.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne Z de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Z</i>   |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>échantillon</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| $\alpha$           |    | 32.736                                   | 34,242%                              |
|                    |   | 35.926                                   |                                      |
|                    |   | 34.990                                   |                                      |
|                    |   | 33.220                                   |                                      |
|                    |   | 34.249                                   |                                      |
| $\beta$            |    | 36.659                                   | 33,001%                              |
|                    |   | 32.580                                   |                                      |
|                    |   | 33.318                                   |                                      |
|                    |   | 31.468                                   |                                      |
|                    |   | 30.984                                   |                                      |
| $\gamma$           |   | 38.276                                   | 38,238%                              |
|                    |   | 39.760                                   |                                      |
|                    |   | 37.597                                   |                                      |
|                    |   | 37.648                                   |                                      |
|                    |   | 37.911                                   |                                      |
| $\eta$             |  | 40.178                                   | 38,564%                              |
|                    |   | 39.536                                   |                                      |
|                    |   | 38.239                                   |                                      |
|                    |   | 38.639                                   |                                      |
|                    |   | 36.232                                   |                                      |
| $\delta$           |  | 38.315                                   | 36,338%                              |
|                    |   | 37.691                                   |                                      |
|                    |   | 36.383                                   |                                      |
|                    |   | 34.802                                   |                                      |
|                    |   | 34.500                                   |                                      |

On remarque que la distribution obtenue dans tous les échantillons du lingot après laminage sont caractérisés par une distribution aléatoire caractérisée par un pic au niveau des deux paliers  $\eta$  et  $\gamma$  suivant le sens de coulée ; avec des valeurs d'eutectique relativement rapprochées et amoindries par rapport à l'état brut.



**Tableau XLVII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage et leurs fractions pour de la colonne Z' de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Z'</i>  |   |  |                                      |
|--------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>échantillon</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| $\alpha'$          |    | 34.909                                   | 32,161%                              |
|                    |   | 32.213                                   |                                      |
|                    |   | 30.746                                   |                                      |
|                    |   | 31.039                                   |                                      |
|                    |   | 31.899                                   |                                      |
| $\beta'$           |    | 32.651                                   | 32,211%                              |
|                    |   | 34.223                                   |                                      |
|                    |   | 30.447                                   |                                      |
|                    |   | 32.210                                   |                                      |
|                    |   | 31.525                                   |                                      |
| $\gamma'$          |   | 34.416                                   | 33,295%                              |
|                    |   | 34.177                                   |                                      |
|                    |   | 33.848                                   |                                      |
|                    |   | 32.431                                   |                                      |
|                    |   | 31.604                                   |                                      |
| $\eta'$            |  | 34.146                                   | 33,058%                              |
|                    |   | 33.028                                   |                                      |
|                    |   | 33.296                                   |                                      |
|                    |   | 32.628                                   |                                      |
|                    |   | 32.193                                   |                                      |
| $\delta'$          |  | 33.795                                   | 32,675%                              |
|                    |   | 33.924                                   |                                      |
|                    |   | 32.550                                   |                                      |
|                    |   | 31.461                                   |                                      |
|                    |   | 31.646                                   |                                      |

On remarque que la distribution obtenue dans tous les échantillons du lingot après laminage sont caractérisés par une distribution aléatoire caractérisés par un pic au niveau des deux paliers  $\eta'$  et  $\gamma'$  suivant le sens de coulée ; avec des valeurs d'eutectique très rapprochées et amoindries par rapport à l'état brut.



## 2.2. Résistivité électrique

Les résultats de résistivité électrique des alliages Sn-Zn et Pb-Sn respectivement, obtenus après laminage et suivant le sens de coulée sont illustrés dans les *tableaux* (XLVIII à LVII).

**Tableau XLVIII.** Résistivité électrique de la colonne X de l'alliage Sn-Zn après laminage.

| Colonne X            |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{mov}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| G                    | $5 \cdot 10^{-6}$             | 0.0028               | 0.0844                          | 351.6800   | 68.5073  | 69.1743   | 0.0145  |
|                      | $6 \cdot 10^{-6}$             | 0.0034               |                                 | 355.8666   | 69.3228  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-6}$             | 0.0040               |                                 | 358.8571   | 69.9054  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-6}$             | 0.0045               |                                 | 353.2500   | 68.8131  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-6}$             | 0.0051               |                                 | 355.8666   | 69.3228  |   |   |
| H                    | $10^{-3}$                     | 0.0014               | 0.0546                          | 0.8792   | 0.1108   | 0.1095  | 9.1291  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0.0028               |                                 | 0.8792   | 0.1108   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0.0041               |                                 | 0.8582   | 0.1081   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0.0055               |                                 | 0.8635   | 0.1088   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0069               |                                 | 0.8664   | 0.1092   |   |   |
| i                    | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0045               | 0.0745                          | 5.6520   | 1.0846   | 0.9906  | 1.0095  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0.0053               |                                 | 5.5473   | 0.9536   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0.0063               |                                 | 5.6520   | 0.9716   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0.0072               |                                 | 5.6520   | 0.9716   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0.0081               |                                 | 5.6520   | 0.9716   |   |   |
| j                    | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0020               | 0.0596                          | 25.1200  | 3.4540   | 3.6019  | 0.2776  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0024               |                                 | 25.1200  | 3.4540   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0029               |                                 | 26.0171  | 3.5774   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0033               |                                 | 25.9050  | 3.5619   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0037               |                                 | 25.8177  | 3.9624   |   |   |
| K                    | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0010               | 0.1117                          | 12.5600  | 3.3912   | 3.3912  | 0.2949  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0012               |                                 | 12.5600  | 3.3912   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0014               |                                 | 12.5600  | 3.3912   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0016               |                                 | 12.5600  | 3.3912   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0018               |                                 | 12.5600  | 3.3912   |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier G ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon H.

**Tableau XLIX.** Résistivité électrique de la colonne Y de l'alliage Sn-Zn après laminage.

| Colonne Y            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| 6                    | $5.10^{-4}$                   | 0.0018               | 0.0919                          | 2.2608  | 0.4795  | 0.4223  | 2.3679   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0.0020               |                                 | 2.0933  | 0.4439  |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0.0022               |                                 | 1.9737  | 0.4186  |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0.0024               |                                 | 1.8840  | 0.3996  |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0.0025               |                                 | 1.7444  | 0.3699  |   |  |
| 7                    | $10^{-5}$                     | 0.0021               | 0.0819                          | 131.8800  | 24.9253   | 18.3261   | 0.0546   |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0.0028               |                                 | 87.9200   | 16.6169   |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0.0042               |                                 | 87.9200   | 16.6169   |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0.0056               |                                 | 87.9200   | 16.6169   |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0.0071               |                                 | 89.1760   | 16.8543   |   |  |
| 8                    | $5.10^{-5}$                   | 0.0014               | 0.0919                          | 17.5840   | 3.7296  | 3.7792  | 0.2646   |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0.0016               |                                 | 16.7466   | 4.1883  |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0.0019               |                                 | 17.0457   | 3.6154  |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0.0022               |                                 | 17.2700   | 3.6630  |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0.0025               |                                 | 17.4444   | 3.6999  |   |  |
| 9                    | $5.10^{-6}$                   | 0.0031               | 0.0645                          | 389.3600  | 57.9368   | 24.8412   | 0.0426   |
|                      | $6.10^{-6}$                   | 0.0038               |                                 | 397.7333  | 59.1827   |   |  |
|                      | $7.10^{-6}$                   | 0.0045               |                                 | 403.7142  | 60.0727   |   |  |
|                      | $8.10^{-6}$                   | 0.0053               |                                 | 416.0500  | 61.9082   |   |  |
|                      | $9.10^{-6}$                   | 0.0060               |                                 | 418.6666  | 62.2976   |   |  |
| 10                   | $10^{-5}$                     | 0.0018               | 0.0919                          | 113.0400  | 23.9758   | 26.8440   | 0.0373   |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0.0039               |                                 | 122.4600  | 25.9738   |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0.0062               |                                 | 129.7866  | 27.5277   |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0.0084               |                                 | 131.8800  | 27.9717   |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0.0108               |                                 | 135.6480  | 28.7709   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier 10 ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 6.

**Tableau L.** Résistivité électrique de la colonne Y' de l'alliage Sn-Zn après laminage.

| Colonne Y'           |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| 6'                   | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0034               | 0.0943                          | 42.7040  | 9.3134   | 9.2035  | 0.1087  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0040               |                                 | 41.8666  | 9.1311   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0047               |                                 | 42.1657  | 9.1963   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0054               |                                 | 42.3900  | 9.2453   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0060               |                                 | 41.8666  | 9.1311   |   |   |
| 7'                   | $10^{-3}$                     | 0.0017               | 0.0968                          | 1.0676   | 0.2385   | 0.2363  | 4.2319  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0.0034               |                                 | 1.0676   | 0.2385   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0.0050               |                                 | 1.0466   | 0.2338   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0.0067               |                                 | 1.0519   | 0.2350   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0084               |                                 | 1.0550   | 0.2357   |   |   |
| 8'                   | $10^{-5}$                     | 0.0023               | 0.1043                          | 144.4400   | 34.7667  | 34.9582   | 0.0286  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0047               |                                 | 147.5800   | 35.5225  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0070               |                                 | 146.5333   | 35.2706  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0092               |                                 | 144.4400   | 34.7667  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0114               |                                 | 143.1840   | 34.4643  |   |   |
| 9'                   | $10^{-4}$                     | 0.0049               | 0.0950                          | 30.6250  | 6.7467   | 8.2874  | 0.1207  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0.0114               |                                 | 35.6250  | 7.8482   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0.0183               |                                 | 38.1250  | 8.3989   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0.0263               |                                 | 41.0938  | 9.0529   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0341               |                                 | 42.6250  | 9.3903   |   |   |
| 10'                  | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0022               | 0.1043                          | 27.6320  | 6.6510   | 7.0275  | 0.1423  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0027               |                                 | 28.2600  | 6.7993   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0033               |                                 | 29.6057  | 7.1231   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0038               |                                 | 29.8300  | 7.1771   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0044               |                                 | 30.7022  | 7.3869   |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier 8' ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 7'.

