

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

11 N° de publication :

2 954 660

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

21 N° d'enregistrement national :

09 59179

51 Int Cl<sup>8</sup> : H 05 B 6/06 (2006.01)

12

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 18.12.09.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 24.06.11 Bulletin 11/25.

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

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : EFD INDUCTION SA Société anonyme — FR.

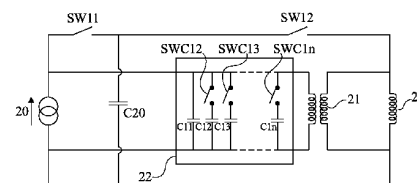
72 Inventeur(s) : LECOMTE GUILLAUME.

73 Titulaire(s) : EFD INDUCTION SA Société anonyme.

74 Mandataire(s) : CABINET BEAUMONT.

54 FOUR A INDUCTION DE FUSION/BRASSAGE.

57 L'invention concerne un four à induction de fusion et de brassage d'un matériau, entouré d'un unique enroulement inducteur (2) alimenté par un unique générateur à fréquence variable (20) associé à des moyens de commande de régulation selon un abaque déterminé au préalable fixant, pour ledit four et son environnement, des valeurs de fréquence et de puissance pour maintenir une température choisie en conservant une vitesse de brassage choisie dans le matériau.



FR 2 954 660 - A1



## FOUR À INDUCTION DE FUSION/BRASSAGE

### Domaine de l'invention

La présente invention concerne l'utilisation d'un four à induction pour mettre en fusion et maintenir à température constante un matériau tout en assurant une vitesse de brassage déterminée dans le matériau en fusion. La présente invention s'applique plus particulièrement à un traitement de silicium métallurgique pour en améliorer la qualité et en réduire la quantité d'impuretés afin d'obtenir par exemple un silicium de qualité photovoltaïque (Solar Grade ou SOG en anglais).

### 10 Exposé de l'art antérieur

La présente invention et l'état de la technique seront décrits plus particulièrement en relation avec le silicium métallurgique, mais on comprendra qu'elle s'applique à de nombreux autres matériaux, par exemple des métaux tels que le zinc ou des alliages métalliques tels que l'acier.

La figure 1 représente de façon extrêmement simplifiée et schématique un four de fusion et de brassage de silicium. Un creuset 1 en matériau réfractaire est entouré d'un enroulement inducteur 2 et contient une charge de silicium métallurgique 4. Ce silicium métallurgique contient initialement un pourcentage non négligeable d'impuretés telles que le fer, le titane, le bore, le phosphore, et autres, dont il faut réduire la teneur.

B9939

2

La représentation de la figure 1 est extrêmement schématique et divers moyens sont prévus pour assurer le fonctionnement du système, par exemple pour contrôler l'atmosphère ambiante et pour assurer l'introduction du silicium dans le creuset et sa  
5 coulée en fin d'opération. On pourra aussi prévoir des moyens de traitement et de chauffage supplémentaires, par exemple des moyens pour assurer un gradient de température vertical dans le creuset tels qu'une flamme ou un chauffage résistif ou encore un chauffage inductif, et des moyens de traitement de la surface  
10 supérieure du bain tels qu'un laitier ou une flamme (par exemple flamme de type plasma).

Dans de tels fours, il est souvent souhaitable de créer un brassage du bain, de sorte que le milieu du bain reste homogène et que les échanges aux interfaces soient favorisés. On  
15 a représenté schématiquement en figure 1 des vortex 8 correspondant à ce mouvement de brassage. D'autres types de mouvements et de répartition de vortex peuvent exister.

De plus dans de nombreuses installations, il est souhaitable que le bain soit maintenu à une température  
20 optimale, par exemple à une valeur fixe comprise entre 1450 et 1600°C, et que le brassage soit régulier, c'est-à-dire notamment que la vitesse de déplacement  $v$  du bain aux interfaces de celui-ci soit contrôlée et maintenue à une valeur déterminée.

De façon classique, les opérations de brassage et de  
25 maintien en température du bain sont assurées par des champs inductifs distincts. Couramment, le chauffage est assuré par un champ inductif à moyenne fréquence, par exemple à une fréquence voisine de 1000 hertz, et le brassage est assuré par un champ inductif à basse fréquence, par exemple à une fréquence voisine  
30 de 50 hertz. La puissance du générateur basse fréquence est maintenue constante pour assurer une vitesse de brassage constante. La puissance du générateur moyenne fréquence est asservie pour maintenir une température constante, étant entendu que le champ moyenne fréquence n'a quasiment pas d'influence sur  
35 le brassage.

