

(19)



(11)

EP 3 463 716 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
17.02.2021 Bulletin 2021/07

(51) Int Cl.:
B22D 11/00 (2006.01) B22D 11/115 (2006.01)
B22D 11/12 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **17731208.9**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2017/051195

(22) Date de dépôt: **17.05.2017**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2017/207886 (07.12.2017 Gazette 2017/49)

(54) **PROCEDE DE FABRICATION DE LINGOTS DE LAMINAGE PAR COULEE VERTICALE D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM**

VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON SCHICHTINGOTS DURCH VERTIKALES GIESSEN EINER ALUMINIUMLEGIERUNG

METHOD FOR PRODUCING SHEET INGOTS BY VERTICAL CASTING OF AN ALUMINIUM ALLOY

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(30) Priorité: **30.05.2016 FR 1654834**

(43) Date de publication de la demande:
10.04.2019 Bulletin 2019/15

(73) Titulaire: **Constellium Isoire**
63500 Isoire (FR)

(72) Inventeurs:
• **JARRY, Philippe**
38000 Grenoble (FR)
• **TAINA, Fabio**
63100 CLERMONT-FERRAND (FR)

- **ACHARD, Jean-Louis**
38220 Vizille (FR)
- **BERTHERAT, Marc**
3960 Sierre (CH)
- **MENET, Pierre-Yves**
38430 Saint Jean De Moirans (FR)
- **CABLEA, Mircea**
38000 Grenoble (FR)

(74) Mandataire: **Constellium - Propriété Industrielle**
C-TEC Constellium Technology Center
Propriété Industrielle
Parc Economique Centr'Alp
725, rue Aristide Bergès
CS10027
38341 Voreppe (FR)

(56) Documents cités:
WO-A1-2009/018810 WO-A1-2014/155357

EP 3 463 716 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

Domaine technique

[0001] Le domaine technique de l'invention est la fabrication de lingots suite à une coulée d'un alliage d'aluminium liquide

Exposé de l'invention

[0002] Au cours d'une coulée verticale, visant à former un lingot, la solidification d'un métal ou d'un alliage métallique est affectée par des phénomènes dits de ségrégations macroscopiques. Lors du refroidissement du métal, des courants de convection se forment, engendrant des vortex de recirculation, ces derniers étant à l'origine de ségrégations macroscopiques lorsque leur durée de vie est du même ordre de grandeur que les durées caractéristiques de solidification. Ces phénomènes conduisent, dans le lingot solidifié, à un appauvrissement local ou à un enrichissement local en espèces chimiques. Ces ségrégations macroscopiques, ou macroségrégations, sont à l'origine d'hétérogénéités dans la composition du lingot.

[0003] 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'un axe central vertical 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.

[0004] Les principaux mécanismes à l'origine de la macroségrégation centrale décrits dans cet ouvrage sont

- La convection thermosolutale dans le marais causée par les gradients de température et de concentration, et la pénétration de ces écoulements convectifs dans la zone pâteuse ;
- Le transport de grains dans la zone en surfusion sous l'effet de la gravité, de la force d'Archimède et de la convection naturelle ou forcée ;
- L'écoulement dans la zone pâteuse suscité par le retrait volumétrique à solidification, qui peut être assisté par la pression métallogénétique ;
- L'écoulement du liquide dans la zone pâteuse causé par des déformations mécaniques ;
- Les écoulements forcés qui peuvent résulter de la verse, de l'injection ou d'un dégagement de gaz, d'un brassage, d'une vibration, etc. qui pénètrent dans la zone en surfusion et dans la zone pâteuse et modifient la direction des mouvements de convection.

[0005] Il s'agit d'une macroségrégation continue, ce terme désignant le 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.

[0006] Le phénomène de macroségrégation intermit-

tente a été moins souvent décrit dans la littérature et se traduit par la formation de bandes en forme de V de part et d'autre de la macroségrégation centrale négative. Ces bandes en forme de V sont alternativement enrichies et appauvries en éléments d'alliage eutectique et péritectique. Ces bandes sont observables en effectuant des radiographies aux rayons X de tranches verticales de lingots, typiquement dans le plan L/TC à mi-largeur, lorsque les éléments ségrégés 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 niveau de la région T/2.5 de l'épaisseur, la région T/2 correspondant à l'axe central du lingot. 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 d'un bord du lingot, où T désigne une épaisseur du lingot.

[0007] Les macroségrégations intermittentes périodiques apparaissent très tôt après le démarrage de coulée, dès qu'un front incliné est formé entre une zone solide et une zone liquide. Elles sont observées dans tous les cas de coulée d'alliages d'aluminium chargés d'alliages d'aluminium, coulés typiquement selon des formats d'épaisseur supérieure à 300mm, ce seuil d'épaisseur dépendant lui-même de la vitesse de coulée.

[0008] La publication R.C Dorward et al. « Banded segregation patterns in DC cast AlZnMgCu alloy ingots and their effect on plate properties » Aluminium, 1996, 72. Jahrgang, 4, p.251-259 décrit la formation de bandes de ségrégations intermittentes dans un alliage 7000. Selon ces auteurs, ce phénomène est dû à des avalanches de grains déclenchées périodiquement par des oscillations convectives du marais, c'est-à-dire la phase liquide du métal, en lien avec un mécanisme d'émission de tourbillons. Cet article montre notamment que la macroségrégation intermittente peut être à l'origine de variations des propriétés mécaniques, par exemple de la ténacité, sur les tôles obtenues à partir des produits bruts de coulée. Il est donc avantageux de trouver un procédé de coulée qui supprimerait ces macroségrégations intermittentes.

[0009] La réduction ou la suppression des macroségrégations continues, par exemple la macroségrégation centrale, a déjà été décrite. En particulier on a montré que l'application d'un champ magnétique, à des fins de brassage ou de freinage des écoulements, permettait de limiter l'apparition de macroségrégations continues. Le document US5375647 décrit par exemple un procédé de réduction de macroségrégation centrale survenant lors de la coulée d'un lingot d'alliage métallique. Ce procédé comprend l'application, lors du refroidissement, d'un champ magnétique statique généré par au moins une bobine parcourue par un courant continu.

[0010] Le document FR2530510 décrit un procédé de coulée électromagnétique de métaux dans lequel on fait agir simultanément un champ magnétique stationnaire et un champ magnétique de fréquence variable, pour produire à la fois des vibrations radiales au sein du métal non encore solidifié, et limiter le brassage.

[0011] B. Zhang et al "Effect of low-frequency magnetic field on macrosegregation of continuous casting aluminum alloys" Materials Letters 57 (2003) pp1707-1711 ont appliqué un champ magnétique variable à basse fréquence (entre 10 et 100 Hz) à une billette de 200 mm en alliage AA7075 et ont constaté un effet bénéfique sur la diminution de la macroségrégation centrale, principalement pour une fréquence de 30 Hz.

[0012] EP 2682201 décrit un procédé de brassage électromagnétique à l'aide de deux inducteurs montés symétriquement par rapport à l'autre par rapport au plan vertical de symétrie d'une lingotière. Ces inducteurs génèrent deux champs électromagnétiques de fréquences différentes se propageant selon des directions opposées le long d'un axe vertical. Au moins un des inducteurs génère un champ magnétique à une fréquence de résonance du métal liquide.

[0013] WO 2014/155357 concerne des procédés et un appareil destinés à déplacer un métal fondu, l'inducteur électromagnétique comprenant au moins deux paires de pôles électromagnétiques et un premier composant de champ magnétique étant généré entre un pôle dans une première paire de pôles électromagnétiques et un second pôle dans une paire de pôles électromagnétiques différente, et un second composant de champ magnétique étant généré entre les deux pôles dans une ou plusieurs paires de pôles électromagnétiques, le second composant de champ magnétique générant ainsi un ou plusieurs courants de Foucault dans le métal fondu.

[0014] WO 2009/018810 concerne un procédé et un dispositif d'agitation électromagnétique de fluides électriquement conducteurs, utilisant un champ magnétique RMF tournant dans le plan horizontal et un champ magnétique WMF migrant verticalement par rapport à celui-ci. L'objectif est d'éviter les structures à flux non symétriques dans les récipients remplis de matière fondue, en particulier au début et au cours de la solidification. De plus, un mélange efficace du fluide et/ou une solidification contrôlée d'alliages métalliques doit être obtenu, tout en évitant la formation de zones de ségrégation dans la structure en cours de solidification. La solution consiste à ce que le champ magnétique tournant RMF et le champ magnétique migrant WMF soient connectés de manière discontinue sous la forme de durées périodiques et ajustables dans le temps et alternativement, de manière consécutive dans le temps. via des bobines d'induction associées.

[0015] Les inventeurs ont considéré que les procédés précédemment décrits ne permettent pas de réduire efficacement l'apparition de macroségrégations intermittentes. Ils proposent un procédé permettant de limiter la formation de telles macroségrégations, voire à les élimi-

ner, de façon à mieux maîtriser les propriétés mécaniques des produits issus de la coulée.

Exposé de l'invention

[0016] Un objet de l'invention est un procédé pour couler un lingot d'alliage d'aluminium dans une lingotière sensiblement rectangulaire comportant les étapes suivantes :

- préparation de l'alliage d'aluminium ;
- coulée de l'alliage d'aluminium dans la lingotière, selon un axe vertical d'écoulement, l'alliage étant refroidi, au cours de la coulée, par un ruissellement d'un liquide refroidisseur au contact avec le métal solidifié;
- au cours de la coulée, application d'un champ magnétique dont l'amplitude est variée périodiquement selon une fréquence, ledit 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 en différents points d'une partie liquide de l'alliage en cours de solidification ;
- le champ magnétique appliqué étant un champ magnétique glissant, se propageant selon un axe de propagation, de telle sorte qu'une amplitude maximale du champ magnétique se propage selon ledit axe de propagation, en définissant une longueur d'onde de propagation, ledit champ magnétique glissant entraînant une propagation, selon ledit axe de propagation, d'une force de Lorentz d'intensité maximale ;

le procédé étant caractérisé en ce qu'un paramètre magnétique dit de force, régissant une valeur force de Lorentz d'intensité maximale, est variable dans un intervalle temporel prédéterminé, ledit paramètre étant :

- ladite amplitude maximale du champ magnétique ;
- et/ou ladite fréquence du champ magnétique ;
- et/ou la longueur d'onde de propagation du champ magnétique ;

de façon à obtenir une modulation, dans ledit intervalle temporel, de ladite force de Lorentz d'intensité maximale se propageant selon l'axe de propagation.

[0017] Le procédé peut comporter l'une quelconque des caractéristiques suivantes, prises isolément ou en combinaison :

- la section de la lingotière, dans un plan horizontal, définit une épaisseur et une longueur, l'épaisseur étant inférieure ou égale à la longueur, l'épaisseur étant supérieure à 300 mm et de préférence d'au moins 400 mm ;
- 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 N.m⁻³ dans un intervalle temporel compris entre 20 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 N.m⁻³.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 20s 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, l'épaisseur étant au moins 400 mm ou 450 mm.

[0018] 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 ;
- 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.

[0019] 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 de résonance ;
- 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.

[0020] Le procédé peut comporter une définition d'une pluralité de valeurs critiques de l'intensité et de la fré-

quence 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.

[0021] De manière préférée, le procédé comporte une variation de la fréquence du courant d'induction parcourant un inducteur.

[0022] Selon un mode de réalisation, au moins un générateur est un aimant permanent, le procédé comportant :

- 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.

[0023] Un autre objet de l'invention est un lingot en alliage d'aluminium, obtenu par le procédé tel que décrit ci-dessus et dans la description qui suit.

[0024] Le lingot peut présenter, pour un élément de l'alliage, dont la teneur en poids est supérieure à 0.5 %, ou la somme de deux éléments de l'alliage dont la teneur individuelle est supérieure à 0.5%, un critère de dispersion 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, ledit critère de dispersion étant défini selon les expressions suivantes :

$$\varepsilon = \Delta C_{ZA} / \Delta C_{ZR} \quad (6)$$

$$\Delta C_{ZA} = \max (C_{ZA}) - \min (C_{ZA}) \quad (4),$$

$$\Delta C_{ZR} = \max (C_{ZR}) - \min (C_{ZR}) \quad (5),$$

où :

- max (C_{ZA}) et min (C_{ZA}) désignent respectivement les concentrations maximale et minimale de l'élément considéré ou de la somme des deux éléments considérés mesurées dans une zone d'analyse, présentant des macroségrégations intermittentes, par exemple entre T/2.3 et T/3.3 ;
- max (C_{ZR}) et min (C_{ZR}) désignent respectivement les concentrations maximale et minimale de l'élément considéré ou de la somme des deux éléments considérés dans une zone de référence considérée comme peu affectée par les macroségrégations intermittentes, par exemple entre T/6 et T/12 ;

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 des dites macroségrégations intermittentes selon ladite direction TC.

[0025] Le lingot peut présenter un critère d'intensité spectrale 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 deux 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 deux éléments considérés.

[0026] 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.

Figures

[0027]

Les figures 1A à 1E illustrent un exemple de dispositif et de procédé selon l'art antérieur et selon l'invention. La figure 1A présente les principaux composants du dispositif tandis que les figures 1B et 1C représentent respectivement une distribution spatiale et temporelle de l'amplitude d'un champ magnétique glissant selon l'art antérieur. Les figures 1D et 1E présentent respectivement une distribution spatiale et temporelle de l'amplitude d'un champ magnétique glissant instationnaire selon des modes de réalisation de l'invention.

La figure 2 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.

La figure 3 est une radiographie d'une tranche verticale d'un produit obtenu en mettant en œuvre un premier exemple de procédé, représentatif de l'art antérieur, selon un premier exemple, dit exemple 1, représentatif de l'art antérieur.

La figure 4 montre un exemple de profil de concentration en Zn le long d'une ligne horizontale de la tranche verticale représentée sur la figure 3 et les zones d'analyse et de référence.

La figure 5A montre les traitements numériques successivement effectués sur chaque profil obtenu avec une résolution de 0,1 mm. La figure 5B montre un profil résultant des traitements effectués.

Les figures 6A et 6B illustrent des profils de caractérisation d'un produit obtenu en mettant en œuvre un procédé selon l'exemple 1. La figure 6A montre des profils de concentration en Zn le long de plusieurs lignes horizontales de la tranche verticale représentée sur la figure 3. La figure 6B montre les profils résultant des traitements numériques effectués.

La figure 7 montre des transformées de Fourier des profils représentés sur la figure 6B.

La figure 8 représente une courbe dite de résonance de surface libre du marais, obtenue en mettant en œuvre un procédé d'un deuxième exemple, dit exemple 2, selon l'invention.

Les figures 9, 10A, 10B et 11 illustrent une caractérisation d'un produit obtenu en mettant en œuvre un procédé selon ce deuxième exemple. La figure 9 est une radiographie d'une tranche verticale du produit. La figure 10A montre des profils de concentration en Zn le long de plusieurs lignes horizontales de la tranche verticale représentée sur la figure 9. La figure 10B montre les profils résultant des traitements numériques effectués sur les profils illustrés sur la figure 9. La figure 11 montre des transformées de Fourier de ces différents profils.

Description détaillée de l'invention

[0028] Sauf mention contraire, 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 Cu signifie que la teneur en cuivre exprimée en % en poids est multipliée par 1,4. La désignation des alliages se fait en conformité avec les règlements de The Aluminium Association, connus de l'homme du métier.

[0029] La figure 1A illustre un exemple de procédé de coulée connu de l'art antérieur. Dans cet exemple, un alliage d'aluminium 1 s'écoule dans une lingotière 2, à travers une ouverture 2i. La lingotière 2 s'étend selon un axe Z vertical. Elle est délimitée par une enceinte périphérique dont la section, dans un plan horizontal XY, est parallélogramme. Un fluide de refroidissement 3, par exemple de l'eau, s'écoule contre la paroi du produit solidifié. Ce procédé est connu en tant que coulée semi-

continue par refroidissement direct (« Direct-Chill Casting »). Un faux-fond 4 peut être translaté de façon à s'éloigner de l'ouverture 2i au cours de la coulée. La lingotière 2 s'étend, parallèlement à un premier axe horizontal X, selon une épaisseur e et, parallèlement à un deuxième axe horizontal Y, perpendiculaire à l'axe X, selon une longueur ℓ . L'épaisseur e est par exemple supérieure à 300 mm. C'est au-delà d'une telle épaisseur que les macroségrégations intermittentes 11 apparaissent de façon marquée.