**Tableau LI.** Résistivité électrique de la colonne Z de l'alliage Sn-Zn après laminage.

| Colonne Z            |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| I                    | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0026               | 0.0844                          | 32.6560  | 6.3614   | 6.2991  | 0.1588  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0031               |                                 | 32.4466  | 6.3206   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0036               |                                 | 32.2971  | 6.2915   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0041               |                                 | 32.1850  | 6.2696   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0046               |                                 | 32.0977  | 6.2526   |   |   |
| II                   | $10^{-4}$                     | 0.0011               | 0.0770                          | 6.9080   | 1.2276   | 1.2131  | 0.8243  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0.0022               |                                 | 6.9080   | 1.2276   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0.0032               |                                 | 6.9080   | 1.2276   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0.0043               |                                 | 6.7510   | 1.1997   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0053               |                                 | 6.6568   | 1.1829   |   |   |
| III                  | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0024               | 0.0745                          | 3.0144   | 0.5182   | 0.5355  | 1.8675  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0.0030               |                                 | 3.1400   | 0.5398   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0.0035               |                                 | 3.1400   | 0.5398   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0.0040               |                                 | 3.1400   | 0.5398   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0.0045               |                                 | 3.1400   | 0.5398   |   |   |
| IV                   | $10^{-4}$                     | 0.0028               | 0.0943                          | 17.5840  | 3.8263   | 3.4646  | 0.2886  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0.0055               |                                 | 17.2700  | 3.7579   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0.0079               |                                 | 16.5373  | 3.5985   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0.0105               |                                 | 16.4850  | 3.5871   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0130               |                                 | 16.3280  | 3.5530   |   |   |
| V                    | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0019               | 0.0695                          | 0.2386   | 0.0383   | 0.0416  | 24.0038   |
|                      | $6 \cdot 10^{-3}$             | 0.0023               |                                 | 0.2407   | 0.0386   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-3}$             | 0.0037               |                                 | 0.3319   | 0.0532   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-3}$             | 0.0031               |                                 | 0.2434   | 0.0390   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-3}$             | 0.0035               |                                 | 0.2442   | 0.0392   |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition décroissante suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du dernier palier IV ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon V.

**Tableau LII.** Résistivité électrique de la colonne Z' de l'alliage Sn-Zn après laminage.

| Colonne Z'           |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| I'                   | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0028               | 0.1167                          | 3.5168   | 0.9471   | 0.8764  | 1.1411  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0.0031               |                                 | 3.2446   | 0.8738   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0.0036               |                                 | 3.2297   | 0.8698   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0.0040               |                                 | 3.1400   | 0.8456   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0.0045               |                                 | 3.1400   | 0.8456   |   |   |
| II'                  | $10^{-5}$                     | 0.0021               | 0.1216                          | 131.8800   | 37.0055  | 24.0418   | 0.0416  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0024               |                                 | 75.3600  | 21.1460  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0035               |                                 | 73.2666  | 20.5586  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0047               |                                 | 73.7900  | 20.7055  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0059               |                                 | 74.1040  | 20.7936  |   |   |
| III'                 | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0030               | 0.0850                          | 3.7500   | 0.7391   | 0.7777  | 1.2858  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0.0038               |                                 | 3.9583   | 0.7802   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0.0045               |                                 | 4.0179   | 0.7919   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0.0050               |                                 | 3.9063   | 0.7699   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0.0059               |                                 | 4.0972   | 0.8076   |   |   |
| IV'                  | $10^{-3}$                     | 0.0038               | 0.1092                          | 2.3864   | 0.6014   | 0.5983  | 1.6715  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0.0076               |                                 | 2.3864   | 0.6014   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0.0113               |                                 | 2.3655   | 0.5961   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0.0151               |                                 | 2.3707   | 0.5974   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0188               |                                 | 2.3613   | 0.5950   |   |   |
| V'                   | $10^{-5}$                     | 0.0007               | 0.1316                          | 43.9600  | 13.3507  | 13.2235   | 0.0756  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0.0014               |                                 | 43.9600  | 13.3507  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0.0020               |                                 | 41.8666  | 12.7149  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0.0028               |                                 | 43.9600  | 13.3507  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0035               |                                 | 43.9600  | 13.3507  |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du dernier palier II'; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon IV'. Après laminage la résistivité électrique est descendue soit concrètement comme pour les échantillons (III', 10', K, 9...etc.), soit partiellement comme pour les échantillons (i, 7) soit carrément augmentée radicalement ou partiellement comme les échantillons (V', I, III, 9', 10, 7,...etc.).

**Tableau LIII.** Résistivité électrique de la colonne X de l'alliage Pb-Sn après laminage.

| Colonne X            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{mov}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| A                    | $10^{-4}$                     | 0,0024               | 0,1846                          | 15,072  | 6,392   | 6,468   | 0,1546   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0048               |                                 | 15,072  | 6,392   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0,0073               |                                 | 15,281  | 6,480   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0,0098               |                                 | 15,386  | 6,525   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0,0123               |                                 | 15,448  | 6,551   |   |  |
| B                    | $10^{-5}$                     | 0,0026               | 0,1731                          | 163,280   | 64,929  | 58,950  | 0,0169   |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0,0048               |                                 | 150,720   | 59,935  |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0,0070               |                                 | 146,533   | 48,270  |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0,0094               |                                 | 147,580   | 58,686  |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0,0126               |                                 | 158,256   | 62,932  |   |  |
| C                    | $10^{-4}$                     | 0,0011               | 0,1961                          | 6,908   | 3,112   | 3,104   | 0,3221   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0022               |                                 | 6,908   | 3,112   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0,0032               |                                 | 6,986   | 3,017   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0,0044               |                                 | 6,908   | 3,112   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0,0056               |                                 | 7,033   | 3,168   |   |  |
| D                    | $10^{-3}$                     | 0,0021               | 0,1923                          | 1,318   | 0,583   | 0,590   | 1,6926   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0,0043               |                                 | 1,350   | 0,596   |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0,0064               |                                 | 1,339   | 0,592   |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0,0085               |                                 | 1,334   | 0,589   |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0,0107               |                                 | 1,343   | 0,594   |   |  |
| E                    | $5.10^{-4}$                   | 0,0023               | 0,1885                          | 2,888   | 1,251   | 1,058   | 0,9452   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0028               |                                 | 2,930   | 1,269   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0032               |                                 | 2,870   | 1,243   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0037               |                                 | 2,904   | 1,257   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0042               |                                 | 2,930   | 1,269   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du dernier palier B; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon D.



**Tableau LIV.** Résistivité électrique de la colonne Y de l'alliage Pb-Sn après laminage.

| Colonne Y            |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{mov}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| 1                    | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0038               | 0,1885                          | 4,772  | 2,067  | 2,190   | 0,4566  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0,0047               |                                 | 4,919  | 2,130  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0,0057               |                                 | 5,113  | 2,214  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0,0066               |                                 | 5,181  | 2,243  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0,0076               |                                 | 5,303  | 2,296  |   |   |
| 2                    | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0022               | 0,1923                          | 2,763  | 1,221  | 1,352   | 0,7396  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0,0026               |                                 | 2,721  | 1,202  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0,0030               |                                 | 2,355  | 1,189  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0,0035               |                                 | 2,747  | 1,214  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0,0040               |                                 | 2,791  | 1,233  |   |   |
| 3                    | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0,0019               | 0,1961                          | 23,863   | 21,501   | 22,403  | 0,0446  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0,0022               |                                 | 23,026   | 21,689   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0,0026               |                                 | 23,325   | 22,228   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0,0029               |                                 | 22,765   | 23,340   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0,0033               |                                 | 23,026   | 23,261   |   |   |
| 4                    | $10^{-4}$                     | 0,0013               | 0,1846                          | 8,164  | 3,462  | 3,564   | 0,28055   |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0,0027               |                                 | 8,478  | 3,595  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0,0040               |                                 | 8,373  | 3,551  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0,0054               |                                 | 8,478  | 3,593  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0068               |                                 | 8,540  | 3,621  |   |   |
| 5                    | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0026               | 0,2038                          | 3,265  | 1,529  | 1,504   | 0,6648  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0,0030               |                                 | 3,140  | 1,470  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0,0036               |                                 | 3,229  | 1,512  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0,0041               |                                 | 3,218  | 1,507  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0,0046               |                                 | 3,209  | 1,503  |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du dernier palier 3; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 2.

