

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**3 074 191**

②1 N° d'enregistrement national : **17 61384**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **C 22 C 21/00 (2018.01), B 22 D 7/00, 27/02, 27/04, C 22 F 1/04**

⑫

**DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

**A1**

②2 **Date de dépôt** : 29.11.17.

③0 **Priorité** :

④3 **Date de mise à la disposition du public de la demande** : 31.05.19 Bulletin 19/22.

⑤6 **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire** : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 **Références à d'autres documents nationaux apparentés** :

**Demande(s) d'extension** :

⑦1 **Demandeur(s)** : *CONSTELLIUM ISSOIRE Société anonyme — FR.*

⑦2 **Inventeur(s)** : JARRY PHILIPPE, TAINA FABIO, ACHARD JEAN-LOUIS, BERTHERAT MARC, MÉNET PIERRE-YVES, CABLEA MIRCEA et WARNER TIMOTHY.

⑦3 **Titulaire(s)** : *CONSTELLIUM ISSOIRE Société anonyme.*

⑦4 **Mandataire(s)** : *C-TEC CONSTELLIUM TECHNOLOGY CENTER.*

⑤4 **PRODUIT PLAT EN ALLIAGE D'ALUMINIUM PRESENTANT DES PROPRIETES AMELIOREES DANS L'ÉPAISSEUR.**

⑤7 L'invention concerne un produit plat en alliage d'aluminium d'épaisseur supérieure à 12.5 mm présentant des propriétés améliorées dans l'épaisseur. Ce produit est obtenu en ajustant les conditions de brassage pendant la coulée du lingot servant à l'obtention du produit plat.

Le procédé de coulée se caractérise par une coulée avec brassage induit par un champ de forces externes non stationnaire ou une coulée avec brassage induit par un champ de forces externes stationnaire plaquant. Le procédé de transformation comprend une mise en solution à une température supérieure à 450°C, une trempe et un revenu ou maturation pour obtenir un produit plat en alliage d'aluminium.

Optionnellement une opération de scalpage peut être effectuée pendant le procédé de transformation afin d'éliminer des défauts de surface rédhibitoire si une opération de laminage est effectué subséquent. L'invention permet en particulier d'augmenter l'épaisseur du produit coulé sans altérer, voire en améliorant l'allongement dans le sens travers-court du produit final.

**FR 3 074 191 - A1**



**PRODUIT PLAT EN ALLIAGE D'ALUMINIUM PRESENTANT DES PROPRIETES AMELIOREES  
DANS L'ÉPAISSEUR**

**5    Domaine de l'invention**

Le domaine technique de l'invention concerne les produits plats épais en alliage d'aluminium issus de lingots obtenus par coulée verticale.

**10   Etat de la technique**

Les produits plats épais en alliage d'aluminium, en particulier les alliages d'aluminium à durcissement structural de la série 7XXX, 2XXX présentent à partir d'une épaisseur supérieure à 12.5 mm des différences de propriétés selon le positionnement dans l'épaisseur. Ces  
15 différences de propriétés sont associées entre autres aux macroségrégations observées sur le lingot coulé et qui subsistent sur le produit plat obtenu après un procédé de transformation du lingot ; le procédé de transformation comprenant une mise en solution, trempe et revenu ou maturation.

20 Une macroségrégation bien connue de l'homme du métier est la macroségrégation centrale négative, résultant d'un appauvrissement en éléments d'alliage eutectiques, le long d'une partie du plan médian parallèle aux grandes faces du lingot. Ces macroségrégations ont été décrites dans l'ouvrage de John Wiley et al « Direct-Chill Casting of light alloys », Editeur Wiley, septembre 2013, pp 158 - 172. Il s'agit d'une macroségrégation continue, ce terme désignant le  
25 fait que la macroségrégation a lieu de façon continue sur tout ou partie de la hauteur du lingot, en d'autres termes qu'elle est essentiellement uniforme selon l'axe de coulée.

Il y a aussi le phénomène de macroségrégation intermittente qui se traduit par la formation de bandes en forme de V de part et d'autre de la macroségrégation centrale négative. La publication R.C Dorward et al. « Banded segregation patterns in DC cast AlZnMgCu alloy ingots and their  
30 effect on plate properties » Aluminium, 1996, 72. Jahrgang, 4, p.251-259 décrit la formation de bandes de ségrégations intermittentes dans un alliage 7000. Ces bandes en forme de V sont alternativement enrichies et appauvries (respectivement appauvries et enrichies) en éléments d'alliage eutectiques (respectivement péritectiques). Ces bandes sont observables en effectuant des radiographies aux rayons X de tranches verticales de lingots, typiquement dans le plan L/TC  
35 à mi-largeur, lorsque les éléments ségrégués absorbent les rayons X de manière différenciée des atomes du métal composant le lingot. D'autres moyens permettent de visualiser ce phénomène,

par exemple l'échographie ou l'observation à l'œil nu de tranches verticales anodisées, du fait de la différence de réflectivité optique entre les zones enrichies ou appauvries en éléments d'alliage. Généralement, la macroségrégation intermittente est la plus marquée au voisinage de la région T/2.5, et typiquement entre T/3.3 et T/2.3, la région T/2 correspondant à l'axe central du lingot.

Les produits plats épais en alliages d'aluminium, en particulier les alliages d'aluminium à durcissement structural de la série 7XXX, 2XXX, ou 6XXX utilisés dans les domaines aéronautiques présentent à partir d'une épaisseur de 12.5 mm, de manière plus marquée entre 40 mm et 200 mm, des différences de propriétés selon le positionnement dans l'épaisseur du produit. En particulier, cette différence est marquée entre la mi-épaisseur et le quart épaisseur du produit.

Il est connu que trois facteurs dominent la différence de propriétés entre T/2 et T/4.

- La macroségrégation centrale abaisse les propriétés statiques à mi épaisseur des tôles recristallisées.
- Le corroyage : ce déficit de propriétés à mi épaisseur est compensé, parfois au-delà, par l'effet de corroyage sur les tôles non recristallisées ou partiellement recristallisées qui induit une texture fibrée favorable pour les propriétés.
- La vitesse de trempe, notamment pour les tôles épaisses.

La publication de Chakrabarti et al. « Through thickness property variations in 7050 plate », Materials Science Forum, 1996, Vols. 217-222, p. 1085-1090 indique que la macroségrégation domine les propriétés à T/2 pour les tôles d'épaisseur inférieure à 40mm qui sont recristallisées, alors que la texture induite par le corroyage domine les propriétés pour les tôles d'épaisseur supérieure à 40mm car elles sont non recristallisées.

L'homme de l'art cherchant à contrer les effets négatifs de la macroségrégation souhaite donc augmenter le taux de corroyage des tôles en partant de plaques de fonderie plus épaisses. Mais il est alors confronté à des niveaux de macroségrégations intermittentes au voisinage de T/2.3 et T/3.3 qui introduisent dans le produit des zones qu'on ne peut pas remettre en solution, particulièrement pour les alliages les plus saturés, car le solvus local de l'alliage dans les ségrégations intermittentes peut se situer au-delà du solidus de l'alliage de composition nominale. Ces macroségrégations intermittentes sont néfastes en particulier pour la valeur d'allongement à rupture mesurée dans le sens travers court. Une valeur d'allongement trop faible dans le sens travers court du produit n'est pas souhaitable lors de la fabrication des structures aéronautiques à cause du risque de fissuration plus important.

Les inventeurs ont donc cherché à obtenir des produits plats plus épais présentant un compromis avantageux entre les propriétés mécaniques statiques et de tolérance aux dommages, ce compromis variant peu dans l'épaisseur du produit. C'est-à-dire que le compromis de propriétés est obtenu dans la majorité de l'épaisseur du produit.

- 5 Pour que ces produits soient sélectionnés pour des applications typiques de produits plats épais telles que l'aéronautique la fabrication de moules ou d'éléments de chambre à vide, leur performance doit notamment atteindre un compromis de propriété avantageux entre les propriétés de résistance mécanique statique (typiquement limite d'élasticité en traction et en compression, résistance à la rupture) et les propriétés de tolérance aux dommages (typiquement
- 10 ténacité, résistance à la propagation des fissures en fatigue) et/ou d'allongement ces propriétés étant en général antinomiques.

### Objet de l'invention

15

L'objet de l'invention concerne un produit plat en alliage d'aluminium s'étendant parallèlement à un axe longitudinal (L), et dont la section perpendiculaire à l'axe longitudinal présente une largeur (TL) et une épaisseur (TC), l'épaisseur (TC) étant inférieure à la largeur, l'épaisseur dudit produit plat étant supérieure à 12.5 mm.

20

De manière préférée le produit plat présente une épaisseur supérieure à 40 mm, et de manière encore plus préférée supérieure à 70 mm.

Ledit produit plat est obtenu à partir d'un procédé de fabrication comprenant :

- Un procédé de coulée avec brassage électromagnétique pour former un lingot d'alliage d'aluminium d'épaisseur supérieure à 400 mm.

25

De manière préférée, l'épaisseur du lingot est supérieure à 450 mm, 500 mm ou 600 mm.

Le procédé de coulée est effectué dans une lingotière, la lingotière définissant un parallélépipède, de telle sorte que le lingot formé s'étend parallèlement à un axe longitudinal (Y), selon une largeur (W) et parallèlement à un axe transversal (X), selon une épaisseur (T), l'épaisseur du lingot étant inférieure à la largeur ; le lingot définissant un

30 plan médian s'étendant selon la mi épaisseur (T/2), parallèlement à l'axe longitudinal (Y).

L'épaisseur de la lingotière est voisine de l'épaisseur du lingot formé.

Et

- un procédé de transformation dudit lingot d'alliage d'aluminium comprenant une mise en solution à une température supérieure à 450°C, une trempe et un revenu ou une

maturation pour obtenir un produit plat en alliage d'aluminium avec optionnellement une opération de scalpage.

Le procédé de coulée avec brassage électromagnétique comprend les étapes suivantes

- 5 - coulée de l'alliage d'aluminium liquide dans la lingotière, selon un axe vertical de coulée (Z), l'alliage étant refroidi, au cours de la coulée, par un ruissellement d'un liquide refroidisseur (3), de façon à former un alliage solide (1s), s'étendant autour d'un alliage liquide (1ℓ), dit marais, l'alliage solide formant un front (10) à l'interface avec le marais (1ℓ), le front étant incliné selon un angle d'inclinaison ( $\alpha$ ), par rapport à l'axe vertical, l'angle d'inclinaison du front variant selon l'axe transversal (X);
- 10 - déplacement de l'alliage solide (1s), selon l'axe vertical de coulée (Z), selon une vitesse de coulée (V);
- au cours de la coulée, application d'un champ magnétique glissant dont l'amplitude varie selon une fréquence ( $f$ ), le champ magnétique étant généré par au moins un générateur de champ magnétique (5) disposé à la périphérie de la lingotière, de façon à appliquer une force de Lorentz moyenne ( $F$ ) en différents points du marais, la force de Lorentz moyenne, durant une période (P) du champ magnétique, étant inclinée par rapport à l'axe vertical (Z) selon un angle d'inclinaison ( $\beta$ ), dit angle d'inclinaison de la force de Lorentz, ce dernier variant selon l'axe transversal (X) ; la force de Lorentz présente durant la période P une force de Lorentz d'intensité maximale ( $F_{max}$ );
- 15 - le marais comporte une zone médiane, s'étendant symétriquement de part et d'autre du plan médian (M) dont l'épaisseur correspond à une demi-épaisseur du lingot
- le champ magnétique appliqué se propage selon un axe de propagation, de telle sorte qu'une amplitude maximale ( $B_0^{max}$ ) du champ magnétique se propage selon ledit axe de propagation, en définissant une longueur d'onde de propagation ( $\lambda$ ).
- 25

Le procédé de coulée avec brassage électromagnétique est tel qu'il permette l'atténuation des macroségrégations intermittentes ou leur disparition. Selon l'invention, le procédé de coulée avec brassage électromagnétique correspond soit à un mode de brassage électromagnétique non stationnaire, soit à un mode de brassage électromagnétique stationnaire dit plaquant, tels que définis ci-dessous.

Le mode de brassage électromagnétique non stationnaire est défini par un paramètre magnétique dit de force, régissant la force de Lorentz d'intensité maximale ( $F_{max}$ ) ; ce

paramètre magnétique de force est variable dans un intervalle temporel ( $\Delta t$ ) prédéterminé, ledit paramètre étant :

- ladite amplitude maximale ( $B_0^{max}$ ) du champ magnétique ;
- et/ou ladite fréquence ( $f$ ) du champ magnétique ;
- 5 - et/ou la longueur d'onde de propagation ( $\lambda$ ) du champ magnétique ;

de façon à obtenir une modulation, dans ledit intervalle temporel, de ladite force de Lorentz d'intensité maximale ( $F_{max}$ ) se propageant selon l'axe de propagation.

Le mode de brassage électromagnétique stationnaire plaquant est défini par le fait que le champ magnétique glissant se propage selon un axe de propagation parallèle à l'axe vertical de coulée; la fréquence ( $f$ ) est inférieure à 5 Hz ; et la vitesse de coulée ( $V$ ) et la fréquence ( $f$ ) sont adaptées de telle sorte que dans toute la zone médiane du marais, à l'interface entre l'alliage liquide (1 $\ell$ ) et le front, l'angle d'inclinaison de la force ( $\beta$ ) est strictement inférieur à l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) du front.

15 Il a été observé que le produit plat en alliage d'aluminium ainsi obtenu présente pour un élément de l'alliage d'aluminium, dont la teneur en poids est supérieure à 0.5 %, ou pour la somme de plusieurs éléments de l'alliage dont la teneur individuelle en poids est supérieure à 0.5%, un critère de dispersion  $\varepsilon$  inférieur à 3.3, de préférence inférieur à 3, plus avantageusement inférieur à 2.5, encore plus avantageusement inférieur à 2 et de manière  
20 préférée inférieur à 1.5, le critère de dispersion étant défini selon les expressions suivantes :

$$\varepsilon = \Delta C_{ZA} / \Delta C_{ZR}$$

$$\Delta C_{ZA} = \max (C_{ZA}) - \min (C_{ZA}),$$

$$\Delta C_{ZR} = \max (C_{ZR}) - \min (C_{ZR}),$$

où :

25 -  $\max (C_{ZA})$  et  $\min (C_{ZA})$  désignent respectivement les concentrations maximale et minimale de l'élément considéré ou de la somme des éléments considérés mesurées dans une zone d'analyse (ZA), présentant des macroségrégations intermittentes, par exemple entre les épaisseurs T/3.3 et T/2.3 dudit produit plat;

-  $\max (C_{ZR})$  et  $\min (C_{ZR})$  désignent respectivement les concentrations maximale et  
30 minimale de l'élément considéré ou de la somme des éléments considérés mesurées dans une zone de référence (ZR), considérée comme peu affectée par les macroségrégations intermittentes, par exemple entre les épaisseurs T/12 et T/6 dudit produit plat, mais toujours

en excluant les zones périphériques éventuellement affectées par de la macroségrégation corticale;

lesdites concentrations étant mesurées sur au moins un profil établi à mi-largeur dans un plan vertical L/TC et selon la direction TC, ledit profil étant représentatif desdites macroségrégations intermittentes de l'élément considéré selon la direction TC.

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, et représentés sur les figures listées ci-dessous.

10

### **Description des figures**

Les figures 1 et 2 présentent les principaux composants du dispositif de coulée permettant de mettre en œuvre l'invention.

Les figures 3 et 4 représentent respectivement une distribution spatiale et temporelle de l'amplitude d'un champ magnétique glissant non stationnaire, selon un des modes de réalisation de l'invention (coulée avec brassage électromagnétique non stationnaire).

Les figures 5 et 6 présentent respectivement une distribution spatiale et temporelle de l'amplitude d'un champ magnétique glissant stationnaire selon un autre mode de réalisation de l'invention (coulée avec brassage électro magnétique stationnaire plaquant).

La figure 7 représente une courbe dite de résonance de surface libre du marais, représentant des valeurs, dites critiques, de l'intensité et de la fréquence d'un courant d'induction auxquelles une résonance de la surface libre du marais apparaît, cela en mettant en œuvre un procédé de brassage électromagnétique.

Les figures 8, 9, 10 représentent respectivement une courbe dite de résonance CR de surface libre du marais, obtenue en mettant en œuvre un procédé de coulée utilisant un brassage par champ magnétique non stationnaire dans les exemples respectifs 1, 3 et 4 selon l'invention.

La figure 11 illustre une force de Lorentz s'appliquant sur une partie du marais d'une coulée mettant en œuvre l'invention selon un procédé de brassage stationnaire plaquant.

Les figures 12A, 12B, 12C et 12D montrent des résultats de simulations permettant d'obtenir l'orientation moyenne d'une force de Lorentz dans le marais, au niveau du front, respectivement à différentes fréquences, pour une vitesse de coulée de 55 mm par minute en mettant en œuvre une coulée avec brassage électromagnétique stationnaire.

Les figures 12 E, 12F, 12G et 12H montrent des résultats de simulations permettant d'obtenir l'orientation moyenne d'une force de Lorentz dans le marais, au niveau du front, respectivement

30

à différentes fréquences, pour une vitesse de coulée de 35 mm par minute en mettant en œuvre une coulée avec brassage électromagnétique stationnaire.

Les figures 13A et 13B sont des courbes établies en considérant respectivement différentes fréquences, et représentant une évolution d'un angle, dit angle différentiel, le long du front, l'angle différentiel représentant une différence entre les angles, par rapport à la verticale, respectivement formés par la force de Lorentz et le front. Sur la figure 13A, on a considéré une vitesse de coulée de 55 mm par minute. Sur la figure 13B, on a considéré une vitesse de coulée de 35 mm par minute.

La figure 14 montre un abaque permettant de définir un domaine de fonctionnement en fonction de la vitesse de coulée (axe des abscisses) et de l'épaisseur de la coulée (axe des ordonnées), pour obtenir une orientation de la force de Lorentz dans une zone médiane s'étendant entre  $T/2 \pm T/4$  selon un procédé de coulée avec brassage électromagnétique stationnaire plaquant.

### **Description de l'invention**

En préambule, on appelle produit plat un produit de forme parallélépipédique s'étendant parallèlement à un axe longitudinal (L), et dont la section perpendiculaire à l'axe longitudinal présente une largeur (TL) et une épaisseur (TC), l'épaisseur (TC) étant inférieure à la largeur.

Tous les alliages d'aluminium cités dans le document sont désignés, sauf indication contraire, selon les désignations définies par l'« Aluminum Association » dans les «Registration Record Series » qu'elle publie régulièrement.

Toutes les indications concernant la composition chimique des alliages sont exprimées comme un pourcentage en poids basé sur le poids total de l'alliage. L'expression 1.4 x Si signifie que la teneur en silicium exprimée en % en poids est multipliée par 1.4.

Les définitions des états métallurgiques sont indiquées dans la norme européenne EN 515.

Les caractéristiques mécaniques statiques en traction, en d'autres termes la résistance à la rupture  $R_m$ , la limite d'élasticité conventionnelle à 0.2% d'allongement  $R_{p0.2}$ , et l'allongement à la rupture A%, sont déterminés par un essai de traction selon la norme NF EN ISO 6892-1 (2016), le prélèvement et le sens de l'essai étant définis par la norme EN 485 (2016).

Le facteur d'intensité de contrainte ( $K_{Ic}$ ) est déterminé selon la norme ASTM E 399 (2012).