B9939

3

Divers types d'inducteurs et de générateurs ont été prévus pour assurer ces deux fonctions de chauffage et de brassage. Dans certaines installations, on prévoit deux enroulements distincts, l'un dédié au brassage et l'autre dédié au chauffage. On a cherché à utiliser un seul enroulement pour assurer ces deux fonctions, ce qui a amené à utiliser des installations électriques telles que celles utilisées en figure 2 et en figure 3.

On notera au préalable les ordres de grandeur des puissances à fournir par les installations électriques. Couramment, un creuset contenant une charge de silicium de 150 à 200 kg et devant être maintenu à une température choisie comprise entre 1450 et 1600°C présentera des pertes de 50 à 100 kilowatts. Si une source externe variable communique au four une puissance thermique de l'ordre de 20 kilowatts, la puissance complémentaire doit être fournie par l'inducteur, c'est-à-dire que l'énergie inductive fournie au four doit être de l'ordre de 30 à 80 kilowatts. Si les générateurs ont une tension de fonctionnement de l'ordre de 500 volts, cela implique, pour fournir par exemple 50 kilowatts à 50 hertz, que le courant délivré par le générateur est de 100 ampères moyennant le facteur de puissance ( $\cos\phi$ ) et donc un courant de l'ordre de 3000 ampères dans un inducteur avec 14 spires sur une charge de 80kg de silicium (sans tenir compte du fait que l'intégralité de la puissance fournie par les inducteurs n'est pas transformée en puissance thermique dans la charge). On notera également qu'étant donné les faibles valeurs des fréquences en cause et surtout en ce qui concerne le 50 hertz, les dimensions des composants électriques (capacités et inductances) doivent être très importantes.

Dans le schéma de la figure 2, pour alimenter l'inducteur 2, on prévoit un générateur basse fréquence (BF) (10) (10 à environ 100 hertz) dont la fréquence de fonctionnement est fixée par une capacité C1 et l'inductance de l'inducteur 2, et un générateur moyenne fréquence (MF) 12 dont la fréquence de

B9939

4

fonctionnement est fixée par un condensateur C2 et l'inductance de l'inducteur 2.

Toutefois, quand le système fonctionne, il faut éviter l'influence de chacun des oscillateurs sur l'autre et pour cela, on doit prévoir un filtre moyenne fréquence 14 du côté du générateur BF et un filtre basse fréquence 16 du côté du générateur MF. Le filtre moyenne fréquence 14 contient essentiellement une inductance de blocage série pour bloquer la moyenne fréquence (1000 Hz). Une telle inductance de blocage doit avoir des dimensions très importantes. En pratique, elle pèse 2 à 3 tonnes. De même, le filtre basse fréquence 16 devra comprendre notamment une capacité série de forte valeur et en pratique pèse environ 40 kg. Le prix de l'ensemble des filtres est élevé et constitue environ 20 % du prix de l'ensemble de l'installation électrique. De plus, bien entendu, les valeurs des composants contenus dans les filtres doivent être prises en compte pour déterminer le fonctionnement des générateurs.

La figure 3 représente un circuit plus simple pour assurer la même fonction. On y retrouve l'inducteur 2, le générateur BF 10, le générateur MF 12, et les capacités C1 et C2. On a en outre représenté un transformateur de couplage 18 côté BF. Comme on l'a indiqué précédemment, un tel circuit ne pourrait pas fonctionner en raison des interactions entre les deux générateurs. Ainsi, on fait fonctionner les générateurs à tour de rôle, ce qui est symbolisé par la présence de deux commutateurs SW1 et SW2 qui connectent alternativement le générateur BF et le générateur MF à l'inducteur 2. En pratique, si on veut assurer un brassage régulier, il faut que la basse fréquence soit fournie à l'inducteur pendant la plus grande partie d'un cycle de fonctionnement. Ainsi, par exemple, le commutateur SW2 de mise en route du générateur MF n'est fermé qu'environ 10 % du temps. Il en résulte que le générateur MF, pour assurer sa fonction de chauffage, doit être surdimensionné d'un facteur 10 par rapport au générateur de la figure 2. Ceci constitue bien

B9939

5

entendu également un inconvénient en termes de coût et d'encombrement.

#### Résumé

5 Ainsi, selon un mode de réalisation de la présente invention, on cherche à remédier à un ou plusieurs des inconvénients des fours à induction de fusion et de brassage mentionnés ci-dessus.