**Tableau LV.** Résistivité électrique de la colonne Y' de l'alliage Pb-Sn après laminage.

| Colonne Y'           |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{mov}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| 1'                   | $10^{-4}$                     | 0,0014               | 0,1615                          | 8,792   | 3,262   | 3,262   | 0,3065   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0028               |                                 | 8,792   | 3,262   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0,0042               |                                 | 8,792   | 3,262   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0,0056               |                                 | 8,792   | 3,262   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0,0070               |                                 | 8,792   | 3,262   |   |  |
| 2'                   | $10^{-5}$                     | 0,0017               | 0,1654                          | 106,760   | 40,565  | 49,020  | 0,02039  |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0,0035               |                                 | 109,900   | 41,758  |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0,0059               |                                 | 123,506   | 46,929  |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0,0083               |                                 | 130,310   | 49,514  |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0,0139               |                                 | 174,584   | 66,337  |   |  |
| 3'                   | $5.10^{-5}$                   | 0,0044               | 0,1577                          | 55,264  | 20,021  | 21,200  | 0,04716  |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0,0054               |                                 | 56,520  | 20,476  |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0,0063               |                                 | 56,520  | 20,476  |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0,0073               |                                 | 57,305  | 20,760  |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0,0096               |                                 | 66,986  | 24,268  |   |  |
| 4'                   | $5.10^{-5}$                   | 0,0019               | 0,1846                          | 23,864  | 10,120  | 9,839   | 0,10163  |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0,0022               |                                 | 23,026  | 9,765   |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0,0026               |                                 | 23,325  | 9,891   |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0,0029               |                                 | 22,765  | 9,654   |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0,0033               |                                 | 23,026  | 9,765   |   |  |
| 5'                   | $10^{-4}$                     | 0,0014               | 0,2077                          | 8,792   | 4,195   | 4,233   | 0,2362   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0028               |                                 | 8,792   | 4,195   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0,0042               |                                 | 8,792   | 4,195   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0,0057               |                                 | 8,949   | 4,269   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0,0072               |                                 | 9,043   | 4,315   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition croissante jusqu'à atteindre le pic au niveau de l'échantillon 2' suivie d'une décroissance suivant le sens de coulée; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 1'.

Tableau LVI. Résistivité électrique de la colonne Z de l'alliage Pb-Sn après laminage.

| Colonne Z            |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{mov}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| $\alpha$             | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0050               | 0,1923                          | 6,280  | 2,774  | 2,814   | 0,3553  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0,0060               |                                 | 6,280  | 2,774  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0,0071               |                                 | 6,369  | 2,814  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0,0082               |                                 | 6,437  | 2,843  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0,0093               |                                 | 6,489  | 2,866  |   |   |
| $\beta$              | $10^{-4}$                     | 0,0016               | 0,1923                          | 10,048   | 4,438  | 4,313   | 0,2318  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0,0031               |                                 | 9,734  | 4,300  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0,0046               |                                 | 9,629  | 4,254  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0,0062               |                                 | 9,734  | 4,300  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0077               |                                 | 9,671  | 4,272  |   |   |
| $\gamma$             | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0,0014               | 0,1885                          | 17,584   | 7,615  | 7,958   | 0,1256  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0,0017               |                                 | 17,793   | 7,705  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0,0021               |                                 | 18,840   | 8,158  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0,0024               |                                 | 18,840   | 8,158  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0,0027               |                                 | 18,840   | 8,158  |   |   |
| $\eta$               | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0016               | 0,1962                          | 2,009  | 0,906  | 0,891   | 1,12208   |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0,0019               |                                 | 1,988  | 0,896  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0,0022               |                                 | 1,973  | 0,889  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0,0025               |                                 | 1,962  | 0,884  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0,0028               |                                 | 1,953  | 0,881  |   |   |
| $\delta$             | $10^{-4}$                     | 0,0030               | 0,2154                          | 18,840   | 9,322  | 9,721   | 0,10286   |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0,0062               |                                 | 19,468   | 9,633  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0,0095               |                                 | 19,886   | 9,841  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0,0127               |                                 | 19,939   | 9,866  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0160               |                                 | 20,096   | 9,944  |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition croissante suivant le sens de coulée avec une chute de la résistivité au niveau de l'échantillon  $\eta$  ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau du même échantillon.

Tableau LVII. Résistivité électrique de la colonne Z' de l'alliage Pb-Sn après laminage.

| Colonne Z'           |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{mov}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| $\alpha'$            | $10^{-5}$                     | 0,0019               | 0,1692                          | 119,320  | 46,379   | 48,031  | 0,02081   |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0,0038               |                                 | 119,320  | 46,379   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0,0058               |                                 | 121,141  | 47,193   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0,0081               |                                 | 127,170  | 49,431   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0,0104               |                                 | 130,624  | 50,773   |   |   |
| $\beta'$             | $10^{-4}$                     | 0,0016               | 0,1577                          | 10,048   | 3,640  | 3,555   | 0,2813  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0,0031               |                                 | 9,734  | 3,526  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0,0046               |                                 | 9,629  | 3,488  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0,0062               |                                 | 9,734  | 3,526  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0079               |                                 | 9,922  | 3,595  |   |   |
| $\gamma'$            | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0,0016               | 0,1615                          | 20,096   | 7,456  | 7,929   | 0,1261  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0,0020               |                                 | 20,933   | 7,766  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0,0024               |                                 | 21,531   | 7,988  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0,0028               |                                 | 21,980   | 8,155  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0,0032               |                                 | 22,328   | 8,284  |   |   |
| $\eta'$              | $10^{-5}$                     | 0,0014               | 0,1346                          | 87,920   | 27,186   | 27,237  | 0,0367  |
|                      | $2 \cdot 10^{-5}$             | 0,0028               |                                 | 87,920   | 27,186   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-5}$             | 0,0043               |                                 | 90,013   | 27,833   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-5}$             | 0,0056               |                                 | 87,920   | 27,186   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0,0069               |                                 | 86,664   | 26,797   |   |   |
| $\delta'$            | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0,0024               | 0,1000                          | 3,014  | 0,692  | 0,718   | 1,3919  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0,0030               |                                 | 3,140  | 0,721  |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0,0035               |                                 | 2,140  | 0,721  |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0,0040               |                                 | 3,140  | 0,721  |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0,0046               |                                 | 3,209  | 0,737  |   |   |

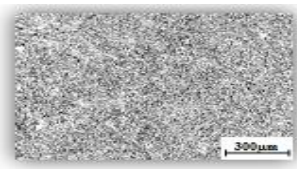
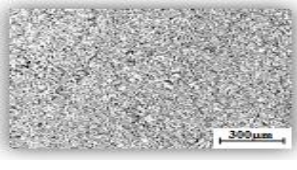
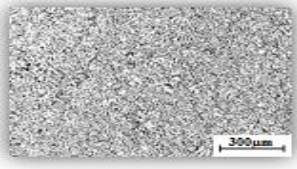
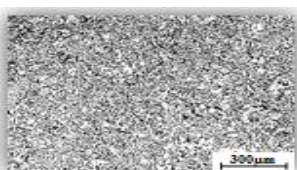
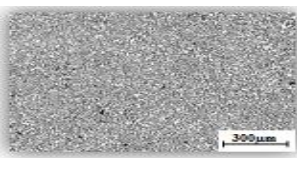
En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après laminage, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau de l'échantillon  $\alpha'$ ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon  $\delta'$ . Après laminage, la résistivité électrique a baissé soit concrètement comme pour les échantillons (A, 1, 4,  $\beta'$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma'$ ,...etc.), soit partiellement, comme pour les échantillons (D, 2, 5,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,...etc.), ou bien elle a radicalement ou partiellement augmenté, comme les échantillons (B, 2', 3',  $\alpha'$ ,  $\gamma'$ ,...etc.).

### 3. Echantillons laminés et recuits

#### 3.1. Distribution de l'eutectique

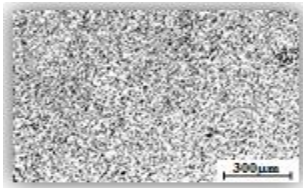
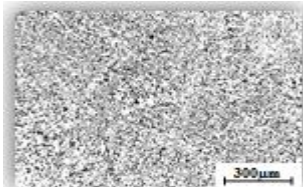
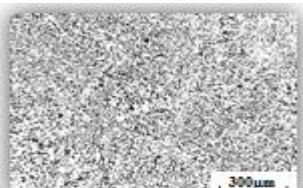
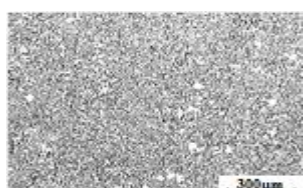
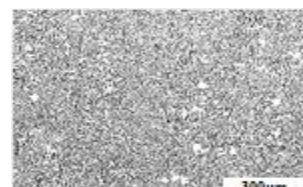
Les résultats de la micrographie et de la fraction de l'eutectique des alliages Pb-Sn et Sn-Zn respectivement, obtenus après traitement thermique (recuit) et suivant le sens de coulée, avec l'utilisation du logiciel "Imagej" pour traiter les images, sont illustrés dans les *tableaux (LVIII à LXVII)*.

**Tableau LVIII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit et leurs fractions pour de la colonne X de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne X</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| <b>A</b>            |    | 36.273                                   | <b>35,437 %</b>                      |
|                     |   | 36.087                                   |                                      |
|                     |   | 35.76                                    |                                      |
|                     |   | 33.611                                   |                                      |
|                     |   | 33.941                                   |                                      |
| <b>B</b>            |  | 37.563                                   | <b>34,554 %</b>                      |
|                     |   | 37.133                                   |                                      |
|                     |   | 36.896                                   |                                      |
|                     |   | 30.048                                   |                                      |
|                     |   | 31.132                                   |                                      |
| <b>C</b>            |  | 38.548                                   | <b>36,674 %</b>                      |
|                     |   | 36.983                                   |                                      |
|                     |   | 36.424                                   |                                      |
|                     |   | 35.908                                   |                                      |
|                     |   | 35.504                                   |                                      |
| <b>D</b>            |  | 41.900                                   | <b>40,948 %</b>                      |
|                     |   | 41.999                                   |                                      |
|                     |   | 40.372                                   |                                      |
|                     |   | 40.425                                   |                                      |
|                     |   | 40.048                                   |                                      |
| <b>E</b>            |  | 39.212                                   | <b>37,323 %</b>                      |
|                     |   | 37.049                                   |                                      |
|                     |   | 37.670                                   |                                      |
|                     |   | 36.396                                   |                                      |
|                     |   | 36.289                                   |                                      |

On remarque que la distribution obtenue est aléatoire suivant le sens de coulée tout en remarquant un pic de la fraction au niveau du dernier palier D ; avec des valeurs de fraction d'eutectique relativement proches et homogènes sur toute la surface de chaque échantillon.