Les tailles de grain sont mesurées selon la norme ASTM E112-12.

L'abattement de résistance par effet d'entaille est déterminé par la norme E 602-03.

Selon une nomenclature connue de l'homme du métier, le terme T/n, où n est un nombre positif, désigne une région située à une distance T/n de la surface d'un produit parallélépipédique où T désigne l'épaisseur du produit, ledit produit parallélépipédique s'étend parallèlement à un axe longitudinal (L), et dont la section perpendiculaire à l'axe longitudinal présente une largeur et une épaisseur, l'épaisseur étant inférieure à la largeur.

Les inventeurs se sont aperçus qu'un produit plat issu d'un lingot obtenu selon les conditions de procédé de coulée de l'invention et ensuite transformé selon un procédé de transformation comprenant un corroyage, une mise en solution, trempe et revenu ou maturation permettait d'obtenir un bon compromis entre ténacité, limite d'élasticité et allongement. En particulier le compromis est obtenu pour la ténacité définie selon la norme E399-12 mesurée à mi épaisseur dans le sens L-T, la limite d'élasticité mesurée dans le sens longitudinal (L) et l'allongement à rupture mesuré dans le sens travers court (TC).

Cependant, la solution corroyage n'est pas toujours envisageable en fonction de l'épaisseur du produit souhaité. C'est le cas en particulier des produits plats en alliage d'aluminium, en particulier les alliages d'aluminium à durcissement structural de la série 7XXX, utilisés dans les domaines de l'usinage de moules mécaniques. Ceux-ci sont classiquement utilisés à des épaisseurs supérieures à 400 mm, préférentiellement supérieures à 500 mm, encore plus préférentiellement supérieure à 600 mm.

Les inventeurs se sont aperçus que des produits plats obtenus à partir d'un lingot d'épaisseur supérieure à 400 mm, préférentiellement supérieure à 500 mm, encore plus préférentiellement supérieure à 600 mm obtenu selon les conditions de procédé de coulée de l'invention et ensuite transformés selon un procédé de transformation comprenant une mise en solution, trempe et revenu ou maturation mais n'incluant pas d'étape de déformation plastique supérieure à 5% permettait d'obtenir un écart de propriétés réduit dans l'épaisseur. En particulier, cette amélioration est observée pour l'allongement à rupture mesuré entre la surface et la mi-épaisseur dans le sens TL et l'abattement de résistance par effet d'entaille mesuré à mi épaisseur et quart épaisseur dans le sens TL.

25

L'invention repose sur la constatation faite par les inventeurs que la combinaison du procédé de coulée décrit dans les demandes PCT/FR2017/051195 ou FR 1761200 pour obtenir un lingot d'alliage d'aluminium d'épaisseur supérieure à 400 mm et un procédé de transformation comprenant une mise en solution à une température supérieure à 450°C, trempe et revenu ou maturation permet d'obtenir un meilleur compromis de propriétés dans l'épaisseur du produit plat transformé.

Les inventeurs attribuent ce bénéfice à la réduction de la macroségrégation intermittente dans le produit plat transformé.

35

Les demandes PCT/FR2017/051195 et FR 1761200 visent toutes les deux à réduire les macroségrégations intermittentes dans le lingot coulé en utilisant un champ magnétique glissant. On nommera coulée avec brassage électromagnétique non stationnaire les conditions de coulées décrites dans la demande PCT/FR2017/051195 permettant de réduire les macroségrégations intermittentes. On nommera coulée avec brassage électromagnétique stationnaire plaquant les conditions de coulée décrites dans la demande FR 1761200 permettant de réduire les macroségrégations intermittentes.

Le produit plat s'étend parallèlement à un axe longitudinal (L), et dont la section perpendiculaire à l'axe longitudinal présente une largeur (TL) et une épaisseur (TC), l'épaisseur (TC) étant inférieure à la largeur, l'épaisseur dudit produit plat étant supérieure à 12.5 mm.

De manière préférée le produit plat présente une épaisseur supérieure à 40 mm, et de manière encore plus préférée supérieure à 70 mm.

Les macroségrégations intermittentes du produit plat peuvent être caractérisées en réalisant des analyses chimiques selon l'épaisseur du produit, de préférence des profils linéaires selon l'axe TC dans le plan L-TC du produit. Ces profils sont réalisés de préférence à quart largeur ou mi largeur. Ces analyses chimiques peuvent être réalisées par microsonde ou par toute autre méthode avec une résolution spatiale d'au moins 0.1 mm.

Le profil obtenu avec une résolution d'au moins 0,1 mm est le profil brut. Une moyenne glissante sur 2 mm permet de s'affranchir de la microségrégation et permet d'obtenir un profil lissé. Une autre moyenne glissante du profil brut sur 50 mm permet de s'affranchir des macroségrégations intermittentes, et d'obtenir le profil de macroségrégation continue. Le profil de macroségrégation continue est soustrait au profil lissé pour obtenir un profil dit corrigé, correspondant à la macroségrégation intermittente. Le profil corrigé est principalement représentatif de la macroségrégation intermittente, et n'est pas ou peu affecté par la macroségrégation continue centrale et par la microségrégation. Un tel profil corrigé permet de caractériser la macroségrégation intermittente.

On peut alors calculer un écart maximal de concentration dans une zone d'analyse  $Z_A$  située entre  $T/3.3$  et  $T/2.3$  de l'épaisseur du produit plat, cet écart maximal pouvant être exprimé selon l'équation suivante :

$$\Delta C_{Z_A} = \max(C_{Z_A}) - \min(C_{Z_A})$$

où  $\max(C_{Z_A})$  et  $\min(C_{Z_A})$  désignent respectivement les concentrations maximale et minimale de l'élément considéré mesurées entre  $T/3.3$  et  $T/2.3$ .

L'élément considéré est un élément dont la teneur en poids dans l'alliage est supérieure ou égale à 0.5%. Il peut s'agir, de préférence, de l'élément majeur de l'alliage, le terme élément majeur correspondant à la définition donnée par The Aluminum Association.

L'écart maximal  $\Delta C_{ZA}$  peut être normalisé par la concentration nominale  $C_0$  de l'élément considéré. Les produits selon l'invention présentent de préférence une valeur d'un tel ratio normalisé inférieure à 10% et de préférence inférieure à 8% ou même inférieure à 6%. Cependant la valeur absolue de  $\Delta C_{ZA}$  peut être influencée par l'épaisseur du produit, la nature de l'élément considéré, notamment son coefficient de partage et/ou sa concentration. Il est donc utile pour caractériser les produits obtenus par le procédé selon l'invention de calculer, à titre de référence, un écart maximal dans une zone de référence  $Z_R$  peu sensible aux macroségrégations intermittentes, située entre T/12 et T/6, cet écart maximal pouvant être exprimé selon l'équation suivante:

$$\Delta C_{ZR} = \max(C_{ZR}) - \min(C_{ZR})$$

où  $\max(C_{ZR})$  et  $\min(C_{ZR})$  désignent respectivement les concentrations maximale et minimale de l'élément considéré mesurées entre T/12 et T/6.

On obtient ainsi un critère de dispersion  $\varepsilon$  permettant d'évaluer pour l'élément considéré la macroségrégation intermittente :

$$\varepsilon = \Delta C_{ZA} / \Delta C_{ZR}$$

Pour s'affranchir de variations locales de composition, il est avantageux, pour déterminer  $\Delta C_{ZA}$  et  $\Delta C_{ZR}$ , de calculer une moyenne sur au moins cinq profils de concentration distants d'au moins 10 mm.

Plus  $\varepsilon$  est faible, moins les macroségrégations intermittentes sont marquées. Les produits obtenus par le procédé selon l'invention ont de préférence un critère de dispersion  $\varepsilon$  inférieur à 3.3, de préférence inférieur à 3, plus avantageusement inférieur à 2.5, encore plus avantageusement inférieur à 2 et de manière préférée inférieur à 1.5.

On peut également appliquer ce critère de dispersion à plusieurs éléments dont la teneur individuelle est supérieure à 0.5%. Dans le cas où l'on considère la somme de plusieurs éléments, les valeurs pour normaliser l'écart maximal  $\Delta C_{ZA}$ , et/ou la transformée de Fourier correspondent à la somme des concentrations nominales des éléments considérés.

Il est également utile de réaliser une analyse par transformée de Fourier du profil brut de composition et de le normaliser par la composition nominale de l'élément. Une telle analyse permet d'identifier des périodes spatiales caractérisant la macroségrégation intermittente. Les inventeurs ont pu constater que la macroségrégation intermittente présente des périodes comprises entre deux valeurs définies en fonction du taux de réduction R appliqué au lingot

pendant le procédé de transformation. Typiquement la macroségrégation intermittente présente des périodes comprises entre  $8/R$  et  $25/R$  mm.

On appelle taux de réduction le rapport entre l'épaisseur du lingot obtenue par le procédé de coulée et l'épaisseur du produit plat final obtenu après corroyage ou si un scalpage est effectué l'épaisseur obtenue après scalpage et l'épaisseur du produit plat final obtenu après corroyage. Par exemple, dans le cas d'un laminage à chaud, si le lingot coulé présente une épaisseur de 550 mm et qu'il est scalpé à 500 mm pour supprimer la couche corticale en surface ou d'éventuels défauts, s'il est laminé à une épaisseur finale de 100 mm, le taux de réduction est égal à 5.

Quand la macroségrégation intermittente est importante, et que le lingot ne subit pas de déformation plastique supérieure à 5%, le taux de réduction est sensiblement égal à 1. On observe donc dans ce cas un pic de l'amplitude des composantes de Fourier pour des périodes spatiales comprises entre 8 et 25 mm.

On détermine un critère adimensionnel d'intensité spectrale  $\zeta$  qui correspond à l'amplitude maximale des composantes de Fourier dans une plage de période spatiale comprise entre  $8/R$  et  $25/R$  mm, normalisée par la concentration nominale  $C_0$  de l'élément considéré. Les produits obtenus par le procédé selon l'invention ont de préférence un critère  $\zeta$  inférieur à 0.01, de préférence inférieur à 0.007 et de manière préférée inférieur à 0.005.

Les critères de dispersion  $\varepsilon$  et d'intensité spectrale  $\zeta$  sont avantageusement appliqués à l'élément majeur de l'alliage considéré, typiquement au Zn pour un alliage 7xxx ou au Cu pour un alliage 2xxx. On peut également appliquer ces critères à la somme de plusieurs éléments dont la teneur individuelle est supérieure à 0.5%, par exemple la somme Zn + Cu dans certains alliages 7xxx ou la somme Mg + Si dans les alliages 6xxx.

Dans le cas où l'on considère la somme de plusieurs éléments, les valeurs pour normaliser l'écart maximal  $\Delta C_{ZA}$ , et/ou la transformée de Fourier correspondent à la somme des concentrations nominales des éléments considérés.

Les figures 1 et 2 illustrent une lingotière permettant une mise en œuvre de l'invention. Dans cet exemple, un alliage d'aluminium 1 s'écoule dans une lingotière 2, à travers une ouverture 2i. La coulée s'effectue selon un axe Z vertical, à travers la lingotière. La lingotière est délimitée par une enceinte périphérique dont la section, dans un plan horizontal XY, est parallélépipédique. La lingotière définit un cadre, parallèlement à un axe longitudinal Y, selon une largeur W, et, parallèlement à un axe transversal X, en définissant une épaisseur T. La largeur W est supérieure à l'épaisseur T. L'épaisseur T correspond à une distance entre deux parois verticales 2p délimitant la lingotière 2. La coulée forme un lingot parallélépipédique. Un plan, dit plan médian M, s'étend à mi-épaisseur (T/2), parallèlement à l'axe vertical Z et à l'axe longitudinal Y du

lingot. L'épaisseur  $T$  est supérieure à 400 mm, de préférence supérieure à 500 mm et de manière encore plus préférée supérieure à 600 mm. L'épaisseur  $T$  est de préférence comprise entre 400 mm et 750 mm.

Un fluide de refroidissement 3, par exemple de l'eau, s'écoule contre la paroi du lingot solidifié.

5 Ce procédé est connu en tant que coulée semi-continue par refroidissement direct (« Direct-Chill Casting »). Un faux-fond 4 est translaté de façon à s'éloigner de l'ouverture 2i au cours de la coulée. La vitesse de translation du faux-fond correspond à une vitesse dite de coulée  $V$ .

Sous l'effet du refroidissement, une zone d'alliage solide 1s se forme, à proximité de l'enceinte refroidie, autour d'une zone d'alliage liquide 1ℓ, désignée par le terme « marais ». L'interface  
10 entre le marais 1ℓ et la zone solide 1s forme un front 10. A l'issue du refroidissement, le lingot, est formé. Le front 10 présente une pente, par rapport à la verticale, variable en fonction de la position dans l'épaisseur. On appelle l'angle du front un angle  $\alpha$  entre la tangente au front, en un point, et la verticale, c'est-à-dire l'axe  $Z$ . Plus l'angle du front  $\alpha$  est faible, plus la tangente au front est orientée verticalement. L'angle du front est  $\alpha$  représenté sur la figure 11. L'angle du  
15 front varie selon l'axe transversal  $X$ .

Sur l'exemple représenté sur la figure 1, le front 10 est stationnaire : il reste sensiblement à la même position, tandis que la matière se déplace verticalement, à la vitesse de coulée.

Dans les procédés selon l'art antérieur, des macro-ségrégations intermittentes 11 se forment dans le lingot, et en particulier dans une plage d'épaisseur comprise entre  $T/3.3$  et  $T/2.3$  de part et  
20 d'autre du plan médian  $M$ .

L'alliage est un alliage d'aluminium de la série 1XXX, 2XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX, 6XXX, 7XXX ou 8XXX. Les alliages dont la fraction massique en éléments d'alliage est supérieure à 1%, voire supérieure à 3% ou encore à 5% sont particulièrement adaptés à un procédé selon l'invention, car plus cette fraction massique de ces éléments d'alliages est importante, plus les  
25 ségrégations intermittentes sont marquées. L'invention est particulièrement avantageuse pour les produits en alliage de type 2XXX, 6XXX ou 7XXX.

On a représenté un générateur de champ magnétique 5, apte à générer un champ magnétique  $B$  destiné à être appliqué à l'alliage liquide 1ℓ. Un tel générateur peut être un aimant permanent mobile ou un inducteur électromagnétique, ce dernier générant un champ magnétique lorsqu'il  
30 est parcouru par un courant électrique, dit courant d'induction.

Le champ magnétique  $B$  appliqué à l'alliage liquide 1ℓ est un champ alternatif, d'amplitude  $B_0$  et de fréquence  $f$ . L'effet de ce champ magnétique est d'appliquer un brassage du marais, par le moyen de forces de Lorentz s'appliquant sur l'alliage liquide 1ℓ. En effet, l'application d'un champ magnétique  $B$  engendre, dans l'alliage, la formation d'un courant électrique  $J$  résultant,  
35 au sein de l'alliage liquide 1ℓ soumis au champ magnétique, en l'apparition d'une force de

Lorentz  $F$  telle que  $F \propto J \times B$  où  $\times$  désigne l'opérateur produit vectoriel, et  $\propto$  désigne une relation de proportionnalité. La force de Lorentz présente une composante oscillante à une fréquence double de la fréquence  $f$  du champ magnétique.

5 Du fait de l'épaisseur de la lingotière, la fréquence  $f$  est choisie de manière à permettre une pénétration suffisante du champ magnétique  $B$  dans le marais, de façon à obtenir un brassage efficace du liquide. La fréquence  $f$  est d'autant plus faible que l'épaisseur du produit est élevée. Dans le cas d'un lingot d'épaisseur supérieure à 400 mm, la fréquence est de préférence inférieure à 5 Hz, et de façon encore plus avantageuse inférieure à 2 Hz ou à 1 Hz.

10 Le générateur 5 est apte à générer un champ magnétique glissant. Le terme champ magnétique glissant désigne un champ magnétique alternatif, dont l'amplitude  $B_0$  n'est pas constante, et varie entre une valeur minimale et une amplitude maximale  $B_0^{max}$ , l'amplitude maximale  $B_0^{max}$  se propageant selon un axe de propagation. Par amplitude, on entend la valeur maximale que prend une grandeur périodique. L'application d'un champ magnétique glissant se traduit, en un point du marais, par une variation périodique de son amplitude. Ainsi, l'amplitude du  
15 champ magnétique en un point du marais varie en fonction du temps, entre une amplitude minimale  $B_0^{min}$  et une amplitude maximale  $B_0^{max}$ .

Le générateur de champ magnétique glissant 5 peut être constitué par plusieurs inducteurs électromagnétiques disposés autour de l'enceinte périphérique. Sur la figure 2, on a représenté trois paires  $5_1$ ,  $5_2$  et  $5_3$  d'inducteurs électromagnétiques. La partie supérieure  $5_s$  des inducteurs  
20 est positionnée au niveau de la surface libre  $1_{sup}$  de l'alliage liquide. Chaque inducteur présente un déphasage de  $90^\circ$  entre la partie supérieure  $5_s$  et la partie inférieure  $5_i$ . Dans les exemples décrits ci-après, on a utilisé un dispositif tel que décrit dans la demande WO2014/155357. Par grande face d'un lingot, il est entendu une face s'étendant selon l'axe longitudinal Y et l'axe vertical Z. Chaque inducteur comporte une ou plusieurs bobines. Dans cet exemple, chaque  
25 bobine est disposée à une distance de 185 mm de la lingotière. D'une façon générale, la distance entre une bobine d'un inducteur et la lingotière peut être comprise entre 10 mm et 200 mm et de façon préférée pour des raisons d'encombrement entre 130 mm et 200 mm.

Le champ magnétique glissant peut également être généré à partir d'un ou plusieurs aimants permanents disposés à la périphérie de la lingotière et mis en mouvement par rapport à cette  
30 dernière. Par exemple, il est possible de générer un champ magnétique glissant en faisant tourner un aimant permanent.

La distance  $\lambda$  séparant deux maxima d'amplitude du champ magnétique est la longueur d'onde du champ magnétique glissant. La figure 5 représente un exemple de distribution de l'amplitude  $B_0$  d'un champ magnétique glissant le long d'un axe de propagation  $\Delta$  à un instant  $t$  (trait continu), et à un instant  $t + \Delta t$  (trait pointillé). Sur l'axe de propagation, on a représenté une  
35

coordonnée  $r$  correspondant à la position d'un point du marais. La figure 5 illustre une évolution temporelle d'un champ magnétique alternatif glissant en ce point. Cette évolution est périodique, et s'effectue selon une période  $P$ . L'application d'un champ magnétique glissant se traduit, en un point du marais, par une variation périodique de son amplitude. Ainsi, l'amplitude du champ magnétique en un point du marais varie en fonction du temps, entre une amplitude minimale  $B_0^{min}$  et une amplitude maximale  $B_0^{max}$ .

La force de Lorentz, en un point de coordonnées  $r$  du marais, comporte une composante oscillante, modulée selon une fréquence  $2f$  double de la fréquence du champ magnétique. L'amplitude  $F_0$  de la densité de force de Lorentz oscillante peut être explicitée selon l'expression:

$$F_0(r) = \frac{1}{2} \sigma f \lambda B_0^2(r) \quad (1),$$

où  $\sigma$  désigne la conductivité électrique.