[0030] Sous l'effet du refroidissement, une zone solide 1s se forme, à proximité de l'enceinte refroidie, autour d'une zone liquide 1 ℓ , désignée par le terme « marais ». L'interface entre la zone liquide 1 ℓ et la zone solide 1s est un front 10, ce dernier progressant vers le centre de la lingotière au fur et à mesure que la solidification de l'alliage a lieu. A l'issue du refroidissement, un lingot parallélépipédique, également désigné par le terme « produit », est formé.

[0031] 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 macroségrégations intermittentes sont marquées. L'invention est particulièrement avantageuse pour les produits en alliage 2XXX, 5XXX, 6XXX ou 7XXX dont l'épaisseur est au moins égale à 400 mm voire 450 mm.

[0032] On a représenté un générateur de champ magnétique 5, apte à générer un champ magnétique B destiné à être appliqué à la zone liquide 1 ℓ de l'alliage. Un tel générateur peut être un aimant permanent ou un inducteur électromagnétique, ce dernier générant un champ magnétique lorsqu'il est parcouru par un courant électrique, dit courant d'induction.

[0033] Le champ magnétique B appliqué à la zone liquide 1 ℓ 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, sous l'effet de forces de Lorentz s'appliquant sur la zone liquide métallique 1 ℓ . En effet, l'application d'un champ magnétique B engendre, dans l'alliage, la formation d'un courant électrique J résultant, au sein de la zone liquide de l'alliage 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. Cette force de Lorentz présente une composante oscillante à une fréquence double de la fréquence f du champ magnétique.

[0034] 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 alliage d'aluminium d'épaisseur supérieure à 300 mm, la fréquence est de

préférence inférieure à 5 Hz, et de façon encore plus avantageuse inférieure à 2 Hz ou à 1 Hz.

[0035] 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 Δ , de préférence rectiligne. Par amplitude, on entend la valeur maximale que prend une grandeur périodique. De préférence, l'axe de propagation appartient à un plan parallèle à la direction de coulée.

[0036] La distance λ séparant deux maxima d'amplitude du champ magnétique est la longueur d'onde du champ magnétique glissant. La figure 1B représente un exemple de distribution de l'amplitude B_0 d'un champ magnétique glissant le long d'un axe de propagation Δ à un instant t (trait continu), et à un instant $t + \Delta t$ (trait pointillé). Sur l'axe de propagation, on a représenté une coordonnée r correspondant à la position d'un point du marais. La figure 1C illustre une évolution temporelle d'un champ magnétique alternatif glissant en ce point. Du fait de la propagation de la valeur d'amplitude maximale B_0^{max} , l'amplitude du champ magnétique, en ce point, varie entre une valeur minimale B_0^{min} et la valeur B_0^{max} cette dernière n'évoluant pas dans le temps.

[0037] Un générateur de champ magnétique glissant 5 peut être constitué par plusieurs inducteurs électromagnétiques disposés autour de l'enceinte périphérique. 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 :

$$F_0(r) = \frac{1}{2} \sigma f \lambda B_0^2(r) \quad (1), \text{ où } \sigma \text{ désigne la conductivité électrique.}$$

[0038] On peut définir une vitesse de glissement V_G du champ magnétique $V_G = f \lambda$ (2) auquel cas l'expression (1) peut être exprimée comme suit :

$$F_0(r) = \frac{1}{2} \sigma V_G B_0^2(r) \quad (3)$$

[0039] Ainsi, 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. L'application d'un champ magnétique glissant se traduit, en un point du marais, par une modulation 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} . Il en est de même de la densité de force de Lorentz, cette dernière ayant, en un point r du marais, une valeur maximale lorsque l'amplitude du champ magnétique, en ce point, est

maximale. 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 Δ . La combinaison des forces se propageant le long de l'axe de propagation établit un mouvement du liquide selon cet axe constituant un élément de pompe électromagnétique.

[0040] 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 300 mm.

[0041] 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 les équations (1) et (3), par exemple :

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

[0042] 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 λ du champ magnétique glissant, c'est-à-dire la distance entre deux maximas se propageant selon l'axe de propagation. La fréquence 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 1D, 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 λ 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 Δt , 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 λ a été modifiée, passant de $\lambda(t)$ à $\lambda(t + \Delta t)$. Sur la figure 1E, 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 λ constantes.

[0043] De ce fait, dans les exemples représentés sur les figures 1D et 1E, 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 $F_{max}(t + \Delta t)$.

[0044] 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.

[0045] 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. Dans les exemples décrits ci-après, on a utilisé un dispositif décrit dans la demande WO2014/155357, et plus précisément selon la configuration décrite en lien avec les figures 19 et 20A, dans laquelle trois inducteurs, orientés selon l'axe vertical Z, sont disposés face à chaque grande face du lingot.

[0046] 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.

[0047] 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.

[0048] 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 $2 \text{ N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$.

[0049] 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

300 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 20 secondes (épaisseur de 300 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 Δt 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.

[0050] 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 20 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 $30 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$, et avantageusement d'au moins $40 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$, et de préférence d'au moins $50 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$, et encore plus préférentiellement d'au moins $60 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$.

[0051] 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.

[0052] 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.

[0053] Avantageusement, au cours de la coulée, la force de Lorentz d'intensité maximale est supérieure à $80 \text{ N}/\text{m}^3$, de préférence supérieure à $100 \text{ N}/\text{m}^3$, de préférence supérieure à $120 \text{ N}/\text{m}^3$, de manière encore plus préférée supérieure à $140 \text{ N}/\text{m}^3$. Les inventeurs ont en effet constaté que la suppression des macroségrégations intermittentes n'était pas optimum lorsque la force était trop faible comme le montre l'exemple 5 (Fig 20 a à d). 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.

[0054] 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'induc-

tion. Cette étape préalable comprend la détermination d'une ou de plusieurs valeurs de couples fréquence/intensité, dites valeurs critiques, générant, à la surface libre 1_{sup} du marais, une résonance, la résonance se traduisant par l'apparition d'oscillations significatives de ladite surface libre 1_{sup} , cette dernière étant représentée sur la figure 1A. 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.

[0055] En considérant différentes valeurs critiques de fréquence (ou d'intensité), il est possible de déterminer expérimentalement une courbe de résonance R, 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 R, 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 R, 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.

[0056] Une telle courbe de résonance R dépend des conditions de coulée, c'est-à-dire des dimensions de la lingotière, 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. Une courbe de résonance R est représentée sur la figure 2, cette courbe ayant été obtenue en coulant un lingot d'épaisseur 525 mm x 1650 mm, selon une vitesse de coulée de 45 mm/min, un brassage magnétique étant effectué par l'application d'un champ magnétique par trois inducteurs disposés devant chaque grande face du lingot et déphasés de 90° pour former un élément de pompe électromagnétique horizontale, comme précédemment évoqué. 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 représentant un certain pourcentage de l'intensité de la force de Lorentz nominale, par exemple 10% de cette intensité, et la courbe de résonance.

[0057] 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 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 macroségrégations intermittentes.

[0058] Un autre exemple de courbe est représenté sur la figure 8 et sera commenté ultérieurement en lien avec les exemples. Sur les figures 2 et 8, on a représenté la courbe de résonance R, déterminée expérimentalement, ainsi que la courbe représentant une Force de Lorentz dont l'intensité est égale à 10% de la force de Lorentz nominale préalablement définie.

[0059] La variation d'un ou plusieurs paramètres de force peut notamment permettre d'alterner des périodes durant lesquelles le nombre adimensionnel de Hartmann Ha est respectivement faible, typiquement inférieur à 1, et élevé, typiquement supérieur à 3, voire 5. Le nombre adimensionnel de Hartmann Ha est un nombre couramment utilisé dans le domaine de la magnétohydrodynamique. Il représente un ratio entre la viscosité magnétique et la viscosité d'un liquide chargé s'écoulant dans un champ magnétique. Plus ce nombre est important, plus la contribution des forces de Lorentz est importante. De préférence le nombre adimensionnel de Hartmann Ha alterne avec un ratio entre valeurs faibles et fortes d'au moins 3 ou d'au moins 5. Une telle configuration est préférée, car elle permet d'alterner des périodes durant lesquelles l'énergie cinétique appliquée par le champ magnétique s'oppose à la convection naturelle du métal liquide, et des périodes durant lesquelles la convection naturelle prédomine.

[0060] Comme décrit en lien avec les exemples présentés ci-après, les produits obtenus par un procédé selon l'invention présentent une macroségrégation intermittente limitée par rapport à des procédés de l'art antérieur, voire non perceptible. Dans les exemples qui suivent, la caractérisation des produits a été réalisée en analysant des profils horizontaux (selon l'axe TC) d'une radiographie réalisée à mi-largeur selon un plan vertical L/TC, ces profils étant étalonnés pour obtenir la distribution spatiale d'éléments d'alliage lourds de type Zn ou Cu. Les zones enrichies en tels éléments lourds, plus absorbantes, apparaissent sous la forme de taches sombres sur le négatif des radiographies effectuées et donc des taches claires sur les radiographies présentées. Un

exemple d'obtention du profil de concentration en Zn à partir d'une radiographie d'un alliage Al-Zn est présenté sur la figure 4.

[0061] Les termes L, TL et TC, connus de l'homme du métier, correspondent respectivement à la dimension du lingot selon l'axe vertical, l'axe dit « travers long » et selon l'axe dit « travers court ».

[0062] De façon complémentaire ou alternative, on peut réaliser des analyses chimiques selon des profils horizontaux, de façon à quantifier la distribution spatiale desdits éléments chimiques selon l'axe TC. Une macroségrégation intermittente peut être caractérisée par un écart maximal en masse d'un élément d'alliage, en l'occurrence Zn, dans la zone la plus marquée par les macroségrégations intermittentes, c'est-à-dire au voisinage de T/2.5.

[0063] Pour quantifier la macroségrégation intermittente, les profils de concentration, obtenus par radiographie ou par toute autre méthode, avec une résolution spatiale de 0,1 mm ont été traités comme illustré sur la figure 5A. Le profil obtenu avec la résolution de 0,1 mm est le profil brut référencé profil A. Une moyenne glissante sur 2 mm permet de s'affranchir de la microségrégation, le profil lissé obtenu est référencé profil B. 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 obtenu étant un profil dit de base, référencé profil C. Le profil C est soustrait au profil B pour obtenir un profil dit corrigé, correspondant à la macroségrégation intermittente, le profil corrigé étant référencé profil D. Un tel profil est représenté sur la Figure 5B. Comme on peut le voir sur cette figure 5B, 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.

[0064] On peut alors calculer un écart maximal de concentration dans une zone d'analyse Z_A située entre T/2.3 et T/3.3, cet écart maximal pouvant être exprimé selon l'équation suivante :

$$\Delta C_{ZA} = \max (C_{ZA}) - \min (C_{ZA}) \quad (4)$$

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

[0065] 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.

[0066] L'écart maximal ΔC_{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 pré-

férence inférieure à 8% ou même inférieure à 6 %. Cependant la valeur absolue de ΔC_{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/6 et T/12, cet écart maximal pouvant être exprimé selon l'équation suivante:

$$\Delta C_{ZR} = \max(C_{ZR}) - \min(C_{ZR}) \quad (5)$$

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

[0067] On obtient ainsi un critère de dispersion ε permettant d'évaluer pour l'élément considéré la macroségrégation intermittente :

$$\varepsilon = \Delta C_{ZA} / \Delta C_{ZR} \quad (6)$$

[0068] Pour s'affranchir de variations locales de composition, il est avantageux, pour déterminer ΔC_{ZA} et ΔC_{ZR} , de calculer une moyenne sur au moins 5 profils de concentration distants d'au moins 10 mm.

[0069] Plus ε est faible, moins les macroségrégations intermittentes sont marquées. Les produits obtenus par le procédé selon l'invention ont de préférence un critère de dispersion ε 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.

[0070] Selon une nomenclature connue de l'homme du métier, T/n désigne une distance par rapport à un bord du lingot, selon un axe horizontal, T/2 correspondant au centre du lingot.

[0071] 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. La macroségrégation intermittente présente des périodes comprises entre 8 et 25 mm. Quand la macroségrégation intermittente est importante, on observe donc 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 ζ qui correspond à l'amplitude maximale des composantes de Fourier dans une plage de période spatiale comprise entre 8 et 25 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 ζ inférieur à 0.01, de préférence inférieur à 0.007 et de manière préférée inférieur à 0.005.

[0072] Les critères de dispersion ε et d'intensité spec-

trale ζ 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 deux éléments, par exemple la somme Zn + Cu dans certains alliages 7xxx ou la somme Mg + Si dans les alliages 6xxx. Ces critères peuvent également s'appliquer à un élément dont la teneur en poids dans l'alliage est supérieure ou égale à 0.5% ou à la somme de deux éléments de l'alliage dont la teneur individuelle est supérieure à 0.5%,

[0073] Dans le cas où l'on considère la somme de deux éléments, les valeurs pour normaliser l'écart maximal ΔC_{ZA} , et/ou la transformée de Fourier correspondent à la somme des concentrations nominales des éléments considérés.

[0074] Les lingots de section rectangulaire obtenus par le procédé selon l'invention peuvent être utilisés tels que coulés ou après corroyage, optionnellement après mise en solution et trempe et vieillissement pour les alliages à durcissement structural. Avantageusement les lingots de section rectangulaire obtenus par le procédé selon l'invention sont laminés et/ou forgés.

Exemple 1.

[0075] On a réalisé une coulée d'un alliage AA7035 sans brassage électromagnétique. La composition de l'alliage coulé comprenant une concentration nominale en Zn de 5,6 % en poids, une concentration nominale en Mg de 1.3% en poids. Le format du lingot était de 1650 mm x 525 mm. Cet exemple est représentatif de l'art antérieur. L'affinage du grain a été réalisé avec une concentration d'affinant AlTiB 5 : 1 de 1Kg/t. La vitesse de coulée était de 35 mm/min. La figure 3 représente une radiographie du lingot à mi-largeur selon un plan L / TC, sur laquelle la macroségrégation centrale négative et les macroségrégations intermittentes sont clairement identifiables. Sur la figure 6A, on a représenté différents profils bruts horizontaux de la teneur en Zn, selon un axe TC, ainsi que des profils lissés B sont obtenu par une moyenne glissante sur 2 mm déduits de la figure 3. La radiographie permet de quantifier que les éléments à l'origine d'un contraste par rapport à l'aluminium, à savoir dans le cas présent le Zn. Cette remarque s'applique à l'exemple 2 suivant. On observe clairement la macroségrégation centrale négative, maximale à T/2, les macroségrégations intermittentes étant observées entre T/2.3 et T/3.3. Sur la figure 6B, on a représenté les différents profils corrigés de la teneur en Zn (profils D), selon un axe TC, obtenus après soustraction de chaque profil lissé (profil B) par un profil de base (profil C) représentatif de la macroségrégation continue.

[0076] La valeur des écarts maximaux de la teneur en Zn était 0,75% en poids pour ΔC_{ZA} et 0,19% en poids pour ΔC_{ZR} , la valeur des écarts maximaux normalisés dans la zone d'analyse et dans la zone de référence étant ainsi respectivement 13.3% et 3.5%. La valeur du critère de dispersion ε tel que défini par l'équation (6) était 3.9.