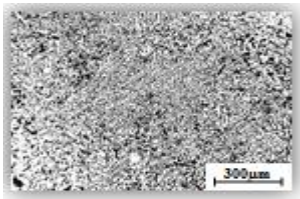
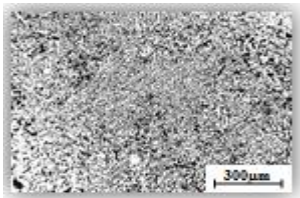
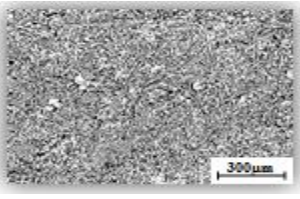
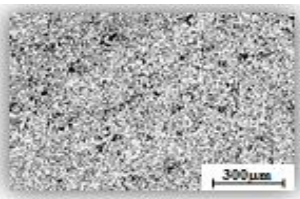
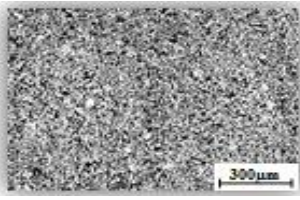
**Tableau LIX.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit et leurs fractions pour de la colonne Y de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Y</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| <b>1</b>            |    | 27.898                                   | <b>26,775%</b>                       |
|                     |   | 26.793                                   |                                      |
|                     |   | 26.825                                   |                                      |
|                     |   | 26.253                                   |                                      |
|                     |   | 26.107                                   |                                      |
| <b>2</b>            |    | 33.529                                   | <b>30,102 %</b>                      |
|                     |   | 32.575                                   |                                      |
|                     |   | 27.961                                   |                                      |
|                     |   | 26.717                                   |                                      |
|                     |   | 29.731                                   |                                      |
| <b>3</b>            |   | 37.601                                   | <b>36,756 %</b>                      |
|                     |   | 37.128                                   |                                      |
|                     |   | 36.951                                   |                                      |
|                     |   | 36.277                                   |                                      |
|                     |   | 35.827                                   |                                      |
| <b>4</b>            |  | 32.462                                   | <b>31,717 %</b>                      |
|                     |   | 31.100                                   |                                      |
|                     |   | 31.735                                   |                                      |
|                     |   | 30.771                                   |                                      |
|                     |   | 32.361                                   |                                      |
| <b>5</b>            |  | 34.254                                   | <b>34,135 %</b>                      |
|                     |   | 35.366                                   |                                      |
|                     |   | 33.350                                   |                                      |
|                     |   | 34.671                                   |                                      |
|                     |   | 33.037                                   |                                      |

On remarque que la distribution obtenue est aléatoire suivant le sens de coulée tout en remarquant un pic de la fraction au niveau du dernier palier 3 ; avec des valeurs de fraction d'eutectique relativement proches et homogènes sur toute la surface de chaque échantillon.

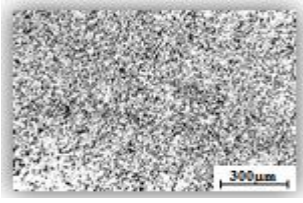
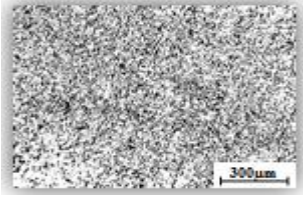
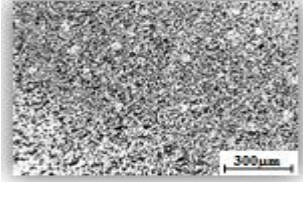
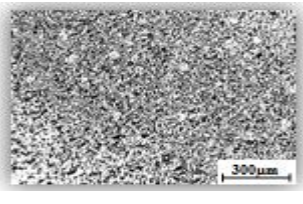
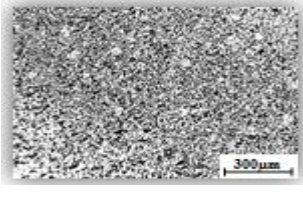


**Tableau LX.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit et leurs fractions pour de la colonne Y' de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Y'</i>   |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| 1'                  |    | 36.309                                   | <b>32,823 %</b>                      |
|                     |   | 34.147                                   |                                      |
|                     |   | 33.160                                   |                                      |
|                     |   | 30.589                                   |                                      |
|                     |   | 29.911                                   |                                      |
| 2'                  |    | 36.784                                   | <b>34,977 %</b>                      |
|                     |   | 36.397                                   |                                      |
|                     |   | 34.484                                   |                                      |
|                     |   | 33.505                                   |                                      |
|                     |   | 33.716                                   |                                      |
| 3'                  |   | 40.600                                   | <b>39,541 %</b>                      |
|                     |   | 40.385                                   |                                      |
|                     |   | 38.958                                   |                                      |
|                     |   | 38.214                                   |                                      |
|                     |   | 39.550                                   |                                      |
| 4'                  |  | 37.349                                   | <b>36,151 %</b>                      |
|                     |   | 38.405                                   |                                      |
|                     |   | 35.757                                   |                                      |
|                     |   | 34.380                                   |                                      |
|                     |   | 34.865                                   |                                      |
| 5'                  |  | 34.837                                   | <b>32,517 %</b>                      |
|                     |   | 32.866                                   |                                      |
|                     |   | 32.666                                   |                                      |
|                     |   | 31.339                                   |                                      |
|                     |   | 30.878                                   |                                      |

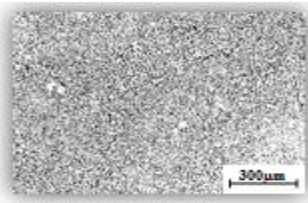
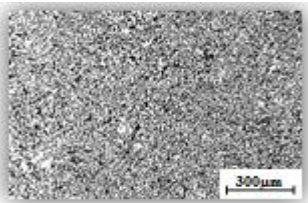
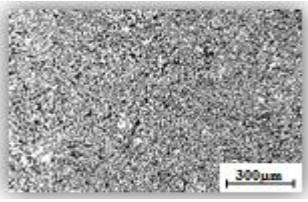
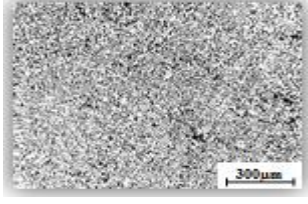
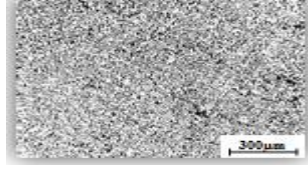
On remarque que la distribution obtenue est croissante suivant le sens de coulée jusqu'à l'échantillon 3' suivie d'une décroissance ; avec des valeurs de fraction d'eutectique relativement proches et homogènes sur toute la surface de chaque échantillon.

**Tableau LXI.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit et leurs fractions pour de la colonne Z de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Z</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| $\alpha$            |    | 38.952                                   | <b>35,938 %</b>                      |
|                     |   | 37.928                                   |                                      |
|                     |   | 36.430                                   |                                      |
|                     |   | 34.584                                   |                                      |
|                     |   | 31.798                                   |                                      |
| $\beta$             |    | 44.164                                   | <b>41,969 %</b>                      |
|                     |   | 42.615                                   |                                      |
|                     |   | 42.203                                   |                                      |
|                     |   | 41.381                                   |                                      |
|                     |   | 39.482                                   |                                      |
| $\gamma$            |  | 37.222                                   | <b>36,111 %</b>                      |
|                     |   | 36.506                                   |                                      |
|                     |   | 35.156                                   |                                      |
|                     |   | 35.880                                   |                                      |
|                     |   | 35.789                                   |                                      |
| $\eta$              |  | 33.811                                   | <b>33,222 %</b>                      |
|                     |   | 33.304                                   |                                      |
|                     |   | 33.578                                   |                                      |
|                     |   | 32.769                                   |                                      |
|                     |   | 32.649                                   |                                      |
| $\delta$            |  | 38.040                                   | <b>35,956 %</b>                      |
|                     |   | 37.201                                   |                                      |
|                     |   | 35.362                                   |                                      |
|                     |   | 33.926                                   |                                      |
|                     |   | 35.251                                   |                                      |


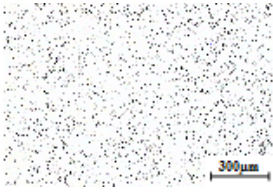
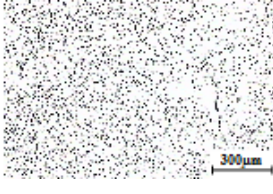
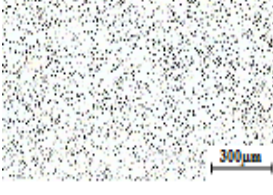

On remarque que la distribution obtenue est aléatoire suivant le sens de coulée tout en ayant un pic au niveau de l'échantillon  $\beta$  ; avec des valeurs de fraction d'eutectique relativement proches et homogènes sur toute la surface de chaque échantillon.