L'amplitude de la force de Lorentz, en un point  $r$  du marais dépend du carré de l'amplitude du champ magnétique appliqué en ce point. En se plaçant dans le repère XYZ, lié à la lingotière 2, la propagation d'une valeur maximale de l'amplitude du champ magnétique  $B_0^{max}$ , le long d'un axe de propagation, entraîne, simultanément, la propagation d'une force de Lorentz d'intensité maximale  $F_{max}$  selon l'axe de propagation. La combinaison des forces se propageant le long de l'axe de propagation établit un mouvement du liquide selon cet axe constituant un brassage électromagnétique.

Les inventeurs ont constaté qu'il était possible d'améliorer les propriétés d'un produit plat en alliage d'aluminium d'épaisseur supérieure à 12.5 mm en ajustant les conditions de brassage pendant la coulée du lingot servant à l'obtention du produit plat après transformation dudit lingot. Le procédé de transformation comprenant une mise en solution à une température supérieure à 450°C, une trempe et un revenu ou maturation pour obtenir un produit plat en alliage d'aluminium.

Optionnellement une opération de scalpage peut être effectuée pendant le procédé de transformation afin d'éliminer des défauts de surface réducteurs si une opération de corroyage, comme le laminage est effectuée subséquentement.

Les inventeurs ont découvert deux modes de coulée permettant d'améliorer les propriétés dans l'épaisseur du produit plat :

- une coulée avec brassage électromagnétique non stationnaire

- une coulée avec brassage électromagnétique stationnaire plaquant.

#### Coulée avec brassage électromagnétique non stationnaire

5

Les conditions de coulées correspondantes à la coulée avec brassage électromagnétique non stationnaire sont décrites dans la demande PCT/FR2017/051195.

Les inventeurs ont constaté qu'en modulant, dans le temps, l'amplitude maximale de la force de Lorentz  $F_{max}$  se propageant dans le marais, les macroségrégations intermittentes sont atténuées, voire disparaissent, et cela particulièrement sur des lingots dont l'épaisseur est supérieure à 400 mm.

Cette modulation temporelle peut être obtenue par une variation d'un paramètre, dit paramètre magnétique de force, commandant l'amplitude de la densité de force de Lorentz explicitée dans l'équation (1), par exemple :

- 15
- la valeur de l'amplitude maximale  $B_0^{max}$  du champ magnétique ;
  - de la fréquence  $f$  du champ magnétique ;
  - la longueur d'onde  $\lambda$  du champ magnétique glissant.

Le procédé avec brassage électromagnétique non stationnaire peut comporter l'une quelconque des caractéristiques suivantes, prises isolément ou en combinaison :

20

- la fréquence du champ magnétique est inférieure à 5 Hz, ou 2 Hz ou 1 Hz ;
- la force de Lorentz d'intensité maximale, se propageant selon l'axe de propagation, varie d'au moins  $30 \text{ N.m}^{-3}$  dans un intervalle temporel compris entre 50 secondes et 10 minutes ;
- le champ magnétique est tel que la valeur absolue de la variation de la densité de la force de Lorentz maximale est supérieure ou égale à  $0.05 \text{ N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$  durant ledit intervalle temporel ;
- l'axe de propagation de l'amplitude maximale du champ magnétique appartient à un plan parallèle à la direction de coulée ;
- au cours de la coulée, la variation du paramètre de force est périodique, la période étant comprise entre 50 s et 20 minutes, ou entre 1 minute et 15 minutes, ou entre 2 minutes et 10 minutes ;
- au cours de la coulée, la force de Lorentz d'intensité maximale n'est pas égale à zéro.
- au cours de la coulée, la variation du paramètre de force n'est pas obtenue par une interruption périodique du champ glissant.
- le nombre adimensionnel de Hartmann, en au moins un point de la partie liquide de l'alliage, varie au moins d'un facteur 3, voire d'un facteur 5, dans ledit intervalle temporel ;
- l'alliage d'aluminium est choisi parmi les alliages de types 2XXX, 6XXX ou 7XXX.

35

Selon un mode de réalisation, les générateurs sont des inducteurs électromagnétiques, chaque inducteur électromagnétique étant parcouru par un courant dit courant d'induction. Le procédé comporte, durant ledit intervalle temporel :

- une variation d'une intensité du courant d'induction ;
- 5 - et/ou une variation d'une fréquence du courant d'induction ;
- et/ou une variation d'une distance entre un inducteur électromagnétique et la lingotière.
- et/ou une variation du déphasage du courant entre les bobines qui conduit à une variation de la longueur d'onde du champ magnétique glissant.

Selon ce mode de réalisation, le procédé peut comporter une variation de l'intensité ou de la fréquence du courant d'induction parcourant un inducteur, le procédé comportant alors :

- une étape préalable de définition d'au moins une valeur critique de l'intensité et de la fréquence du courant d'induction générant, au niveau d'une surface libre de l'alliage d'aluminium s'écoulant dans la lingotière, une onde résonante ;
- une détermination d'une plage de variation de l'intensité ou de la fréquence du courant d'induction en fonction de ladite valeur critique préalablement définie.

Le procédé peut comporter une définition d'une pluralité de valeurs critiques de l'intensité et de la fréquence du courant d'induction, de façon à définir une courbe de résonance, représentant les valeurs critiques d'intensité et de fréquence générant une résonance de ladite surface libre, le procédé comportant une détermination d'une plage de variation de l'intensité ou de la fréquence du courant d'induction dans un domaine délimité par ladite courbe de résonance.

De manière préférée, le procédé comporte une variation de la fréquence du courant d'induction parcourant un inducteur.

Selon un mode de réalisation, au moins un générateur est un aimant permanent, le procédé comportant :

- 25 - une variation d'une distance entre l'aimant permanent et la lingotière ;
- et/ou une rotation de l'aimant permanent, et une variation de la vitesse de rotation de l'aimant ;
- et/ou une rotation de deux aimants permanents.

30 Lorsque le champ magnétique glissant est généré par une pluralité d'inducteurs électromagnétiques disposés à la périphérie de la lingotière, la modulation temporelle de la densité de force de Lorentz peut être obtenue en modifiant le pas polaire, c'est-à-dire le déphasage entre les courants d'induction circulant dans chaque inducteur. Une telle modification permet de faire varier la longueur d'onde  $\lambda$  du champ magnétique glissant, c'est-à-dire la distance entre deux maxima se propageant selon l'axe de propagation. La fréquence

35 du courant d'induction circulant dans les inducteurs peut être variable, ce qui modifie la

fréquence  $f$  du champ magnétique. L'amplitude du courant d'induction peut également être variable, ce qui modifie la valeur de l'amplitude maximale  $B_0^{max}$  du champ magnétique. Sur la figure 3, on a représenté un mode de réalisation dans lequel la valeur de l'amplitude maximale  $B_0^{max}$  du champ magnétique et la longueur d'onde  $\lambda$  du champ magnétique glissant sont variables au cours du temps. Ainsi, on a représenté une distribution spatiale de l'amplitude  $B_0(t)$  dans le marais, à un instant  $t$  (trait continu), ainsi qu'une distribution spatiale de l'amplitude  $B_0(t + \Delta t)$ , à un instant  $t + \Delta t$  (trait pointillé). Durant l'intervalle temporel  $\Delta t$ , l'amplitude maximale  $B_0^{max}$  varie entre  $B_0^{max}(t)$  et  $B_0^{max}(t + \Delta t)$ . De même, la longueur d'onde  $\lambda$  a été modifiée, passant de  $\lambda(t)$  à  $\lambda(t + \Delta t)$ . Sur la figure 4, qui représente une évolution temporelle d'un champ magnétique alternatif glissant en un point, on a représenté un mode de réalisation dans lequel la valeur de l'amplitude maximale  $B_0^{max}$  du champ magnétique varie, au cours du temps, pour une fréquence  $f$  et une longueur d'onde  $\lambda$  constantes.

De ce fait, l'amplitude maximale de la force de Lorentz, se propageant dans le marais, varie entre  $t$  et  $t + \Delta t$ , entre les valeurs  $F_{max}(t)$  et  $F_{max}(t + \Delta t)$ .

La modulation temporelle d'un paramètre de force est mise en œuvre pendant la coulée, durant une durée significative, de préférence supérieure à 50% voire à 80% de la durée de la coulée. Cette modulation temporelle peut par exemple être appliquée durant au moins 30 minutes, voire au moins 1 heure.

Un champ magnétique glissant  $B$  peut notamment être généré à partir de deux inducteurs disposés sur une même face du lingot. Les inducteurs sont disposés de préférence face à une grande face du lingot, c'est-à-dire une des deux faces du lingot présentant la plus grande section verticale. Les inducteurs peuvent être superposés l'un à l'autre, de façon à engendrer un déphasage dit vertical, ou disposés côte à côte, de façon à engendrer un déphasage horizontal. On peut utiliser un dispositif décrit dans la demande WO2014/155357, et plus précisément trois inducteurs, orientés selon l'axe vertical Z, sont disposés face à chaque grande face du lingot.

Le champ magnétique glissant peut également être généré à partir d'un ou plusieurs aimants permanents disposés à la périphérie de la lingotière et mis en mouvement par rapport à cette dernière. Par exemple, il est possible de générer un champ magnétique glissant en faisant tourner un aimant permanent.

Une variation des paramètres du champ magnétique glissant, qu'il s'agisse de son amplitude, de sa fréquence ou de sa longueur d'onde permet d'appliquer une force de Lorentz non stationnaire dans le marais. Les inventeurs ont constaté que cela permet d'atténuer l'apparition des macroségrégations intermittentes voire de les faire disparaître. De telles conditions influent probablement sur les recirculations se produisant spontanément dans le marais, et réduisent leurs conséquences.

De préférence, dans le marais, la vitesse de variation de la densité maximale de force de Lorentz est supérieure à  $0.05 \text{ N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ , et de préférence supérieure à  $0.1 \text{ N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ , et de préférence supérieure à  $0.2 \text{ N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ . Dans un mode de réalisation la vitesse maximale de variation de la densité maximale de force de Lorentz pendant la coulée est au moins de  $1 \text{ N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$  et de préférence au moins de  $2 \text{ N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ .

De préférence, la variation d'un ou plusieurs paramètres de force a lieu dans un intervalle temporel inférieur ou égal aux durées caractéristiques des recirculations générées par convection naturelle. Ces durées varient selon l'épaisseur du lingot et de la vitesse de coulée. En considérant des épaisseurs  $e$  comprises entre 400 mm et 700 mm, et des vitesses de coulée comprises entre 30 mm/min et 80 mm/min, les durées caractéristiques des recirculations s'étendent entre 50 secondes (épaisseur de 400 mm, vitesse de coulée de 30 mm/min) et 10 minutes (épaisseur de 700 mm, vitesse de coulée de 80 mm/min). Ainsi, les paramètres de force varient dans un intervalle temporel  $\Delta t$  déterminé en fonction de ces durées caractéristiques. Par variation, on entend une variation significative, d'au moins 10% du paramètre de force considéré, et de préférence d'au moins 20% voire 30% du paramètre de force.

La variation d'un paramètre de force peut être périodique, la période temporelle de variation pouvant être de l'ordre d'une durée caractéristique de recirculation, c'est-à-dire être comprise entre 50 secondes et 10 minutes selon les conditions de dimensions et de vitesse de la coulée. De préférence, dans le marais, pendant la période temporelle de variation, la densité maximale de force de Lorentz varie d'au moins  $30 \text{ N.m}^{-3}$ , et avantageusement d'au moins  $40 \text{ N.m}^{-3}$ , et de préférence d'au moins  $50 \text{ N.m}^{-3}$ , et encore plus préférentiellement d'au moins  $60 \text{ N.m}^{-3}$ .

La variation d'un paramètre de force peut également être monotone au cours de la coulée, par exemple selon une fonction croissante ou décroissante entre le début et la fin de la coulée, la valeur du paramètre de force variant de façon continue ou par incréments successifs.

Avantageusement, au cours de la coulée, la force de Lorentz d'intensité maximale n'est pas égale à zéro. Typiquement, elle est égale à zéro lorsque le courant dans les inducteurs ou les bobines est égale à zéro. Donc de manière avantageuse, la variation du paramètre de force n'est pas obtenue par une interruption périodique du champ glissant.

Avantageusement, au cours de la coulée, la force de Lorentz d'intensité maximale est supérieure à  $80 \text{ N/m}^3$ , de préférence supérieure à  $100 \text{ N/m}^3$ , de préférence supérieure à  $120 \text{ N/m}^3$ , de manière encore plus préférée supérieure à  $140 \text{ N/m}^3$ . Les inventeurs ont en effet constaté que la suppression des macroségrégations intermittentes n'était pas optimum lorsque la force était trop faible. La valeur minimale à partir de laquelle la suppression des macroségrégations intermittentes est améliorée dépend de l'ensemble des paramètres de coulée, en particulier du mode de brassage, de la position des inducteurs par rapport à la plaque et de la composition de l'alliage.

Selon un mode de réalisation, la fréquence  $f$  et/ou l'amplitude maximale  $B_0^{max}$  du champ magnétique sont modifiées respectivement en faisant varier la fréquence et l'amplitude du courant d'induction circulant dans des inducteurs. Pour cela, le procédé peut comprendre une étape préalable de définition d'un domaine de fonctionnement, c'est-à-dire une plage de variation de la fréquence et/ou de l'intensité du courant d'induction. Cette étape préalable comprend la détermination d'une ou de plusieurs valeurs de couples fréquence/intensité, dites valeurs critiques, générant, à la surface libre  $l_{sup}$  du marais, une résonance, la résonance se traduisant par l'apparition d'oscillations significatives de ladite surface libre  $l_{sup}$ , cette dernière étant représentée sur la figure 7. Ces oscillations significatives sont généralement observées à l'œil nu. Par oscillation significative, on entend par exemple une oscillation dont l'amplitude est supérieure ou égale à 5 mm selon l'axe vertical Z. Par exemple, la fréquence du courant est fixée et on augmente l'intensité du courant d'induction jusqu'à ce qu'une oscillation significative soit observée.

En considérant différentes valeurs critiques de fréquence (ou d'intensité), il est possible de déterminer expérimentalement une courbe de résonance CR, dans un plan fréquence/intensité correspondant aux différents couples (fréquence/intensité) auxquels une résonance est observée à la surface libre du marais. A partir de cette courbe CR, on détermine une plage de variation de l'intensité et/ou de la fréquence, de façon à éviter ou limiter l'apparition d'une résonance de la surface libre du marais. En effet, la courbe de résonance délimite une zone de stabilité et une zone d'instabilité, dans laquelle la coulée peut devenir dangereuse. Cependant, le fait de moduler la fréquence ou l'intensité du courant d'induction, et donc la fréquence  $f$  ou l'amplitude maximale  $B_0^{max}$  du champ magnétique glissant, permet de s'approcher temporairement de la courbe de résonance CR, par exemple de façon périodique, tout en restant dans la zone de stabilité. Cela permet de maximiser l'intensité de la force de Lorentz, et donc le brassage du marais, tout en restant dans des configurations de sécurité acceptables. En effet, au voisinage de la courbe de résonance, l'effet de brassage est particulièrement important.

Une telle courbe de résonance CR dépend des conditions de coulée, c'est-à-dire des dimensions de la lingotière, du système de distribution et en particulier de la présence d'un cadre flottant dans le métal liquide, de la vitesse de coulée, de la configuration du champ magnétique appliqué, cette dernière dépendant du générateur de champ magnétique, c'est-à-dire des inducteurs ou du ou des aimants permanents utilisés. Des courbes de résonance CR sont représentées sur les figure 8 et 9, la courbe de la figure 8 a été obtenue en coulant un lingot de section 625 mm x 1520 mm, selon les conditions de l'exemple 1, la courbe de la figure 9 a été obtenue en coulant un lingot de section 525 mm x 1650 mm, selon les conditions de l'exemple 3. Sur cette figure, on a également représenté des abaques représentant un pourcentage de l'intensité d'une force de Lorentz, dite nominale, 100 % correspondant à l'intensité du courant d'induction maximale

utilisable dans l'installation lorsque la fréquence est égale à 0.2 Hz. Cette intensité correspond à l'apparition d'une résonance à la fréquence de 0.2 Hz. De préférence, l'intensité et la fréquence du courant d'induction se situent dans un espace délimité par la courbe d'iso-valeur de force représentant un certain pourcentage de l'intensité de la force de Lorentz nominale, par exemple  
5 10% de cette intensité, et la courbe de résonance.

De manière préférée, le procédé comporte une variation de la fréquence du courant d'induction parcourant un inducteur. Les inventeurs ont trouvé qu'il était avantageux de faire varier la fréquence car la variation de pénétration du champ qui en résulte permet de faire varier plus  
10 efficacement le gradient de force dans l'épaisseur et la profondeur du puits liquide. Par ailleurs, l'électronique de puissance fait que la variation de fréquence est plus rapide que la variation d'intensité ; ce qui donne un degré de liberté supplémentaire vers les périodes plus faibles de forçage instationnaire. Il est en effet avantageux de découpler les temps caractéristiques hydrodynamiques des temps caractéristiques de la solidification pour éviter les  
15 macroségrégations intermittentes.

#### Coulée avec brassage électromagnétique stationnaire plaquant

20 Les conditions de coulées correspondantes à la coulée avec brassage électromagnétique stationnaire plaquant sont décrites dans la demande FR 1761200.

Les inventeurs ont constaté qu'on peut limiter l'apparition de macro-ségrégations intermittentes 11 en ajustant le brassage électromagnétique lorsque la force de Lorentz moyenne s'appliquant sur l'alliage liquide 1ℓ s'écoulant au niveau du front 10, présente une certaine orientation, et cela  
25 dans une zone médiane du marais, s'étendant symétriquement de part et d'autre du plan médian M, entre  $T/2 - T/4$  et  $T/2 + T/4$ . L'épaisseur de la zone médiane M correspond à la moitié de l'épaisseur du lingot. Par force de Lorentz moyenne, on entend une moyenne de la force de Lorentz durant une période P du champ magnétique. La période P du champ magnétique correspond à l'intervalle de temps séparant deux maxima ou minima successifs du champ  
30 magnétique, comme représenté sur la figure 4. La période P correspond à l'inverse de la fréquence  $f$ . Les inventeurs ont observé que dans la zone médiane, à l'interface du marais 1ℓ et de l'alliage solide 1s, au niveau du front 10, l'angle  $\beta$  formé par la force de Lorentz moyenne  $\bar{F}$ , par rapport à la verticale, doit être avantageusement inférieur à l'angle  $\alpha$  du front, précédemment évoqué, correspondant à l'angle entre la tangente au front et la verticale, les angles  $\alpha$  et  $\beta$  étant  
35 orientés dans le même sens. Autrement dit, il est avantageux que la direction de la force de Lorentz moyenne  $\bar{F}$  soit plus proche de la verticale que la direction de la tangente au front.

Ainsi, dans la zone médiane, à l'interface entre le marais et le front, la force de Lorentz moyenne  $\bar{F}$  est orientée vers l'alliage solide  $1s$ , et non vers l'alliage liquide  $1\ell$ . Cette condition est illustrée sur la figure 11. Sur cette figure, on a représenté une coupe d'une coulée selon un plan XZ. La position du plan médian M correspond à l'épaisseur  $T/2$ .

- 5 De manière préférée, l'angle d'inclinaison de la force de Lorentz moyenne est inférieur, d'au moins  $4^\circ$ , à l'angle d'inclinaison du front, de telle sorte que la force de Lorentz moyenne est plus inclinée, vers la verticale, que le front.