10 Selon un objet plus particulier de la présente invention, on cherche à réaliser un four de fusion et de brassage utilisant un seul inducteur et un seul générateur d'alimentation électrique pour maintenir une vitesse et une température constante malgré des perturbations extérieures, ou faire varier une vitesse à des valeurs précises et voulues tout en conservant une température constante, ou encore faire varier  
15 une température à des valeurs précises et voulues en conservant une vitesse constante, les perturbations extérieures pouvant être des déperditions thermiques, une isolation extérieure plus forte, ou encore des puissances supplémentaires.

20 Selon un autre objet d'un mode de réalisation de la présente invention, on cherche à réaliser un four de fusion et de brassage associé à un système d'alimentation électrique de coût et d'encombrement réduit.

25 Ainsi, un mode de réalisation de la présente invention prévoit un four à induction de fusion et de brassage d'un matériau, entouré d'un unique enroulement inducteur alimenté par un unique générateur à fréquence variable associé à des moyens de commande de régulation selon un abaque déterminé au préalable fixant, pour ledit four et son environnement, des valeurs de fréquence et de puissance pour maintenir une température choisie  
30 en conservant une vitesse de brassage choisie dans le matériau.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, le four à induction est appliqué au traitement de silicium métallurgique.

35 Selon un mode de réalisation de la présente invention, le générateur comprend un ensemble de capacités de réglage de

B9939

6

fréquence commandées pour que, en fonction de la puissance choisie de maintien en température, la relation puissance-fréquence reste dans la relation fixée par ledit abaque.

Selon un mode de réalisation de la présente invention,  
5 le générateur est régulé par modulation de largeur d'impulsions, PWM.

Un mode de réalisation de la présente invention prévoit un procédé de commande d'un four à induction de fusion et de brassage d'un matériau, associé à un inducteur unique,  
10 dans lequel l'inducteur est commandé par un unique générateur à fréquence variable commandé pour que sa puissance et sa fréquence se conforment à une courbe d'un abaque déterminé au préalable.

#### Brève description des dessins

15 Ces objets, caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

la figure 1 décrite précédemment, représente de façon  
20 schématique et simplifiée un four à induction de fusion et de brassage ;

les figures 2 et 3, décrites précédemment, représentent deux exemples de circuits d'alimentation d'un four de fusion et de brassage ;

25 la figure 4 représente un abaque de puissance en fonction de la fréquence ; et

la figure 5 représente un exemple de circuit électrique d'alimentation selon un mode de réalisation de la présente invention.

#### 30 Description détaillée

En se référant à nouveau à la figure 1, on rappellera que l'on cherche à maintenir en température une charge de silicium fondu 4 dans un creuset 1 en conservant une vitesse constante de brassage  $v$  aux interfaces et ceci dans une  
35 installation à un seul enroulement inducteur.

B9939

7

Au lieu de séparer une source de chauffage par induction d'une source de brassage par induction fonctionnant à des fréquences différentes, on propose ici d'utiliser une source unique de chauffage et de brassage. Pour cela, les inventeurs ont étudié les phénomènes en cause et ont découvert que l'on pouvait maintenir une vitesse de brassage constante et une température constante en faisant varier la puissance fournie par un inducteur unique 2 à condition de faire varier simultanément sa fréquence.

La figure 4 illustre, à titre d'exemple, un abaque de la puissance en kilowatts appliquée à un inducteur en fonction de la fréquence. L'abaque est tracé pour une température constante, dans l'exemple donné de 1550°C et pour diverses vitesses de brassage. On constate que, pour maintenir une vitesse de brassage en surface  $v$  déterminée ( $v_1, v_2, v_3$ ), il faut maintenir le point de fonctionnement selon l'une des courbes représentées. Par exemple, on aura une même vitesse de brassage  $v_3$  si la puissance appliquée a une première valeur à une fréquence de 50 Hz ou une valeur sensiblement double à une fréquence de 125 Hz ou une valeur sensiblement triple à une fréquence de 200 Hz.

Ainsi, on peut maintenir une vitesse de brassage constante dans un four à un seul enroulement inducteur tout en faisant varier largement la puissance pour maintenir une température constante à condition de faire varier simultanément la fréquence en respectant la règle fournie par une courbe de l'abaque.

