

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

⑫

N° 81 07277

⑤4 Procédé et appareil de coulée électromagnétique de bandes minces.

⑤1 Classification internationale (Int. Cl. ³). **B 22 D 11/01 // C 01 B 33/00.**

⑫② Date de dépôt..... 10 avril 1981.

③③ ③② ③① Priorité revendiquée : *EUA, 11 avril 1980, n° 139,617.*

④① Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 42 du 16-10-1981.

⑦① Déposant : Société dite : OLIN CORPORATION, résidant aux EUA.

⑦② Invention de : Michael J. Pryor.

⑦③ Titulaire : *Idem* ⑦①

⑦④ Mandataire : Cabinet Beau de Loménie,
55, rue d'Amsterdam, 75008 Paris.

La présente invention concerne un procédé et un appareil perfectionnés pour couler par voie électromagnétique des matières et notamment des métaux, des alliages et des non-métaux tels que le silicium. Le procédé et l'appareil selon l'invention
5 sont applicables à la coulée de minces bandes poly- ou monocristallines.

La coulée électromagnétique est connue et utilisée depuis de nombreuses années pour couler des métaux ou des alliages en continu ou semi-continu. Elle a été utilisée industriellement pour
10 couler l'aluminium et ses alliages. Dans ses applications connues, elle fournit des produits coulés relativement épais.

Un appareil de coulée électromagnétique est formé essentiellement d'une lingotière à trois éléments : un inducteur refroidi par eau, un écran amagnétique et un distributeur pour appliquer
15 de l'eau de refroidissement au produit coulé ou refroidisseur. Un tel appareil est décrit, par exemple, dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique n° 3 467 166. Le métal fondu est confiné ou maintenu sans qu'il vienne directement en contact avec une partie quelconque de la lingotière. La solidification du métal résulte de l'application
20 directe d'eau du refroidisseur à la croûte en cours de solidification du produit coulé.

On peut trouver une description assez complète de l'art de la coulée électromagnétique dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique 4 161 206. L'objet proprement dit de ce brevet est
25 un dispositif de commande pour le processus électromagnétique.

Les brevets des Etats-Unis d'Amérique n° 3 985 179 et 4 004 631 décrivent l'utilisation d'inducteurs façonnés dans la coulée électromagnétique.

Dans la coulée électromagnétique, le bain de métal fondu au-dessus de la zone de solidification est normalement maintenu
30 à la même section droite que le produit coulé solidifié que l'on désire obtenir. Pour couler de minces bandes, on aurait donc un bain de métal mince et de faible volume. Or, de petites variations dans la température du métal fondu ajouté à un tel bain et de petites
35 différences dans la vitesse de refroidissement dans la coulée conduiraient toutes à de grandes variations de température du bain de

petit volume, pouvant entraîner le figeage prématuré du métal et l'avortement de la coulée.

Le remplacement de la coulée continue conventionnelle avec une lingotière à refroidissement direct par la coulée électromagnétique pose cependant d'autres problèmes encore. Dans la coulée électromagnétique, il faut régler avec précision le débit de métal s'écoulant vers le bas dans la zone de confinement, c'est-à-dire dans le bain de métal, parce que la hauteur du bain influe sur la pression hydrostatique que le bain exerce dans la zone de confinement, donc aussi sur la force nécessaire au confinement du métal dans l'espace voulu.

L'adaptation de la coulée électromagnétique à la production de bandes minces présente des difficultés supplémentaires, surtout si l'épaisseur des bandes est inférieure à 6 mm par exemple. Le problème devient plus ardu encore en dessous de 2,5 mm, par exemple avec les épaisseurs de l'ordre de 0,6 mm qui sont demandées pour couler des matières telles que le silicium pour des applications dans le domaine des semi-conducteurs. Dans ce dernier cas, il est extrêmement difficile de maintenir la bande coulée à la forme requise par le procédé électromagnétique, en particulier sur les bords de la bande.

Le brevet des Etats-Unis d'Amérique 3 463 365 et le brevet britannique 1 481 301 sont des exemples de l'art concernant l'emploi de champs électromagnétiques pour régler l'écoulement de métal d'un panier de coulée ou d'un creuset dans une lingotière. Dans le brevet britannique, un champ électromagnétique est utilisé non seulement pour régler l'écoulement de métal du creuset mais aussi pour empêcher le métal de venir en contact avec le réfractaire d'une partie du creuset, afin de réduire ainsi l'érosion du réfractaire. Dans ce brevet britannique, le creuset possède un diamètre relativement grand comparativement à l'ouverture ou busette à travers laquelle le métal liquide sort du creuset et entre dans la lingotière.

Le brevet britannique 1 499 809 décrit un système de coulée de barres utilisant un creuset et un dispositif électromagnétique de réglage d'écoulement semblable à celui décrit dans le brevet britannique cité plus haut. Cependant, dans ce cas, la bobine

électromagnétique qui règle le débit de métal sert aussi à donner la forme de barre désirée au métal, lequel est ensuite refroidi à l'eau en vue de sa solidification puis laminé en un produit final désiré en forme de barre ou de fil.