De préférence, la fréquence est inférieure à 2 Hz ou inférieure à 1 Hz. De préférence, la vitesse de coulée est inférieure à 45 mm/minute ou à 40 mm/minute.

- 10 Selon un mode de réalisation, la vitesse de coulée et la fréquence sont adaptées de telle sorte que dans la zone médiane du marais, dans une couche d'interface entre l'alliage liquide et le front, l'angle d'inclinaison de la force de Lorentz moyenne est strictement inférieur à l'angle d'inclinaison du front, la couche d'interface présentant une épaisseur, selon une direction perpendiculaire au front, est inférieure à 2cm ou à 1 cm ou à 5 mm.

- 15 Le procédé de coulée avec brassage électromagnétique stationnaire plaquant peut comporter, préalablement à la coulée, une modélisation de la force de Lorentz s'appliquant en au moins un point du front, de manière à définir, compte tenu de l'épaisseur de la lingotière, une valeur de fréquence et/ou une valeur de vitesse de coulée permettant l'obtention d'une force de Lorentz moyenne, dont l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale, est inférieur à l'angle, au dit point, formé par le front par rapport à la verticale. De préférence, cette modélisation est effectuée en différents points, le long du front, selon l'axe transversal. La modélisation peut permettre de définir une valeur de fréquence et/ou une valeur de vitesse de coulée permettant l'obtention d'une force de Lorentz moyenne dont l'angle d'inclinaison, par rapport à la verticale, est inférieur de  $4^\circ$  à l'angle d'inclinaison formé par le front par rapport à la verticale.

- 25 L'effet de plaquage de l'alliage liquide  $1\ell$  contre le front 10 est obtenu à l'interface entre l'alliage liquide et le front 10. De préférence, cet effet est obtenu dans une couche, dite couche d'interface, adjacente au front, dont l'épaisseur est inférieure à 2 cm, ou à 1 cm ou à 5 mm. L'épaisseur est définie selon une direction perpendiculaire au front. C'est en effet dans une telle couche que l'alliage liquide, au contact de l'isotherme froide formée par le front, devient localement plus dense. Il se forme alors une couche limite convective le long du front, dans laquelle l'écoulement de l'alliage liquide est accéléré, et peut se détacher du front, conduisant à l'apparition de tourbillons. C'est principalement dans cette couche qu'il est nécessaire d'appliquer une force de Lorentz plaquant l'alliage liquide contre le front, afin de maintenir l'alliage liquide contre le front, de façon à limiter la formation de macro-ségrégations intermittentes.

Dans ces conditions particulières, la force de Lorentz  $F$  tend à plaquer l'alliage liquide 1ℓ du marais contre le front 10, ce qui limite la formation de macro-ségrégations intermittentes. La force de Lorentz est dite plaquante. Elle permet la formation d'un flux laminaire convectif le long de tout ou partie du front 10, limitant l'apparition de macro-ségrégations intermittentes.

- 5 Comme décrit par la suite, le phénomène de plaquage de l'alliage liquide par la force de Lorentz contre le front 10 est d'autant plus marqué que la vitesse de coulée  $V$  et la fréquence  $f$  sont faibles.

L'homme du métier sait modéliser l'orientation d'une force de Lorentz moyenne  $\bar{F}$ , s'exerçant au cours d'une période, dans le marais. Des codes de calculs, par exemple le module AC/DC du code COMSOL, permettent une telle modélisation, en se basant notamment sur les caractéristiques des inducteurs (dimensions, nombre d'ampères-tours, pas polaire, positionnement par rapport à la lingotière), la géométrie de la lingotière et des paramètres opérationnels comme la vitesse de coulée ou la fréquence du champ magnétique. Les simulations permettent de modéliser le brassage électromagnétique de l'alliage liquide et d'estimer une évolution temporelle de la force de Lorentz  $F$ , en tout point du marais, durant une période. Par évolution, on entend aussi bien l'évolution de l'intensité que l'évolution de la direction. Il est alors possible de déterminer l'orientation et l'intensité de la force de Lorentz moyenne s'appliquant en un point du marais, durant une période  $P$  du champ magnétique.

Les figures 12A, 12B, 12C et 12D montrent l'orientation de la force moyenne de Lorentz, obtenue par simulation, en différents points d'un front 10. Sur ces figures, on a représenté une partie d'un front 10, selon un plan XZ, s'étendant entre le plan médian M (abscisse  $x = 0$ ) et une paroi de la lingotière (abscisse  $x = 0,26$ ). L'axe des abscisses représente une position selon l'axe transversal  $X$  et l'axe des ordonnées représente une position selon l'axe vertical  $Z$ . Les fréquences considérées sont respectivement égales à 5Hz (figure 12A), 1 Hz, 0.5 Hz et 0.2 Hz (figure 12D), la vitesse de coulée étant de 55 mm/min. On observe qu'en considérant une même position sur le front 10, plus la fréquence  $f$  est faible, plus l'angle  $\beta$  de la force de Lorentz moyenne temporelle  $\bar{F}$  est faible. Ainsi, en une même position sur le front, la force de Lorentz moyenne temporelle  $\bar{F}$  tend à s'incliner verticalement au fur et à mesure que la fréquence diminue.

30 Par ailleurs, comme précédemment décrit la force de Lorentz est plaquante lorsque l'angle  $\beta$  de la force de Lorentz moyenne  $\bar{F}$  est inférieur à l'angle  $\alpha$  du front. On a représenté, sur chaque figure, une plage d'épaisseur  $\Delta x$ , s'étendant à partir du plan médian M, dans laquelle l'effet de force plaquante est obtenu. Cette plage de largeur est matérialisée par une double flèche. On observe que plus la fréquence diminue, plus la plage d'épaisseur  $\Delta x$  s'étend, à partir du plan médian M ( $x = 0$ ), correspondant à l'épaisseur  $T/2$ , vers la paroi de la lingotière. L'effet technique

de minimisation des macro-ségrégations intermittentes apparaît dans cette plage d'épaisseur  $\Delta x$ , et il est préférable qu'elle soit la plus large possible, en englobant de préférence la plage d'épaisseur  $T/2,3 - T/3,3$ , cette dernière étant généralement propice à la formation de macro-ségrégations intermittentes. Sur ces figures, la plage d'épaisseur  $T/2,3 - T/3,3$  correspond à l'intervalle entre  $x = 0,03$  m et  $0,1$  m. La coordonnée  $T/4$  correspond à  $x = 0,13$  m.

Les figures 12E, 12F, 12G et 12H montrent respectivement l'orientation moyenne de la force de Lorentz, obtenue par simulation, en différents points d'un front 10, les fréquences étant respectivement égales à 5Hz, 1 Hz, 0.5 Hz et 0.2 Hz.

Sur les figures 12A à 12H, on a représenté des forces dites normalisées, chaque force étant normalisée par son intensité, de façon à mieux faire apparaître l'évolution de l'orientation de la force moyenne temporelle de Lorentz sur le front 10, en fonction de la position le long du front. La comparaison des figures 12A à 12H montre que plus la fréquence est faible, plus la plage d'épaisseur  $\Delta x$  selon laquelle la force de Lorentz devient plaquante est importante. La plage d'épaisseur  $\Delta x$  s'étend à partir du plan médian M vers la paroi de la lingotière, selon l'axe transversal X. Elle s'élargit au fur et à mesure que la fréquence diminue. Par ailleurs, à une même fréquence, plus la vitesse de coulée est faible, plus la plage d'épaisseur selon laquelle la force de Lorentz est plaquante est importante. On a donc intérêt à privilégier à la fois une fréquence  $f$  faible, de préférence inférieure à 2 Hz, voire à 1 Hz, et une vitesse de coulée faible, de préférence inférieure à 45 mm/min, voire à 40 mm/min.

Sur la base de simulations telles qu'illustrées sur les figures 12A à 12H, les inventeurs ont déterminé une évolution, selon l'axe transversal X, d'un angle  $\theta$ , dit angle différentiel, représentant une différence entre, en un même point, l'angle du front  $\alpha$  et l'angle de la force de Lorentz  $\beta$ , soit  $\theta = \alpha - \beta$ . On rappelle que les angles  $\alpha$  et  $\beta$  sont orientés dans le même sens. Lorsque  $\theta > 0$ ,  $\alpha > \beta$  : la force de Lorentz est davantage inclinée que la tangente au front. Elle est donc plaquante.

Les figures 13A et 13B montrent l'évolution de l'angle différentiel  $\theta$  en fonction d'une position  $x$  sur le front 10, le long de l'axe transversal X. L'axe des abscisses représente la position  $x$ , exprimée en mètre, sur le front le long de l'axe transversal. De même que sur les figures 3A à 3H, la coordonnée  $x=0$  correspond à la position  $T/2$ , la coordonnée  $x = 0,26$  correspondant à la paroi 2p de la lingotière. Les figures 13A et 13B ont été obtenues en considérant respectivement une vitesse de coulée de 55 mm/min et de 35 mm/min. Sur chaque figure, les simulations de l'orientation de la force de Lorentz moyenne  $\bar{F}$  ont été réalisées en considérant successivement plusieurs fréquences  $f$ , comprises entre 5 Hz et 0,2 Hz. Sur chaque figure, on a représenté, en traits horizontaux mixtes, des droites correspondant aux valeurs  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 4^\circ$  lorsque la fréquence est égale à 1 Hz. La force de Lorentz est plaquante lorsque  $\theta > 0$ , mais les inventeurs

considèrent qu'il est avantageux que  $\theta \geq 4^\circ$ . On peut ainsi définir, sur chaque configuration, une plage d'épaisseur, dans laquelle la force de Lorentz est plaquante, à partir du plan médian M (épaisseur  $T/2$ ).

On a représenté, sur les figures 13A et 13B, les plages d'épaisseur  $\Delta x$  ( $\theta = 0^\circ$ ) et  $\Delta x$  ( $\theta = 4^\circ$ ) pour  $f = 1$  Hz. De façon similaire aux figures 12A à 12H, on observe que les plages d'épaisseurs sont d'autant plus importantes que la fréquence est faible et que la vitesse de coulée est faible. Les résultats optimaux sont obtenus pour  $f \leq 2$  Hz, voire  $f \leq 1$  Hz, et lorsque la vitesse de coulée est de 35 mm. Plus la fréquence est faible, plus l'intensité de la force de Lorentz s'appliquant sur l'alliage liquide limitrophe du front, dans la plage d'épaisseur  $T/2 - T/4$ , est importante. Cela renforce l'intensité de la force de Lorentz et augmente l'effet technique recherché. Autrement dit, pour obtenir une réduction significative des macro-ségrégations intermittentes, une orientation de la force de Lorentz telle que précédemment décrite est nécessaire. Toutefois, son intensité doit être suffisante pour obtenir un plaquage de l'alliage liquide 1ℓ contre le front 10. C'est pourquoi il est préférable de moduler le champ magnétique selon une fréquence  $f$  relativement faible.

A l'aide de simulations prenant en compte différentes épaisseurs de coulée, les inventeurs ont établi un abaque, représenté sur la figure 14, permettant de définir une plage de fonctionnement pour laquelle la force de Lorentz est considérée comme suffisamment plaquante, c'est-à-dire lorsque l'angle différentiel  $\theta$  est supérieur ou égal à  $4^\circ$ . L'axe des abscisses et des ordonnées de l'abaque correspond respectivement à la vitesse de coulée  $V$  et à l'épaisseur  $T$  du lingot. L'épaisseur étant déterminée, l'abaque permet de définir la vitesse de coulée et la fréquence maximale permettant de se placer dans les conditions de mise en œuvre de l'invention.

Cet abaque dépend du nombre et des caractéristiques des inducteurs, de leur positionnement par rapport à la lingotière, des dimensions de cette dernière et des paramètres opérationnels de l'installation, en particulier relatifs au champ magnétique appliqué. L'homme du métier, connaissant les caractéristiques de l'installation, peut procéder à des simulations visant à obtenir l'orientation de la force de Lorentz moyenne  $\bar{F}$  en différents points le long du front 10, selon l'axe transversal X. Il peut alors déterminer une plage de fréquence et une plage de vitesse de coulée pour lesquelles on obtient  $\theta \geq 0^\circ$ , ou avantageusement  $\theta \geq 4^\circ$ , de façon à mettre en œuvre l'invention et obtenir l'effet technique désiré, c'est-à-dire une limitation de la macro-ségrégation intermittente entre  $T/2$  et  $T/4$ , et plus particulièrement entre  $T/2,3$  et  $T/3,3$ .

Les inventeurs ont constaté qu'en utilisant un lingot d'épaisseur au moins supérieure à 400 mm, de préférence supérieure à 450 mm, de manière encore plus préférée supérieure à 500 mm, de manière encore plus préférée supérieure à 600 mm, lingot obtenu en utilisant le mode de coulée

par brassage électromagnétique non stationnaire ou le mode de coulée par brassage électromagnétique stationnaire plaquant tel que décrit, il était possible d'obtenir un produit plat d'épaisseur au moins supérieure à 12.5 mm, après un procédé de transformation comprenant une mise en solution à une température supérieure à 450°C, une trempe et un revenu ou une maturation. Ledit produit plat ainsi obtenu présente un compromis de propriétés avantageux 5 quelle que soit la position dans l'épaisseur.

Optionnellement une opération de scalpage peut être effectuée pendant le procédé de transformation afin d'éliminer des défauts de surface réhibitoire notamment si une opération de laminage est effectué subséquemment.

- 10 La mise en solution est réalisée à une température supérieure à 450°C. De manière préférée, la température de mise en solution est inférieure à  $T_{\text{solidus}}$ , température de solidus de l'alliage d'aluminium afin d'éviter l'apparition de liquide. De manière préférée, la température de mise en solution est supérieure à  $T_{\text{solvus}} - 10^{\circ}\text{C}$  où  $T_{\text{solvus}}$  est la température au-dessus de laquelle les phases potentiellement solubles (en général constituées uniquement d'éléments dont la teneur 15 est au moins de 0.5%) sont dissoutes. De manière préférée, la température de mise en solution est comprise entre  $T_{\text{solvus}} - 10^{\circ}\text{C}$  et  $T_{\text{solidus}}$ .

- Le produit mis en solution est trempé. La trempe peut être faite à l'air ou à l'eau de manière horizontale par aspersion ou immersion. La trempe se caractérise par une vitesse de refroidissement exprimée en °C/s. Selon la composition du produit, il existe une vitesse critique 20 de trempe en dessous de laquelle les propriétés finales du produit sont dégradées à cause d'une précipitation grossière pendant la trempe tendant à appauvrir la solution solide de l'alliage. De préférence la vitesse de trempe est supérieure à la vitesse critique de trempe du produit. Il est cependant possible que la vitesse de trempe puisse être inférieure à 0.1°C/s, de préférence inférieure à 0.05 °C/s. Ce type de vitesse de trempe est particulièrement adaptée pour des 25 alliages 7XXX de type AA7021 ou AA7035.

Le revenu correspond à un traitement thermique réalisé en un ou plusieurs paliers permettant d'obtenir les caractéristiques mécaniques correspondant à un revenu au pic du type T6 ou T8 ou un état sur-revenu de type T7. Le traitement thermique est de préférence réalisé à une température comprise typiquement entre 100°C et 200°C pendant une durée de 1h à 70h.

- 30 La maturation est obtenue à température ambiante sur produit trempé. Par maturation, on entend un état métallurgique T4 ou T3.

#### Produit plat faiblement corroyé

- 35 Les inventeurs ont constaté que dans le cas où le procédé de transformation ne comporte pas de déformation plastique supérieure à 5% d'une quelconque de ses dimensions, il était possible

d'obtenir une meilleure homogénéité de propriétés dans l'épaisseur, en particulier l'allongement et l'abattement de résistance par effet d'entaille.

Typiquement, le procédé de transformation ne comporte pas d'étape de laminage à chaud, ni de forgeage. Il peut toutefois comporter une étape de détensionnement par compression mais où la déformation plastique induite n'est pas supérieure à 5%.

Les inventeurs ont constaté que l'amélioration de propriétés dans l'épaisseur est d'autant plus marquée que l'épaisseur du produit plat est supérieure à 500 mm, en encore plus préférablement supérieur à 600 mm. Ce résultat est attribué au fait que les macroségrégations intermittentes sont plus marquées quand l'épaisseur du produit coulé augmente. Dans le cas particulier où il y a une faible déformation plastique, les macroségrégations intermittentes obtenues après coulée sont sensiblement identiques à celles mesurées sur le produit plat.

La microstructure granulaire du produit plat ne subissant pas de déformation plastique supérieure à 5% est sensiblement équiaxe.

Si on nomme  $G_T$ ,  $G_L$ ,  $G_S$ , la taille de grain respectivement dans le sens travers long, le sens long et sens travers court du produit plat à mi épaisseur, le rapport  $\sqrt[3]{\left(\frac{G_T \times G_L}{G_S^2}\right)}$  est inférieur à 1.5,

préférentiellement compris entre 0.5 et 1.3 et de manière encore plus préférée entre 0.8 et 1.2.

La taille de grain  $G_T$ ,  $G_L$ ,  $G_S$  est déterminée selon la méthode des interceptes de la norme (ASTM E112-12 §16.3). La taille de grain  $G_L$  peut être déterminée dans le plan longitudinal L/TC et correspond à la notation  $\bar{\ell}_{\ell(0^\circ)}$  de l'ASTM E112-12 à la Figure 7. La taille de grain  $G_T$  peut être déterminée dans le plan longitudinal TL/TC et correspond à la notation  $\bar{t}_{t(0^\circ)}$  de ASTM E112-12 à la Figure 7. La taille de grain  $G_S$  peut être déterminée dans le plan longitudinal L/TC et correspond à la notation  $\bar{\ell}_{\ell(90^\circ)}$  de l'ASTM E112-12 à la Figure 7.

Pour déterminer la taille de grain, il est possible de réaliser des mesures en métallographie optique à mi épaisseur après attaque Barker.

IL est avantageux selon l'invention d'utiliser pour ce type de produit plat une vitesse de trempe inférieure à 0.1°C/s. Cette gamme de vitesse de trempe est particulièrement adaptées aux alliages d'aluminium du type AA7021 ou AA7035 selon les normes de l'aluminium Association.

30

Les inventeurs ont constaté qu'un produit plat en alliage d'aluminium trempé à une vitesse inférieure à 0.1°C/s, typiquement un alliage du type AA7035 ou AA7021 obtenu selon le procédé de coulée et le procédé de transformation de l'invention présente une différence d'allongement entre la surface et la mi épaisseur inférieure à 3% , de préférence inférieure à 2.5 % , encore plus préférentiellement inférieure à 2%.

La mesure d'allongement est réalisée dans le sens TL. Le prélèvement en surface est réalisé dans un plan situé entre 4 et 80 mm par rapport à la surface du produit plat, typiquement entre T/200 et T/10, de préférence entre T/150 et T/80.

Si on normalise cette différence par rapport à la valeur d'allongement à mi épaisseur, on obtient un écart dit d'allongement. Les inventeurs ont constaté que l'écart d'allongement dans ce produit plat est inférieur à 80%, de préférence inférieur à 70%.

L'allongement est mesuré selon la norme NF EN ISO 6892-1 (2016) dans le sens TL du produit plat.

Un produit plat en alliage d'aluminium trempé à une vitesse inférieure à 0.1°C/s, typiquement un alliage du type AA7035 ou AA7021 obtenu selon le procédé de coulée et le procédé de transformation de l'invention présente entre la mi épaisseur et quart épaisseur un écart inférieur à 50%, de préférence inférieur à 25% sur l'abattement de résistance par effet d'entaille.