La figure 5 représente un exemple de générateur adapté à fournir une fréquence telle que le point de fonctionnement reste sur une des courbes de l'abaque de la figure 4, fonction de la puissance requise pour rester à température constante et à vitesse de brassage désirée. Le générateur représenté comprend une source de courant 20 couplée par l'intermédiaire d'un transformateur 21 à un inducteur 2. Un réseau de condensateurs 22 est connecté au primaire du transformateur 21. Ce réseau de

condensateurs comprend des condensateurs, C11, C12, C13... C1n en série avec des commutateurs respectifs SWC12, SWC13... SWC1n qui peuvent être sélectivement fermés pour fixer la fréquence d'oscillation du générateur. De façon classique, un asservissement sera prévu pour lier la puissance appliquée à la température de bain. En outre une régulation sera prévue pour, en fonction de la puissance produite par le générateur, ajuster automatiquement la fréquence d'oscillation, par commande de commutation des commutateurs SWC12 à SWC1n.

10 On a représenté en outre en figure 5, un circuit propre à alimenter à forte puissance l'inducteur 2 pendant des phases de montée en température. Alors, des commutateurs SW11 et SW12 sont fermés et l'inducteur 2 est alors placé en parallèle sur un condensateur C20 pour fixer la fréquence à la valeur maximum possible avec le générateur choisi.

15 Les avantages principaux de l'installation décrite ici sont que l'on utilise un seul générateur aussi bien pour le brassage que pour le chauffage pendant la période de maintien en température. De plus, on évite l'utilisation de filtres complexes tels que décrits en relation avec la figure 2.

20 Un autre avantage de l'installation décrite ici est qu'elle utilise une alimentation monophasée, ce qui simplifie beaucoup les circuits électriques par rapport à des installations polyphasées.

25 Bien entendu, le mode de réalisation de la figure 5 ne constitue qu'un exemple de générateur utilisable pour mettre en oeuvre la présente invention. Notamment divers montages série pourront être utilisés. Également, la position relative du transformateur pourra être modifiée.

30 Au lieu de réaliser un réglage par commutation de condensateurs de la façon décrite ci-dessus, on pourra utiliser un réglage par commutation de type PWM (alimentation électrique modulée en largeur d'impulsions).

35 La présente invention s'applique notamment à des installations de "ségrégation" dont le principe est de

B9939

9

solidifier de manière contrôlée le silicium de bas en haut pour obtenir un métal solide le plus purifié possible. La partie liquide reste en surface. Les impuretés ont tendance à être repoussées dans le liquide ce qui engendre un métal solide

5 "purifié". Pour cela, un gradient de température est appliqué entre la surface supérieure et inférieure. La présente invention s'applique également à des installations de "purification" dans lesquelles la surface supérieure d'un bain de silicium métallurgique est traitée par un laitier ou par une flamme

10 plasma.

**REVENDICATIONS**

1. Four à induction de fusion et de brassage d'un matériau, entouré d'un unique enroulement inducteur (2) alimenté par un unique générateur à fréquence variable (20) associé à des moyens de commande de régulation selon un abaque déterminé au préalable fixant, pour le four et son environnement, des valeurs de fréquence et de puissance pour maintenir une température choisie en conservant une vitesse de brassage choisie dans le matériau.  
5
2. Four à induction selon la revendication 1, appliqué au traitement de silicium métallurgique.  
10
3. Four à induction selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le générateur comprend un ensemble de capacités de réglage de fréquence (C11, C12... Cn) commandées pour que, en fonction de la puissance choisie de maintien en température, la relation puissance-fréquence reste dans la relation fixée par ledit abaque.  
15
4. Four à induction selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le générateur est régulé par modulation de largeur d'impulsions, PWM.  
20
5. Procédé de commande d'un four à induction de fusion et de brassage d'un matériau, associé à un inducteur unique, dans lequel l'inducteur est commandé par un unique générateur à fréquence variable commandé pour que sa puissance et sa fréquence se conforment à une courbe d'un abaque déterminé au préalable.  
25