5 Les dispositifs décrits dans les brevets britanniques, du fait qu'ils sont hybrides, puisqu'ils utilisent à la fois un creuset et des forces électromagnétiques pour le confinement, ont notamment l'inconvénient que le bain de métal fondu supporté par le creuset est susceptible d'être contaminé par le creuset par
10 l'introduction de fragments de réfractaires dans le métal liquide. De plus, dans le dispositif selon le brevet britannique 1 499 809, de l'eau du poste de refroidissement, par éclaboussure, pourrait être projetée vers le haut entre le métal liquide et le creuset dans l'étranglement de sortie, ce qui crée de sérieux risques
15 d'explosion de l'appareil. Pour éviter ces problèmes, l'invention prévoit un système dans lequel un grand bain de matière fondue est supporté, uniquement par des forces de confinement électromagnétiques, au-dessus de la section étroite de formation de bande de la lingotière électromagnétique où s'effectue la solidification.

20 Ce système n'est pas à confondre avec les appareils ordinaires de fusion en lit fluidisé, comme ceux décrits dans les brevets des Etats-Unis d'Amérique n° 2 686 864 et 3 476 170. Ces appareils utilisent un inducteur pour la mise en lit fluidisé d'une matière en fusion et même, dans le brevet cité en dernier, pour
25 produire des soutirages dosés de la matière en fusion. Cependant, aucun de ces appareils n'utilise un système électromagnétique de confinement où le bain de métal fondu d'où est formée la mince bande coulée possède une épaisseur supérieure à cette bande.

L'invention apporte un appareil et un procédé pour
30 la coulée, par voie électromagnétique, d'une mince bande, pouvant être faite d'une grande variété de matières fondues et notamment de métaux, d'alliages et de différentes matières, telles que le silicium, convenant à la fabrication de composants électroniques. Selon l'invention, un dispositif électromagnétique de formation et
35 de confinement comporte une zone de solidification pour façonner la matière à l'état fondu en une mince bande ayant la section désirée,

ainsi qu'une deuxième zone plus large pour supporter un bain de matière fondue. Ce bain élargi par rapport à la section de la bande à couler réduit les variations de température de la matière fondue délivrée à la zone de solidification et réduit également les variations dans la pression hydrostatique exercée par le bain dans la zone de solidification. Le confinement de la matière fondue, à la fois dans le bain d'alimentation élargi et dans la zone de solidification, est assuré exclusivement par l'action de forces électromagnétiques sur la matière. Ce résultat est obtenu, selon un mode de réalisation préféré, par la conformation d'un inducteur électromagnétique, de manière que, dans une première partie, il possède une section qui correspond à la section de la mince bande que l'on désire couler, tandis que, dans une deuxième partie, il possède une section élargie résultant d'un évasement à partir de la première partie. De préférence, l'extrémité ouverte définie par la surface supérieure de l'inducteur possède une aire de section au moins cinq fois plus grande que celle de l'ouverture de l'inducteur dans la zone de solidification. Facultativement, l'appareil peut comporter un écran amagnétique pour limiter la courbure de la matière fondue à la surface supérieure du bain.

Le procédé et l'appareil selon l'invention permettent de couler des bandes ultraminces, d'une épaisseur inférieure à 6 mm environ et de préférence d'une épaisseur inférieure à 2,5 mm environ. Un dispositif est prévu pour alimenter l'inducteur avec un courant alternatif dont la fréquence est choisie de telle manière que la profondeur de pénétration du courant dans le métal fondu à la zone de coulée est inférieure à environ $1/4$ et de préférence à environ $1/6$ de l'épaisseur de la bande coulée. De cette manière, il devrait être possible de couler des bandes extrêmement minces de matières telles que le silicium ou d'autres matières désirées, tout en conservant la maîtrise sur la forme du produit coulé et sans contamination (introduction d'impuretés) de la matière coulée.

Selon un autre mode de réalisation, l'inducteur de section non constante pour le confinement est utilisé aussi pour chauffer et fondre la matière à couler.

L'invention fournit donc un appareil et un procédé perfectionnés pour la coulée électromagnétique de minces bandes de métaux, alliages, non-métaux tels que le silicium et d'autres matières encore, qui réduisent la contamination de la matière fondue pendant sa coulée et qui permettent excellemment de maintenir la forme de la bande ultramince coulée sur toute sa section à la forme souhaitée.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de plusieurs exemples de réalisation non limitatifs, ainsi que des dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une représentation schématique d'un appareil de coulée selon un exemple de réalisation de l'invention;

- la figure 2 est une représentation schématique d'un appareil de coulée selon un autre exemple de réalisation de l'invention; et

- la figure 3 est une représentation schématique partielle d'une variante de réalisation d'un mécanisme extracteur de produit coulé, également selon l'invention.

La figure 1 représente, à titre d'exemple, un appareil de coulée électromagnétique selon l'invention. Il comporte une lingotière de coulée électromagnétique 10 qui se compose d'un inducteur 11 refroidi par eau, d'un refroidisseur 12 pour appliquer de l'eau à la surface 13 du produit coulé C, tout autour de celui-ci, et d'un écran amagnétique 14. Dans cet exemple, la matière fondue, un métal par exemple, est introduite en continu dans la lingotière, au cours d'une coulée, d'une manière normale, avec utilisation d'une auge 15, d'un tube de coulée 16 et d'un dispositif de régulation 17 pour le chargement en métal liquide du bain dans la lingotière. Le dispositif de régulation 17 peut être formé d'une quenouille ordinaire 18 qui peut être ajustée manuellement ou, de préférence, automatiquement. Dans le mode de réalisation préféré, la quenouille 18 peut être déplacée dans le sens de l'axe du produit coulé C et du tube de coulée 16 par un système à crémaillère 19 et pignon 20 actionné par un moteur pas à pas de chargement 21, lui-même commandé à partir du bloc d'alimentation 22 et du dispositif de commande 23. L'écoulement de métal fondu à travers le tube de coulée 16 est réglé

en conformité avec de lentes augmentations ou diminutions de l'inductance de l'inducteur 11.