L'abattement de résistance par effet d'entaille est évaluée à l'aide de l'essai normalisé E 602-03 de l'Aluminium Association. Il consiste à mesurer la contrainte maximale du produit selon une direction définie obtenue sur une éprouvette cylindrique entaillée. L'abattement de résistance par effet d'entaille est défini par le rapport entre la contrainte maximale mesurée et la valeur de R0.2 mesurée dans le même sens sur une éprouvette non entaillée selon la norme E8 et B557. Ce rapport est aussi appelé « Notch Strength Ratio » ou « NSR ».

Par ailleurs, les inventeurs ont constaté que le produit plat ainsi obtenu présentait une excellente aptitude à l'anodisation en ce sens que du fait des macroségrégations intermittentes peu marquées ou absentes, le produit anodisé présentait un aspect visuel homogène : la couche anodique ne présente pas de différences de couleurs ou de reflets associées à des différences de composition. De manière préférée, le produit plat est usiné puis anodisé pour être utilisé en tant que pièces de moules à injection ou d'éléments de chambre à vide.

#### Produit plat corroyé

Les inventeurs ont constaté qu'un produit plat en alliage d'aluminium issu d'un lingot obtenu par une coulée avec brassage électromagnétique non stationnaire ou par une coulée avec

brassage stationnaire plaquant, telles que décrites précédemment, présentait des propriétés améliorées dans l'épaisseur s'il était corroyé avec un taux de réduction supérieur à 2, préférentiellement compris entre 3 et 10, encore plus préférentiellement entre 5 et 7. Cette étape de corroyage est préférentiellement obtenue par laminage à chaud.

- 5 De préférence un scalpage du lingot est effectué. Le scalpage consiste à usiner la surface du lingot coulé et enlever une certaine épaisseur de matière, typiquement entre 20 mm et 100 mm, de préférence une épaisseur inférieure à 50 mm.

Le taux de réduction R est défini par le rapport entre l'épaisseur du lingot obtenue par le procédé de coulée et l'épaisseur du produit plat final obtenu après corroyage ou si une opération de scalpage est effectuée avant corroyage, le rapport entre l'épaisseur obtenue après scalpage et l'épaisseur du produit plat final obtenu après corroyage.

De préférence, l'épaisseur du produit plat en alliage d'aluminium est comprise entre 40 et 200 mm, préférentiellement entre 70 et 120 mm.

15

Il est intéressant de caractériser un critère d'intensité spectrale ( $\zeta$ ). Celui ci est inférieur à 0.01, de préférence inférieur à 0.007 et de manière préférée inférieur à 0.005, ledit critère d'intensité spectrale étant calculé en :

- Déterminant une amplitude maximale d'une transformée de Fourier d'un profil représentatif d'une macroségrégation intermittente d'un élément dont la teneur en poids est supérieure à 0.5% ou la somme de plusieurs éléments de l'alliage dont la teneur individuelle est supérieure à 0.5%, le profil étant établi selon ladite direction TC, ladite amplitude maximale étant déterminée dans une plage de périodes spatiales comprise entre 8/R et 25/R mm,
- 20
- normalisant ladite amplitude maximale par une concentration nominale C0 dudit élément ou par la somme des concentrations nominales des différents éléments considérés.
- 25

De manière préférée, le produit plat présente une microstructure essentiellement non

30 recristallisée et telle que le rapport  $\sqrt[3]{\left(\frac{G_T \times G_L}{G_S^2}\right)}$  soit supérieur à 2, préférentiellement compris

entre 3 et 10, encore plus préférentiellement entre 4 et 7 où  $G_T$ ,  $G_L$ ,  $G_S$ , correspondent respectivement à la taille de grains non recristallisés dans le sens travers long, le sens long et le sens travers court du produit plat.

La mesure de taille de grain est faite selon la méthode des interceptes de la norme (ASTM E112-12 §16.3)

Il est possible de distinguer les grains non recristallisés par une attaque métallographie, par exemple par attaque chromique.

- 5 Il est avantageux que le produit plat en alliage d'aluminium corresponde à un alliage de type aéronautique de la série 7XXX ou 2XXX ou 6XXX.

Les alliages de type aéronautique peuvent être au sein de la famille 7xxx, les nuances 7010, 7040, 7050, 7150, 7250, 7055, 7056, 7068, 7049, 7140, 7149, 7249, 7349, 7449, 7050, 7055, 7056, 7060, 7160, 7075, 7175 et 7475 tels que définis par l'Aluminum Association.

- 10 Pour les alliages de type aéronautique au sein de la famille 2XXX, il est avantageux de distinguer les alliages contenant du lithium et/ou de l'argent, des alliages n'en contenant pas au-delà du niveau d'impureté, typiquement 0,05% en poids. Les nuances d'alliages de type aéronautique de la famille 2XXX ne contenant pas de lithium et/ou d'argent qui conviennent sont notamment le 2014, 2022, 2023, 2024, 2026, 2027, 2056, 2224, 2324 et 2524 tels que
- 15 définis par l'Aluminum Association. Les alliages de type aéronautique de la famille 2XXX contenant du lithium et/ou de l'argent qui conviennent peuvent être le 2050, 2055, 2060, 2065, 2070, 2076, 2090, 2091, 2094, 2095, 2196, 2296, 2097, 2197, 2297, 2397, 2098, 2198, 2099, 2199, 2029, 2039, 2139, , 2297 et 2397, tels que définis par l'Aluminum Association.

- 20 Les alliages d'aluminium de type aéronautique de la famille 6XXX peuvent être le 6056, 6156, 6061, 6111, tels que définis par l'Aluminum Association.

De manière préférée, l'alliage d'aluminium présente un écart de température entre la température de solidus et la température de solvus inférieur à 60 °C , préférentiellement inférieur à 40°C.

- 25 Pour ce type d'alliage d'aluminium présentant un faible écart de température entre la température de solvus et de solidus, les inventeurs ont montré qu'il était possible d'obtenir un compromis optimisé entre la ténacité, la limite d'élasticité et l'allongement à rupture. En particulier, pour un alliage de type AA7050 d'épaisseur comprise entre 70 mm et 120 mm, la ténacité définie selon la norme E399-12 mesurée à mi épaisseur dans le sens L-T est supérieur à 40 MPa.m<sup>1/2</sup>, la limite d'élasticité mesurée dans le sens longitudinal (L) est supérieure à 470
- 30 MPa et l'allongement à rupture mesuré dans le sens travers court (TC) est supérieur à 6% , préférentiellement supérieur à 7%.

- Les produits selon l'invention peuvent de manière avantageuse être utilisées pour réaliser des éléments de structure, de préférence des éléments de structure d'avion. Des éléments de structure d'avion préférés sont les longerons, nervures ou cadres de fuselage. L'invention est
- 35 particulièrement avantageuse pour des pièces de forme complexe obtenues par usinage intégral,

utilisées en particulier pour la fabrication d'ailes d'avion ainsi que pour n'importe quel autre usage pour lequel les propriétés des produits selon l'invention sont avantageuses.

5 On appelle ici « élément de structure » ou « élément structural » d'une construction mécanique une pièce mécanique pour laquelle les propriétés mécaniques statiques et/ou dynamiques sont particulièrement importantes pour la performance de la structure, et pour laquelle un calcul de structure est habituellement prescrit ou réalisé. Il s'agit typiquement d'éléments dont la défaillance est susceptible de mettre en danger la sécurité de ladite construction, de ses  
10 utilisateurs, de ses usagers ou d'autrui. Pour un avion, ces éléments de structure comprennent notamment les éléments qui composent le fuselage (tels que la peau de fuselage (fuselage skin en anglais), les raidisseurs ou lisses de fuselage (stringers), les cloisons étanches (bulkheads), les cadres de fuselage (circumferential frames), les ailes (tels que la peau de voilure (wing skin), les raidisseurs (stringers ou stiffeners), les nervures (ribs) et longerons (spars)) et l'empennage  
15 composé notamment de stabilisateurs horizontaux et verticaux (horizontal or vertical stabilisers), ainsi que les profilés de plancher (floor beams), les rails de sièges (seat tracks) et les portes.

Les inventeurs ont par ailleurs constaté que le produit plat présentait une excellente aptitude à l'anodisation en ce sens que du fait des macroségrégations intermittentes peu  
20 marquées ou absentes, le produit anodisé présentait un aspect visuel homogène : la couche anodique ne présente pas de différences de couleurs ou de reflets associées à des différences de composition.

## Exemples

### Exemple 1 – produit plat faiblement corroyé

5

On a coulé un lingot d'un alliage AA7035 de section 1520 x 625 mm dont la composition A est indiquée dans le Tableau 1 le ci-dessous.

Tableau 1

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
A	0.04	0.13	<0.05	<0.05	1.3	<0.05	5.6	0.03	0.09
B	0.04	0.13	<0.05	<0.05	1.2	<0.05	5.6	0.05	0.08

10 Ce lingot a été obtenu à l'aide d'un brassage électromagnétique non stationnaire.

La vitesse de coulée s'élevait à 45 mm/min.

Le brassage électromagnétique a été obtenu par la mise en place, en regard de chaque face du lingot, de trois bobines orientées selon l'axe z et parcourues par un courant alternatif qui était déphasé, dans la bobine centrale, de 90° par rapport au courant dans les bobines extrêmes. La

15 longueur d'onde du champ glissant était donc de 2.4 m. Les éléments de pompe électromagnétique ainsi obtenus étaient disposés en miroir par rapport au grand plan de symétrie du lingot, la direction de glissement étant parallèle à la direction travers-long, les glissements générés divergeant depuis la mi-largeur du lingot. Le forçage non stationnaire a été obtenu par l'imposition d'une variation cyclique du courant électrique alternatif qui parcourait les bobines,

20 tel qu'illustré par la double flèche dans le diagramme fréquence vs intensité de la figure 8. L'intensité de la force volumique maximale de Lorentz ainsi générée par la variation de la fréquence variait typiquement entre 290 N/m<sup>3</sup> et 420 N/m<sup>3</sup> sur une période de 7 min ce qui correspond à une vitesse de variation d'environ 0.30 N/m<sup>3</sup>/s.

25 Le lingot ainsi obtenu a été ensuite ébouté pour obtenir une dimension finale de 1520x625x2300 mm Puis il a subi une mise en solution de 465°C (8h)+540°C(1h), trempé à l'air et ensuite revenu pendant 10h à 105°C suivi d'un palier de 4h à 160°C.

Le produit ainsi transformé a ensuite été caractérisé dans l'épaisseur, la limite d'élasticité Rp0.2, la résistance à rupture Rm et l'allongement A% tel que défini selon la norme NF EN ISO 6892-1 (2016), le prélèvement et le sens de l'essai étant définis par la norme EN 485 (2016).

30 Ils ont été testés dans le sens travers long de la plaque (TL) en surface, T/8, T/4 et T/2.

Le prélèvement en surface est réalisé telle sorte à avoir l'axe de l'éprouvette dans un plan situé à 5 mm de la surface. Par ailleurs, ces mêmes propriétés ont aussi été évaluées dans le sens

travers court (TC), l'éprouvette de traction ayant sa partie utile centrée à T/2. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2

Alliage	Position	Surface	T/8	T/4	T/2	T/2
	Sens de sollicitation	Sens TL	Sens TL	Sens TL	Sens TL	Sens TC
A	Rp0.2 (MPa)	318	327	330	316	318
	Rm (MPa)	355	357	356	340	343
	A%	4.7	3.5	2.9	2.8	3.1
	NSR	1.0	0.9	0.9	1.1	1.0

- 5 Les résultats expérimentaux obtenus par la caractérisation de cette coulée sont comparés à ceux associés à la production conventionnelle du même type d'alliage AA7035 produit, dont la composition B est indiquée dans le Tableau 1. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 3 ci-dessous. La production conventionnelle se distingue de l'invention par le seul fait que la coulée se fait sans brassage électromagnétique. Les autres paramètres en particulier le format du lingot et son épaisseur, les paramètres de transformation sont les mêmes.

Tableau 3

Alliage	Position	Surface	T/8	T/4	T/2	T/2
	Sens de sollicitation	Sens TL	Sens TL		Sens TL	Sens TC
B	Rp0.2 (MPa)	316	327		309	313
	Rm (MPa)	350	356		329	309
	A%	6.0	3.0		1.8	2.3

- 15 Les propriétés mécaniques statiques telles que  $R_{p0.2}$  et  $R_m$  obtenues avec le brassage électromagnétique sont toutes supérieures aux valeurs moyennes de la production conventionnelle de l'alliage AA7035.

Mais l'avantage du procédé de brassage électromagnétique est particulièrement prononcé pour la valeur d'allongement. En effet, avec le procédé selon l'invention, les valeurs d'allongement à mi épaisseur sont 1.5 fois plus grandes que dans le cas non brassé, conventionnel.

- 20 On observe que le produit selon l'invention présente un écart d'allongement entre la surface et la mi épaisseur de 1.9% contre 4.9 % sur le produit conventionnel. Cette différence correspond à un écart d'allongement entre la surface et la mi épaisseur de 68% pour le produit selon l'invention contre près de 233% pour le produit conventionnel.

- 25 L'abattement de résistance par effet d'entaille ou « NSR » est évaluée à l'aide de l'essai normalisé E 602-03 de l'Aluminium Association. Les valeurs mesurées sur le produit selon l'invention sont présentées dans le Tableau 1.

Les valeurs mesurées sont comprises entre 0.9 et 1.1. Elles se trouvent être aussi supérieures aux valeurs obtenues sur le produit obtenu selon le procédé conventionnel qui est usuellement compris entre 0.5 et 0.8.

## 5 Exemple 2 - Référence

Cet exemple a pour objet d'être une référence. Il a pour objet d'illustrer les propriétés obtenues sur un produit plat corroyé obtenu à partir d'un lingot de section 1700 x 377 mm selon un procédé de coulée conventionnelle sans brassage électromagnétique.

10 Le Tableau 4 indique la composition C de l'alliage AA7050 coulé en coulée verticale selon un procédé de coulée conventionnelle sans brassage électromagnétique.

La vitesse de coulée était de 45mm/min.

Tableau 4

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
C	0.03	0.06	2.04	0.01	2.22	0.01	6.14	0.02	0.11

15

Le lingot ainsi obtenu subit une homogénéisation de 30 heures à  $482 \pm 2^\circ\text{C}$ , suivi d'une opération de scalpage. Le lingot présente alors une section avant corroyage de 1700 x 337 mm.

20 Le lingot est laminé longitudinalement avec une température de réchauffage comprise entre 395 et  $430^\circ\text{C}$  pour atteindre une épaisseur finale de 80 mm. Le taux de réduction est de 4.2.

En fin de laminage, on procède à des opérations d'éboutage et de rivage afin d'atteindre une largeur finale de 1355 mm et une longueur de 2990 mm. Une mise en solution de 2.5 heures à  $479 \pm 2^\circ\text{C}$  a été réalisée. Une traction axiale de 2.3% a été appliquée, suivi par un revenu avec un premier palier de 4h à  $122^\circ\text{C}$  et un deuxième palier de 17h à  $165^\circ\text{C}$ .

25

Les caractérisations mécaniques (traction et ténacité) ont été évaluées à mi épaisseur.

Des éprouvettes du type CT-40 ont été prélevées à mi- épaisseur afin d'évaluer la ténacité selon les plans L-T et T-L et S-L. Pour ce qui concerne l'évaluation des caractéristiques de traction dans le plan travers-court, des éprouvettes du type 4d avec un diamètre de 6 mm et longueur utile 27 mm ont été prélevées.

30

Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.

5            Tableau 5

		T/2					
		R0.2	Rm	A	K1C L-T	K1C T-L	K1C S-L
		MPa	MPa	%	MPa .m <sup>1/2</sup>	MPa .m <sup>1/2</sup>	MPa .m <sup>1/2</sup>
C	Sens L	474	526	12.1	36.2	31.0	35.7
	Sens TL	473	533	10.0			
	Sens TC	444	519	7.5			

Le produit plat en alliage AA7050 selon un procédé de coulée conventionnel, à partir d'un lingot d'épaisseur 377 mm et ayant subi un taux de réduction de 4.2 présente une limite d'élasticité dans le sens L de 474 MPa, une ténacité T-L de 36.2 MPa.m<sup>1/2</sup> et un allongement travers court de 7.5%.

### Exemple 3 – Produit plat corroyé

Dans cet exemple, on a réalisé une coulée d'alliage AA7050 dont la composition D est indiquée dans le Tableau 6. Un lingot de section 1650x525mm a ainsi été obtenu. L'affinage du grain est effectué à l'aide d'un fil affinant AlTiC3 :0.15 avec un taux d'ajout de 1.5kg/tonne. La vitesse de coulée était de 45 mm/min.

Tableau 6

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
D	0.03	0.05	2.05	0.02	2.04	0.02	6.09	0.04	0.11

En début de coulée, aucun brassage électromagnétique n'est mis en place. Puis après avoir solidifié une longueur d'environ 2 m, le brassage électromagnétique est activé.

Par cette méthodologie, il est possible de comparer les propriétés obtenues avec et sans brassage.

Le brassage électromagnétique correspond à un brassage électromagnétique non stationnaire.

Le brassage électromagnétique non stationnaire a été obtenu par la mise en place, en regard de chaque face du lingot, de trois bobines orientées selon l'axe z et parcourues par un courant alternatif qui était déphasé, dans la bobine centrale, de 90° par rapport au courant dans les bobines extrêmes. La longueur d'onde du champ glissant était donc de 2,4m. Les éléments de pompe électromagnétique ainsi obtenus étaient disposés en miroir par rapport au grand plan de

symétrie du lingot, la direction de glissement étant parallèle à la direction travers-long, les glissements générés divergeant depuis la mi-largeur du lingot. Le forçage instationnaire a été obtenu par l'imposition d'une variation cyclique de la fréquence du courant électrique alternatif qui parcourait les bobines, tel qu'illustré par la double flèche dans le diagramme fréquence vs intensité présenté à la figure 9. L'intensité de la force volumique maximale de Lorentz ainsi générée par la variation de la fréquence variait typiquement entre 210 N/m<sup>3</sup> et 275 N/m<sup>3</sup> sur une période de 1.33 min ce qui correspond à une vitesse de variation d'environ 0.81 N/m<sup>3</sup>/s. On notera que la courbe limite de stabilité est différente de celle présentée dans l'exemple 1 en raison à la fois de l'épaisseur de coulée différente et de la présence d'un cadre flottant qui contribue à inhiber certains modes résonants de la surface libre.

Suite à un traitement de détente de 10h à 350°C, le lingot ainsi obtenu a été ensuite ébouté pour obtenir une dimension de 1150x2240x525 mm. Puis il a subi une homogénéisation de 30 heures à 482± 2°C. Suite à une opération de scalpage, le lingot présente les dimensions finales de 1150x2240x440 mm.

Le lingot a ensuite été laminé avec une température de réchauffage comprise entre 395-430°C pour atteindre une épaisseur finale de 80 mm. Le taux de réduction est de 5.5.

Des opérations d'éboutage et rivage ont été effectuées afin d'atteindre une largeur finale de 900 mm et une longueur de 4000 mm. Une mise en solution de 2.5 heures à 479 ± 2°C a été réalisée. Une traction axiale de 2.3% a été appliquée, suivi par un revenu avec un premier palier de 4h à 122°C et un deuxième palier de 17h à 165°C.