La transformée de Fourier de chaque profil a été calculée, et est représentée sur la figure 7, après normalisation par la composition nominale de Zn : 5.6 % en poids. L'axe des abscisses représente la période spatiale, comprise entre 0 et 30 mm. On observe différents pics prédominants, correspondant à différentes périodes spatiales réparties entre 8 et 25 mm, et plus particulièrement entre 10 mm et 25 mm. Le critère d'intensité spectrale ζ , qui correspond à l'amplitude maximale des composantes de Fourier entre 8 et 25 mm, normalisée par la concentration nominale C_0 du Zn, était pour l'ensemble des profils au moins 0.01.

Exemple 2.

[0077] Au cours d'un deuxième exemple, on a réalisé une coulée d'un alliage AA7035 avec un brassage électromagnétique. La composition de l'alliage coulait comprenait une concentration nominale en cen Zinc de 5,6 % en poids et une concentration nominale en Magnésium de 1.3% en poids.. Le format du lingot était de 1650 mm x 525 mm. L'affinage du grain a été réalisé avec une concentration d'affinant AlTiB 5 :1 de 1Kg/t. La vitesse de coulée s'élevait à 35 mm/min. Le brassage électromagnétique a été obtenu par la mise en place, en regard de chaque face L/TL du lingot, (correspondant à un plan YZ dans le repère indiqué sur la figure 1A), de trois inducteurs orientés selon l'axe vertical Z, parcourus par un courant alternatif, de fréquence 0.25 Hz, déphasés l'un par rapport à l'autre de 60° et espacés l'un de l'autre de 0.6 m, constituant ainsi un élément de pompe électromagnétique. La distance entre les inducteurs et le lingot s'élevait à 172 mm. Les éléments de pompe électromagnétiques sur chaque face étaient orientés en sens inverse. Les inducteurs généraient un champ magnétique glissant selon un plan horizontal, l'axe de glissement étant parallèle à la direction TL, la longueur d'onde λ était 3,6 m. La densité maximale de la force de Lorentz induite dans le marais liquide a été variée entre environ 180 N/m³ et 240 N/m³ avec une vitesse de variation de 2 N.m⁻³.s⁻¹ en modifiant la valeur nominale du courant dans les inducteurs. La courbe de résonance, correspondant à ces conditions de coulée, est représentée sur la figure 8. La variation de l'intensité du courant d'induction est représentée, sur cette figure par une double flèche.

[0078] La figure 9 représente une radiographie du lingot selon un plan L/TC, sur laquelle la macroségrégation centrale négative à T/2 est identifiable. Sur la figure 10A, on a représenté différents profils horizontaux bruts de la teneur en Zn (profil A) et lissés (profils B), selon un axe TC. On distingue la macroségrégation centrale négative, maximale à T/2. Sur la figure 10B, on a représenté les différents profils horizontaux de la teneur en Zn, selon un axe TC, de type profil corrigé (profils D) obtenus après soustraction du profil correspondant à la macroségrégation continue.

[0079] La valeur des écarts maximaux de la teneur en

Zn était 0,24% en poids pour ΔC_{ZA} et 0,28% en poids pour ΔC_{ZR} , la valeur des écarts maximaux normalisés dans la zone d'analyse et dans la zone de référence étant respectivement 4.3% et 5%. La valeur du critère de dispersion ε telle que définie par l'équation (6) était 0,9 : la macroségrégation intermittente dans la zone d'analyse entre T/2.3 et T/3.3 a été éliminée. La transformée de Fourier de chaque profil a été calculée, et est représentée sur la figure 11, après normalisation par la composition nominale de Zn : 5.6 % en poids. L'axe des abscisses représente la période spatiale, comprise entre 0 et 30 mm. On n'observe plus de pics prédominants. Le critère d'intensité spectrale ζ , qui correspond à l'amplitude maximale des composantes de Fourier entre 8 et 25 mm normalisée par la concentration nominale C_0 du Zn, était pour l'ensemble des profils inférieur à 0.005.

Exemple 3

[0080] Dans cet exemple, on a réalisé une coulée d'un alliage AA 7050 sans brassage électromagnétique. La composition de l'alliage était de 6.3% en poids de Zn, de 2.2% en poids de Mg et de 2.1% en poids de Cu. Le format du lingot était 1650x525mm. L'affinage du grain est effectué à l'aide d'un fil affinant AlTiC3 :0.15 avec un taux d'ajout de 1kg/tonne. La vitesse de coulée était de 45mm/min. Il constitue la référence de l'exemple 4.

[0081] La figure 12 représente une radiographie du lingot selon un plan L/TC, sur laquelle la macroségrégation centrale négative à T/2 est identifiable. Sur la figure 13a, on a représenté le profil horizontal lissé de la somme de deux éléments Zn et Cu (profils B) selon un axe TC, déduit de la radiographie de la figure 12. En effet, la radiographie ne permet de quantifier que les éléments à l'origine d'un contraste par rapport à l'aluminium, à savoir dans le cas présent le Zn et le Cu. Cette remarque s'applique aux exemples 4 et 5 suivants. Sur la figure 13b, on a représenté les différents profils horizontaux de la concentration en Zn+Cu, selon un axe TC, de type profil corrigé (Profils D) obtenus après soustraction du profil correspondant à la macroségrégation continue. La valeur des écarts maximaux de la somme Zn+ Cu était 0.81% en poids pour ΔC_{ZA} et 0.19% pour ΔC_{ZR} . La valeur du critère de dispersion ε telle que définie par l'équation (6) était 4.4. La figure 14 représente la transformée de Fourier de chaque profil, après normalisation par la somme des compositions nominales en Zn et Cu : 8.3% en poids. L'axe des abscisses représente la période spatiale, comprise entre 0 et 30 mm. Le critère d'intensité spectrale ζ , qui correspond à l'amplitude maximale des composants de Fourier entre 8 et 25 mm normalisée par la somme des compositions nominales en Zn et Cu, était pour un des profils supérieur à 0.01 ou pour l'ensemble des profils supérieurs à 0.007.

Exemple 4

[0082] Dans cet exemple, on a réalisé une coulée d'al-

liage en AA 7050. La composition de l'alliage était de 6.3% en poids de Zn, de 2.2% en poids de Mg et de 2.1% en poids de Cu. La section du lingot était de 1650x525mm. L'affinage du grain est effectué à l'aide d'un fil affinant AlTiC3 :0.15 avec un taux d'ajout de 1kg/tonne. La vitesse de coulée était de 45mm/min. Le brassage électromagnétique a été obtenu par la mise en place, en regard de chaque face L/TL du lingot, (correspondant à un plan YZ dans le repère indiqué sur la figure 1A) 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 de 2,4 m. Les éléments de pompe électromagnétique ainsi obtenus étaient disposés en miroir par rapport à chaque face L/TL 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 de la figure 15. La densité maximale de la force de Lorentz ainsi générée par la variation de la fréquence *entre 0.450 et 0.600Hz* a été variée entre environ 110 N/m³ et 150 N/m³ sur une période de 3 min ce qui correspond à une vitesse de variation d'environ 0.22 N/m³/s.

[0083] La figure 16 représente une radiographie du lingot selon un plan L/TC, sur laquelle la macroségrégation centrale négative à T/2 est identifiable. Les macroségrégations intermittentes sont très fortement atténuées par rapport à la référence (Fig 12), comme le montrent les figures 17a et 17b.

[0084] Sur la figure 17a, on a représenté le profil horizontal lissé de la somme des éléments en Zn+Cu (profils B) selon un axe TC, déduit de la radiographie de la figure 16. Sur la figure 17b, on a représenté les différents profils horizontaux de la somme des deux éléments Zn et Cu, selon un axe TC, de type profil corrigé (Profils D) obtenus après soustraction du profil correspondant à la macroségrégation continue. La valeur des écarts maximaux de la teneur en Zn + Cu était 0.30% en poids pour ΔC_{ZA} et 0.14% pour ΔC_{ZR} . La valeur du critère de dispersion ε telle que définie par l'équation (6) était 2.2. La macroségrégation intermittente dans la zone d'analyse a donc été réduite et est représentée à la figure 18, après normalisation par la somme des compositions nominales en Zn et Cu : 8.3% en poids. L'axe des abscisses représente la période spatiale, comprise entre 0 et 30 mm. Le critère d'intensité spectrale ζ , qui correspond à l'amplitude maximale des composants de Fourier entre 8 et 25 mm normalisée par la somme des compositions nominales en Zn et Cu, était pour l'ensemble des profils inférieur à 0.005.

Exemple 5

[0085] Dans cet exemple, on a réalisé une coulée d'al-

liage AA7050 La composition de l'alliage était de 6.3% en poids de Zn, de 2.2% en poids de Mg et de 2.1% en poids de Cu, les teneurs des autres éléments étaient toutes inférieures à 0.5% en poids. La section du lingot était de 1650x525mm. L'affinage du grain est effectué à l'aide d'un fil affinant AlTiC3 :0.15 avec un taux d'ajout de 1kg/tonne. La vitesse de coulée était de 45mm/min. Le brassage électromagnétique a été obtenu par la mise en place, en regard de chaque face L/TL du lingot, (correspondant à un plan YZ dans le repère indiqué sur la figure 1A) 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 de 2,4 m. Les éléments de pompe électromagnétique ainsi obtenus étaient disposés en miroir par rapport à chaque face L/TL du lingot, la direction de glissement étant parallèle à la direction travers-long, les glissements générés divergeant depuis la mi-largeur du lingot.

[0086] Le forçage instationnaire a été obtenu par l'imposition d'une variation à partir de zéro de l'intensité du courant électrique alternatif qui parcourait les bobines, tel qu'illustré par les flèches dans le diagramme fréquence vs intensité de la figure 19. L'intensité de la force volumique maximale de Lorentz ainsi générée par la variation de l'intensité a varié typiquement de 0 N/m³ à 140 N/m³ en 4 min ce qui correspond à une vitesse de variation de 0.58 N/m³/s. A la suite, on a fait varier l'intensité de la force volumique maximale de Lorentz entre 140 N/m³ et 360 N/m³ en 5 min ce qui correspond à une vitesse de variation de 0.73 N/m³/s.

[0087] Les résultats obtenus sont illustrés par les deux tranches verticales radiographiées représentées sur les figures 20a (variation de l'intensité entre 0 N/m³ à 140 N/m³ en 4min) et figure 21a (variation de la force entre 140 N/m³ à 360 N/m³ en 5min) qui sont en continuité l'une de l'autre.

[0088] Sur la figure 20b, on a représenté le profil horizontal lissé de la somme des éléments majeurs Zn+Cu (profils B) selon un axe TC, déduit de la radiographie de la figure 20a. Sur la figure 20c, on a représenté les différents profils horizontaux de la somme des éléments Zn+Cu, selon un axe TC, de type profil corrigé (Profils D) obtenus après soustraction du profil correspondant à la macroségrégation continue. La valeur des écarts maximaux de la teneur en Zn+Cu était 0.70% en poids pour ΔC_{ZA} et 0.22% pour ΔC_{ZR} . La valeur du critère de dispersion ε telle que définie par l'équation (6) était 3.2. La figure 20d représente la transformée de Fourier de chaque profil, après normalisation par la somme des compositions nominales en Zn et Cu : 8.3 % en poids. L'axe des abscisses représente la période spatiale, comprise entre 0 et 30 mm. Le critère d'intensité spectrale ζ , qui correspond à l'amplitude maximale des composants de Fourier entre 8 et 25 mm normalisée par la somme des compositions nominales en Zn et Cu, était pour l'ensemble des profils inférieur à 0.01. On remarque toutefois

que le critère d'intensité spectrale ζ montre des valeurs supérieures à 0.005.

[0089] Sur la figure 21b, on a représenté le profil horizontal lissé de la somme des éléments majeurs Zn+Cu (profils B) selon un axe TC, déduit de la radiographie de la figure 21a. Sur la figure 21c, on a représenté les différents profils horizontaux de la somme des éléments majeurs Zn+Cu, selon un axe TC, de type profil corrigé (Profils D) obtenus après soustraction du profil correspondant à la macroségrégation continue. La valeur des écarts maximaux de la teneur en Zn+Cu était 0.37% en poids pour ΔC_{ZA} et 0.15% pour ΔC_{ZR} . La valeur du critère de dispersion ε telle que définie par l'équation (6) était 2.4. La figure 21d représente la transformée de Fourier de chaque profil, après normalisation par la somme des compositions nominales en Zn et Cu : 8.3 % en poids. L'axe des abscisses représente la période spatiale, comprise entre 0 et 30 mm. Le critère d'intensité spectrale ζ , qui correspond à l'amplitude maximale des composants de Fourier entre 8 et 25 mm normalisée par la somme des compositions nominales en Zn et Cu, était pour l'ensemble des profils inférieur à 0.005.

[0090] On observe ainsi que la suppression des macroségrégations intermittentes est améliorée si la force est supérieure à 140 N/m³. En effet, lorsque la force est trop faible, on constate que les valeurs du critère de dispersion ε d'intensité spectrale ζ sont supérieures aux valeurs préférées de l'invention. Les inventeurs supposent ainsi qu'un forçage instationnaire qui consisterait à interrompre périodiquement le champ glissant ne permettrait pas de supprimer de manière avantageuse les macroségrégations intermittentes.

Revendications

1. Procédé pour couler un lingot d'alliage d'aluminium dans une lingotière sensiblement rectangulaire comportant les étapes suivantes :

- préparation de l'alliage d'aluminium ;
- coulée de l'alliage d'aluminium dans la lingotière, selon un axe vertical de coulée, l'alliage étant refroidi, au cours de la coulée, par un ruissellement d'un liquide refroidisseur au contact avec le métal solidifié;
- au cours de la coulée, application d'un champ magnétique dont l'amplitude (B_0) est variée périodiquement selon une fréquence (f), ledit 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 (F) en différents points d'une partie liquide de l'alliage en cours de solidification ;
- le champ magnétique appliqué étant un champ magnétique glissant, se propageant 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 (λ), ledit champ magnétique glissant entraînant une propagation, selon ledit axe de propagation, d'une force de Lorentz d'intensité maximale (F_{max}) ;

le procédé étant **caractérisé en ce qu'un** paramètre magnétique dit de force, régissant force de Lorentz d'intensité maximale (F_{max}), est variable dans un intervalle temporel (Δt) prédéterminé, ledit paramètre étant :

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

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la section de la lingotière, dans un plan horizontal, définit une épaisseur (e) et une longueur (ℓ), l'épaisseur étant inférieure ou égale à la longueur, l'épaisseur étant supérieure à 300 mm et de préférence d'au moins 400 mm.
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la fréquence du champ magnétique est inférieure à 5Hz, ou 2 Hz ou 1 Hz.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel, la force de Lorentz d'intensité maximale (F_{max}), se propageant selon l'axe de propagation, varie d'au moins 30 N.m⁻³ dans un intervalle temporel (Δt) compris entre 20 secondes et 10 minutes.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel, 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 N.m⁻³.s⁻¹ durant ledit intervalle temporel (Δt).
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'axe de propagation de l'amplitude maximale du champ magnétique appartient à un plan parallèle à la direction de coulée.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel au cours de la coulée, la variation du paramètre de force est périodique, la période étant comprise entre 20s et 20 minutes, ou entre 1 minute et 15 minutes, ou entre 2 minutes et 10 minutes.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les générateurs sont des inducteurs électromagnétiques, chaque inducteur électromagnétique étant parcouru par un courant dit courant d'induction, le procédé comportant, durant ledit intervalle temporel :

- une variation d'une intensité du courant d'induction ;
- 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.

9. Procédé selon la revendication 8, comportant une variation de l'intensité ou de la fréquence du courant d'induction parcourant un inducteur, le procédé comportant :

- 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 (1_{sup}) de l'alliage d'aluminium s'écoulant dans la lingotière, une onde de résonance ;
- 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.

10. Procédé selon la revendication 9 comportant, au cours de ladite étape préalable, 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 (R), représentant les valeurs 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.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel au moins un générateur est un aimant permanent, le procédé comportant :

- 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.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'alliage d'aluminium est choisi parmi les alliages de types 2XXX, 5XXX, 6XXX ou 7XXX et dans lequel l'épaisseur est au moins 400 mm ou 450 mm.