L'inducteur 11 est alimenté en courant alternatif à partir du bloc d'alimentation 22 et du dispositif de commande 23. 5 Ceux-ci peuvent être de toute conception désirée mais il est préférable qu'ils soient réalisés comme décrit dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique 4 161 206. Selon ce document, l'intensité du courant dans l'inducteur 11 est réglée de telle manière que l'inductance de l'inducteur 11 reste sensiblement constante. Un intervalle d'air 10 uniforme est ainsi maintenu entre le métal fondu et les parois voisines de l'inducteur 11 pendant la coulée.

Le courant alternatif circulant dans l'inducteur 11 produit un champ magnétique qui, par interaction avec la masse ou tête de métal fondu 24, produit des courants de Foucault dans celle- 15 ci. Ces courants de Foucault, à leur tour, par interaction avec le champ magnétique, produisent des forces qui exercent une pression magnétique sur la tête de métal fondu 24 de manière à la maintenir dans un espace limité et à produire la solidification du métal sous forme d'un produit coulé ayant la section désirée. La tête de métal 24 20 reste séparée de l'inducteur 11 par un intervalle d'air 25 pendant la coulée. Dans la zone de solidification 26, le métal liquide de la tête 24 est façonné ou moulé dans la même forme générale que l'inducteur 11, de sorte qu'il prend la section que l'on désire donner au produit coulé. L'inducteur 11 possède de préférence une forme 25 rectangulaire qui entoure le métal fondu.

L'écran amagnétique 14 a pour but de permettre l'ajustement fin de la pression magnétique et son équilibrage avec la pression hydrostatique de la tête de métal 24 près de la surface supérieure 27 de la tête. L'écran 14 peut être formé d'un élément 30 séparé, comme représenté, mais il peut également être intégré en d'autres éléments de l'appareil, dans l'inducteur par exemple, comme décrit dans certains des brevets cités plus haut.

Au commencement de la coulée, un bloc de fond 29 ou faux fond est tenu de façon connue par une barre 28 dans la zone 35 de solidification 26 de la lingotière 10 pour que le premier métal liquide puisse être déversé dans la lingotière et y former le début

du produit coulé. La barre 28 et le bloc de fond 29 sont ensuite abaissés uniformément à la vitesse de coulée désirée par un mécanisme extracteur 30 qui peut être de conception conventionnelle.

La solidification du métal confiné magnétiquement dans la lingotière 10 est produite par l'application directe d'eau du refroidisseur 12 à la surface 13 en cours de solidification du produit coulé C. Dans l'exemple de figure 1, l'eau est appliquée à la surface 13 du produit coulé juste au-dessous de l'inducteur, à très faible distance de celui-ci. Il est possible aussi, si désiré, d'appliquer l'eau à la surface 13 du produit coulé à l'intérieur même de l'inducteur par la prévision de fentes ou d'orifices appropriés pour l'éjection d'eau de refroidissement dans l'inducteur 11.

L'appareil de figure 1 se distingue surtout des appareils de coulée électromagnétique connus par le fait que le bain de métal 24 possède une section non-uniforme. Dans une première partie 26 de la zone de confinement, où s'effectue la solidification, le métal liquide est forcé à prendre la forme de section désirée pour la mince à bande à produire. Dans une deuxième partie 31 de la zone de confinement, située en amont de la première partie, le bain de métal 24 s'évase vers le haut, de manière que sa surface supérieure 27 possède une aire de section qui est de préférence au moins cinq fois plus grande et, mieux encore, au moins sept fois plus grande que l'aire de section de la bande coulée C.

La deuxième partie de la zone de confinement crée un bain de métal qui est nettement plus large que la bande coulée C. Le volume du bain 24 est assez grand pour assurer que les différences de température au sein du bain soient réduites au minimum et pour assurer en plus que la hauteur du bain de métal, déterminant la pression hydrostatique du métal liquide dans la zone de solidification 26, reste sensiblement constante. La bande C obtenue est ainsi plus uniforme en section et en épaisseur.

Dans l'exécution préférée représentée figure 1, la zone de confinement électromagnétique possédant les deux parties décrites ci-dessus est créée par un inducteur 11 de forme particulière. Sa surface 32 dirigée vers le métal liquide est divisée en deux parties correspondantes 33 et 34. La première partie 33 possède une forme générale qui correspond à la forme désirée de la mince

bande C à couler. La deuxième partie 34 s'évase vers le haut à partir de la première partie pour former au sommet 35 de l'inducteur une ouverture, délimitant la zone de confinement, qui possède une première aire de section nettement plus grande que la deuxième aire de section, qui est celle de l'ouverture définissant la zone de confinement de la première partie. La première aire de section est de préférence plus de cinq fois plus grande que la deuxième aire de section et de préférence au moins sept fois plus grande.