Les caractérisations mécaniques (traction et ténacité) ont été évaluées à mi épaisseur.

Des éprouvettes du type CT-40 ont été prélevées à mi- épaisseur afin d'évaluer la ténacité selon les plans L-T et T-L et S-L. Pour ce qui concerne l'évaluation des caractéristiques de traction dans le plan travers-court, des éprouvettes du type 4d avec un diamètre de 6 mm et longueur utile 27 mm ont été prélevées.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 7

Tableau 7

		T/2						
		R0.2	Rm	A	K1C L-T	K1C T-L	K1C S-L	
		MPa	MPa	%	MPa .m1/2	MPa .m1/2	MPa .m1/2	
D	Invention	Sens L	479	532	10.9	43.0	32.8	33.9
		Sens TL	464	518	10.5			
		Sens TC	453	519	6.4			
D	Référence	Sens L	477	531	11.3	42.0	33.6	32.4
		Sens TL	463	517	10.4			
		Sens TC	456	517	5.0			

Le produit plat en alliage AA7050 obtenu selon un procédé de coulée conventionnel, à partir d'un lingot d'épaisseur 525 mm et ayant subi un taux de réduction de 5.5 présente une limite d'élasticité dans le sens L de 477 MPa, une ténacité T-L de 42.0 MPa.m<sup>1/2</sup> et un allongement travers court de 5.0%.

Le produit plat en alliage AA7050 obtenu selon un procédé de coulée selon l'invention, à partir d'un lingot d'épaisseur 525 mm et ayant subi un taux de réduction de 5.5 présente une limite d'élasticité dans le sens L de 479 MPa, une ténacité T-L de 43.0 MPa.m<sup>1/2</sup> et un allongement travers court de 6.4%.

10

#### Exemple 4 – Produit plat corroyé

Dans cet exemple, on a réalisé une coulée d'alliage AA7050 dont la composition F est indiquée dans le Tableau 8. Un lingot de section 1650 x 525mm a ainsi été obtenu. L'affinage du grain est effectué à l'aide d'un fil affinant AlTiC3 :0.15 avec un taux d'ajout de 1.5kg/tonne. La vitesse de coulée était de 45mm/min.

Tableau 8

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
F	0.03	0.05	2.12	0.02	2.15	0.02	6.20	0.04	0.11

En début de coulée, le brassage électromagnétique est mis place. Puis après avoir solidifié une longueur d'environ 2.1 m, le brassage électromagnétique est arrêté.

Le brassage électromagnétique correspond à un brassage électromagnétique non stationnaire. Le brassage électromagnétique a été obtenu par la mise en place, en regard de chaque face du lingot, de trois bobines orientées selon l'axe z et parcourues par un courant alternatif qui était déphasé, dans la bobine centrale, de 90° par rapport au courant dans les bobines extrêmes. La longueur d'onde du champ glissant était donc de 2,4m. Les éléments de pompe électromagnétique ainsi obtenus étaient disposés en miroir par rapport au grand plan de symétrie du lingot, la direction de glissement étant parallèle à la direction travers-long, les glissements générés divergeant depuis la mi- largeur du lingot. Le forçage instationnaire a été obtenu par l'imposition d'une variation cyclique de l'intensité nominale du courant électrique alternatif qui parcourait les bobines, tel qu'illustré par les flèches dans le diagramme fréquence vs intensité à la figure 10. L'intensité de la force volumique maximale de Lorentz ainsi générée par la variation de l'intensité a varié selon une période de 1.33 min.

30

Suite à un traitement de détente de 10h à 350°C, le lingot ainsi obtenu a été ensuite ébouté pour obtenir une dimension de 1145x2365x525 mm. Puis il a subi une homogénéisation de 30 heures à 482± 2°C. Suite à une opération de scalpage, le lingot a obtenu les dimensions finales de 1145x2365x455 mm.

- 5 Le lingot a été laminé longitudinalement avec une température de réchauffage de 395-430°C pour atteindre une épaisseur finale de 80 mm. Le taux de réduction est de 5.7.
- Des opérations d'éboutage et rivage ont été effectuées afin d'atteindre une largeur finale de 900 mm et une longueur de 4000 mm. Une mise en solution de 2.5 heures à 479± 2°C a été réalisée. Une traction axiale de 2.3% a été appliquée, suivi par un revenu avec un premier palier de 4h à 122°C et un deuxième palier de 17h à 165°C.

Les caractérisations mécaniques (traction et ténacité) ont été réalisées de la même façon que l'exemple 3.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9

			T/2					
			R0.2	Rm	A	K1C L-T	K1C T-L	K1C S-L
			MPa	MPa	%	MPa .m <sup>1/2</sup>	MPa .m <sup>1/2</sup>	MPa .m <sup>1/2</sup>
F	Invention	Sens L	483	537	11.2	40.6	31.2	33.4
		Sens TL	468	522	10.3			
		Sens TC	461	524	7.4			
F	référence	Sens L	479	533	11.1	42.4	32.1	33
		Sens TL	465	518	10.2			
		Sens TC	456	513	4.0			

15

Le produit plat en alliage AA7050 obtenu selon un procédé de coulée conventionnel, à partir d'un lingot d'épaisseur 525 mm et ayant subi un taux de réduction de 5.5 présente une limite d'élasticité dans le sens L de 479 MPa, une ténacité T-L de 42.4 MPa.m<sup>1/2</sup> et un allongement travers court de 4.0%.

20

Le produit plat en alliage AA7050 obtenu selon un procédé de coulée selon l'invention, à partir d'un lingot d'épaisseur 525 mm et ayant subi un taux de réduction de 5.5 présente une limite d'élasticité dans le sens L de 483 MPa, une ténacité T-L de 40.6 MPa.m<sup>1/2</sup> et un allongement travers court de 7.4%.

25

## Revendications

1. Produit plat en alliage d'aluminium s'étendant parallèlement à un axe longitudinal (L),  
 5 et dont la section perpendiculaire à l'axe longitudinal présente une largeur (TL) et une épaisseur (TC), l'épaisseur (TC) étant inférieure à la largeur, l'épaisseur dudit produit plat étant supérieure à 12.5 mm, ledit produit plat étant obtenu à partir d'un procédé de fabrication comprenant :
- Un procédé de coulée avec brassage électromagnétique pour former un lingot d'alliage  
 10 d'aluminium d'épaisseur supérieure à 400 mm, le procédé de coulée étant effectué dans une lingotière, la lingotière définissant un parallélépipède, de telle sorte que le lingot formé s'étend parallèlement à un axe longitudinal (Y), selon une largeur (W) et parallèlement à un axe transversal (X), selon une épaisseur (T), l'épaisseur du lingot étant inférieure à la largeur ; le lingot définissant un plan médian s'étendant selon la  
 15 mi épaisseur (T/2), parallèlement à l'axe longitudinal (Y),
  - un procédé de transformation dudit lingot d'alliage d'aluminium comprenant une mise en solution à une température supérieure à 450°C, une trempe et un revenu ou une maturation pour obtenir un produit plat en alliage d'aluminium,  
 caractérisé en ce que  
 20 ledit procédé de coulée comprend les étapes suivantes
    - coulée de l'alliage d'aluminium liquide dans la lingotière, selon un axe vertical de coulée (Z), l'alliage étant refroidi, au cours de la coulée, par un ruissellement d'un liquide refroidisseur (3), de façon à former un alliage solide (1s), s'étendant autour d'un alliage liquide (1ℓ), dit marais, l'alliage solide formant un front (10) à l'interface  
 25 avec le marais (1ℓ), le front étant incliné selon un angle d'inclinaison ( $\alpha$ ), par rapport à l'axe vertical, l'angle d'inclinaison du front variant selon l'axe transversal (X);
    - déplacement de l'alliage solide (1s), selon l'axe vertical de coulée (Z), selon une vitesse de coulée (V);
    - au cours de la coulée, application d'un champ magnétique glissant dont  
 30 l'amplitude varie selon une fréquence (f), le champ magnétique étant généré par au moins un générateur de champ magnétique disposé à la périphérie de la lingotière, de façon à appliquer une force de Lorentz moyenne (F) en différents points du marais, la force de Lorentz moyenne, durant une période (P) du champ magnétique, étant inclinée par rapport à l'axe vertical (Z) selon un angle d'inclinaison ( $\beta$ ), dit angle  
 35 d'inclinaison de la force de Lorentz, ce dernier variant selon l'axe transversal (X) ; la

force de Lorentz présente durant la période P une force de Lorentz d'intensité maximale ( $F_{max}$ );

- le marais comportant une zone médiane, s'étendant symétriquement de part et d'autre du plan médian (M) dont l'épaisseur correspond à une demi-épaisseur du lingot
- 5 - le champ magnétique appliqué se propage selon un axe de propagation, de telle sorte qu'une amplitude maximale ( $B_0^{max}$ ) du champ magnétique se propage selon ledit axe de propagation, en définissant une longueur d'onde de propagation ( $\lambda$ ),

et tel que le procédé de coulée avec brassage électromagnétique correspond à un mode de brassage électromagnétique non stationnaire défini par un paramètre magnétique dit de force, régissant la force de Lorentz d'intensité maximale ( $F_{max}$ ); ce paramètre magnétique de force est variable dans un intervalle temporel ( $\Delta t$ ) prédéterminé, ledit paramètre étant :

- ladite amplitude maximale ( $B_0^{max}$ ) du champ magnétique ;
  - et/ou ladite fréquence (f) du champ magnétique ;
  - 15 - et/ou la longueur d'onde de propagation ( $\lambda$ ) du champ magnétique ;
- de façon à obtenir une modulation, dans ledit intervalle temporel, de ladite force de Lorentz d'intensité maximale ( $F_{max}$ ) se propageant selon l'axe de propagation

ou tel que le procédé de coulée avec brassage électromagnétique correspond à un mode de brassage électromagnétique stationnaire plaquant défini par le fait que le champ magnétique glissant se propage selon un axe de propagation parallèle à l'axe vertical de coulée; la fréquence (f) est inférieure à 5 Hz ; et la vitesse de coulée (V) et la fréquence (f) sont adaptées de telle sorte que dans toute la zone médiane du marais, à l'interface entre l'alliage liquide (l) et le front, l'angle d'inclinaison de la force ( $\beta$ ) est strictement inférieur à l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) du front.

25

2. Produit plat en alliage d'aluminium selon la revendication 1 caractérisé en ce que ledit produit plat présente pour un élément de l'alliage d'aluminium, dont la teneur en poids est supérieure à 0.5 %, ou pour la somme de plusieurs éléments de l'alliage dont la teneur individuelle en poids est supérieure à 0.5%, un critère de dispersion  $\varepsilon$  inférieur à 3.3, de préférence inférieur à 3, plus avantageusement inférieur à 2.5, encore plus avantageusement inférieur à 2 et de manière préférée inférieur à 1.5, le critère de dispersion étant défini selon les expressions suivantes :

30

$$\varepsilon = \Delta C_{ZA} / \Delta C_{ZR}$$

$$\Delta C_{ZA} = \max (C_{ZA}) - \min (C_{ZA}),$$

$$\Delta C_{ZR} = \max (C_{ZA}) - \min (C_{ZA}) ,$$

où :

5 -  $\max (C_{ZA})$  et  $\min (C_{ZA})$  désignent respectivement les concentrations maximale et minimale de l'élément considéré ou de la somme des éléments considérés mesurées dans une zone d'analyse (ZA), présentant des macroségrégations intermittentes, par exemple entre les épaisseurs T/3.3 et T/2.3 dudit produit plat;

10 -  $\max (C_{ZR})$  et  $\min (C_{ZR})$  désignent respectivement les concentrations maximale et minimale de l'élément considéré ou de la somme des éléments considérés mesurées dans une zone de référence (ZR), considérée comme peu affectée par les macroségrégations intermittentes, par exemple entre les épaisseurs T/12 et T/6 dudit produit plat ;

15 lesdites concentrations étant mesurées sur au moins un profil établi à mi-largeur dans un plan vertical L/TC et selon la direction TC, ledit profil étant représentatif desdites macroségrégations intermittentes de l'élément considéré selon la direction TC.

20 3. Produit plat en alliage d'aluminium selon l'une quelconque des revendications 1 à 2 caractérisé en ce que ledit procédé de transformation ne comprend pas d'étape induisant une déformation plastique supérieure à 5%, typiquement le procédé de transformation ne comprend pas d'étape de laminage à chaud.

4. Produit plat selon la revendication 3 caractérisé en ce que l'épaisseur dudit produit plat est supérieure à 500 mm, en encore plus préférablement supérieure à 600 mm.

25 5. Produit plat selon la revendication 3 ou 4 caractérisé en ce que ledit produit plat présente une microstructure telle que le rapport  $\sqrt[3]{\left(\frac{G_T \times G_L}{G_S^2}\right)}$  soit inférieur à 1.5, préférentiellement compris entre 0.5 et 1.3 et de manière encore plus préférée entre 0.8 et 1.2 où  $G_T$ ,  $G_L$ ,  $G_S$ , correspondent respectivement à la taille de grain moyenne dans le sens travers long, le sens long et le sens travers court du produit plat, la taille de grain étant mesurée à mi épaisseur selon la norme ASTM E112-12.

30

35 6. Produit plat en alliage d'aluminium selon l'une quelconque des revendications 3 à 5 caractérisé en ce que un critère d'intensité spectrale ( $\zeta$ ) est inférieur à 0.01, de préférence inférieur à 0.007 et de manière préférée inférieur à 0.005, ledit critère d'intensité spectrale étant calculé en :

- Déterminant une amplitude maximale d'une transformée de Fourier d'un profil représentatif d'une macroségrégation intermittente d'un élément dont la teneur en poids est supérieure à 0.5% ou la somme de plusieurs éléments de l'alliage dont la teneur individuelle est supérieure à 0.5%, le profil étant établi selon ladite direction TC, ladite amplitude maximale étant déterminée dans une plage de périodes spatiales comprise entre 8 et 25 mm,
  - normalisant ladite amplitude maximale par une concentration nominale  $C_0$  dudit élément ou par la somme des concentrations nominales des différents éléments considérés.
- 5
- 10
7. Produit plat en alliage d'aluminium selon l'une quelconque des revendications 3 à 6 caractérisé en ce que la trempe est réalisée à une vitesse inférieure à 0.1 °C/s.
8. Produit plat en alliage d'aluminium selon l'une quelconque des revendications 3 à 7 caractérisé en ce que l'alliage d'aluminium correspond à une désignation du type AA7021 ou AA7035.
- 15
9. Produit plat en alliage d'aluminium selon la revendication 7 ou 8 caractérisé en ce que l'allongement à rupture selon la norme NF EN ISO 6892-1 (2016) mesuré dans le sens TL présente une différence d'allongement entre la surface et la mi épaisseur inférieure à 3% , de préférence inférieure à 2.5 %, encore plus préférentiellement inférieure à 2%.
- 20
10. Produit plat en alliage d'aluminium selon l'une quelconque des revendications 7 à 9 caractérisé en ce que l'abattement de résistance par effet d'entaille défini selon la norme E 602-03 présente un écart inférieur à 50%, de préférence inférieur à 25% entre la mi épaisseur et le quart épaisseur.
- 25
11. Produit usiné et anodisé obtenu à partir du produit plat selon l'une quelconque des revendications 3 à 10 caractérisé en ce que le produit plat est usiné et anodisé.
- 30
12. Produit plat en alliage d'aluminium selon la revendication 1 ou 2 caractérisée en ce que le procédé de transformation comprend une étape de corroyage présentant un taux de réduction R supérieur à 2, préférentiellement compris entre 3 et 10, encore plus préférentiellement entre 5 et 7, le taux de réduction R étant défini par le rapport entre l'épaisseur du lingot obtenue par le procédé de coulée et l'épaisseur du produit plat final
- 35

obtenue après corroyage ou si une opération de scalpage est effectuée avant corroyage, le rapport entre l'épaisseur obtenue après scalpage et l'épaisseur du produit plat final obtenue après corroyage.

- 5 13. Produit plat en alliage d'aluminium selon la revendication 12 caractérisée en ce que l'épaisseur dudit produit plat est comprise entre 40 et 200 mm, préférentiellement entre 70 et 120 mm.
- 10 14. Produit plat en alliage d'aluminium selon la revendication 12 ou 13 caractérisé en ce que un critère d'intensité spectrale ( $\zeta$ ) est inférieur à 0.01, de préférence inférieur à 0.007 et de manière préférée inférieur à 0.005, ledit critère d'intensité spectrale étant calculé en :
- Déterminant une amplitude maximale d'une transformée de Fourier d'un profil représentatif d'une macroségrégation intermittente d'un élément dont la teneur en poids est supérieure à 0.5% ou la somme de plusieurs éléments de l'alliage dont la teneur individuelle est supérieure à 0.5%, le profil étant établi selon ladite direction TC, ladite amplitude maximale étant déterminée dans une plage de périodes spatiales comprise entre  $8/R$  et  $25/R$  mm où R est le taux de réduction,
  - normalisant ladite amplitude maximale par une concentration nominale  $C_0$  dudit élément ou par la somme des concentrations nominales des différents éléments considérés.
- 15
- 20
- 25 15. Produit plat en alliage d'aluminium selon l'une quelconque des revendications 12 à 14 caractérisé en ce que ledit produit plat présente une microstructure essentiellement non recristallisée et telle que le rapport  $\sqrt[3]{\left(\frac{G_T \times G_L}{G_S^2}\right)}$  soit supérieur à 2, préférentiellement compris entre 3 et 10, encore plus préférentiellement entre 5 et 7 où  $G_T$ ,  $G_L$ ,  $G_S$ , correspondent respectivement à la taille moyenne de grains non recristallisés dans le sens travers long, le sens long et le sens travers court du produit plat, la taille de grain étant mesurée selon la norme ASTM E112-12.
- 30
- 35 16. Produit plat en alliage d'aluminium selon l'une quelconque des revendications 12 à 15 caractérisé en ce que l'alliage d'aluminium est un alliage de type aéronautique de la série 7XXX ou 2XXX ou 6XXX.

17. Produit plat en alliage d'aluminium selon la revendication 16 caractérisé en ce que l'alliage d'aluminium présente un écart de température entre la température de solidus et la température de solvus inférieur à 60 °C , préférentiellement inférieur à 40°C.
- 5 18. Produit plat en alliage d'aluminium selon la revendication 17 caractérisé en ce qu'il présente un compromis optimisé entre la ténacité, la limite d'élasticité et l'allongement à rupture, caractérisé en ce que l'alliage d'aluminium est un alliage AA7050 , en ce que son épaisseur est comprise entre 70 mm et 120 mm, et tel que la ténacité définie selon la norme E399-12 mesurée à mi épaisseur dans le sens L-T soit supérieur à 40 MPa.m<sup>1/2</sup>,  
10 la limite d'élasticité mesurée dans le sens longitudinal (L) soit supérieure à 470 MPa et l'allongement à rupture mesuré dans le sens travers court (TC) soit supérieur à 6% , préférentiellement supérieur à 7%.
- 15 19. Produit usiné et anodisé obtenu à partir du produit plat selon l'une quelconque des revendications 12 à 18 caractérisé en ce que le produit plat est usiné et anodisé.