13. Lingot en alliage d'aluminium, obtenu par le procédé objet de l'une quelconque des revendications 1 à 12 présentant, pour un élément de l'alliage, dont la teneur en poids est supérieure à 0.5 %, ou pour la somme de deux éléments de l'alliage dont la teneur individuelle en poids est supérieure à 0.5%, un critère de dispersion 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 :

$$\varepsilon = \Delta C_{ZA} / \Delta C_{ZR} \quad (6)$$

$$\Delta C_{ZA} = \max (C_{ZA}) - \min (C_{ZA}) \quad (4),$$

$$\Delta C_{ZR} = \max (C_{ZR}) - \min (C_{ZR}) \quad (5),$$

où :

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

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

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.

14. Lingot en alliage d'aluminium, selon la revendication 13 dont un critère d'intensité spectrale (ζ) 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 deux 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 deux éléments considérés.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Gießen eines Barrens aus Aluminiumlegierung in einer im Wesentlichen rechteckigen Kokille mit folgenden Schritten:

- Herstellen der Aluminiumlegierung;
 - Gießen der Aluminiumlegierung in der Kokille entlang einer vertikalen Gießachse, wobei die Legierung während des Gießens durch Abrieseln einer Kühlflüssigkeit in Kontakt mit dem erstarrten Metall gekühlt wird;
 - während des Gießens Anlegen eines Magnetfeldes, dessen Amplitude (B_0) periodisch in Abhängigkeit von einer Frequenz (f) variiert wird, wobei das Magnetfeld von mindestens einem Magnetfeldgenerator erzeugt wird, der am Umfang der Kokille angeordnet ist, um an verschiedenen Punkten eines flüssigen Teils der sich verfestigenden Legierung eine Lorentz-Kraft (F) aufzubringen;
 - wobei das angelegte Magnetfeld ein gleitendes Magnetfeld ist, das sich entlang einer Ausbreitungsachse ausbreitet, so dass eine maximale Amplitude (B_0^{max}) des Magnetfeldes sich entlang der Ausbreitungsachse ausbreitet und dabei eine Ausbreitungswellenlänge (λ) definiert wird, wobei das gleitende Magnetfeld bewirkt, dass sich eine Lorentz-Kraft maximaler Intensität (F_{max}) entlang der Ausbreitungsachse ausbreitet;

dadurch gekennzeichnet, dass ein sogenannter magnetischer Kraftparameter, der die Lorentz-Kraft maximaler Intensität (F_{max}) bestimmt, in einem vorbestimmten Zeitintervall (Δt) variabel ist, wobei dieser Parameter

- die maximale Amplitude (B_0^{max}) des Magnetfeldes,
- und/oder die Frequenz (f) des Magnetfeldes,

• und/oder die Ausbreitungswellenlänge (λ) des Magnetfeldes ist,

um in diesem Zeitintervall eine Modulation der Lorentz-Kraft maximaler Intensität (F_{max}) zu erhalten, die sich entlang der Ausbreitungsachse ausbreitet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Querschnitt der Kokille in einer horizontalen Ebene eine Dicke (e) und eine Länge (ℓ) definiert, wobei die Dicke kleiner oder gleich der Länge ist, wobei die Dicke größer als 300 mm und vorzugsweise mindestens 400 mm ist.

3. Verfahren nach irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Frequenz des Magnetfeldes weniger als 5 Hz, oder 2 Hz oder 1 Hz beträgt.

4. Verfahren nach irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Lorentz-Kraft maximaler Intensität (F_{max}), die sich entlang der Ausbreitungsachse ausbreitet, um mindestens $30 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$ in einem Zeitintervall (Δt) von 20 Sekunden bis 10 Minuten variiert.

5. Verfahren nach irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Magnetfeld so beschaffen ist, dass der Absolutwert der Änderung der Dichte der maximalen Lorentz-Kraft während des Zeitintervalls (Δt) größer oder gleich $0,05 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ist.

6. Verfahren nach irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Ausbreitungsachse der maximalen Amplitude des Magnetfeldes zu einer Ebene parallel zur Gießrichtung gehört.

7. Verfahren nach irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Veränderung des Kraftparameters während des Gießens periodisch ist, wobei die Periode 20 Sekunden bis 20 Minuten, oder 1 Minute bis 15 Minuten, oder 2 Minuten bis 10 Minuten beträgt.

8. Verfahren nach irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Generatoren elektromagnetische Induktoren sind, wobei jeder elektromagnetische Induktor von einem als Induktionsstrom bezeichneten Strom durchflossen wird, welches Verfahren während des Zeitintervalls umfasst:

- eine Variation einer Intensität des Induktionsstroms;
- und/oder eine Variation einer Frequenz des Induktionsstroms;
- und/oder eine Veränderung eines Abstands zwischen einem elektromagnetischen Induktor und der Kokille.

9. Verfahren nach Anspruch 8, umfassend eine Variation der Intensität oder Frequenz des einen Induktor durchströmenden Induktionsstroms, wobei das Verfahren umfasst:

- einen vorhergehenden Schritt der Definition mindestens eines kritischen Wertes der Intensität und Frequenz des Induktionsstroms, der an einer freien Oberfläche (1_{sup}) der in der Kokille fließenden Aluminiumlegierung eine Resonanzwelle erzeugt;

- eine Bestimmung eines Variationsbereichs der Intensität oder Frequenz des Induktionsstroms in Abhängigkeit von dem vorher definierten kritischen Wert.

10. Verfahren nach Anspruch 9, das während des vorhergehenden Schritts eine Definition einer Vielzahl kritischer Werte der Intensität und Frequenz des Induktionsstroms umfasst, um eine Resonanzkurve (R) zu definieren, welche die Intensitäts- und Frequenzwerte darstellt, die eine Resonanz der freien Oberfläche erzeugen, wobei das Verfahren eine Bestimmung eines Variationsbereichs der Intensität oder Frequenz des Induktionsstroms in einem durch die Resonanzkurve abgegrenzten Bereich umfasst.

11. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem mindestens ein Generator ein Permanentmagnet ist, wobei das Verfahren umfasst:

- eine Veränderung eines Abstands zwischen dem Permanentmagneten und der Kokille;

- und/oder eine Rotation des Permanentmagneten und eine Änderung der Rotationsgeschwindigkeit des Magneten;

- und/oder eine Rotation zweier Permanentmagnete.

12. Verfahren nach irgendeinem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Aluminiumlegierung ausgewählt ist aus den Legierungen des Typs 2XXX, 5XXX, 6XXX oder 7XXX und bei dem die Dicke mindestens 400 mm oder 450 mm beträgt.

13. Barren aus Aluminiumlegierung, der durch das Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 12 erhalten wird, aufweisend für ein Legierungselement, dessen Gewichtsanteil größer als 0,5 % ist, oder für die Summe zweier Legierungselemente, deren Gewichtsanteil jeweils größer als 0,5 % ist, ein Dispersionskriterium von weniger als 3,3, vorzugsweise weniger als 3, weiter bevorzugt weniger als 2,5, besser noch weniger als 2 und in bevorzugter Weise weniger als 1,5, wobei das Dispersionskriterium nach den folgenden Ausdrücken definiert ist :

$$\varepsilon = \Delta C_{ZA} / \Delta C_{ZR} \quad (6)$$

$$\Delta C_{ZA} = \max (C_{ZA}) - \min (C_{ZA}) \quad (4),$$

$$\Delta C_{ZR} = \max (C_{ZR}) - \min (C_{ZR}) \quad (5),$$

wobei:

- $\max (C_{ZA})$ und $\min (C_{ZA})$ die maximale bzw. minimale Konzentration des betrachteten Elements oder der Summe der beiden betrachteten Elemente bezeichnen, gemessen in einem Analysebereich (ZA), der intermittierende Makroseigerungen aufweist, z.B. zwischen T/2,3 und T/3,3;

- $\max (C_{ZR})$ und $\min (C_{ZR})$ die maximale bzw. minimale Konzentration des betrachteten Elements oder der Summe der beiden betrachteten Elemente bezeichnen, gemessen in einem Referenzbereich (ZR), der als kaum beeinträchtigt von intermittierenden Makroseigerungen betrachtet wird, z.B. zwischen T/6 und T/12;

wobei die Konzentrationen an mindestens einem Profil gemessen werden, das in halber Breite in einer vertikalen Ebene L/TC und in der Richtung TC festgelegt ist, wobei das Profil repräsentativ ist für die intermittierenden Makroseigerungen des betrachteten Elements in der Richtung TC.

14. Barren aus Aluminiumlegierung nach Anspruch 13, bei dem ein Spektralintensitätskriterium (ζ) kleiner als 0,01, vorzugsweise kleiner als 0,007 und in bevorzugter Weise kleiner als 0,005 ist, wobei das Spektralintensitätskriterium wie folgt berechnet wird:

- es wird eine maximale Amplitude einer Fourier-Transformation eines Profils bestimmt, das repräsentativ ist für eine intermittierende Makroseigerung eines Elements, dessen Gewichtsanteil größer als 0,5 % ist, oder der Summe zweier Elemente der Legierung, deren Anteil jeweils größer als 0,5 % ist, wobei das Profil in der Richtung TC festgelegt wird, wobei die maximale Amplitude in einem räumlichen Periodenbereich von 8 bis 25 mm bestimmt wird,

- die maximale Amplitude wird durch eine Nennkonzentration C_0 des Elements oder durch die Summe der Nennkonzentrationen der beiden betrachteten Elemente normiert.

Claims

1. Method for casting an aluminium alloy ingot in a sub-

stantially rectangular ingot mould comprising the following steps:

- preparing the aluminium alloy;
- casting the aluminium alloy in the ingot mould, along a vertical casting axis, the alloy being cooled, during the casting, by a runoff of a coolant in contact with the solidified metal;
- during the casting, application of a magnetic field of which the amplitude (B_0) is periodically varied according to a frequency (f), said magnetic field being generated by at least one magnetic field generator arranged at the periphery of the ingot mould, in such a way as to apply a Lorentz force (F) at different points of a liquid portion of the alloy in the process of solidification;
- the magnetic field applied being a traveling magnetic field, propagating along an axis of propagation, in such a way that a maximum amplitude (B_0^{max}) of the magnetic field propagates along said axis of propagation, defining a propagation wavelength (λ), said traveling magnetic field driving a propagation, along said axis of propagation, a Lorentz force of maximum intensity (F_{max});

the method being **characterised in that** a magnetic parameter referred to as a force parameter, governing the Lorentz force of maximum intensity (F_{max}), is variable in a predetermined time interval (Δt), said parameter being:

- said maximum amplitude (B_0^{max}) of the magnetic field;
- and/or said frequency (f) of the magnetic field;
- and/or the propagation wavelength (λ) of the magnetic field;

in such a way as to obtain a modulation, in said time interval, of said Lorentz force of maximum intensity (F_{max}) propagating along the axis of propagation.

2. Method according to claim 1, wherein the section of the ingot mould, in a horizontal plane, defines a thickness (e) and a length (ℓ), the thickness being less than or equal to the length, the thickness being greater than 300 mm and preferably at least 400 mm.
3. Method according to any of the preceding claims, wherein the frequency of the magnetic field is less than 5 Hz, or 2 Hz or 1 Hz.
4. Method according to any of the preceding claims wherein, the Lorentz force of maximum intensity (F_{max}), propagating along the axis of propagation, varies by at least 30 N.m^{-3} in a time interval (Δt) be-

tween 20 seconds and 10 minutes.

5. Method according to any of the preceding claims wherein, the magnetic field is such that the absolute value of the variation of the density of the maximum Lorentz force is greater than or equal to $0.05 \text{ N.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$ during said time interval (Δt).
6. Method according to any of the preceding claims, wherein the axis of propagation of the maximum amplitude of the magnetic field belongs to a plane parallel to the direction of casting.
7. Method according to any of the preceding claims, wherein during the casting, the variation in the force parameter is periodical, the period being between 20s and 20 minutes, or between 1 minute and 15 minutes, or between 2 minutes and 10 minutes.
8. Method according to any of the preceding claims, wherein the generators are electromagnetic inducers, each electromagnetic inducer having a current flowing through it referred to as induction current, the method comprising, during said time interval:
 - a variation in the intensity of the induction current;
 - and/or a variation of a frequency of the induction current;
 - and/or a variation of a distance between an electromagnetic inducer and the ingot mould.
9. Method according to claim 8, comprising a variation in the intensity or in the frequency of the induction current flowing through an inducer, the method comprising:
 - a prior step of defining at least one critical value of the intensity and of the frequency of the induction current generating, on a free surface (1_{sup}) of the aluminium alloy flowing in the ingot mould, a resonant wave;
 - a determination of a range of variation in the intensity or in the frequency of the induction current according to said critical value defined beforehand.
10. Method according to claim 9 comprising, during said prior step, a definition of a plurality of critical values of the intensity and of the frequency of the induction current, in such a way as to define a resonance curve (R), representing the values of intensity and of frequency generating a resonance of said free surface, the method comprising a determination of a range of variation in the intensity or in the frequency of the induction current in a range delimited by said resonance curve.

11. Method according to any of claims 1 to 7, wherein at least one generator is a permanent magnet, the method comprising:

- a variation in a distance between the permanent magnet and the ingot mould;
- and/or a rotation of the permanent magnet, and a variation in the rotation speed of the magnet;
- and/or a rotation of two permanent magnets.

12. Method according to any of the preceding claims, wherein the aluminium alloy is chosen from alloys of types 2XXX, 5XXX, 6XXX or 7XXX and wherein the thickness is at least 400 mm or 450 mm.

13. Aluminium alloy ingot, obtained by the method object of any of claims 1 to 12 having, for an element of the alloy, of which the content by weight is greater than 0.5%, or for the sum of two elements of the alloy of which the individual content by weight is greater than 0.5%, a dispersion criterion less than 3.3, preferably less than 3, more advantageously less than 2.5, even more advantageously less than 2 and preferably less than 1.5, the dispersion criterion being defined according to the following expressions:

$$\varepsilon = \Delta C_{ZA} / \Delta C_{ZR} \quad (6)$$

$$\Delta C_{ZA} = \max (C_{ZA}) - \min (C_{ZA}) \quad (4),$$

$$\Delta C_{ZR} = \max (C_{ZR}) - \min (C_{ZR}) \quad (5),$$

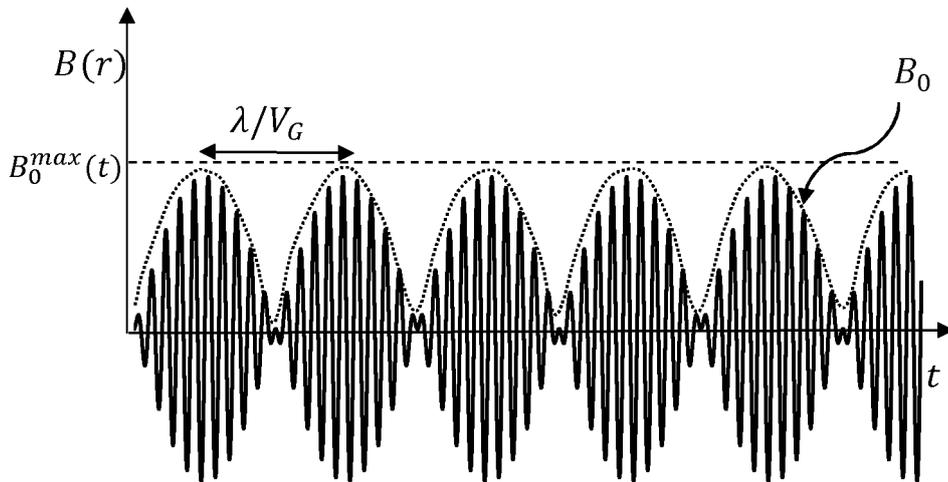
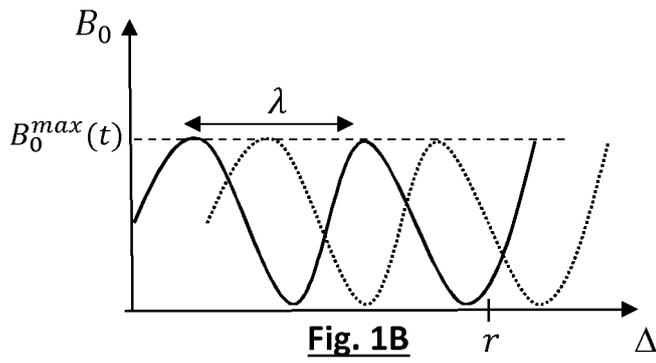
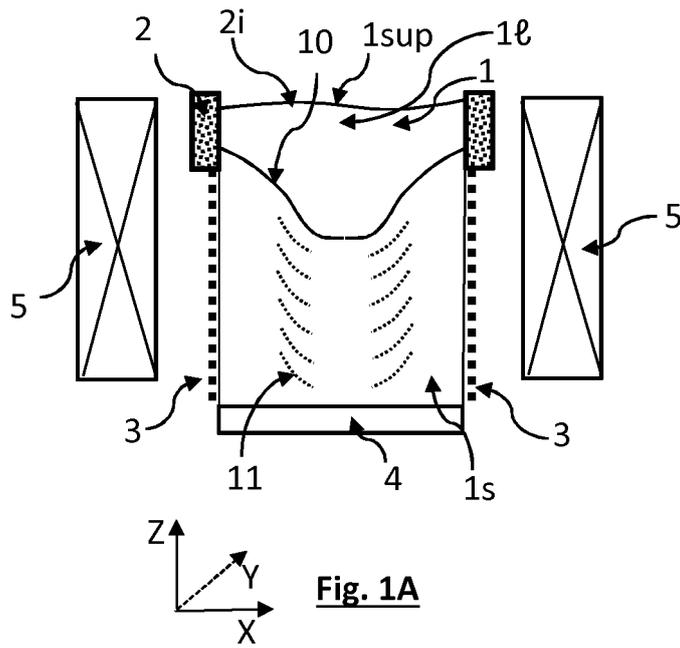
where:

- $\max (C_{ZA})$ and $\min (C_{ZA})$ respectively designate the maximum and minimum concentrations of the element considered or of the sum of the two elements considered measured in a zone of analysis (ZA), having intermittent macrosegregations, for example between T/2.3 and T/3.3;
- $\max (C_{ZR})$ and $\min (C_{ZR})$ respectively designate the maximum and minimum concentrations of the element considered or of the sum of the two elements considered measured in a reference zone (ZR), considered as little affected by the intermittent macrosegregations, for example between T/6 and T/12;

said concentrations being measured on at least one profile established at mid-width in a vertical plane L/TC and according to the direction TC, said profile being representative of said intermittent macrosegregations of the element considered according to the direction TC.

14. Aluminium alloy ingot, according to claim 13 of which a spectral intensity criterion (ζ) is less than 0.01, preferably less than 0.007 and preferably less than 0.005, said spectral intensity criterion being calculated by:

- Determining a maximum amplitude of a Fourier transform of a profile representative of an intermittent macrosegregation of an element of which the content by weight is greater than 0.5% or the sum of two elements of the alloy of which the individual content is greater than 0.5%, the profile being established according to said direction TC, said maximum amplitude being determined in a range of spatial periods between 8 and 25 mm,
- standardising said maximum amplitude by a nominal concentration C_0 of said element or by the sum of the nominal concentrations of the two elements considered.