Il est aisément compréhensible que le courant dans l'inducteur se concentre dans la première partie 33 parce que celle-ci représente le trajet de courant le plus court. Cependant, au niveau de puissance approprié, l'intensité du courant dans la deuxième partie 34 doit être suffisante pour supporter le bain de métal 24. Cette particularité de l'inducteur 11 représenté est hautement désirable parce que les forces hydrostatiques produites par le métal liquide sont les plus élevées dans la première partie 33, étant donné que cette partie est couverte par la plus grande épaisseur de métal. Le fait que la densité du courant ou le courant par unité de surface dans la zone 33 est la plus élevée convient donc excellemment. A mesure que l'on monte le long de la partie évasée 34 de l'inducteur 11, la densité du courant diminue graduellement avec l'allongement du trajet du courant. Ceci est également souhaitable parce que l'épaisseur de métal supportée aux points qui se suivent vers l'extérieur le long de la partie évasée 34 diminue de façon correspondante. L'angle d'inclinaison de la surface 34 est de préférence choisi de telle manière que, compte tenu de la matière coulée, il y a à peu près équilibre entre l'amplitude du courant dans l'inducteur et la pression hydrostatique exercée par la matière fondu en chaque point de la partie 34 de la zone de confinement. Par exemple, l'épaisseur de la couche de métal fondu et, partant, la pression hydrostatique exercée par elle en chaque point de la partie 34 de l'inducteur 11 peuvent être augmentées globalement en donnant à la surface 34 une inclinaison plus proche de la verticale et inversement.

L'exemple représenté utilise un écran amagnétique 14 pour intercepter une partie du champ de l'inducteur 11 près de la surface supérieure 27 du bain afin d'éviter que les angles en haut du bain de métal 24 ne s'arrondissent excessivement. Cependant, dans

la pratique, grâce à la forme particulière de l'inducteur 11, l'écran 14 pourra vraisemblablement être éliminé, de sorte qu'il n'est pas considéré comme un élément essentiel de l'appareil. Il en est ainsi parce que la densité du courant est la plus faible
5 au sommet 35 de l'inducteur 11, du fait que le trajet du courant y est le plus long.

Le procédé et l'appareil décrits relativement à la figure 1 conviennent particulièrement à la coulée de minces bandes de métaux et d'alliages. Le fluide de refroidissement débité
10 par le refroidisseur 12 serait alors de l'eau ou un autre fluide approprié, comme désiré. L'appareil de coulée représenté figure 1 permet de couler des bandes jusqu'à une épaisseur d'environ 19 mm et est utilisé de préférence pour couler des bandes jusqu'à une épaisseur d'environ 13 mm. De telles bandes minces C se prêtent
15 particulièrement à la production par laminage à froid de bandes de toute épaisseur désirée, avec une épaisseur minimale pouvant aller jusqu'à 0,1 mm ou moins encore. L'un des avantages de la coulée de métaux ou d'alliages sous forme de bandes est que le laminage à chaud de dégrossissage qui est normalement utilisé pour réduire
20 les lingots épais de plusieurs centimètres au moins a des semi-produits qui se laissent laminier à froid peut être éliminé.

Comme déjà mentionné, un appareil selon l'invention peut être appliqué aussi à la coulée de bandes ultraminces, notamment de bandes métalliques, en alliages et en non-métaux, y
25 compris les matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, le germanium et ainsi de suite. La figure 2 montre un appareil particulièrement préféré pour la coulée de bandes ultraminces C', pouvant être de nature monocristalline. Dans cet exemple, toute la lingotière 10' est supportée dans une chambre 36 dans laquelle
30 est créée une atmosphère de gaz neutre, d'argon par exemple, en vue du maintien de la pureté de la matière coulée. A la place d'une auge 15 et d'un tube de coulée 16 comme sur la figure 1 pour transporter la matière fondue depuis un point de fusion situé à distance, l'appareil de cet exemple est équipé pour l'introduction du sili-
35 cium M ou d'une autre matière sous forme d'une barre solide. La disposition de l'inducteur 11' et de l'écran 14 est semblable à la

disposition de ces éléments dans l'exemple précédent. Cependant, bien que l'inducteur 11' possède la même forme générale que l'inducteur 11 de la figure 1, il présente une structure notablement différente. L'inducteur 11' est en effet divisé en deux sections 37 et 38. La section supérieure 37 présente la surface 34 et la section inférieure 38 présente la surface 33. Les deux sections 37 et 38 sont séparées par un joint d'isolation électrique 39 et elles sont assemblées de façon étanche à l'eau par des vis isolantes (non représentées). Le but de l'isolation de la section supérieure 37 par rapport à la section inférieure 38 est de permettre l'alimentation indépendante des deux sections pour pouvoir ajuster selon les besoins les intensités de courant électrique dans les surfaces 33 et 34 de l'inducteur 11'. Cette séparation permet de mieux maîtriser la formation de la bande dans la partie 26 de l'inducteur et le maintien du bain de matière dans la partie 31.