**Tableau LXII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit, et leurs fractions pour de la colonne Z' de l'alliage Pb-Sn.

| <i>Colonne Z'</i>   |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Pb des différentes plages</i> | <i>% moyen en Pb de l'eutectique</i> |
| $\alpha'$           |    | 30.610                                   | <b>29,227%</b>                       |
|                     |   | 29.818                                   |                                      |
|                     |   | 29.513                                   |                                      |
|                     |   | 28.278                                   |                                      |
|                     |   | 27.919                                   |                                      |
| $\beta'$            |    | 33.663                                   | <b>32,660 %</b>                      |
|                     |   | 33.421                                   |                                      |
|                     |   | 32.810                                   |                                      |
|                     |   | 31.933                                   |                                      |
|                     |   | 31.473                                   |                                      |
| $\gamma'$           |   | 38.260                                   | <b>37,876%</b>                       |
|                     |   | 38.377                                   |                                      |
|                     |   | 39.598                                   |                                      |
|                     |   | 36.209                                   |                                      |
|                     |   | 36.940                                   |                                      |
| $\eta'$             |  | 37.920                                   | <b>36,095 %</b>                      |
|                     |   | 36.445                                   |                                      |
|                     |   | 34.336                                   |                                      |
|                     |   | 37.285                                   |                                      |
|                     |   | 34.493                                   |                                      |
| $\delta'$           |  | 36.531                                   | <b>35,015%</b>                       |
|                     |   | 34.797                                   |                                      |
|                     |   | 35.214                                   |                                      |
|                     |   | 34.712                                   |                                      |
|                     |   | 33.819                                   |                                      |


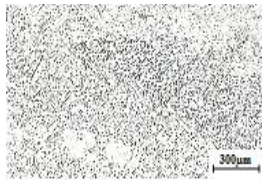
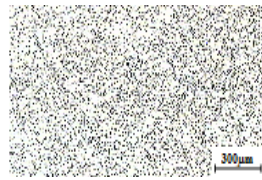

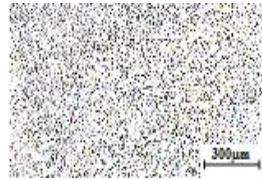
On remarque que la distribution obtenue est croissante suivant le sens de coulée jusqu'à l'échantillon  $\gamma'$ , pour décroître jusqu'à l'échantillon  $\delta'$  ; avec des valeurs de fraction d'eutectique relativement proches et homogènes sur toute la surface de chaque échantillon.

**Tableau LXIII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit, et leurs fractions pour de la colonne Z' de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne X</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| <b>G</b>            |    | 5%                                       | 6.8%                                 |
|                     |   | 8%                                       |                                      |
|                     |   | 6%                                       |                                      |
|                     |   | 9%                                       |                                      |
|                     |   | 6%                                       |                                      |
| <b>H</b>            |    | 7%                                       | 9.2%                                 |
|                     |   | 9%                                       |                                      |
|                     |   | 9%                                       |                                      |
|                     |   | 11%                                      |                                      |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
| <b>i</b>            |  | 14%                                      | 11.4%                                |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
|                     |   | 11%                                      |                                      |
| <b>J</b>            |  | 11%                                      | 11.0 %                               |
|                     |   | 11%                                      |                                      |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
|                     |   | 11%                                      |                                      |
| <b>K</b>            |  | 15%                                      | 15.6%                                |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 17%                                      |                                      |

On remarque qu'après traitement d'homogénéisation pour ce qui concerne la colonne X, la distribution de l'eutectique s'est étendue sur toute la surface de l'échantillon d'une façon homogène et cela à travers une décroissance uniforme, suivant le sens de coulée ; avec des valeurs qui tournent autour de la valeur théorique de l'eutectique accompagnée d'un maximum constaté au niveau du bas de la plaquette, échantillon K.

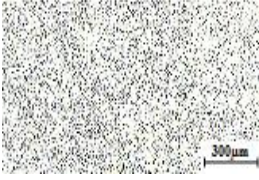
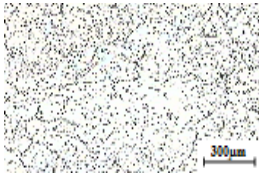
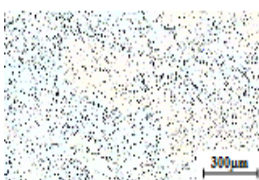

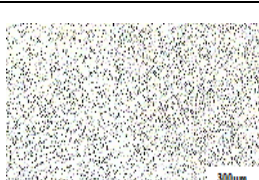
**Tableau LXIV.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit, et leurs fractions pour de la colonne Y de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Y</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| 6                   |    | 24%                                      | 20.8%                                |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
|                     |   | 24%                                      |                                      |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
| 7                   |    | 20%                                      | 20.4%                                |
|                     |   | 23%                                      |                                      |
|                     |   | 19%                                      |                                      |
|                     |   | 21%                                      |                                      |
|                     |   | 19%                                      |                                      |
| 8                   |   | 19%                                      | 19.6%                                |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
|                     |   | 19%                                      |                                      |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
| 9                   |  | 15%                                      | 17.0%                                |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 19%                                      |                                      |
|                     |   | 18%                                      |                                      |
|                     |   | 18%                                      |                                      |
| 10                  |  | 21%                                      | 21.6%                                |
|                     |   | 21%                                      |                                      |
|                     |   | 21%                                      |                                      |
|                     |   | 22%                                      |                                      |
|                     |   | 23%                                      |                                      |

On remarque qu'après traitement d'homogénéisation pour ce qui concerne la colonne Y, la distribution de l'eutectique s'est étendue sur toute la surface de l'échantillon d'une façon homogène et cela à travers une décroissance uniforme, suivant le sens de coulée ; avec des valeurs assez soutenues reflétant la distribution de l'eutectique accompagnée d'un maximum constaté au niveau du bas de la plaquette, échantillon 10.



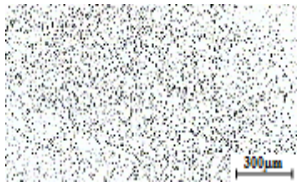
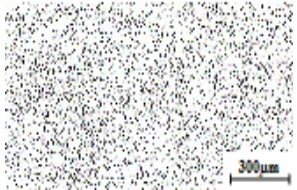

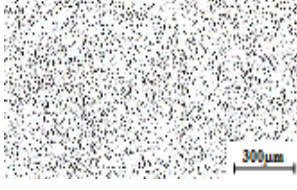

**Tableau LXV.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit, et leurs fractions pour de la colonne Y' de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Y'</i>   |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| 6'                  |    | 21%                                      | 21.0%                                |
|                     |   | 23%                                      |                                      |
|                     |   | 21%                                      |                                      |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
| 7'                  |    | 16%                                      | 13.8%                                |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
|                     |   | 14%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
| 8'                  |   | 10%                                      | 9.2%                                 |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
|                     |   | 8%                                       |                                      |
|                     |   | 8%                                       |                                      |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
| 9'                  |  | 16%                                      | 11.4%                                |
|                     |   | 17%                                      |                                      |
|                     |   | 17%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
|                     |   | 18%                                      |                                      |
| 10'                 |  | 14%                                      | 15.0%                                |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |

On remarque qu'après traitement d'homogénéisation pour ce qui concerne la colonne Y', la distribution de l'eutectique s'est étendue sur toute la surface de l'échantillon d'une façon homogène et cela à travers une décroissance uniforme, suivant le sens de coulée jusqu'au palier 8', suivie d'une croissance pour atteindre une valeur de 15%<sub>Zn</sub> au niveau du dernier palier 10'; accompagnée d'un maximum constaté au niveau de l'échantillon 6'.


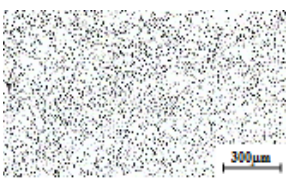
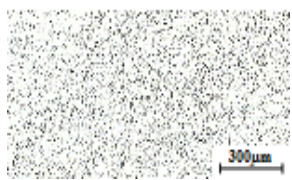
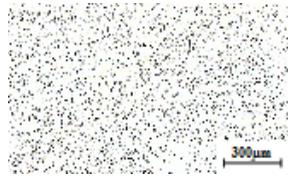
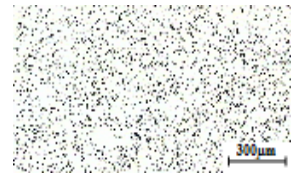


**Tableau LXVI.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit, et leurs fractions pour de la colonne Z de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Z</i>    |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| <b>I</b>            |    | 16%                                      | 15.2%                                |
|                     |   | 14%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 18%                                      |                                      |
|                     |   | 13%                                      |                                      |
| <b>II</b>           |    | 16%                                      | 15.4%                                |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 17%                                      |                                      |
|                     |   | 14%                                      |                                      |
| <b>III</b>          |   | 15%                                      | 14.2%                                |
|                     |   | 11%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
| <b>IV</b>           |  | 12%                                      | 15.0%                                |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 14%                                      |                                      |
|                     |   | 18%                                      |                                      |
| <b>V</b>            |  | 18%                                      | 17.6%                                |
|                     |   | 18%                                      |                                      |
|                     |   | 20%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |

On remarque qu'après traitement d'homogénéisation pour ce qui concerne la colonne Y, la distribution de l'eutectique s'est étendue sur toute la surface de l'échantillon d'une façon homogène et cela à travers une distribution aléatoire, suivant le sens de coulée ; avec des valeurs assez soutenues reflétant la distribution de l'eutectique accompagnée d'un maximum constaté au niveau du bas de la plaquette, échantillon V.

**Tableau LXVII.** Micrographie des lamelles de l'eutectique après laminage suivie d'un recuit, et leurs fractions pour de la colonne Z' de l'alliage Sn-Zn.

| <i>Colonne Z'</i>   |   |  |                                      |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|
| <i>Échantillons</i> | <i>Micrographie</i>   | <i>Le % du Zn des différentes plages</i> | <i>% moyen en Zn de l'eutectique</i> |
| I'                  |    | 19%                                      | 18.2%                                |
|                     |   | 18%                                      |                                      |
|                     |   | 19%                                      |                                      |
|                     |   | 19%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
| II'                 |    | 12%                                      | 11.4%                                |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
|                     |   | 13%                                      |                                      |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
| III'                |   | 15%                                      | 15.8%                                |
|                     |   | 17%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
|                     |   | 14%                                      |                                      |
|                     |   | 17%                                      |                                      |
| IV'                 |  | 11%                                      | 10.8%                                |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
|                     |   | 11%                                      |                                      |
|                     |   | 10%                                      |                                      |
| V'                  |  | 13%                                      | 14.2%                                |
|                     |   | 12%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |
|                     |   | 16%                                      |                                      |
|                     |   | 15%                                      |                                      |

On remarque qu'après traitement d'homogénéisation pour ce qui concerne les deux colonnes Z', la distribution de l'eutectique s'est étendue sur toute la surface de l'échantillon d'une façon homogène et cela à travers une distribution aléatoire relativement uniforme, suivant le sens de coulée ; avec des valeurs assez soutenues reflétant la distribution de l'eutectique à l'état brut, accompagnée d'un maximum constaté au niveau des paliers I' respectivement.