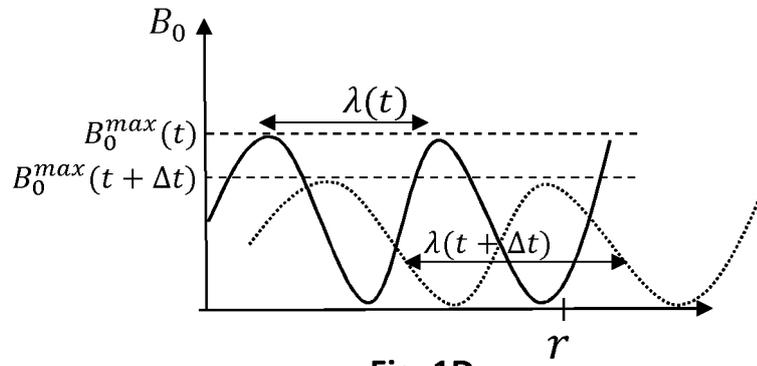


Fig. 1D

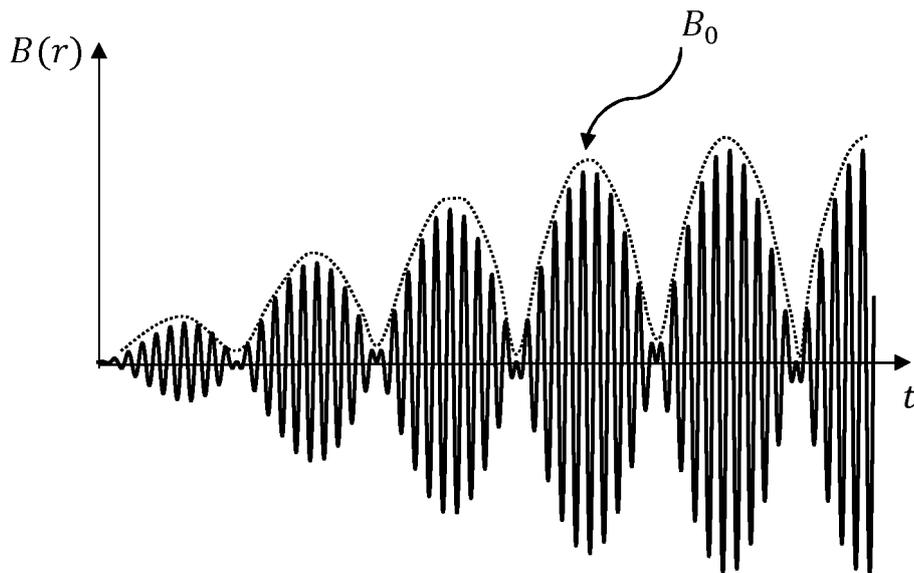


Fig. 1E

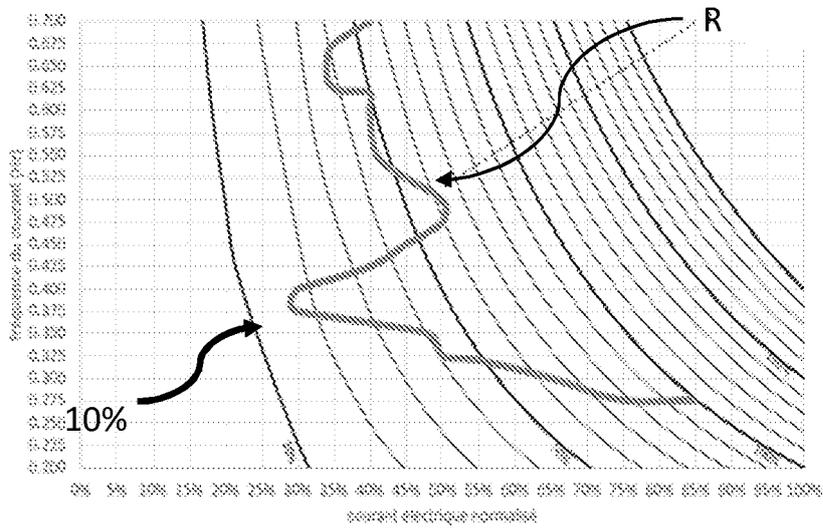


Fig. 2

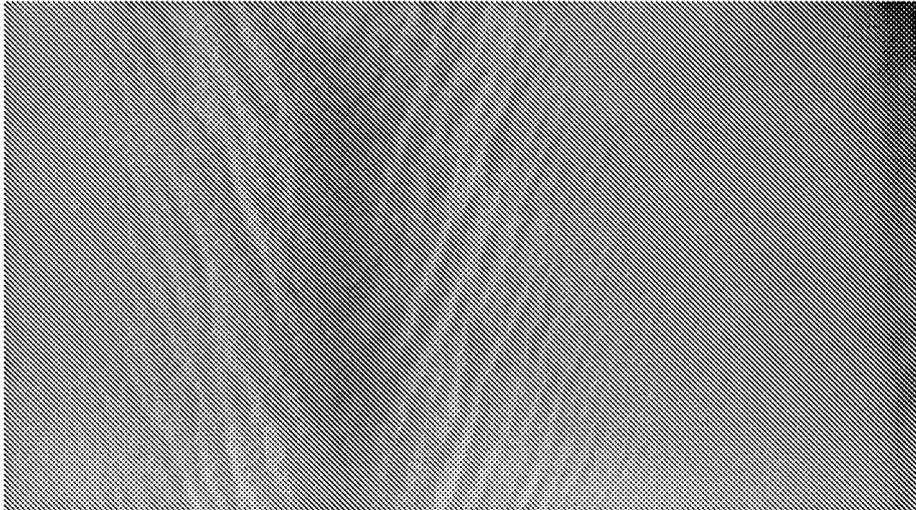


Fig. 3

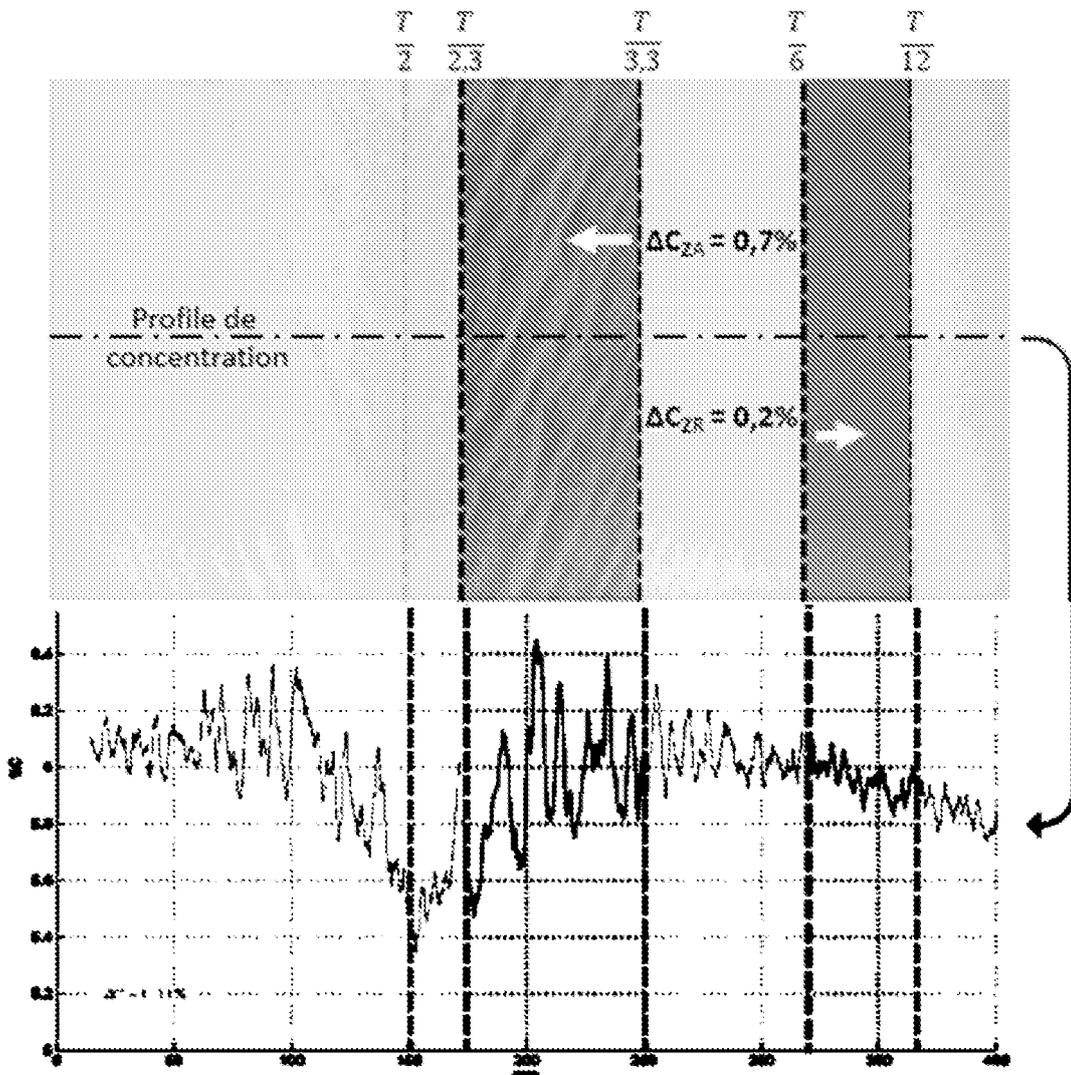


Fig. 4

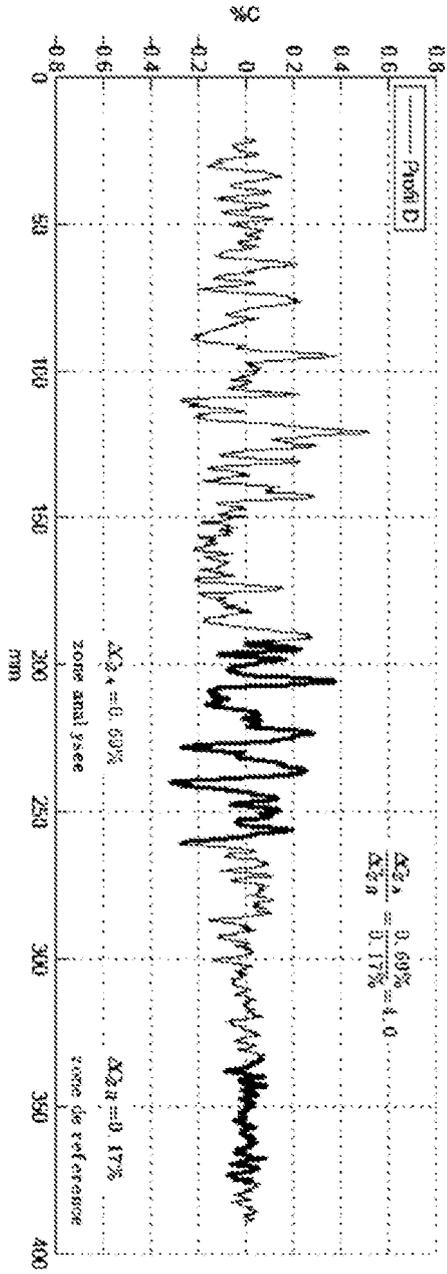


Fig 5B

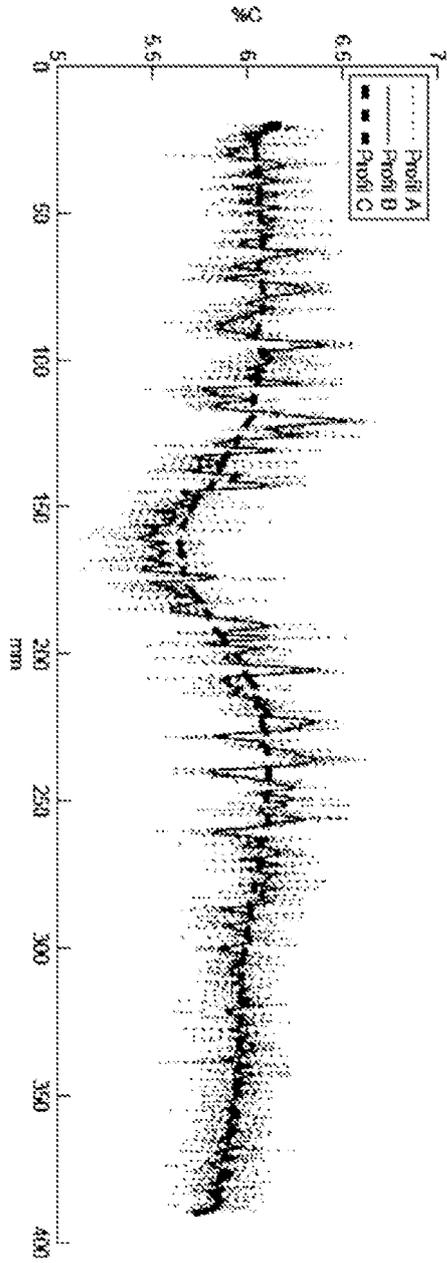
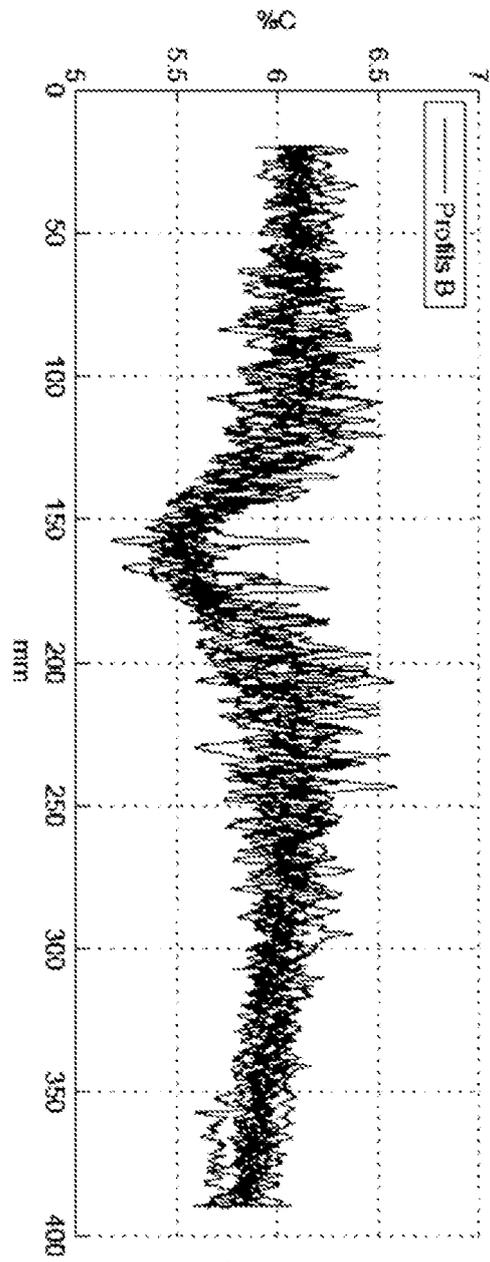
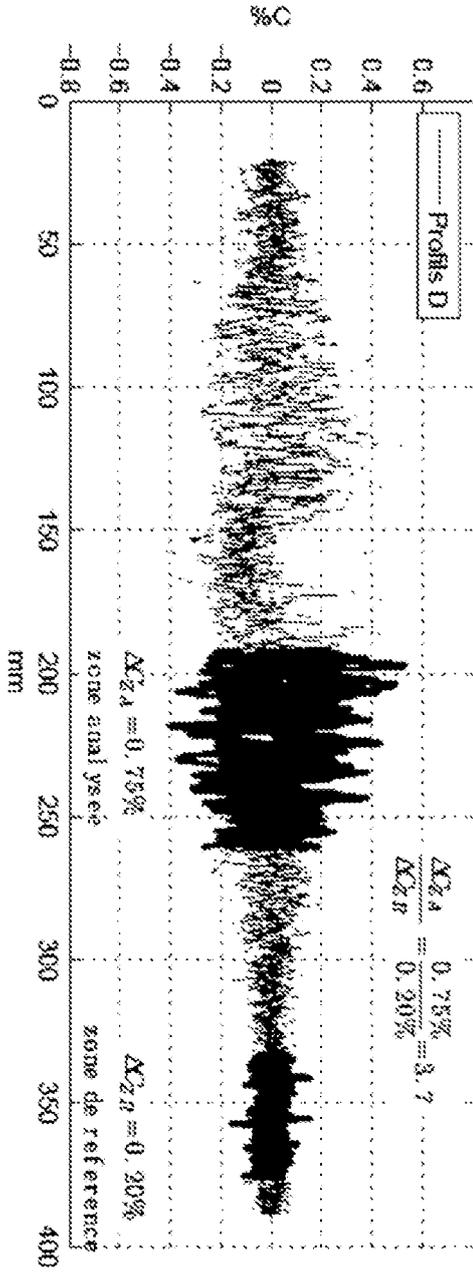