L'alimentation séparée des deux sections de l'inducteur 11' demande deux blocs d'alimentation 40 et 41 et deux dispositifs de commande 42 et 43. Le courant circulant dans la section supérieure 37 de l'inducteur 11' peut ainsi différer totalement du courant circulant dans la section inférieure 38, ce qui produit des intensités de champ correspondantes dans les deux sections. Il est ainsi possible de mieux équilibrer, suivant la matière coulée, la force magnétique développée par l'inducteur et les pressions hydrostatiques exercées par la matière coulée.

Un appareil comme celui de figure 2 est prévu de préférence pour la coulée de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium sous forme d'un monocristal. Le silicium doit dans ce cas avoir une très grande pureté et la conserver dans le produit coulé, ce qui explique pourquoi la coulée s'effectue sous atmosphère neutre, comme indiqué plus haut. Il est souhaitable en outre que la matière coulée ne vienne en contact avec aucune autre matière, d'un creuset par exemple, pour éviter l'introduction d'impuretés.

L'inducteur 11' de la figure 2 est par ailleurs conformé et fonctionne sensiblement de la même manière que l'inducteur 11 de la figure 1. Les surfaces dirigées vers la matière à couler, désignées ici également par 33 et 34, définissent de nouveau

une zone de solidification 26 et une zone 31 où est formé le bain de matière liquide. Les blocs d'alimentation 40 et 41 et les dispositifs de commande 42 et 43 fonctionnent de la même manière que le bloc d'alimentation 22 et le dispositif de commande 23 de l'exemple précédent, sauf que les intensités du courant dans la section supérieure 37 et la section inférieure 38 de l'inducteur 11' peuvent être variées individuellement, comme décrit plus haut. Comme dans l'exemple précédent, l'écran 14 est un élément facultatif puisque son emploi peut être évité, suivant le champ magnétique produit par l'inducteur 11'.

10 Bien que l'appareil de figure 2 convienne particulièrement à la production de bandes ultraminces de morphologie monocristalline, il peut être utilisé pour couler d'autres produits sous d'autres épaisseurs, comme l'appareil de l'exemple précédent.

Dans l'appareil de la figure 2, le bain 24 est

15 réalimenté par fusion de l'extrémité d'une barre solide M de la matière à couler. Pour produire cette fusion, il est proposé, selon un aspect préféré de l'invention, que l'inducteur 11' soit alimenté électriquement de manière qu'il puisse non seulement contenir et supporter le bain de matière liquide 24 mais aussi chauffer la

20 matière de ce bain à la température nécessaire pour fondre la barre M solide de réalimentation à mesure qu'elle est avancée dans le bain 24. Ce résultat est obtenu par l'équilibrage de la pression exercée par et l'apport de chaleur fourni par la section supérieure 37 de l'inducteur 11'. Pour produire la fusion, la fréquence du courant appliqué

25 est augmentée, afin d'accroître ainsi l'effet de chauffage du champ produit et la résistance effective du bain. Il va de soi que la possibilité d'utiliser l'inducteur 11' à la fois à des fins de chauffage et de confinement dépend dans une large mesure de la résistivité de la matière à couler. Dans le cas des matériaux semi-conducteurs

30 tels que le silicium ou le germanium, la résistivité élevée de ces matériaux améliore l'effet de chauffage de l'inducteur. Si les matières à couler ont une résistivité relativement basse, il peut s'avérer impossible d'utiliser l'inducteur à la fois pour le confinement et le chauffage. Cependant, de manière général, un appareil de coulée

35 comme celui de figure 2 sera habituellement utilisé pour produire des bandes ultraminces de matériaux à haute résistivité comme ceux utilisés dans les dispositifs semi-conducteurs et électroniques.

Comme dans l'exemple précédent, le débit de la matière introduite dans le bain est réglé par le dispositif de commande 42 de l'inducteur 11', produisant dans ce cas l'abaissement de la barre de silicium M dans le bain 24, de manière que la surface supérieure 27 de ce bain reste sensiblement à un niveau constant afin de réduire les changements de la pression hydrostatique exercée par la matière fondue dans la zone de solidification 26. L'abaissement de la barre M dans le bain peut être produit au moyen de rouleaux d'alimentation 44 entraînés par un moteur 45 qui est alimenté depuis le dispositif de commande 42. Comme dans le précédent exemple, le dispositif de commande assure la réalimentation du bain 24 avec maintien, de préférence, de l'inductance de l'inducteur 11' à une valeur constante. Si le niveau de la surface supérieure 27 du bain monte ou baisse, la pression hydrostatique exercée par la matière fondue du bain change. De ce fait, l'intervalle d'air 25 entre le bain et les parois intérieures de l'inducteur sera élargi ou aminci. Dans un cas comme dans l'autre, l'inductance de l'inducteur sera modifiée en conséquence. Selon le brevet des Etats-Unis d'Amérique 4 161 206 déjà cité dans le rappel de la technique antérieure au début du présent mémoire, l'inductance peut être maintenue constante par la variation de l'énergie appliquée à l'inducteur et l'inductance peut en outre être maintenue dans des limites désirées par une régulation appropriée de l'alimentation du bain. Pour la mise en oeuvre de l'invention, il est préférable d'utiliser ces deux modes d'action pour régler le système de coulée et produire ainsi une mince bande C ou C' de section uniforme.