### 3.2. Résistivité électrique

Les résultats de la résistivité électrique des alliages Pb-Sn et Sn-Zn respectivement, obtenus après recuit et suivant le sens de coulée sont illustrés dans les *tableaux (LXVIII à LVII)*.

**Tableau LXVIII.** Résistivité électrique de la colonne X de l'alliage Pb-Sn après laminage suivie d'un recuit.

| Colonne X            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| A                    | $5.10^{-5}$                   | 0,0018               | 0,1846                          | 22,608  | 9,587   | 9,306   | 0,1074   |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0,0021               |                                 | 21,980  | 9,321   |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0,0024               |                                 | 21,531  | 9,131   |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0,0028               |                                 | 21,980  | 9,321   |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0,0031               |                                 | 21,631  | 9,173   |   |  |
| B                    | $10^{-5}$                     | 0,0014               | 0,1731                          | 87,920  | 3,496   | 3,496   | 0,2860   |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0,0028               |                                 | 87,920  | 3,496   |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0,0042               |                                 | 87,920  | 3,496   |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0,0056               |                                 | 87,920  | 3,496   |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0,0070               |                                 | 87,920  | 3,496   |   |  |
| C                    | $5.10^{-4}$                   | 0,0020               | 0,1961                          | 2,512   | 1,131   | 1,293   | 0,7729   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0024               |                                 | 2,512   | 1,131   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0028               |                                 | 2,512   | 1,131   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0032               |                                 | 2,512   | 1,131   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0038               |                                 | 2,651   | 1,945   |   |  |
| D                    | $5.10^{-4}$                   | 0,0010               | 0,1923                          | 1,256   | 0,554   | 0,584   | 1,7105   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0013               |                                 | 1,360   | 0,601   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0015               |                                 | 1,345   | 0,594   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0017               |                                 | 1,334   | 0,589   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0019               |                                 | 1,325   | 0,585   |   |  |
| E                    | $5.10^{-4}$                   | 0,0010               | 0,1885                          | 1,256   | 0,543   | 0,543   | 1,8416   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0012               |                                 | 1,256   | 0,543   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0014               |                                 | 1,256   | 0,543   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0016               |                                 | 1,256   | 0,543   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0018               |                                 | 1,256   | 0,543   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon, et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après traitement thermique, on remarque une répartition décroissante suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier A ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon E.

**Tableau LXIX.** Résistivité électrique de la colonne Y de l'alliage Pb-Sn après laminage suivie d'un recuit.

| Colonne Y                |                               |                      |                                     |   |   |   |  |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon $n$ | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon $n$ [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{mov}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| 1                        | $5.10^{-4}$                   | 0,0048               | 0,1885                              | 6,028   | 2,610   | 2,637   | 0,3791   |
|                          | $6.10^{-4}$                   | 0,0058               |                                     | 6,070   | 2,628   |   |  |
|                          | $7.10^{-4}$                   | 0,0068               |                                     | 6,100   | 2,641   |   |  |
|                          | $8.10^{-4}$                   | 0,0078               |                                     | 6,123   | 2,651   |   |  |
|                          | $9.10^{-4}$                   | 0,0088               |                                     | 6,140   | 2,659   |   |  |
| 2                        | $10^{-3}$                     | 0,0011               | 0,1923                              | 0,690   | 0,305   | 0,313   | 3,1948   |
|                          | $2.10^{-3}$                   | 0,0023               |                                     | 0,722   | 0,319   |   |  |
|                          | $3.10^{-3}$                   | 0,0034               |                                     | 0,711   | 0,314   |   |  |
|                          | $4.10^{-3}$                   | 0,0045               |                                     | 0,706   | 0,312   |   |  |
|                          | $5.10^{-3}$                   | 0,0057               |                                     | 0,715   | 0,316   |   |  |
| 3                        | $10^{-5}$                     | 0,0022               | 0,1961                              | 138,160   | 62,240  | 62,513  | 0,0159   |
|                          | $2.10^{-5}$                   | 0,0043               |                                     | 135,020   | 60,826  |   |  |
|                          | $3.10^{-5}$                   | 0,0067               |                                     | 140,253   | 63,183  |   |  |
|                          | $4.10^{-5}$                   | 0,0089               |                                     | 139,730   | 62,948  |   |  |
|                          | $5.10^{-5}$                   | 0,0112               |                                     | 140,672   | 63,372  |   |  |
| 4                        | $5.10^{-6}$                   | 0,0027               | 0,1856                              | 339,120   | 143,813   | 147,877   | $6,7623.10^{-3}$   |
|                          | $6.10^{-6}$                   | 0,0033               |                                     | 345,400   | 146,476   |   |  |
|                          | $7.10^{-6}$                   | 0,0039               |                                     | 349,885   | 148,379   |   |  |
|                          | $8.10^{-6}$                   | 0,0045               |                                     | 353,250   | 149,805   |   |  |
|                          | $9.10^{-6}$                   | 0,0051               |                                     | 355,866   | 150,915   |   |  |
| 5                        | $5.10^{-4}$                   | 0,0016               | 0,2038                              | 2,009   | 0,937   | 0,944   | 1,0593   |
|                          | $6.10^{-4}$                   | 0,0019               |                                     | 1,988   | 0,927   |   |  |
|                          | $7.10^{-4}$                   | 0,0023               |                                     | 2,063   | 0,962   |   |  |
|                          | $8.10^{-4}$                   | 0,0026               |                                     | 2,041   | 0,951   |   |  |
|                          | $9.10^{-4}$                   | 0,0029               |                                     | 2,023   | 0,943   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon, et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après traitement thermique, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier 4 ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 2.

**Tableau LXX.** Résistivité électrique de la colonne Y' de l'alliage Pb-Sn après laminage suivie d'un recuit.

| Colonne Y'           |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{mov}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| 1'                   | $10^{-3}$                     | 0,0013               | 0,1615                          | 0,816   | 6,523   | 7,642   | 0,1308   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0,0025               |                                 | 0,785   | 6,601   |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0,0038               |                                 | 0,795   | 7,322   |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0,0051               |                                 | 0,800   | 8,446   |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0,0064               |                                 | 0,803   | 9,319   |   |  |
| 2'                   | $10^{-4}$                     | 0,0012               | 0,1654                          | 7,536   | 2,863   | 2,770   | 0,3609   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0023               |                                 | 7,222   | 2,744   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0,0035               |                                 | 7,326   | 2,783   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0,0046               |                                 | 7,222   | 2,744   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0,0057               |                                 | 7,159   | 2,720   |   |  |
| 3'                   | $5.10^{-4}$                   | 0,0019               | 0,1577                          | 2,386   | 0,864   | 0,996   | 1,0036   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0025               |                                 | 2,616   | 0,947   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0031               |                                 | 2,781   | 1,007   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0037               |                                 | 2,904   | 1,052   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0044               |                                 | 3,070   | 1,112   |   |  |
| 4'                   | $5.10^{-4}$                   | 0,0010               | 0,1846                          | 1,256   | 0,532   | 0,532   | 1,8796   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0012               |                                 | 1,256   | 0,532   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0014               |                                 | 1,256   | 0,532   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0016               |                                 | 1,256   | 0,532   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0018               |                                 | 1,256   | 0,532   |   |  |
| 5'                   | $5.10^{-4}$                   | 0,0012               | 0,2077                          | 1,507   | 0,716   | 0,725   | 1,3789   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0015               |                                 | 1,570   | 0,746   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0017               |                                 | 1,525   | 0,725   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0019               |                                 | 1,491   | 0,709   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0022               |                                 | 1,535   | 0,730   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon, et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après traitement thermique, on remarque une répartition décroissante suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier 1'; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 4'.

**Tableau LXXI.** Résistivité électrique après recuit, colonne Z de la plaquette de l'alliage Pb-Sn.

| Colonne Z            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{mov}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| $\alpha$             | $5.10^{-4}$                   | 0,0040               | 0,1923                          | 5,024   | 2,219   | 2,219   | 0,4506   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0048               |                                 | 5,024   | 2,219   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0056               |                                 | 5,024   | 2,219   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0064               |                                 | 5,024   | 2,219   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0072               |                                 | 5,024   | 2,219   |   |  |
| $\beta$              | $10^{-3}$                     | 0,0014               | 0,1923                          | 0,879   | 0,388   | 0,380   | 2,6260   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0,0027               |                                 | 0,847   | 0,374   |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0,0041               |                                 | 0,858   | 0,379   |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0,0055               |                                 | 0,863   | 0,381   |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0,0069               |                                 | 0,866   | 0,382   |   |  |
| $\gamma$             | $5.10^{-4}$                   | 0,0028               | 0,1885                          | 3,516   | 1,522   | 1,592   | 0,6279   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0035               |                                 | 3,663   | 1,586   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0041               |                                 | 3,678   | 1,592   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0048               |                                 | 3,768   | 1,631   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0054               |                                 | 3,768   | 1,631   |   |  |
| $\eta$               | $5.10^{-4}$                   | 0,0028               | 0,1962                          | 3,516   | 1,585   | 1,599   | 0,6250   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0034               |                                 | 3,558   | 1,603   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0040               |                                 | 3,588   | 1,616   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0045               |                                 | 3,532   | 1,592   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0051               |                                 | 3,558   | 1,603   |   |  |
| $\delta$             | $5.10^{-5}$                   | 0,0040               | 0,2154                          | 50,240  | 24,860  | 26,533  | 0,0376   |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0,0049               |                                 | 51,286  | 25,378  |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0,0059               |                                 | 61,753  | 26,192  |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0,0071               |                                 | 55,735  | 27,578  |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0,0083               |                                 | 57,915  | 28,658  |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après traitement thermique, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier  $\delta$ ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon  $\beta$ .