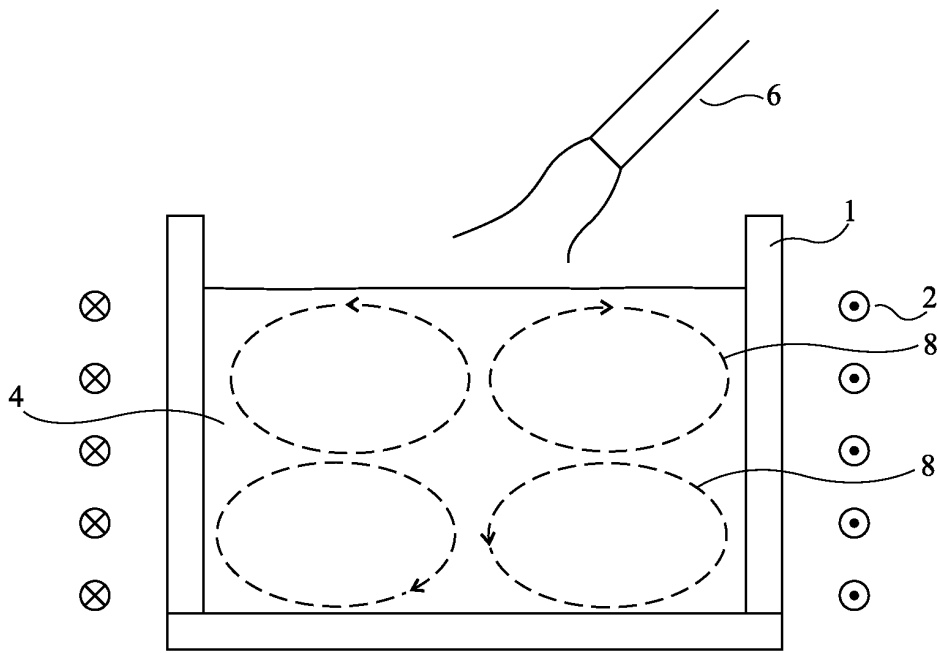


Fig 1

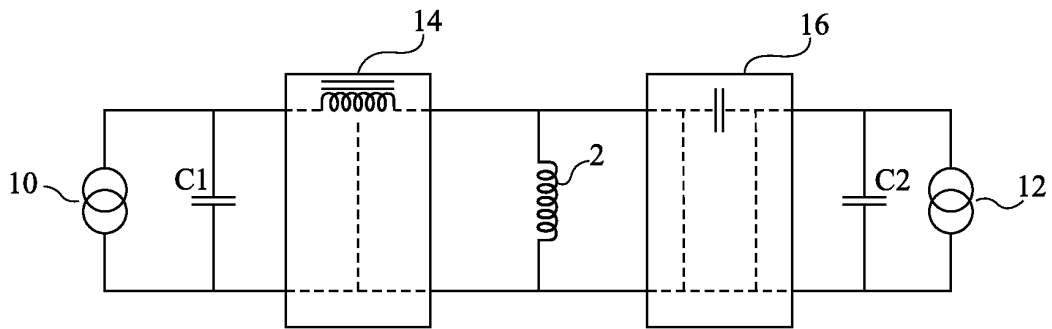


Fig 2

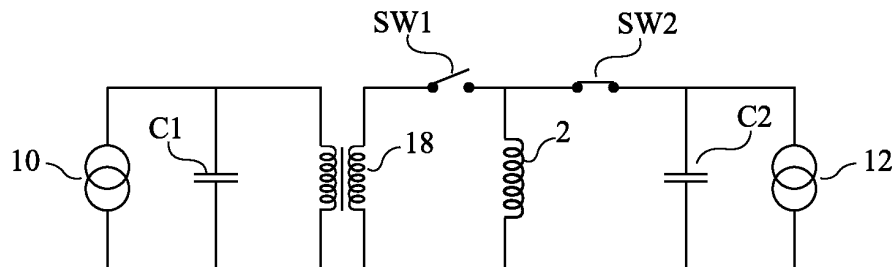


Fig 3

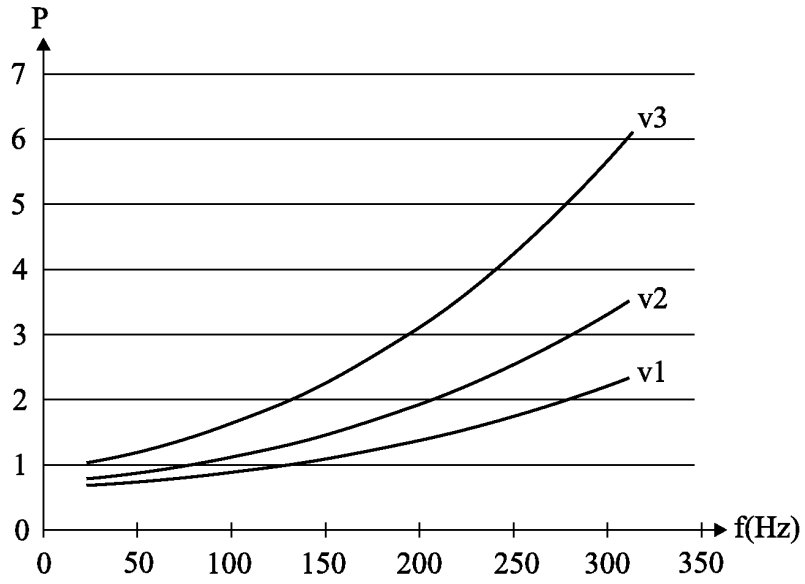


Fig 4

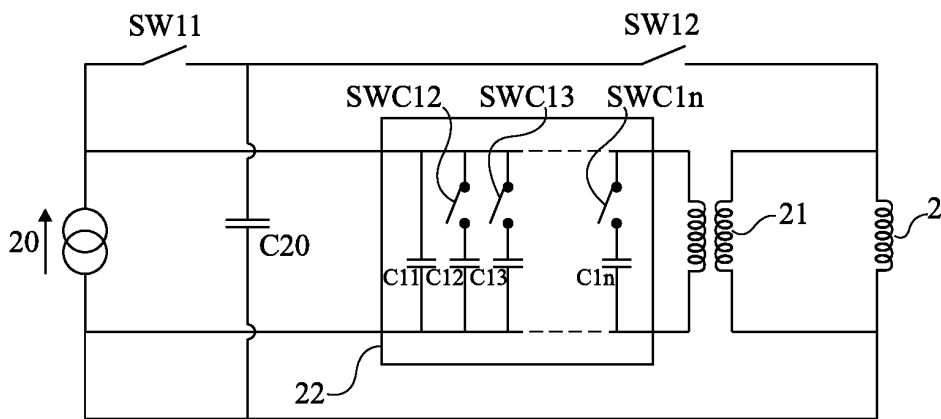


Fig 5



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

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

FA 729545  
FR 0959179

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2008/063025 A1 (FISHMAN OLEG S [US] ET AL) 13 mars 2008 (2008-03-13) * le document en entier *	1-5	H05B6/06
A	US 5 889 812 A (SCHLUCKEBIER DIETER [DE]) 30 mars 1999 (1999-03-30) * abrégé *	1,5	
A	FR 2 540 699 A1 (VIVES CHARLES [FR]) 10 août 1984 (1984-08-10) * abrégé *	1,5	
A	US 2009/114640 A1 (NADOT VLADIMIR V [US] ET AL) 7 mai 2009 (2009-05-07) * abrégé *	1,5	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H05B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
10 août 2010		Garcia, Jesus	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul                      Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie                      A : arrière-plan technologique                      O : divulgation non-écrite                      P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention                      E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.                      D : cité dans la demande                      L : cité pour d'autres raisons                      &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0959179 FA 729545**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.  
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **10-08-2010**  
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2008063025 A1	13-03-2008	WO 2009067456 A2	28-05-2009
US 5889812 A	30-03-1999	AT 166522 T	15-06-1998
		WO 9522238 A1	17-08-1995