La matière fondue et l'énergie appliquée par l'inducteur 11' ont une action suffisante pour faire fondre lentement la barre de silicium M et réalimenter ainsi le bain pour compenser la quantité de matière extraite sous forme d'une bande ultra-mince C' de la zone de coulée 26. Bien qu'il soit préférable, dans ce mode de mise en oeuvre, que l'inducteur fournisse à la fois l'énergie pour supporter le bain de matière fondue 24 et pour fondre la barre d'alimentation M, il est possible, dans le cadre de l'invention, de fondre la matière d'alimentation en un point éloigné, comme décrit relativement à la figure 1. Il ne sera donc pas nécessaire dans ce cas que l'inducteur 11 ou 11' ait la double fonction

de confinement et de chauffage pour fondre la matière d'alimentation.

Dans la coulée de silicium ou d'autres matières sous forme de monocristaux, il faut que la vitesse de coulée ou vitesse d'abaissement de la barre 28 soit très lente, conformément
 5 aux techniques connues pour le tirage de monocristaux. La vitesse d'abaissement de la barre solide de silicium M à faire fondre serait donc également lente. De plus, afin d'éviter la contamination et compte tenu des vitesses d'extraction lentes, au lieu de refroidir la bande de silicium C' par l'application d'eau, il est préférable
 10 que le refroidisseur 12' produise le refroidissement de la bande par un gaz neutre. La morphologie monocristalline est obtenue à partir d'un germe monocristallin 46 supporté par le bloc de fond ou faux fond 29 de l'appareil de coulée.

Il est important, dans la coulée de bandes ultra-
 15 minces C', que le bloc d'alimentation fournisse à l'inducteur 11' un courant électrique dont la fréquence est fixée de telle manière que la profondeur de pénétration du courant induit dans la matière fondue soit inférieure à environ 1/4 de l'épaisseur t de la bande coulée et, de préférence, inférieure à 1/6 de cette épaisseur. La
 20 profondeur de pénétration est définie par la formule suivante :

$$S = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \pi f}}$$

Dans cette formule, la profondeur de pénétration S correspond à la profondeur de pénétration dans la matière en question où l'intensité du courant est réduite d'environ 67% par rapport à
 25 l'intensité à la surface extérieure 13. Par ailleurs, ρ = la résistivité de la matière coulée, μ_0 = la perméabilité de la matière coulée, f = la fréquence du courant appliqué et $\pi = 3,14$.

Il découle de la formule ci-dessus que l'augmentation de la fréquence du courant appliqué entraîne une diminution de
 30 la profondeur de pénétration. Dans la coulée ordinaire par voie électromagnétique, il est habituel d'utiliser une profondeur de pénétration de 5 mm. Le brevet des Etats-Unis d'Amérique 4 161 206 cité plusieurs fois déjà démontre amplement l'influence de la résistivité sur la profondeur de pénétration. Dans la mise en oeuvre de l'inven-
 35 tion, afin de maintenir une bonne maîtrise sur la forme du produit

coulé, c'est-à-dire afin de pouvoir couler un produit de forme et de section uniformes sur toute la longueur du produit, la profondeur de pénétration doit être ajustée très exactement par la variation de la fréquence du courant appliqué. De préférence, la profondeur
5 de pénétration est inférieure à environ $1/4$ de l'épaisseur de la bande coulée et, mieux encore, inférieure à environ $1/6$ de cette épaisseur. Ces limites préférées doivent assurer qu'il n'y ait pas ou très peu d'interaction entre le champ appliqué à un côté de la bande C' et le champ appliqué à l'autre côté de la bande. La deman-
10 deresse considère actuellement que le fait d'éviter de telles interactions diminue les difficultés d'obtention d'une bande C d'épaisseur et de section uniformes. Elle considère en outre que, si ces limites ne sont pas respectées, la bande C ou C' obtenue pourrait avoir une section ovale, ce qui est bien entendu indésirable.

15 Si l'on désire effectuer une coulée sans formation d'une structure monocristalline, on retire le germe cristallin et on place le bloc de fond directement dans le champ de confinement au commencement de la coulée, comme décrit relativement à la figure 1. Pour la coulée de structures monocristallines, le germe cristallin
20 est placé avant le début de la coulée dans le champ de confinement; le germe est ensuite extrait, c'est-à-dire abaissé lentement, à une vitesse compatible avec l'obtention de la morphologie monocristalline désirée. Si une structure non monocristalline est acceptable, il est possible d'utiliser un refroidissement par eau à la place du refroi-
25 dissement par gaz, si cela est désiré. Pour la coulée d'une structure monocristalline, le refroidissement par gaz est préférable.

La figure 3 représente une variante de réalisation d'un mécanisme extracteur 30'. Les mécanismes extracteurs 30 utilisés dans les exemples des figures 1 et 2 sont plus que suffisants pour
30 la coulée continue ou semi-continue d'une mince bande de longueur raisonnable, dépendant bien entendu de la course possible de la barre 28 et du bloc de fond 29. Un mécanisme extracteur 30' comme celui des figures 3 peut être utilisé pour la coulée de bandes minces plus longues. Ce mécanisme comprend une fausse bande 51 de faible
35 épaisseur qui, pour commencer une coulée, est enfilée entre des rouleaux extracteurs 50, jusqu'à ce que son extrémité se trouve dans

la zone de solidification 26, comme le bloc de fond ou le germe des exemples précédents. La fausse bande 51 et la bande C coulée à la suite d'elle sont ensuite extraites de la zone 26 par les rouleaux 50. A la suite des rouleaux extracteurs 50, la fausse bande 51 et la bande 5 coulée sont enroulées sur un tambour 52. Il est ainsi possible de couler des bandes C de très grandes longueurs.