Fig 5A



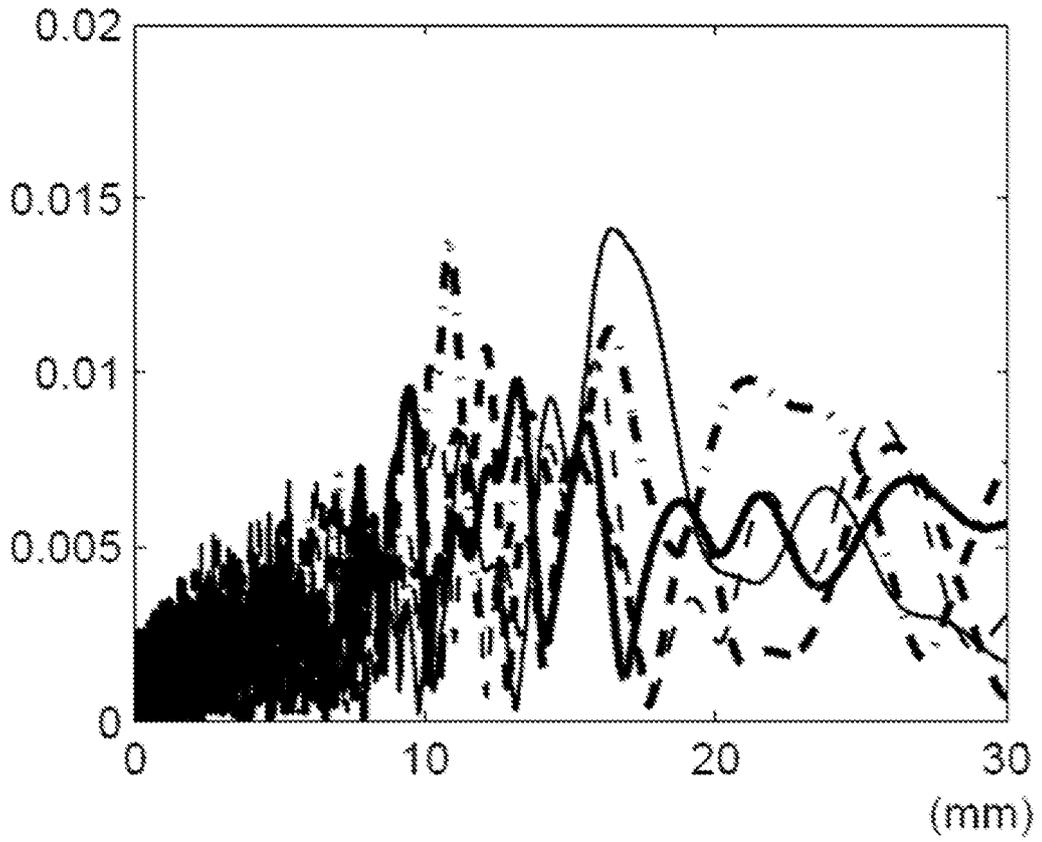


Fig. 7

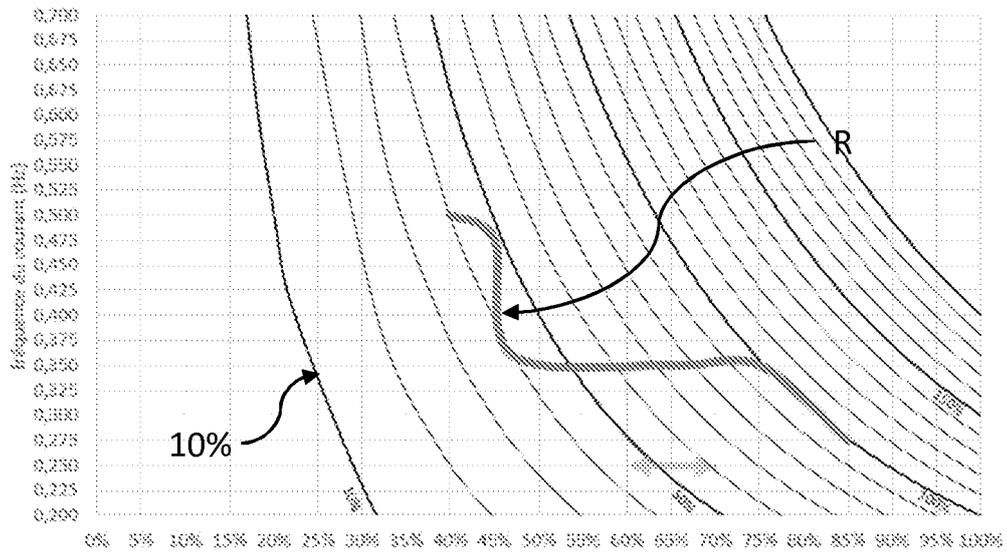


Fig. 8

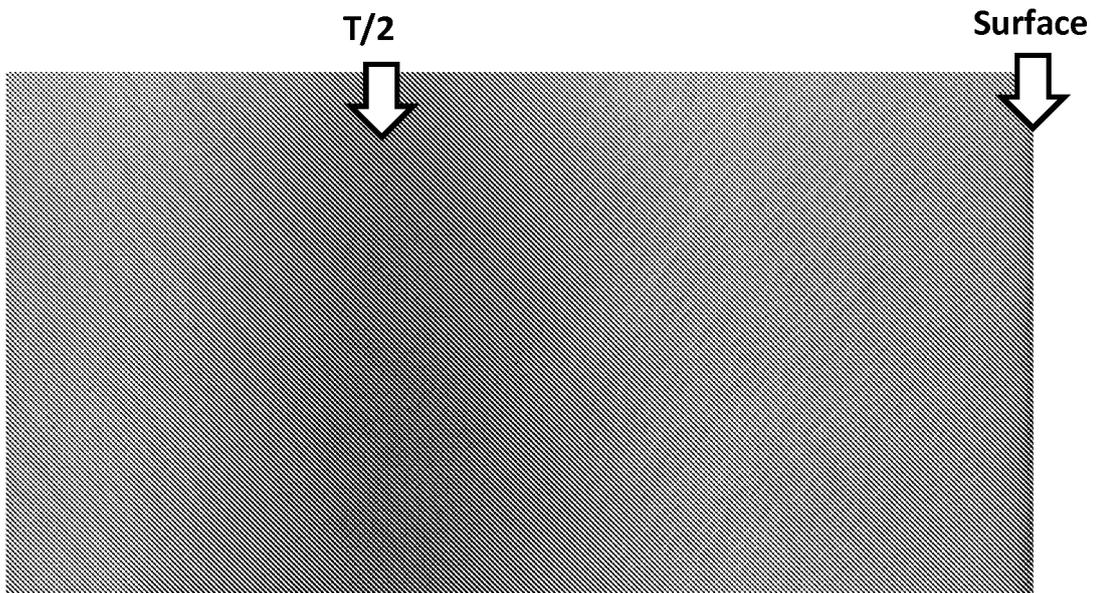


Fig. 9

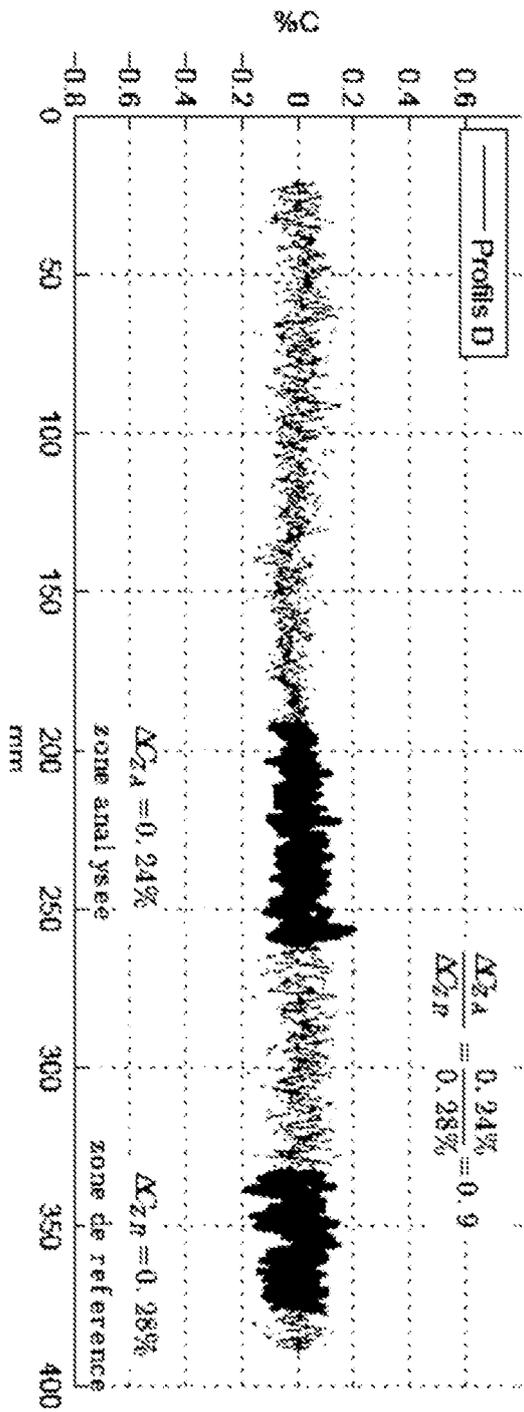


Fig. 10B

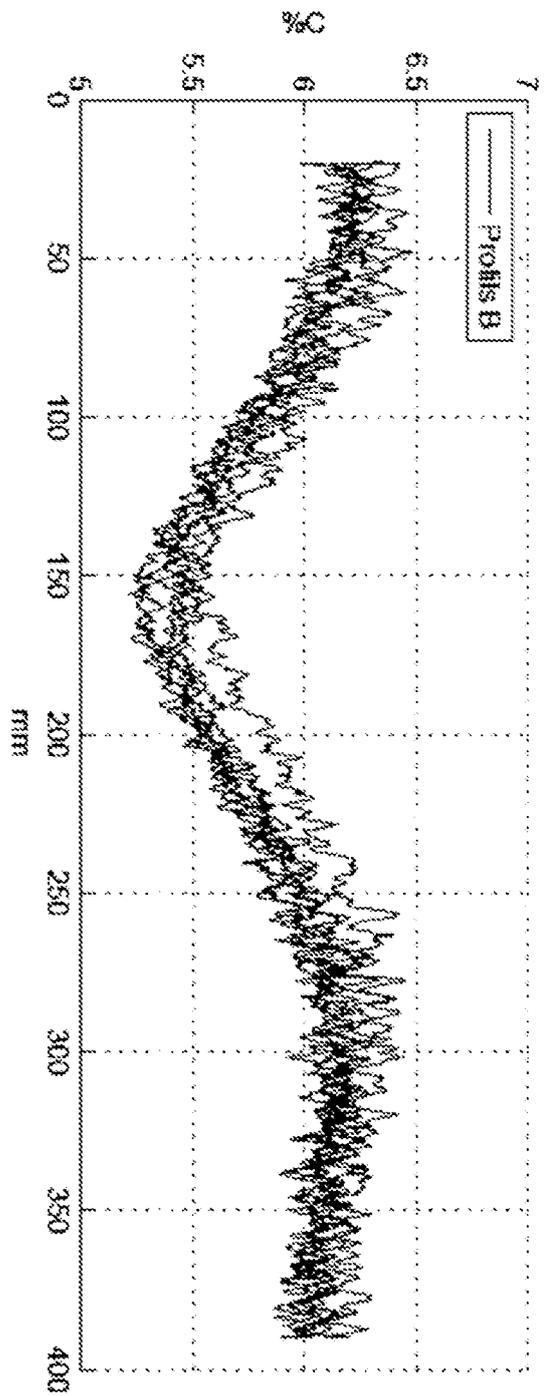


Fig. 10A

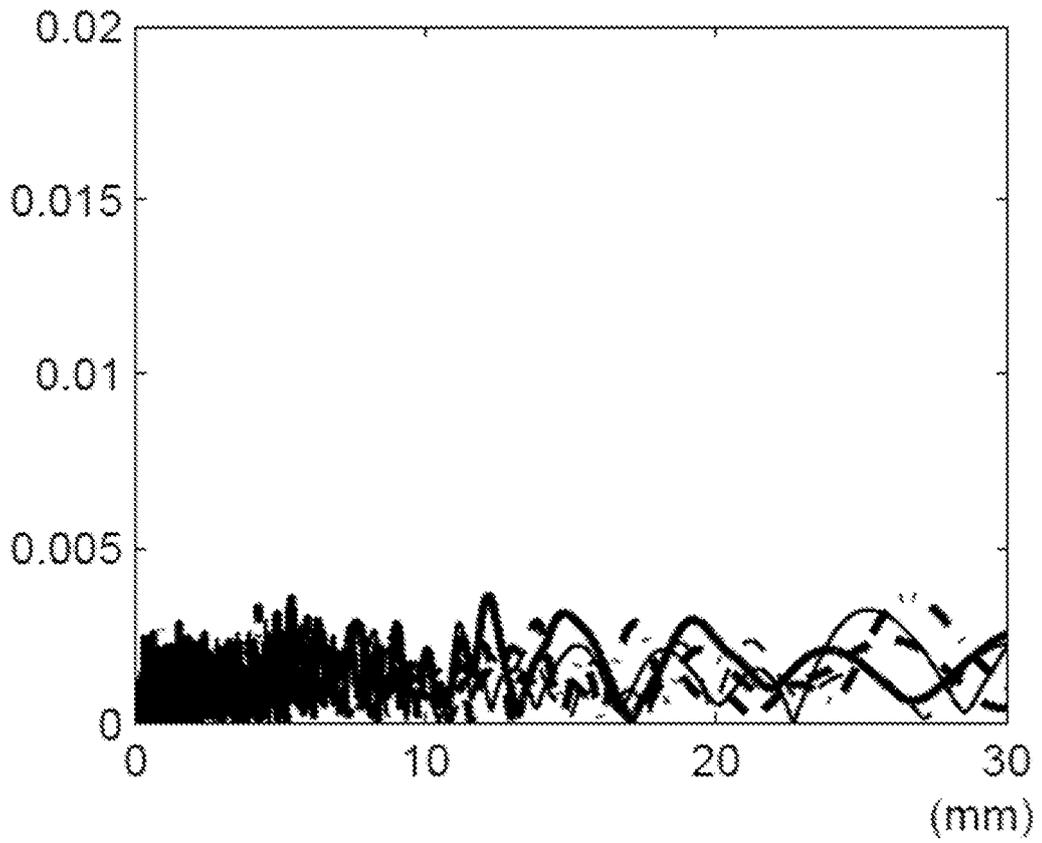


Fig. 11

Fig. 12

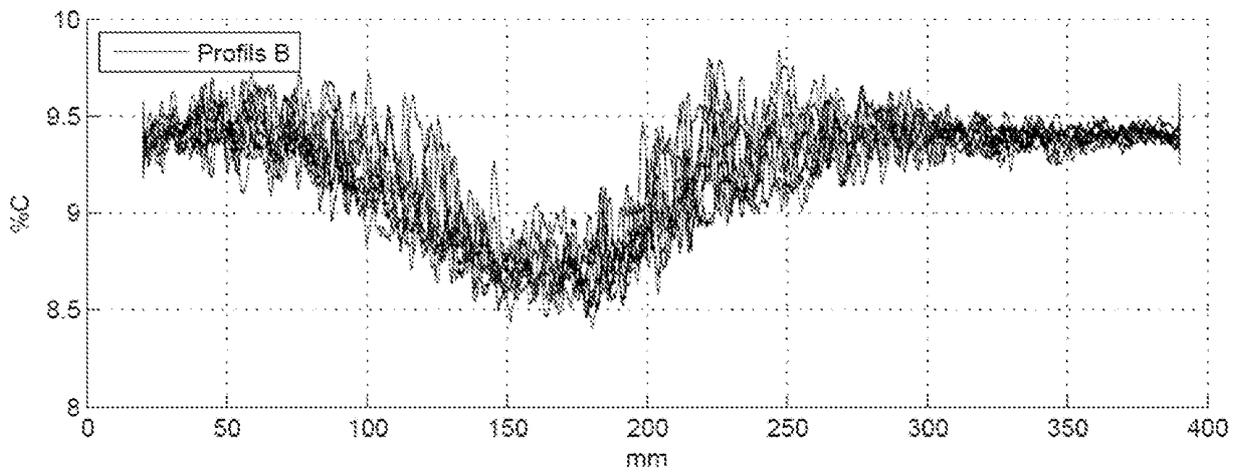
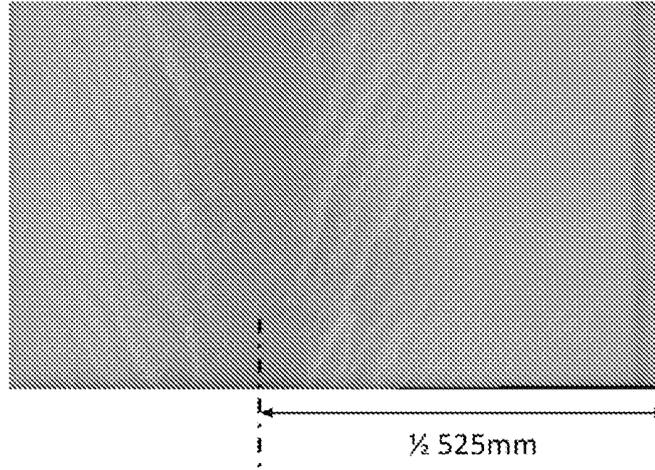