1/8

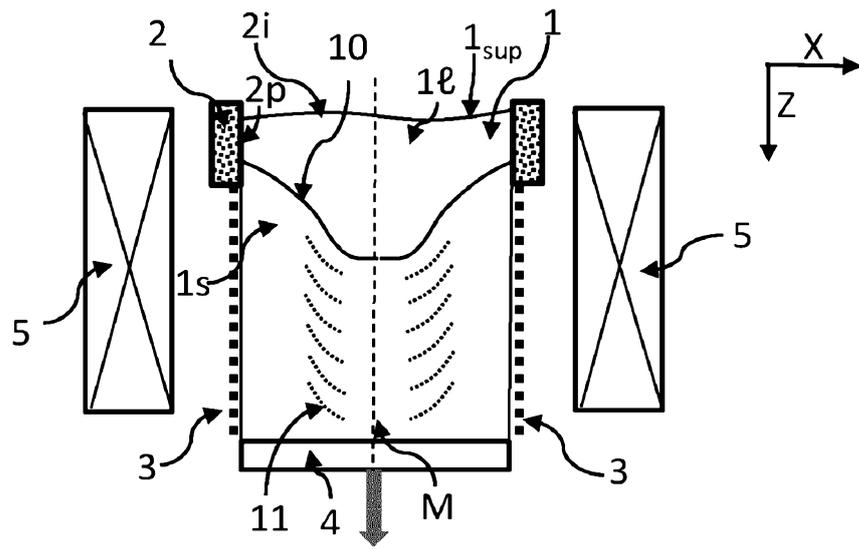


Fig. 1

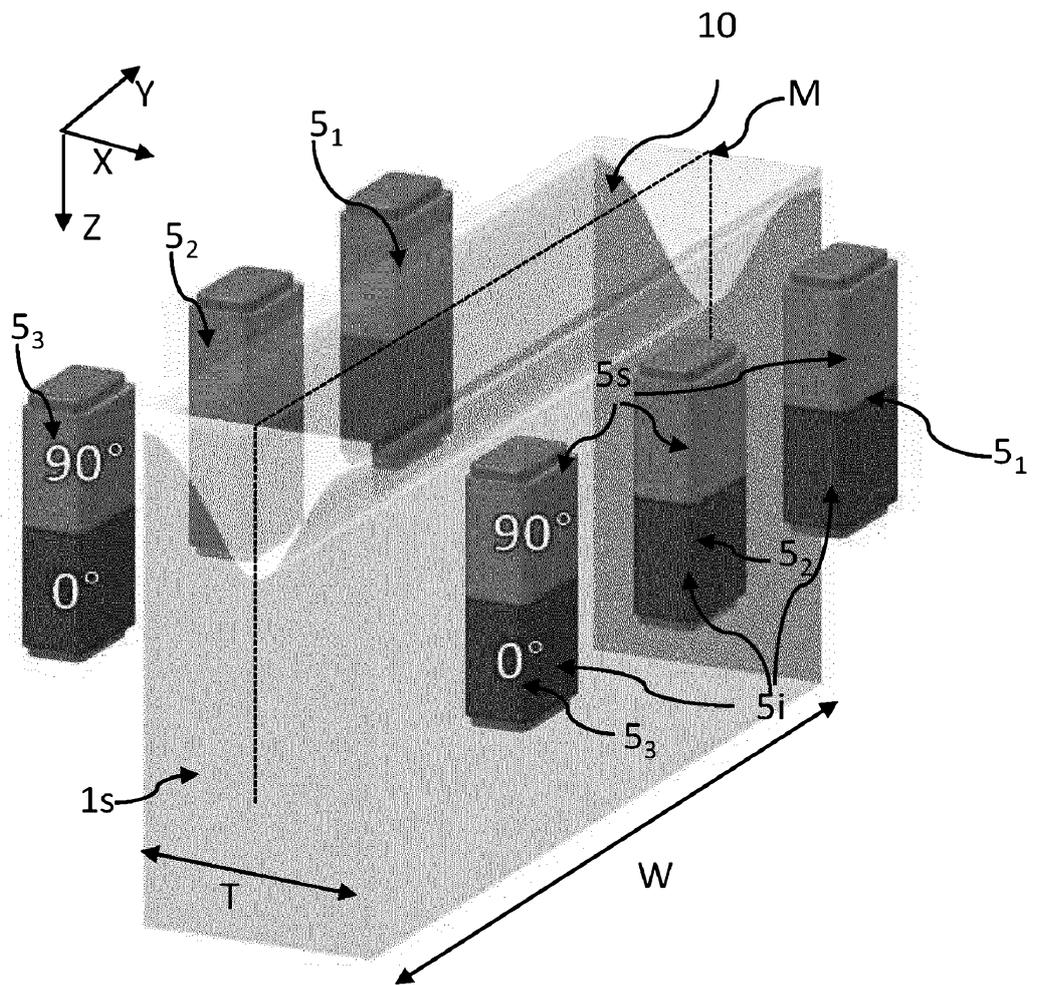
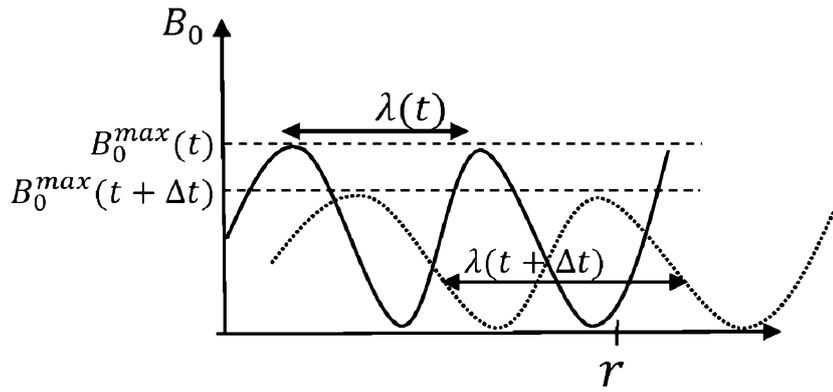
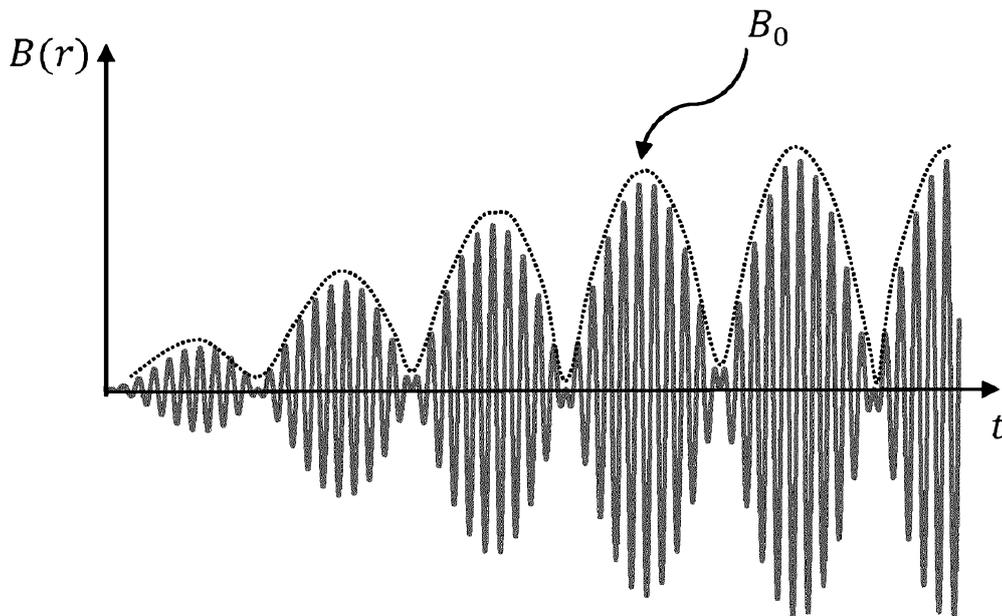