Bien qu'il ait été question jusqu'ici de métaux et d'alliages en général, l'invention est applicable en particulier à la coulée électromagnétique de cuivre et de cupro-alliages, d'acier 10 et d'alliages d'acier, d'aluminium et d'alliages d'aluminium et de nickel et d'alliages de nickel, sans exclure toutefois d'autres métaux et alliages. Dans le même ordre, bien qu'il ait été question jusqu'ici de la coulée de non-métaux tels que le silicium ou le germanium, l'invention est applicable à une large gamme de corps de 15 cette nature ou de nature analogue utilisés dans le domaine des semi-conducteurs et notamment au saphir et aux matériaux semi-conducteurs composites, tels que l'arséniure de gallium. Les corps nommés ne sont que des exemples et d'autres non-métaux ou matériaux analogues utilisés ou non dans les composants électroniques sont 20 nullement exclus.

L'invention n'est pas limitée aux formes de réalisation décrites et l'homme de l'art pourra y apporter diverses modifications, sans pour autant sortir de son cadre.

RE V E N D I C A T I O N S

1. Procédé pour couler une matière fusible, métallique ou autre, en une mince bande de forme et d'épaisseur déterminées, caractérisé en ce qu'il consiste à façonner la matière en une bande mince à l'état fondu par un champ électromagnétique dans une première
5 zone (26), où s'effectue la solidification au moins partielle de la matière en bande mince (C, C'), et à contenir la matière fondue par la seule action d'un champ électromagnétique sous une forme déterminée épaissie par rapport à la bande dans une seconde zone (31) ou zone de confinement, d'où la matière pénètre dans la première zone ou zone
10 de solidification (26), la matière dans la zone de confinement formant un bain (24) situé en amont de la zone de solidification, communiquant avec elle et ayant à sa surface supérieure (27) une section nettement plus grande que la section de la mince bande coulée (C, C').
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en
15 ce que la section à la surface supérieure (27) du bain est au moins cinq fois plus grande que la section de la bande (C, C').
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'on produit le façonnage en bande dans la zone de solidification (26) et le confinement de la matière du bain (24) par des
20 champs électromagnétiques produits par un seul inducteur (11, 11') possédant au moins deux parties (37, 38) électriquement isolées l'une de l'autre, l'une (38) étant conjuguée à la zone de solidification (26) et l'autre partie (37) étant conjuguée à la zone de confinement (31), et en ce que l'on alimente les deux parties de l'inducteur
25 électriquement de façon indépendante l'une de l'autre.
4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'on produit le champ électromagnétique ou chaque champ électromagnétique, par un inducteur (11, 11') en une ou en plusieurs parties, au moyen d'un courant alternatif dont on ajuste la fréquence pour que
30 la profondeur de pénétration du courant induit dans la matière ne dépasse pas 1/4 de l'épaisseur de la bande (C, C') et dont, de préférence, on ajuste l'intensité de manière que l'inductance de l'inducteur reste sensiblement constante.
5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en
35 ce que l'épaisseur de la bande (C') ne dépasse pas 0,65 mm environ

et en ce que l'on ajuste la fréquence pour que la profondeur de pénétration du courant induit ne dépasse pas $1/6$ de l'épaisseur de la bande.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le champ électromagnétique appliqué à la zone de confinement (31) sert également à chauffer la matière du bain (24).

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que, pour compenser la diminution de la quantité de matière du bain (24) par la formation de la bande (G, G'), on alimente le bain avec de la matière fondue ou solide.