**Tableau LXXII.** Résistivité électrique après recuit, colonne Z' de la plaquette de l'alliage Pb-Sn.

| Colonne Z'           |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| $\alpha'$            | $5.10^{-4}$                   | 0,0035               | 0,1692                          | 4,396   | 1,708   | 1,676   | 0,5965   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0041               |                                 | 4,291   | 1,668   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0048               |                                 | 4,306   | 1,673   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0055               |                                 | 4,317   | 1,678   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0061               |                                 | 4,256   | 1,654   |   |  |
| $\beta'$             | $5.10^{-4}$                   | 0,0018               | 0,1577                          | 2,260   | 0,819   | 0,811   | 1,2318   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0021               |                                 | 2,198   | 0,796   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0025               |                                 | 2,242   | 0,812   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0029               |                                 | 2,276   | 0,824   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0032               |                                 | 2,232   | 0,808   |   |  |
| $\gamma'$            | $5.10^{-4}$                   | 0,0038               | 0,1615                          | 4,772   | 1,770   | 1,695   | 0,5896   |
|                      | $6.10^{-4}$                   | 0,0045               |                                 | 4,710   | 1,747   |   |  |
|                      | $7.10^{-4}$                   | 0,0051               |                                 | 4,575   | 1,697   |   |  |
|                      | $8.10^{-4}$                   | 0,0057               |                                 | 4,474   | 1,660   |   |  |
|                      | $9.10^{-4}$                   | 0,0062               |                                 | 4,326   | 1,605   |   |  |
| $\eta'$              | $5.10^{-5}$                   | 0,0030               | 0,1346                          | 37,680  | 11,651  | 11,651  | 0,0858   |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0,0036               |                                 | 37,670  | 11,651  |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0,0042               |                                 | 37,670  | 11,651  |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0,0048               |                                 | 37,670  | 11,651  |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0,0054               |                                 | 37,670  | 11,651  |   |  |
| $\delta'$            | $10^{-4}$                     | 0,0015               | 0,1000                          | 9,420   | 2,164   | 2,745   | 0,3642   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0,0035               |                                 | 10,990  | 2,524   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0,0056               |                                 | 11,722  | 2,693   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0,0080               |                                 | 12,560  | 2,885   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0,0120               |                                 | 15,072  | 3,462   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après traitement thermique, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier  $\eta'$ ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon  $\beta'$ .

On remarque qu'après traitement d'homogénéisation, la résistivité électrique est descendue dans la majorité des cas, soit concrètement ou partiellement, avec quelques cas particulier où on remarque une augmentation considérable, comme pour les échantillons (3, 4,1' et  $\delta$ ).

**Tableau LXXIII.** Résistivité électrique de la colonne X de l'alliage Sn-Zn après laminage suivie d'un recuit.

| Colonne X            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{mov}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| G                    | $10^{-4}$                     | 0.0167               | 0.0844                          | 104.8760  | 20.4298   | 20.5501   | 0.0487   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0337               |                                 | 105.8180  | 20.6133   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0500               |                                 | 104.6666  | 20.3890   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0675               |                                 | 105.9750  | 20.6439   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0845               |                                 | 106.1320  | 20.6745   |   |  |
| H                    | $10^{-3}$                     | 0.0090               | 0.0546                          | 5.6520  | 0.7122  | 0.7122  | 1.4041   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0.0180               |                                 | 5.6520  | 0.7122  |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0.0270               |                                 | 5.6520  | 0.7122  |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0.0360               |                                 | 5.6520  | 0.7122  |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0.0450               |                                 | 5.6520  | 0.7122  |   |  |
| i                    | $10^{-4}$                     | 0.0021               | 0.0500                          | 13.1250   | 1.5212  | 1.4941  | 0.6693   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0041               |                                 | 12.8125   | 1.4849  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0061               |                                 | 12.7083   | 1.4729  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0082               |                                 | 12.8125   | 1.4849  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0104               |                                 | 13.0000   | 1.5067  |   |  |
| j                    | $10^{-4}$                     | 0.0011               | 0.0450                          | 6.8750  | 0.7171  | 0.7256  | 1.3782   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0022               |                                 | 6.8750  | 0.7171  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0033               |                                 | 6.8750  | 0.7171  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0045               |                                 | 7.0313  | 0.7334  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0057               |                                 | 7.1250  | 0.7431  |   |  |
| K                    | $10^{-4}$                     | 0.0019               | 0.1117                          | 11.9320   | 3.0749  | 3.0964  | 0.3230   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0038               |                                 | 11.9320   | 3.0749  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0057               |                                 | 11.9320   | 3.0749  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0077               |                                 | 12.0890   | 3.1165  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0097               |                                 | 12.1832   | 3.1408  |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après recuit, on remarque une répartition aléatoire, suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier G ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon H.

**Tableau LXXIV.** Résistivité électrique de la colonne Y de l'alliage Sn-Zn après laminage suivie d'un recuit.

| Colonne Y            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| 6                    | $10^{-4}$                     | 0.0015               | 0.0500                          | 9.3750  | 1.0866  | 1.1073  | 0.9031   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0030               |                                 | 9.3750  | 1.0866  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0046               |                                 | 9.5833  | 1.1107  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0062               |                                 | 9.6875  | 1.1228  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0078               |                                 | 9.7500  | 1.1300  |   |  |
| 7                    | $10^{-3}$                     | 0.0125               | 0.0819                          | 7.8500  | 1.4837  | 1.4738  | 0.6785   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0.0247               |                                 | 7.7558  | 1.4658  |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0.0369               |                                 | 7.7244  | 1.4599  |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0.0499               |                                 | 7.8343  | 1.4807  |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0.0623               |                                 | 7.8248  | 1.4789  |   |  |
| 8                    | $10^{-3}$                     | 0.0069               | 0.0550                          | 4.3125  | 0.5498  | 0.5723  | 1.7475   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0.0142               |                                 | 4.4375  | 0.5658  |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0.0215               |                                 | 4.4791  | 0.5711  |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0.0292               |                                 | 4.5625  | 0.5817  |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0.0372               |                                 | 4.6500  | 0.5929  |   |  |
| 9                    | $10^{-5}$                     | 0.0021               | 0.0645                          | 334.3949  | 49.7580   | 29.9429   | 0.0334   |
|                      | $2.10^{-5}$                   | 0.0042               |                                 | 131.8800  | 19.6237   |   |  |
|                      | $3.10^{-5}$                   | 0.0064               |                                 | 133.9733  | 19.9352   |   |  |
|                      | $4.10^{-5}$                   | 0.0086               |                                 | 135.0200  | 20.0909   |   |  |
|                      | $5.10^{-5}$                   | 0.0109               |                                 | 136.9040  | 20.3713   |   |  |
| 10                   | $10^{-4}$                     | 0.0092               | 0.0650                          | 57.5000   | 8.6653  | 8.6216  | 0.1159   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0183               |                                 | 57.1875   | 8.6182  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0274               |                                 | 57.0833   | 8.6025  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0365               |                                 | 57.0313   | 8.5946  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0458               |                                 | 57.2500   | 8.6276  |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après recuit, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier 9 ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 8.

**Tableau LXXV.** Résistivité électrique de la colonne Y' de l'alliage Sn-Zn après laminage suivie d'un recuit.

| Colonne Y'           |                               |                      |                                 |  |  |   |   |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--|--|---|---|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{\text{moy}}$ ) [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] |
| 6'                   | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0016               | 0.0943                          | 20.0960  | 4.3729   | 4.3679  | 0.2289  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0019               |                                 | 19.8866  | 4.3273   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0022               |                                 | 19.7371  | 4.2948   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0026               |                                 | 20.4100  | 4.4412   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0029               |                                 | 20.2355  | 4.4032   |   |   |
| 7'                   | $10^{-4}$                     | 0.0051               | 0.0600                          | 31.8750  | 10.1713  | 11.5514   | 0.0866  |
|                      | $2 \cdot 10^{-4}$             | 0.0111               |                                 | 34.6875  | 11.0688  |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-4}$             | 0.0177               |                                 | 36.8750  | 11.7668  |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-4}$             | 0.0242               |                                 | 37.8125  | 12.0659  |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0318               |                                 | 39.7500  | 12.6842  |   |   |
| 8'                   | $5 \cdot 10^{-4}$             | 0.0045               | 0.0900                          | 5.6250   | 1.1739   | 1.2010  | 0.8327  |
|                      | $6 \cdot 10^{-4}$             | 0.0055               |                                 | 5.7292   | 1.1957   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-4}$             | 0.0065               |                                 | 5.8036   | 1.2112   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-4}$             | 0.0074               |                                 | 5.7813   | 1.2066   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-4}$             | 0.0084               |                                 | 5.8333   | 1.2174   |   |   |
| 9'                   | $10^{-3}$                     | 0.0031               | 0.0950                          | 1.9375   | 0.4268   | 0.4193  | 2.3848  |
|                      | $2 \cdot 10^{-3}$             | 0.0061               |                                 | 1.9063   | 0.4199   |   |   |
|                      | $3 \cdot 10^{-3}$             | 0.0091               |                                 | 1.8958   | 0.4176   |   |   |
|                      | $4 \cdot 10^{-3}$             | 0.0121               |                                 | 1.8906   | 0.4165   |   |   |
|                      | $5 \cdot 10^{-3}$             | 0.0151               |                                 | 1.8875   | 0.4158   |   |   |
| 10'                  | $5 \cdot 10^{-5}$             | 0.0011               | 0.1043                          | 13.8160  | 3.3241   | 3.2472  | 0.3080  |
|                      | $6 \cdot 10^{-5}$             | 0.0013               |                                 | 13.6066  | 3.2737   |   |   |
|                      | $7 \cdot 10^{-5}$             | 0.0015               |                                 | 13.4571  | 3.2378   |   |   |
|                      | $8 \cdot 10^{-5}$             | 0.0017               |                                 | 13.3450  | 3.2108   |   |   |
|                      | $9 \cdot 10^{-5}$             | 0.0019               |                                 | 13.2577  | 3.1898   |   |   |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après recuit, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier 7' ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon 9'.