		EP 0744117 A1	27-11-1996
FR 2540699 A1	10-08-1984	AUCUN	
US 2009114640 A1	07-05-2009	WO 2009058820 A2	07-05-2009



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

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

FA 729545  
FR 0959179

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2008/063025 A1 (FISHMAN OLEG S [US] ET AL) 13 mars 2008 (2008-03-13) * le document en entier *	1-5	H05B6/06
A	US 5 889 812 A (SCHLUCKEBIER DIETER [DE]) 30 mars 1999 (1999-03-30) * abrégé *	1,5	
A	FR 2 540 699 A1 (VIVES CHARLES [FR]) 10 août 1984 (1984-08-10) * abrégé *	1,5	
A	US 2009/114640 A1 (NADOT VLADIMIR V [US] ET AL) 7 mai 2009 (2009-05-07) * abrégé *	1,5	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H05B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
10 août 2010		Garcia, Jesus	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul                      Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie                      A : arrière-plan technologique                      O : divulgation non-écrite                      P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention                      E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.                      D : cité dans la demande                      L : cité pour d'autres raisons                      &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0959179 FA 729545**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.  
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **10-08-2010**  
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2008063025 A1	13-03-2008	WO 2009067456 A2	28-05-2009
US 5889812 A	30-03-1999	AT 166522 T WO 9522238 A1 EP 0744117 A1	15-06-1998 17-08-1995 27-11-1996
FR 2540699 A1	10-08-1984	AUCUN	
US 2009114640 A1	07-05-2009	WO 2009058820 A2	07-05-2009