Fig. 13a

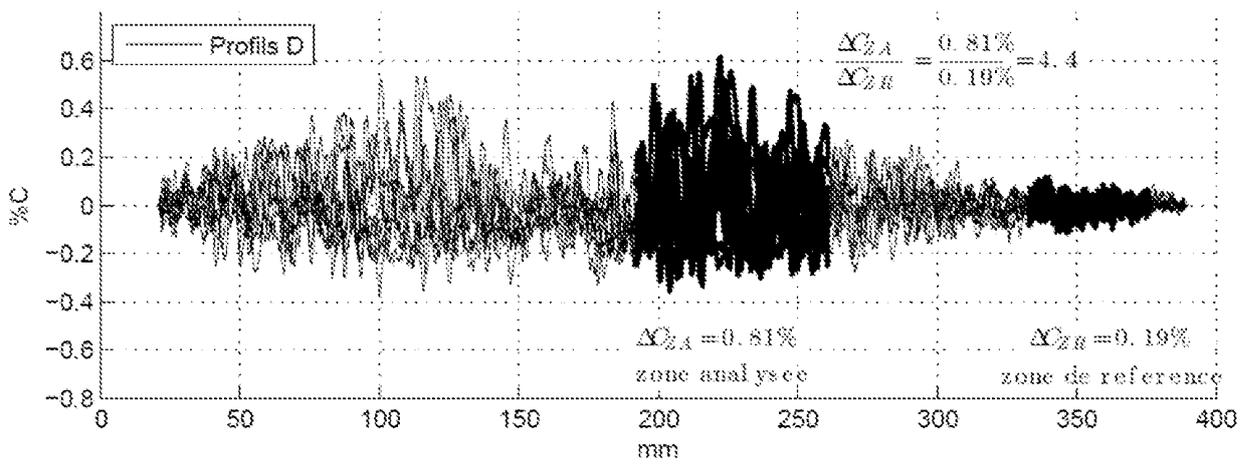


Fig. 13b

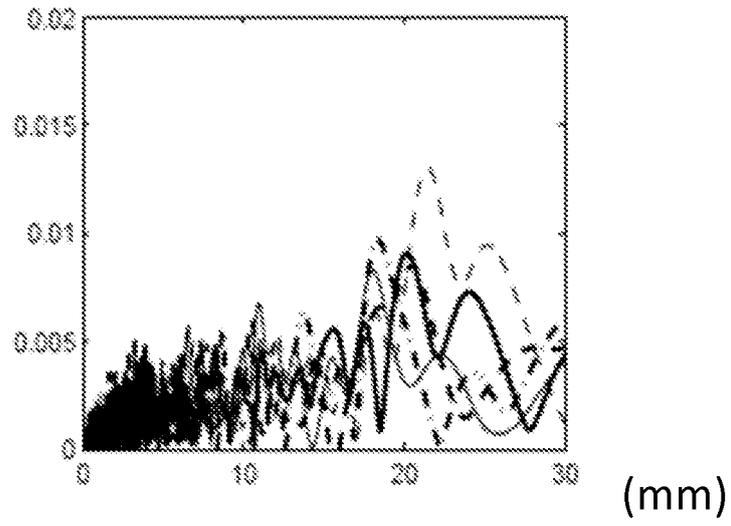


Fig. 14

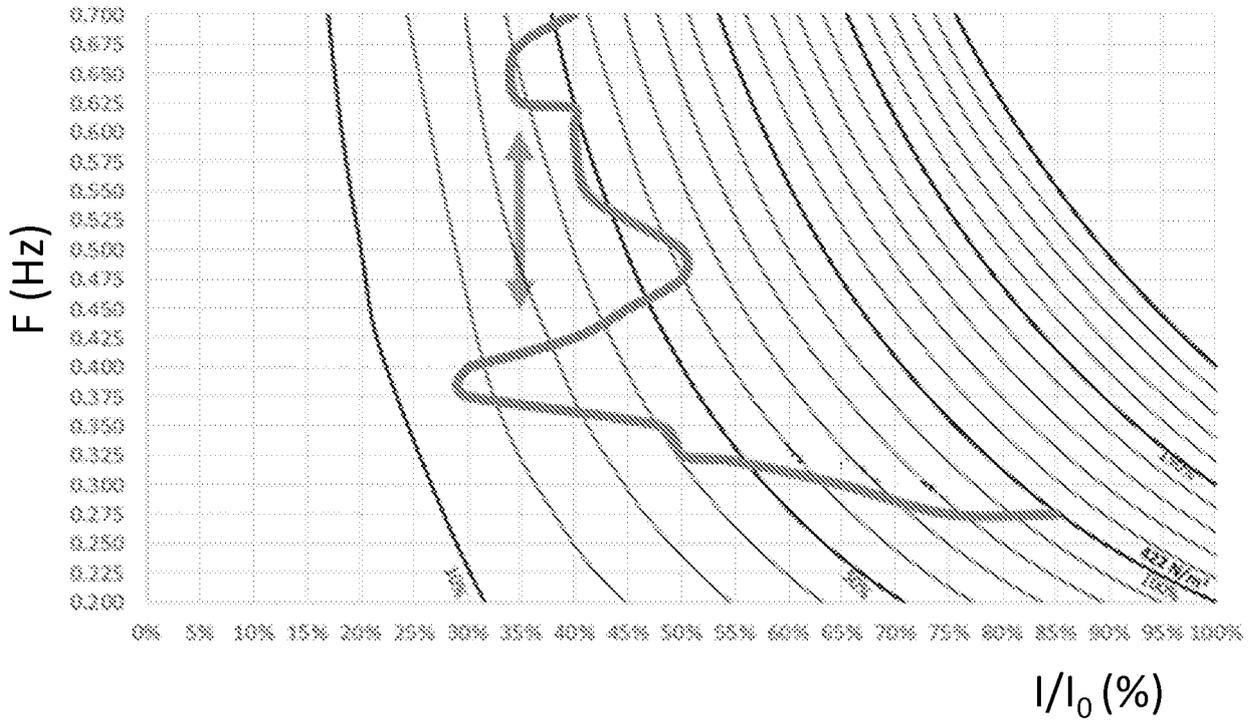


Fig. 15

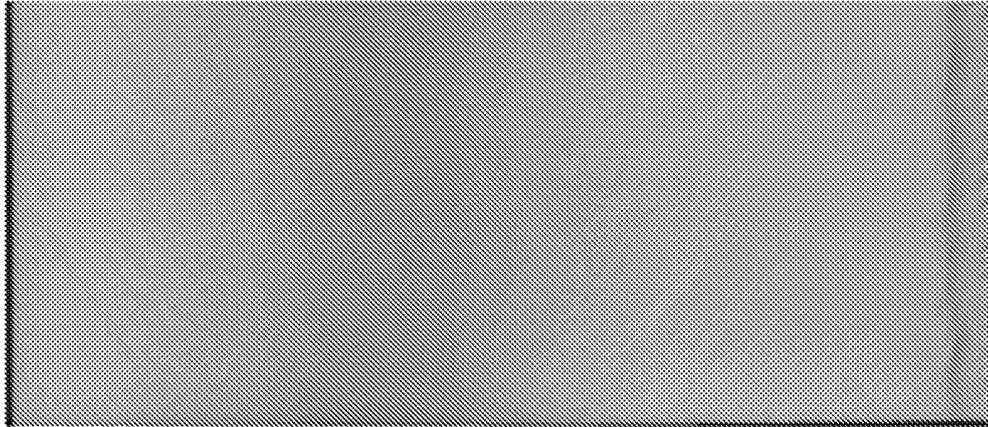


Fig. 16

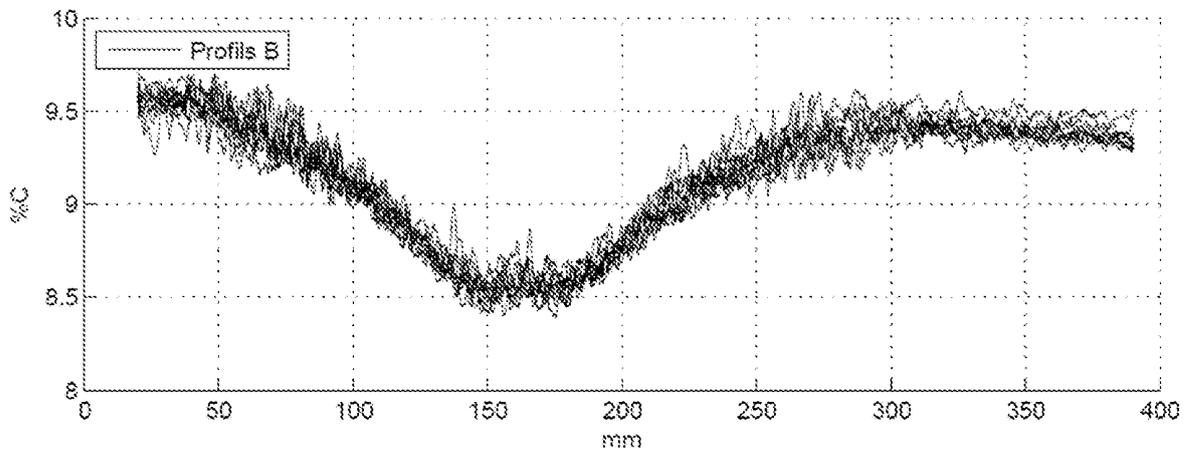


Fig. 17a

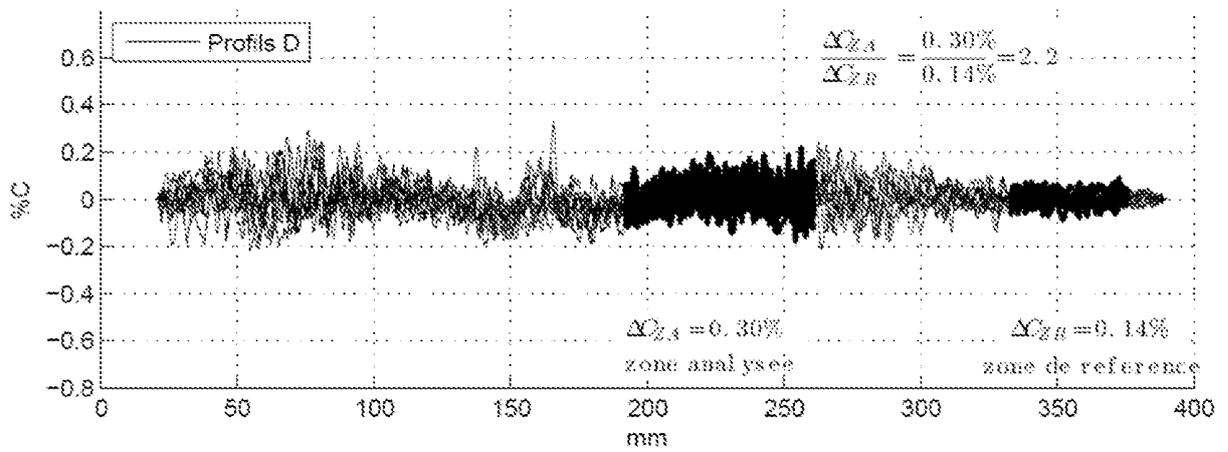


Fig. 17b

Fig. 18

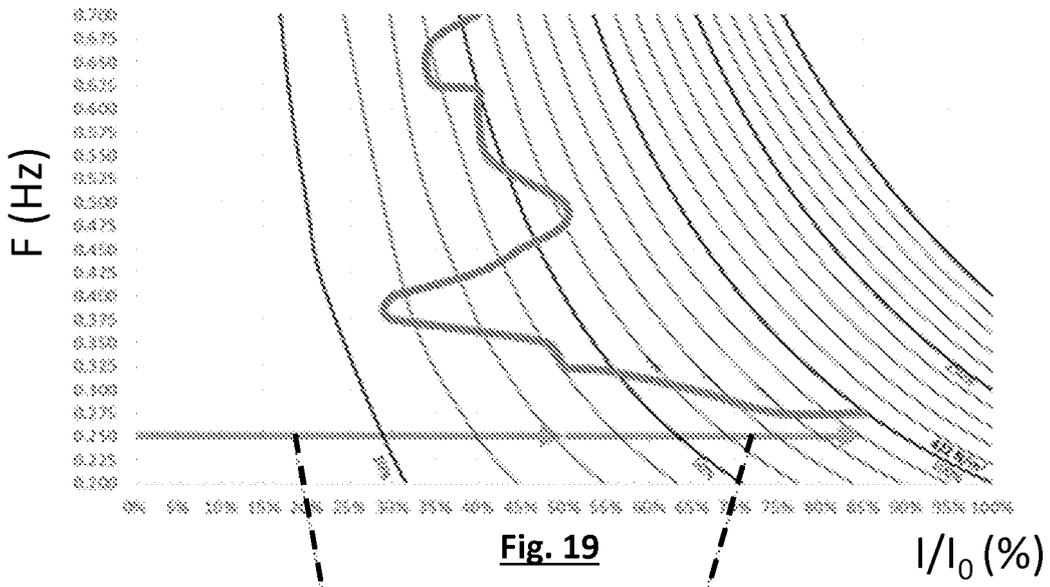
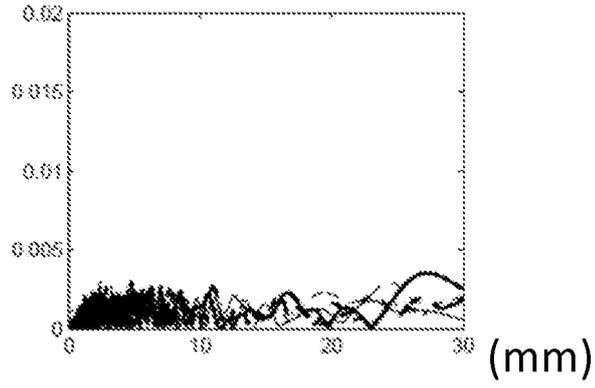


Fig. 19

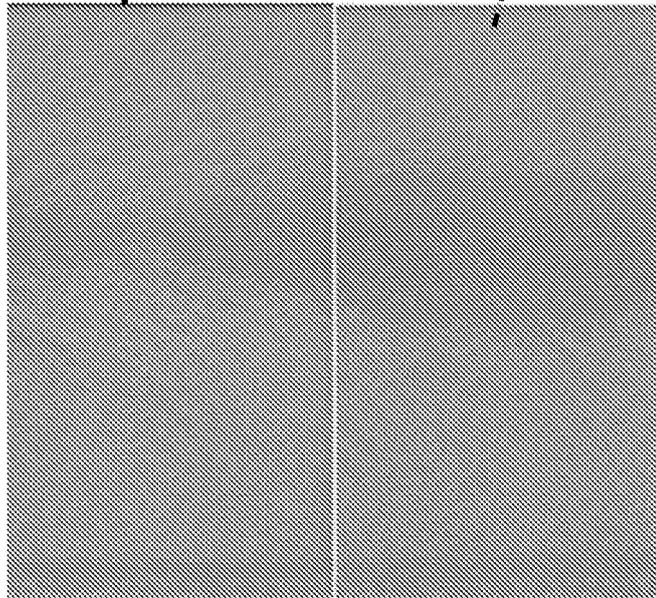


Fig. 20a

Fig. 21a

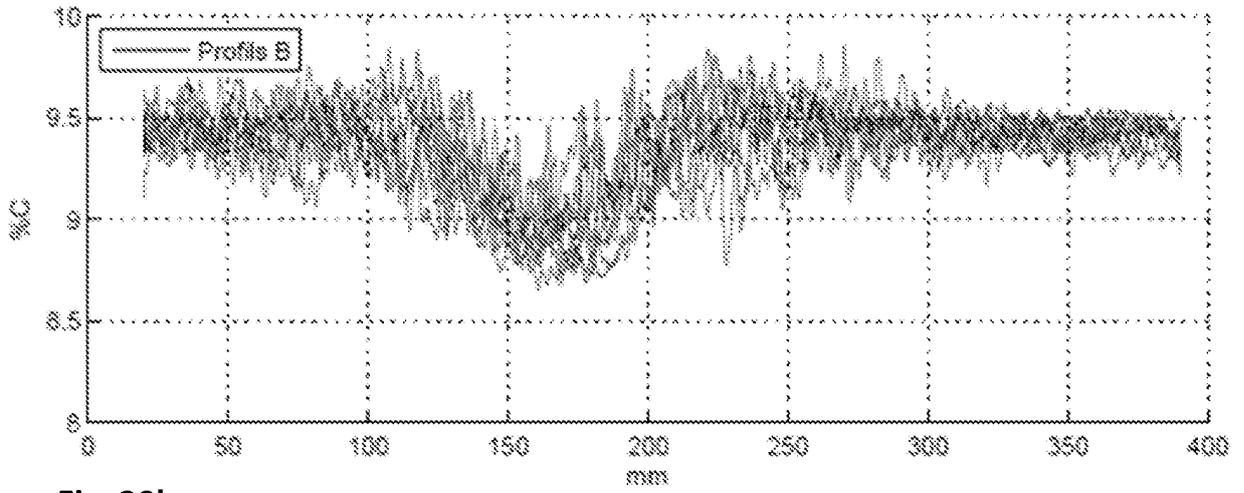


Fig. 20b

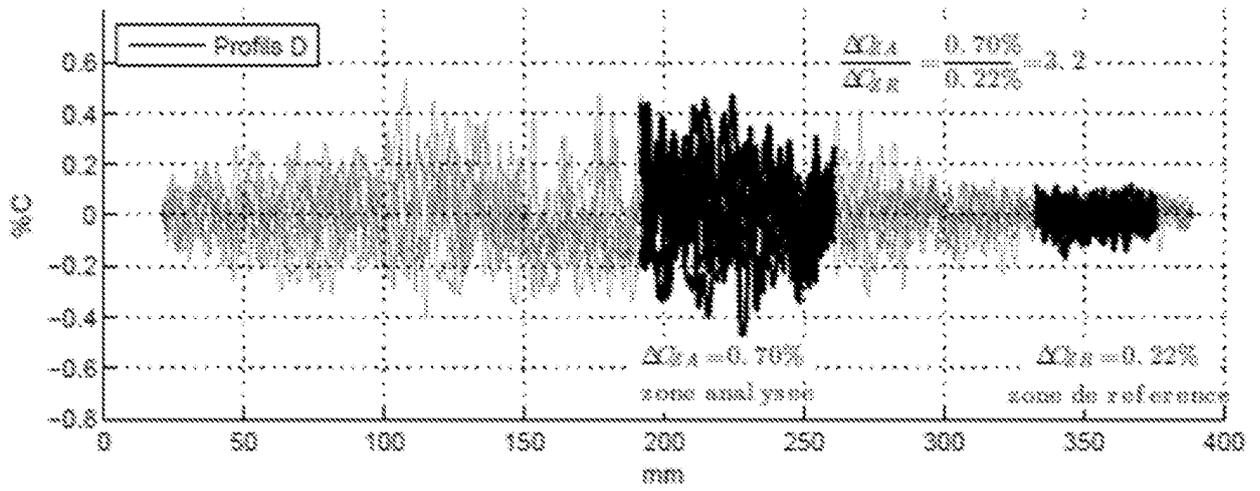
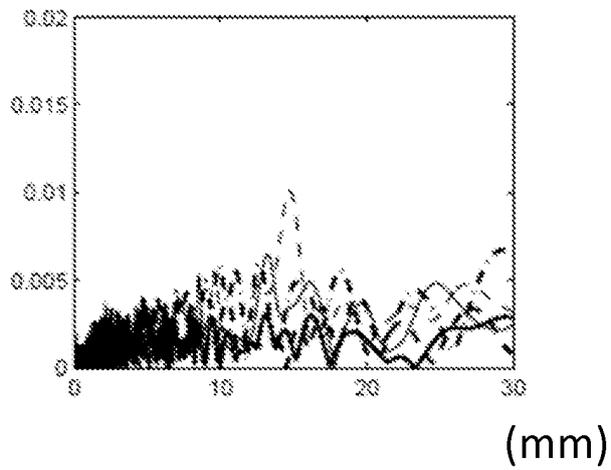


Fig. 20c

Fig. 20d



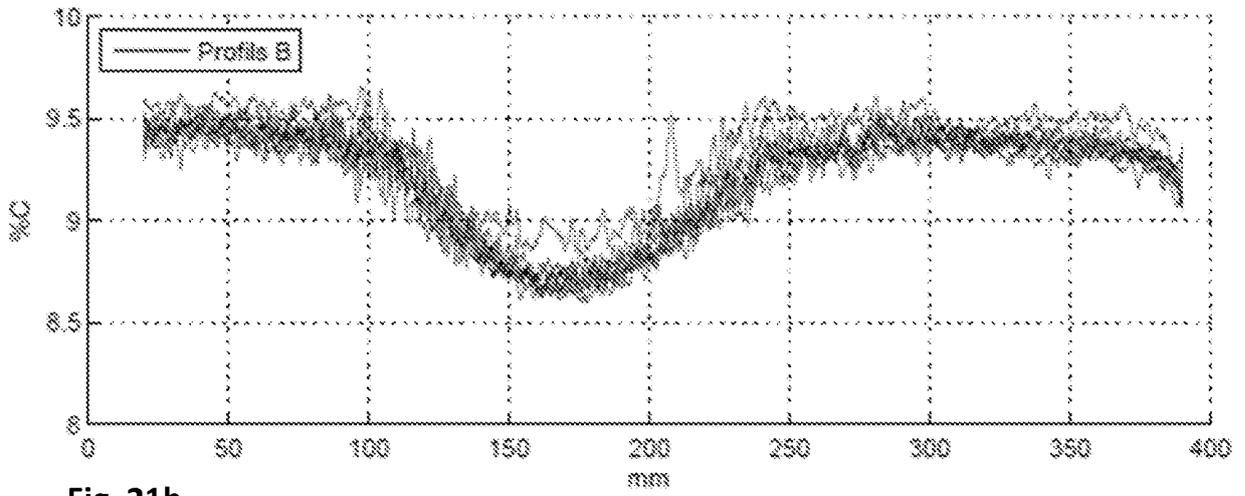


Fig. 21b

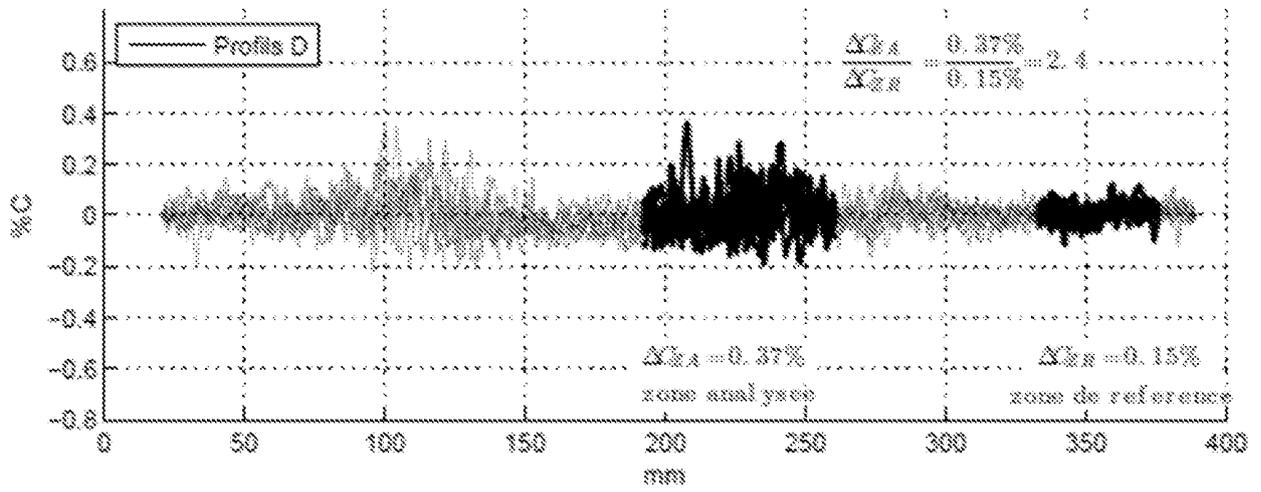
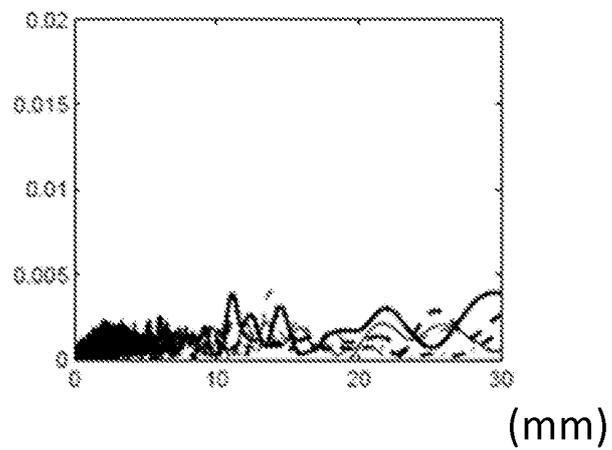


Fig. 21c

Fig. 21d



RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 5375647 A [0009]
- FR 2530510 [0010]
- EP 2682201 A [0012]
- WO 2014155357 A [0013] [0045]
- WO 2009018810 A [0014]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **JOHN WILEY et al.** Direct-Chill Casting of light alloys. Septembre 2013, 158-172 [0003]
- **R.C DORWARD et al.** Banded segregation patterns in DC cast AlZnMgCu alloy ingots and their effect on plate properties. *Aluminium*, 1996, vol. 72 (4), 251-259 [0008]
- **B. ZHANG et al.** Effect of low-frequency magnetic field on macrosegregation of continuous casting aluminum alloys. *Materials Letters*, 2003, vol. 57, 1707-1711 [0011]