**Tableau LXXVI.** Résistivité électrique de la colonne Z de l'alliage Sn-Zn après laminage suivie d'un recuit.

| Colonne Z            |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{mov}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| I                    | $10^{-4}$                     | 0.0089               | 0.0700                          | 55.6250   | 9.0279  | 8.5000  | 0.1176   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0173               |                                 | 54.0625   | 8.7743  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0258               |                                 | 53.7500   | 8.7236  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0348               |                                 | 54.3750   | 7.2101  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0432               |                                 | 54.0000   | 8.7642  |   |  |
| II                   | $10^{-4}$                     | 0.0094               | 0.0500                          | 58.7500   | 6.8091  | 6.6717  | 0.1499   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0183               |                                 | 57.1875   | 6.6280  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0275               |                                 | 57.2917   | 6.6401  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0367               |                                 | 57.3438   | 6.6462  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0458               |                                 | 57.2500   | 6.6353  |   |  |
| III                  | $10^{-4}$                     | 0.0025               | 0.0550                          | 15.6250   | 1.9922  | 2.1829  | 0.4581   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0054               |                                 | 16.8750   | 2.1516  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0083               |                                 | 17.2917   | 2.2047  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0114               |                                 | 17.8125   | 2.2711  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0144               |                                 | 18.0000   | 2.2950  |   |  |
| IV                   | $5.10^{-5}$                   | 0.0034               | 0.0943                          | 42.7040   | 9.2923  | 9.3619  | 0.1068   |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0.0041               |                                 | 42.9133   | 9.3379  |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0.0048               |                                 | 43.0628   | 9.3705  |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0.0055               |                                 | 43.1750   | 9.3949  |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0.0062               |                                 | 43.2622   | 9.4139  |   |  |
| V                    | $5.10^{-5}$                   | 0.0050               | 0.1150                          | 62.5000   | 16.6688   | 16.6212   | 0.0602   |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0.0060               |                                 | 62.5000   | 16.6688   |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0.0069               |                                 | 61.6071   | 16.4306   |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0.0080               |                                 | 62.5000   | 16.6688   |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0.0090               |                                 | 62.5000   | 16.6688   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après recuit, on remarque une répartition aléatoire suivant le sens de coulée avec un pic au niveau du palier V ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon III.

**Tableau LXXVII.** Résistivité électrique de la colonne Z' de l'alliage Sn-Zn après laminage suivie d'un recuit.

| Colonne Z'           |                               |                      |                                 |   |   |   |  |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|---|---|---|--|
| Nom de l'échantillon | Courant électrique imposé [A] | Tension engendré [V] | Epaisseur de l'échantillon [cm] | Résistivité électrique ( $\rho_0$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique ( $\rho$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Résistivité électrique moyenne ( $\rho_{moy}$ ) [ $\Omega.cm$ ] | Conductivité électrique ( $\sigma$ ) [ $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ ] |
| I'                   | $10^{-3}$                     | 0.0095               | 0.1167                          | 5.9660  | 1.6066  | 1.6530  | 0.6050   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0.0190               |                                 | 5.9660  | 1.6066  |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0.0285               |                                 | 5.9660  | 1.6066  |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0.0406               |                                 | 6.3742  | 1.7166  |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0.0511               |                                 | 6.4181  | 1.7284  |   |  |
| II'                  | $10^{-4}$                     | 0.0019               | 0.1216                          | 11.9320   | 3.3481  | 3.3823  | 0.2957   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0038               |                                 | 11.9320   | 3.3481  |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0058               |                                 | 12.1413   | 3.4068  |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0077               |                                 | 12.0890   | 3.3898  |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0097               |                                 | 12.1832   | 3.4186  |   |  |
| III'                 | $5.10^{-5}$                   | 0.0021               | 0.1043                          | 26.3760   | 6.3460  | 6.6655  | 0.1500   |
|                      | $6.10^{-5}$                   | 0.0025               |                                 | 26.1666   | 6.4756  |   |  |
|                      | $7.10^{-5}$                   | 0.0030               |                                 | 26.9143   | 7.0085  |   |  |
|                      | $8.10^{-5}$                   | 0.0034               |                                 | 26.6900   | 6.9500  |   |  |
|                      | $9.10^{-5}$                   | 0.0039               |                                 | 27.2133   | 6.5475  |   |  |
| IV'                  | $10^{-3}$                     | 0.0130               | 0.1092                          | 8.1640  | 2.0573  | 2.1496  | 0.4652   |
|                      | $2.10^{-3}$                   | 0.0270               |                                 | 8.4780  | 2.1364  |   |  |
|                      | $3.10^{-3}$                   | 0.0410               |                                 | 8.5826  | 2.1628  |   |  |
|                      | $4.10^{-3}$                   | 0.0550               |                                 | 8.6350  | 2.1760  |   |  |
|                      | $5.10^{-3}$                   | 0.0700               |                                 | 8.7920  | 2.2156  |   |  |
| V'                   | $10^{-4}$                     | 0.0148               | 0.1316                          | 92.9440   | 28.2271   | 28.6677   | 0.0349   |
|                      | $2.10^{-4}$                   | 0.0299               |                                 | 93.8860   | 28.5132   |   |  |
|                      | $3.10^{-4}$                   | 0.0450               |                                 | 94.2000   | 28.6085   |   |  |
|                      | $4.10^{-4}$                   | 0.0605               |                                 | 94.9850   | 28.8469   |   |  |
|                      | $5.10^{-4}$                   | 0.0764               |                                 | 95.9584   | 29.1426   |   |  |

En tenant compte de la position de l'échantillon et en se basant sur les valeurs de la résistivité électrique après recuit, on remarque une répartition croissante suivant le sens de coulée accompagnée d'une chute de cette dernière au niveau de l'échantillon 4' avec un pic au niveau du palier V' ; en ayant un maximum de conductivité électrique au niveau de l'échantillon I'.

On remarque qu'après traitement d'homogénéisation, la résistivité électrique est descendue dans la majorité des cas, soit concrètement ou partiellement, avec quelques cas particuliers où l'on remarque une augmentation considérable comme pour les échantillons (7', II, IV, V, III', IV' et V').



## Références Bibliographique

- [1]. [http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3446#\\_note-0](http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3446#_note-0).
- [2]. J.G. Stockholm. “*GÉNÉRATION THERMOÉLECTRIQUE*“ Energie portable: autonomie et intégration dans l’environnement humain ISBN 2-909968-10-3, 2002 (p. 1).
- [3]. Driss KENFAUI. “*Etude des propriétés mécaniques et thermoélectriques des matériaux  $Ca_3Co_4O_9$  texturés pour la conversion d’énergie*“. Thèse de Doctorat. Université de Caen France (2010). (PP. 23,25, 26, 29-34).
- [4]. Bertrand LENOIR, Jean-Pierre MICHENAUD, Anne DAUSCHER. “*Thermoélectricité : des principes aux applications*“, Technique de l’ingénieur, K73, (2010), (PP. 3, 5, 9, 14, 15, 17).
- [5]. Luis David Patiño López. “*Caractérisation des propriétés thermoélectriques des composants en régime harmonique : Techniques et Modélisation*“. Thèse de Doctorat. L’UNIVERSITE BORDEAUX 1 (2004). (PP. 13-15, 19).
- [6]. Claude GODART. “*Matériaux à effets thermoélectriques*“, Technique de l’ingénieur, N1500, 2009, (PP. 3-7, 9, 11, 12, 15-17).
- [7]. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil\\_principal](http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal).
- [8]. Véronique DA ROS. “*Transport dans les composés thermoélectriques skutterudites de type  $R_xCo_{4-y}Ni_ySb_{12}$  ( $R=Nd, Yb$  et  $ln$ )*“. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de LORRAINE (2008). (PP. 16-18, 22, 23).
- [9]. Djalila BOUDEMAGH. “*Synthèse et Etude de Matériaux Thermoélectriques du Système  $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$* “. Thèse de Doctorat. Université de Grenoble (2010). (PP. 22, 25-28, 31).
- [10]. LEE Sung-Youn, HAN Madeleine. “La Thermoélectricité“, Lycée Louis le Grand, (2010). (P. 10).
- [11]. <http://webtab.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Physico/Electro/e07fil.htm>.
- [12]. [http://mms2.ensmp.fr/mat\\_nancy/binaire/transparents/1\\_binaires\\_r.pdf](http://mms2.ensmp.fr/mat_nancy/binaire/transparents/1_binaires_r.pdf).
- [13]. [http://www.crct.polymtl.ca/fact/phase\\_diagram.php?file=Sn-Zn.jpg&dir=SGTE](http://www.crct.polymtl.ca/fact/phase_diagram.php?file=Sn-Zn.jpg&dir=SGTE).
- [14]. GUNTER Petzow ‘Metallographic Etching’, ASM international, (PP.129), 1999 Unites States of America.