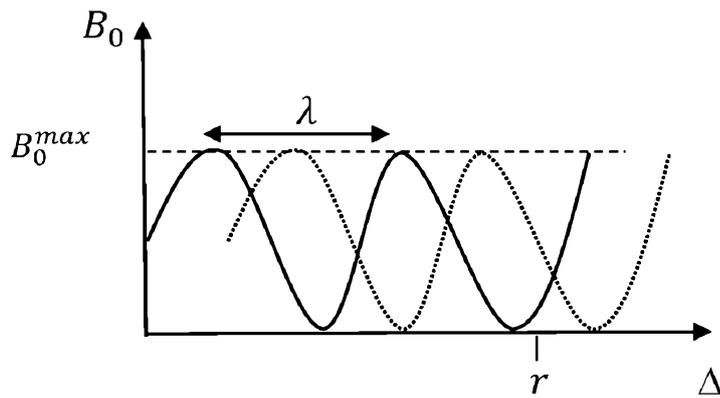
Fig. 2



**Fig 3**

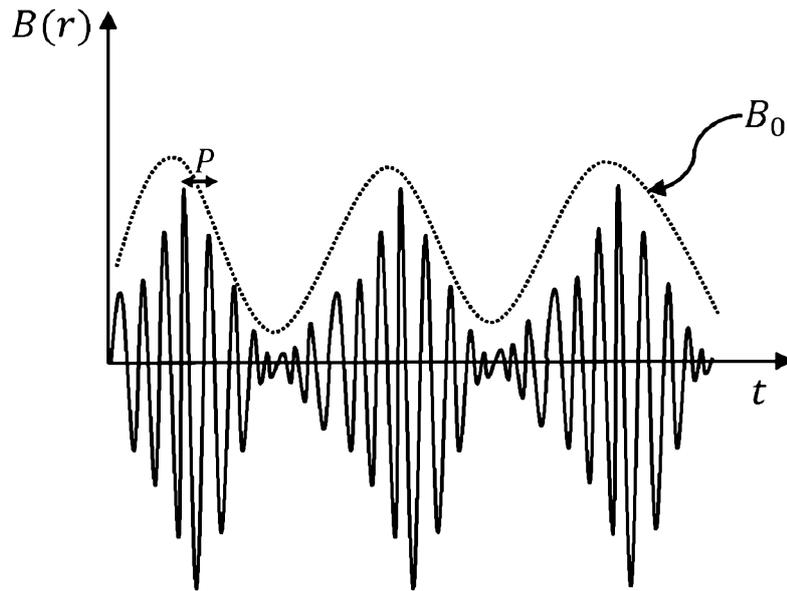


**Fig 4**

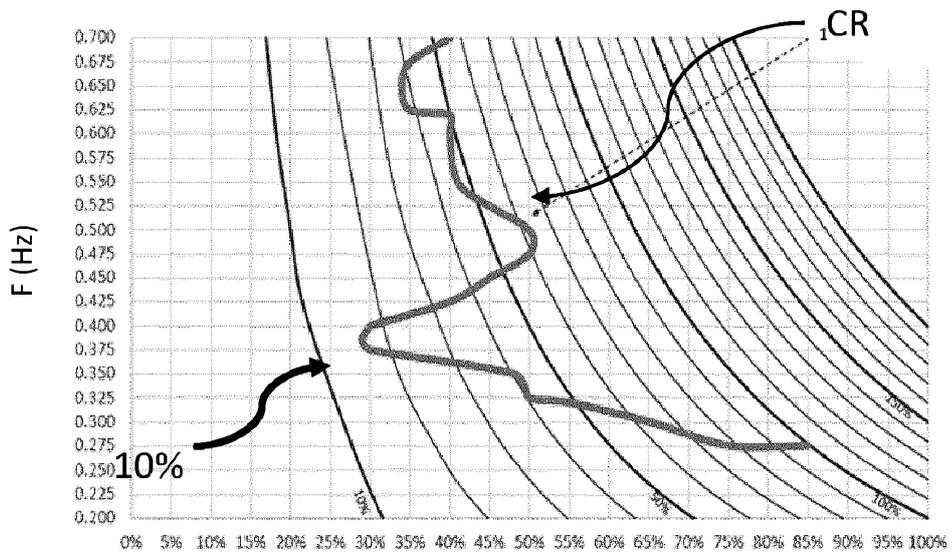


**Fig. 5**

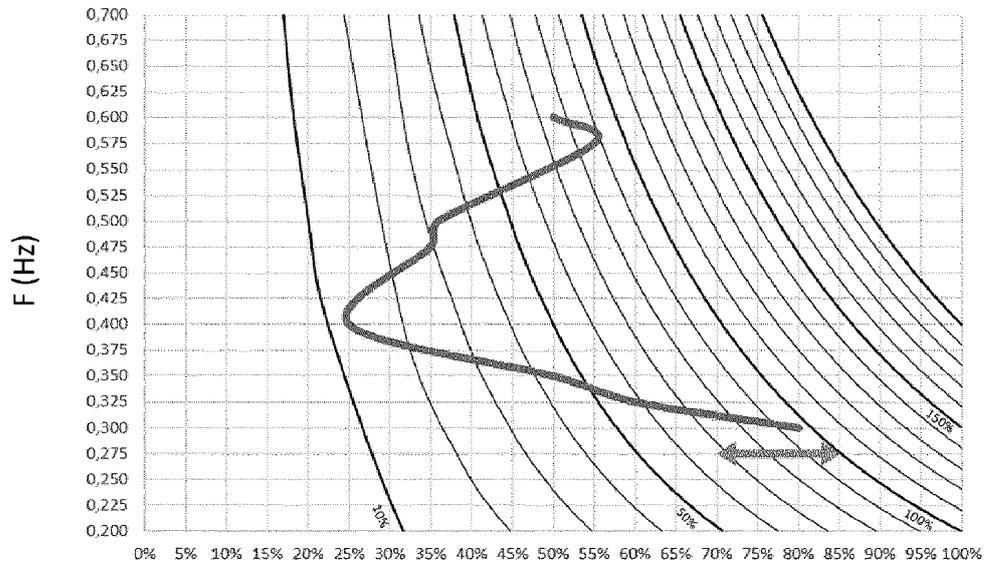
3/8



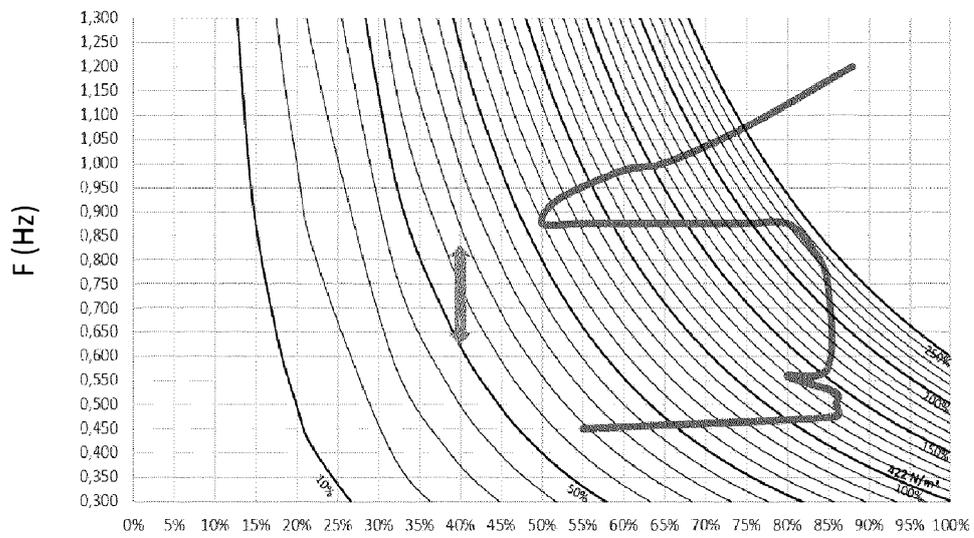
**Fig 6**



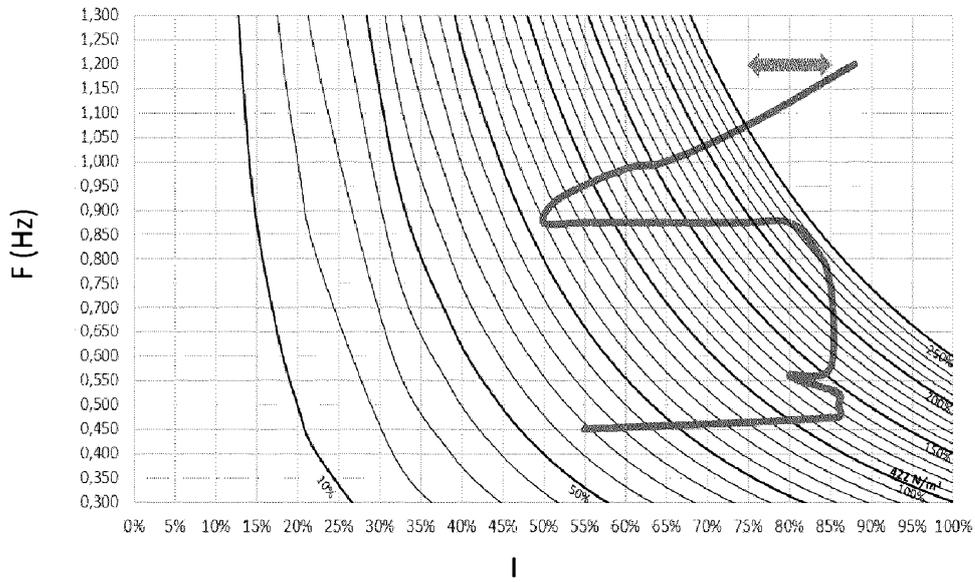
**Fig 7**



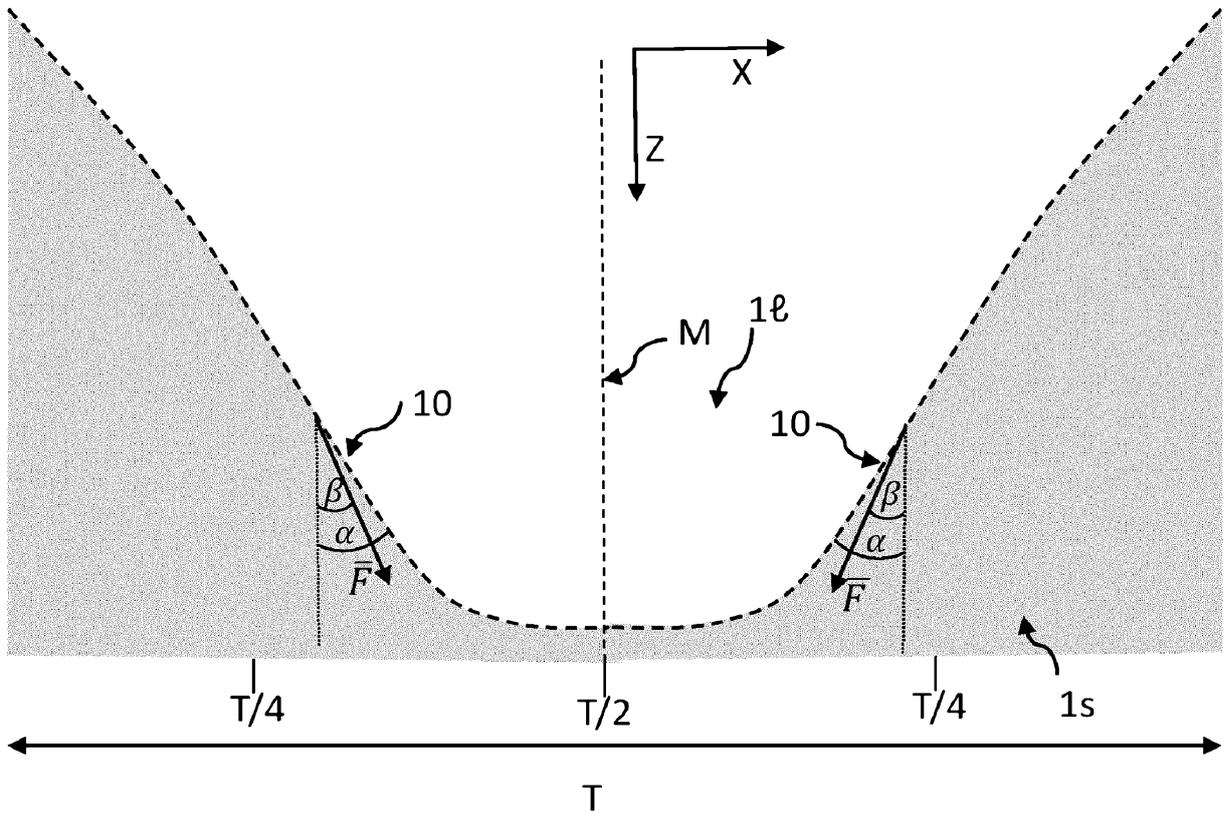
**Fig 8**



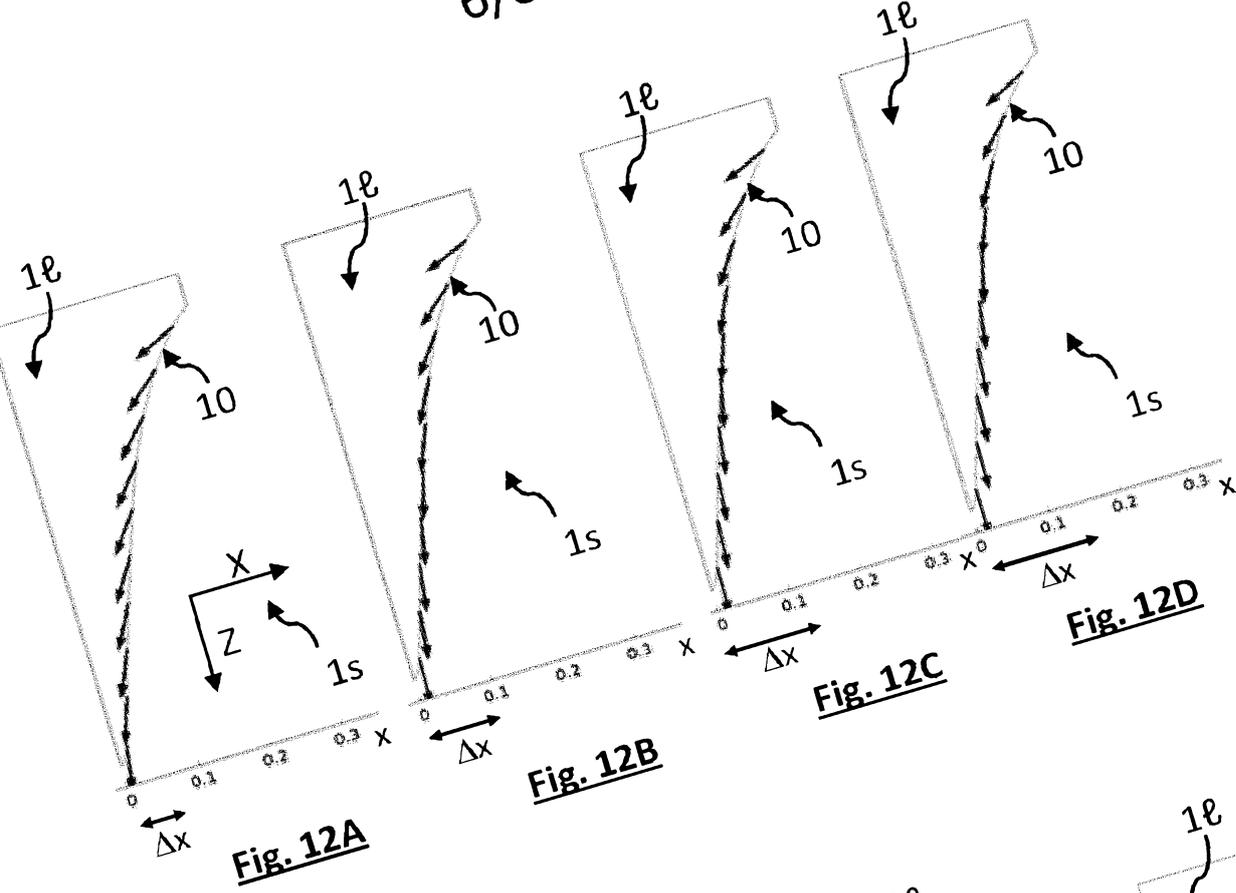
**Fig 9**



**Fig 10**



**Fig 11**

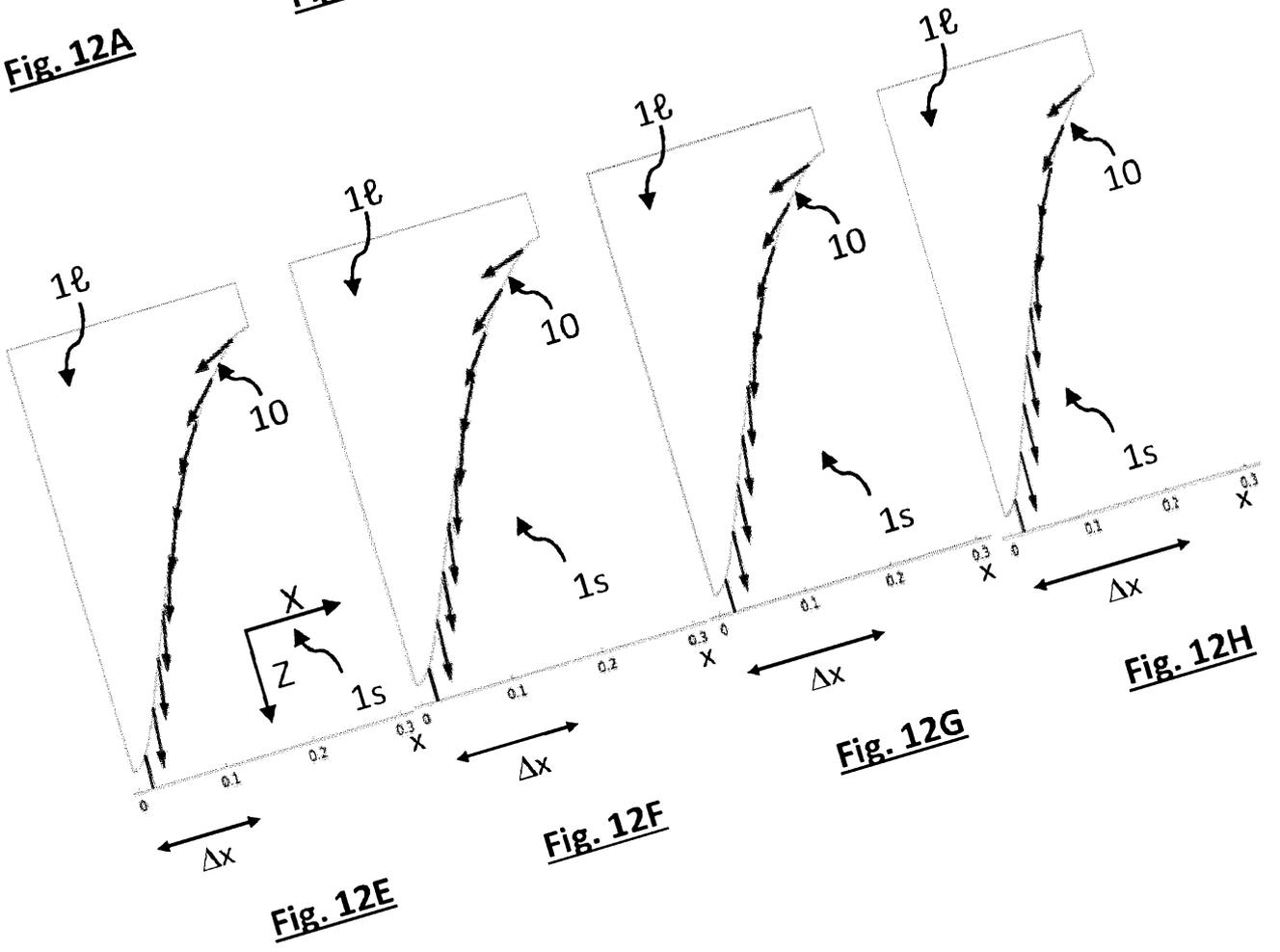


**Fig. 12A**

**Fig. 12B**

**Fig. 12C**

**Fig. 12D**

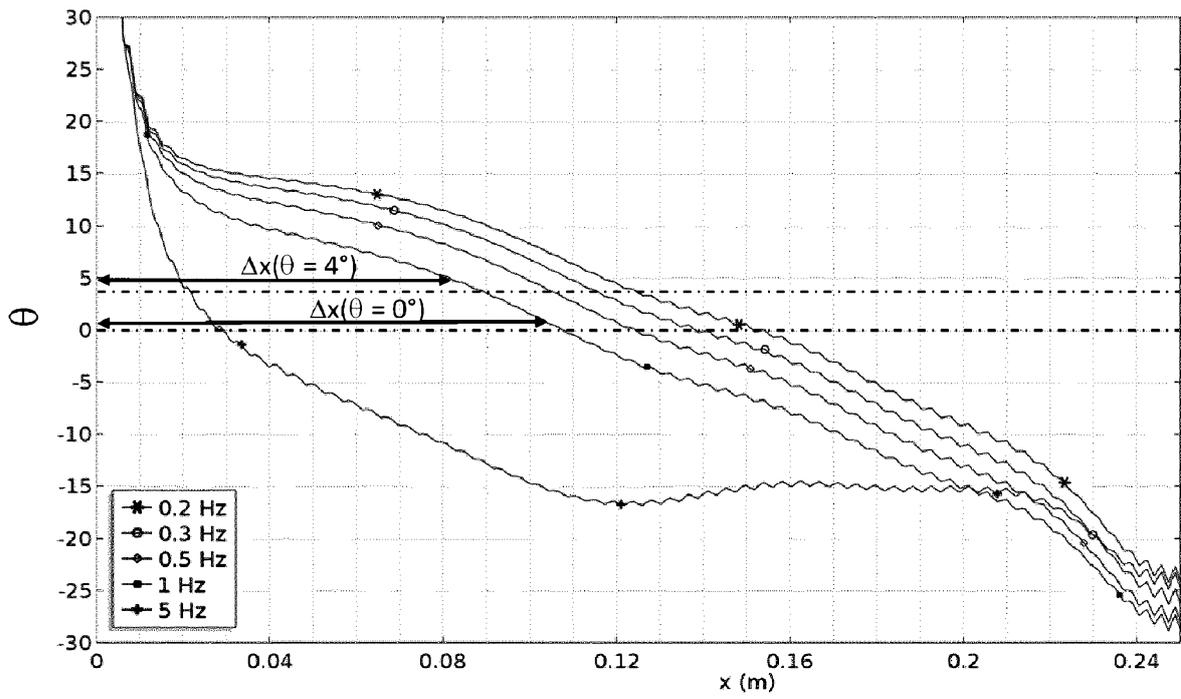
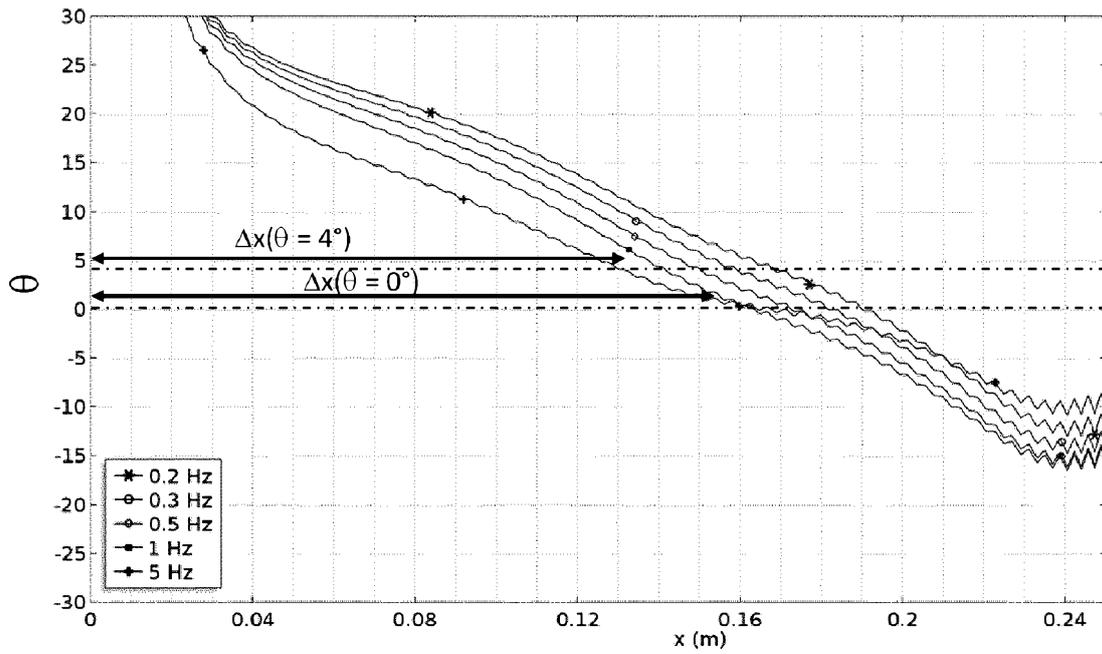


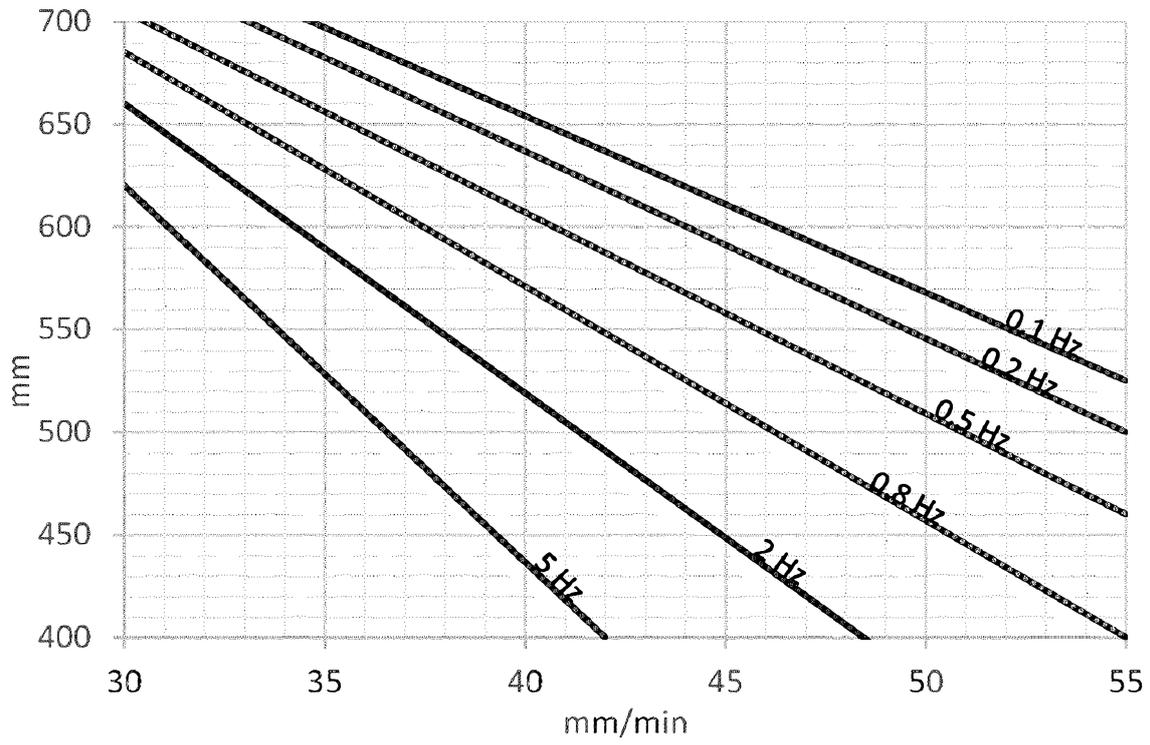
**Fig. 12E**

**Fig. 12F**

**Fig. 12G**

**Fig. 12H**

**Fig. 13A****Fig. 13B**

**Fig 14**

**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 850294  
FR 1761384

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	EP 2 682 201 A1 (FEDERAL NOE G AVTONOMNOE OBRAZOVATEL NOE UCHRETHDENIE VYSSHEGO PROFESS) 8 janvier 2014 (2014-01-08)	11,19	C22C21/00 C22F1/04 B22D7/00
A	* alinéas [0012] - [0014], [0017] - [0018] * * alinéas [0028] - [0035]; revendications 1-11 * * alinéas [0048] - [0055] * * alinéa [0067]; figures 1-9 *	1-10, 12-18	B22D27/02 B22D27/04
A	CUI J Z ET AL: "DC casting of light alloys under magnetic fields", TRANSACTIONS OF NONFERROUS METALS SOCIETY OF CHINA : ENGLISH EDITION = ZHONGGUO-YOUSE-JINSHU-XUEBAO, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 20, no. 11, 1 novembre 2010 (2010-11-01), pages 2046-2050, XP027555254, ISSN: 1003-6326 [extrait le 2010-11-01] * alinéa [1.Introduction] * * alinéa [3.2.Improvement.of.macrosegregation]; figure 2 * * alinéa [5.Conclusions] *	1-19	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)  B22D
A	ZHANG B ET AL: "Effect of low-frequency magnetic field on macrosegregation of continuous casting aluminum alloys", MATERIALS LET, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 57, no. 11, 1 mars 2003 (2003-03-01), pages 1707-1711, XP004411776, ISSN: 0167-577X, DOI: 10.1016/S0167-577X(02)01055-8 * alinéa [1.Introduction] * * alinéa [3.Results.and.discussion] * * alinéa [4.Conclusions] *	1-19	
		----- -/--	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
9 août 2018		Lombois, Thierry	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ..... & : membre de la même famille, document correspondant	



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 850294  
FR 1761384

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A,D	WO 2014/155357 A1 (PAVLOV EVGENY [RU]; IVANOV DMITRY NIKOLAEVICH [RU]; GASANOV PAVEL OLEG) 2 octobre 2014 (2014-10-02) * page 13, dernier alinéa - page 17, ligne 6 * * revendications 1-18; figures 1-20 * -----	1-19	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
9 août 2018		Lombois, Thierry	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul                      Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un                      autre document de la même catégorie                      A : arrière-plan technologique                      O : divulgation non-écrite                      P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention                      E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure                      à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date                      de dépôt ou qu'à une date postérieure.                      D : cité dans la demande                      L : cité pour d'autres raisons                      .....                      &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>			

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14) 2

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1761384 FA 850294**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **09-08-2018**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 2682201	A1	08-01-2014	EP 2682201 A1	08-01-2014
			WO 2012118396 A1	07-09-2012
-----				
WO 2014155357	A1	02-10-2014	CN 105263652 A	20-01-2016
			EP 2978548 A1	03-02-2016
			RU 2015146402 A	05-05-2017
			US 2016052050 A1	25-02-2016
			WO 2014155357 A1	02-10-2014
-----				