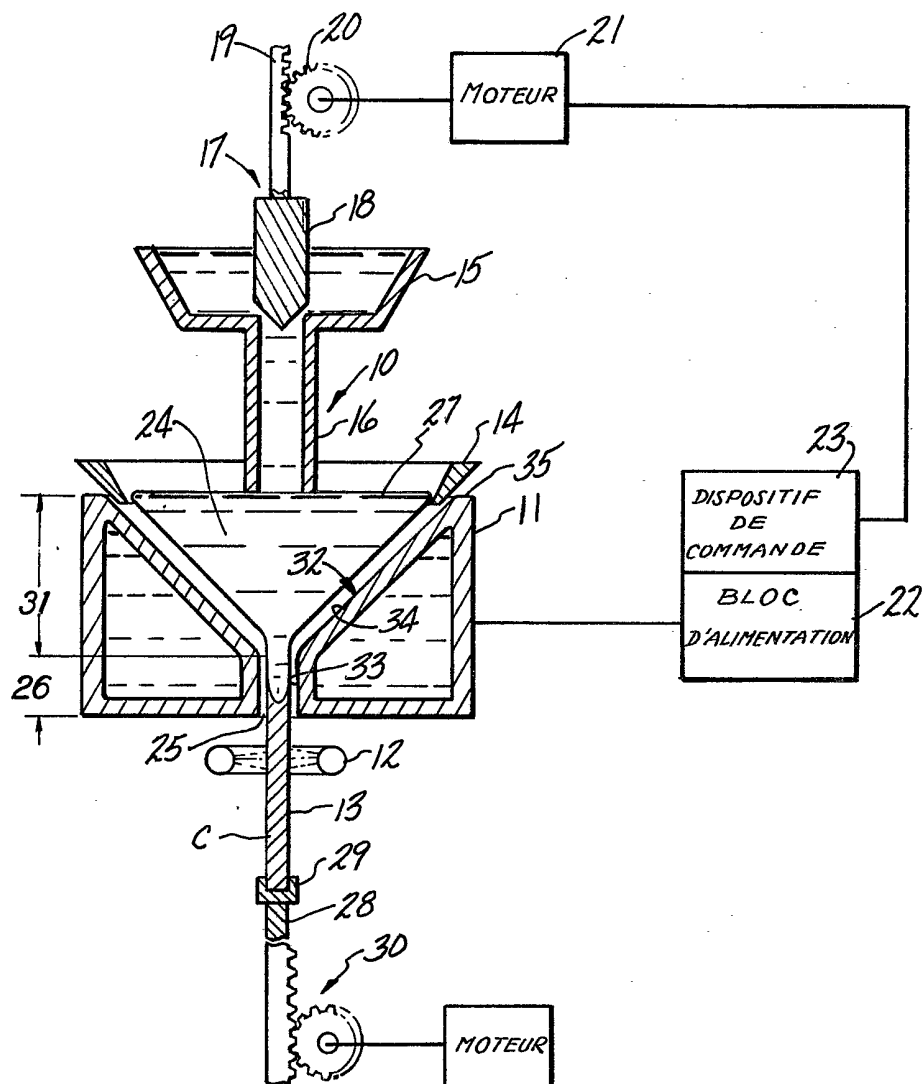
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la matière est un non-métal tel que le silicium et l'on commence la coulée avec un germe monocristallin (46) en vue de la coulée d'une mince bande monocristalline, en particulier d'une mince bande monocristalline de très grande longueur qui est enroulée à la suite de la coulée.

9. Appareil de coulée électromagnétique pour la mise en oeuvre de l'une quelconque des revendications 1 à 8, comprenant une lingotière de coulée électromagnétique (10) avec un inducteur (11, 11'), un dispositif de refroidissement (12, 12') et, éventuellement, un écran amagnétique (14), caractérisé en ce que l'inducteur (11, 11') produit un champ électromagnétique de façonnage en bande dans une première partie (33) située dans la zone de solidification (26) et un champ électromagnétique de confinement pour contenir la matière du bain (24) dans un espace délimité par une deuxième partie (34) située dans la zone de confinement (31), la matière restant séparée de la surface intérieure (32) de l'inducteur par un intervalle d'air (25) dans les deux zones (26, 31).

10. Appareil selon la revendication 9, caractérisé en ce que l'inducteur (11') possède au moins deux sections (37, 38) électriquement séparées, l'une (38) comportant la partie (33) de solidification et l'autre (37) la partie (34) de confinement, et en ce que l'appareil comprend en outre au moins deux blocs d'alimentation électrique (40, 41) et deux dispositifs de commande (42, 43) pour l'alimentation électrique individuelle des deux sections (37, 38).

11. Appareil selon la revendication 9 ou 10, caracté-
risé en ce qu'il comprend au moins un bloc d'alimentation électrique
(22, 40, 41) pour l'inducteur (11, 11'), combiné avec au moins un
dispositif de commande (23, 42, 43) pour ajuster la fréquence du
5 courant fourni à l'inducteur.
12. Appareil selon l'une quelconque des revendications
9 à 11, caractérisé en ce qu'il comprend en outre un dispositif (15-
21; 44, 45) pour ajouter de la matière au bain (24) à l'état fondu
ou à l'état solide.
- 10 13. Appareil selon l'une quelconque des revendications
9 à 12, caractérisé en ce que la forme de la première partie (33) de
l'inducteur (11, 11') correspond à la forme de la bande mince (C, C')
à couler et la deuxième partie (34) est évasée vers le haut à partir
de la première partie.
- 15 14. Appareil selon l'une quelconque des revendications
9 à 13, caractérisé en ce qu'il comprend un germe monocristallin (46)
pour la coulée d'une bande (C') monocristalline.
15. Appareil selon l'une quelconque des revendications
9 à 14, caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif d'extraction
20 et d'enroulement (50-52) permettant de couler des bandes minces (C,
C') de très grandes longueurs.
16. Appareil selon l'une quelconque des revendications
9 à 15 et dans lequel la matière ajoutée au bain (24) est à l'état
solide, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens pour introduire
25 un corps solide de cette matière dans le bain à une vitesse désirée,
lesdits moyens étant constitués notamment de rouleaux d'alimentation
(44) pour faire avancer une barre (M) de ladite matière, d'un moteur
(45) pour faire tourner les rouleaux et d'un dispositif (42) pour
commander le moteur, ce dispositif étant notamment sensible à l'in-
30 ductance de l'inducteur (11, 11').
17. Appareil selon l'une quelconque des revendications
9 à 16, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (23, 42, 43) pour
ajuster l'intensité du courant alternatif ou de chaque courant alter-
natif fourni à l'inducteur (11, 11') de manière que l'inductance
35 reste sensiblement constante.

1/2

**FIG-1**

2/2

