



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
08.11.2017 Bulletin 2017/45

(51) Int Cl.:
C21D 1/34 (2006.01) F27D 19/00 (2006.01)
C21D 11/00 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **16167875.0**

(22) Date de dépôt: **02.05.2016**

(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
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
MA MD

(72) Inventeur: **MITAIS, Jean-Christophe**
91160 LONGJUMEAU (FR)

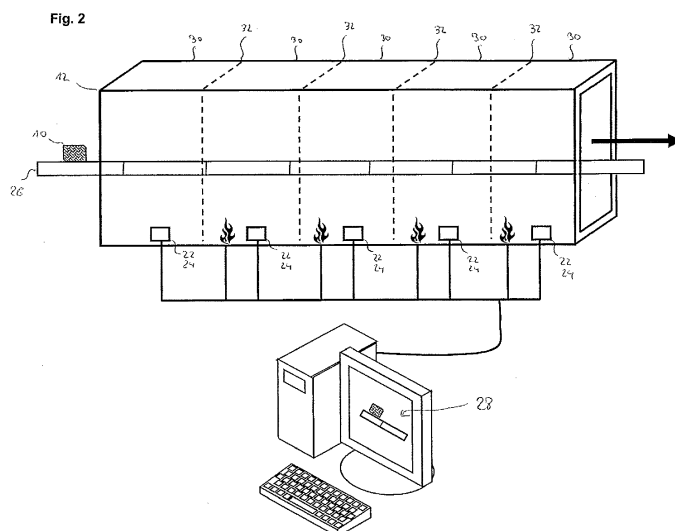
(74) Mandataire: **Pronovem**
Office Van Malderen
Parc d'affaires Zénobe Gramme- bâtiment K
Square des Conduites d'Eau 1-2
4020 Liège (BE)

(71) Demandeur: **Cockerill Maintenance & Ingenierie S.A.**
4100 Seraing (BE)

(54) **CONTRÔLE EN TEMPS RÉEL DU CHAUFFAGE D'UNE PIÈCE PAR UN FOUR SIDERURGIQUE OU UN FOUR DE TRAITEMENT THERMIQUE**

(57) Un procédé, un four et un logiciel pour le chauffage contrôlé d'une pièce comprenant :
l'obtention d'un plan de chauffage définissant une évolution désirée d'un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce au cours du chauffage dans le four ;
la mise à disposition de la pièce à chauffer au four ;
la modélisation numérique tridimensionnelle du chauffage de la pièce, en temps réel et simultanée au chauffage de la pièce, la modélisation numérique utilisant des paramètres de chauffage du four ainsi qu'un modèle tridimensionnel de la pièce à chauffer et comprenant la prédiction des un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce pour le prochain instant de référence ;

la comparaison des un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce dudit plan de chauffage aux un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce prédits par la modélisation numérique pour le prochain instant de référence ; et
suite à chaque comparaison, l'adaptation, si nécessaire, des paramètres de chauffage du four en fonction du résultat de la comparaison afin de diminuer un écart entre les un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce du plan de chauffage et les un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce prédits par la modélisation numérique pour le prochain instant de référence.



Description**Domaine Technique**

5 **[0001]** De manière générale, l'invention concerne le chauffage contrôlé d'une pièce par un four sidérurgique ou un four de traitement thermique, p.ex. un four de réchauffage. Le contrôle est fait par une modélisation numérique, simultanée et en temps réel, du chauffage de la pièce.

Arrière-plan technologique

10 **[0002]** Le brevet US 3,868,094 décrit un procédé de contrôle du chauffage pour un four métallurgique ayant une zone supérieure et une zone inférieure. Le procédé comprend la mesure, dans un seul endroit, de la température de surface d'une pièce qui passe à travers le four. Le signal de mesure est transmis simultanément aux contrôleurs des zones supérieure et inférieure. Les contrôleurs émettent des signaux aux brûleurs du four pour maintenir les températures de

15 consigne supérieure et inférieure souhaitées.

[0003] Le procédé décrit souffre du fait qu'il faut mesurer la température de la pièce à l'intérieur du four. Comme l'explique le document US 3,868,094, la position de la sonde doit être judicieusement choisie pour qu'elle ne soit pas dans le chemin des pièces et pour qu'elle ne soit pas endommagée en cas d'empilement de pièces dans le four. Un autre inconvénient du procédé connu réside dans le fait que la sonde ne renseigne que la température de la surface

20 inférieure de la pièce à chauffer. La température de la surface supérieure est supposée être déductible de la température de la surface inférieure par application d'une fonction simple. Cette supposition est toutefois simpliste, car les réglages des zones inférieure et supérieure peuvent affecter le rapport entre les deux températures de surface. Il y a aujourd'hui un besoin dans l'industrie de pallier ces inconvénients et de mettre à disposition un procédé de chauffage mieux adapté.

Description générale de l'invention

25 **[0004]** Un premier aspect de la présente invention se rapporte à un procédé de chauffage contrôlé d'une pièce, par exemple d'un demi-produit sidérurgique, comme p.ex. une brame, un bloom, une billette, un lingot, un rond, une ébauche, ou autre, par un four sidérurgique ou un four de traitement thermique comprenant :

- 30
- l'obtention d'un plan de chauffage définissant une évolution désirée d'un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce au cours du chauffage dans le four ;
 - la mise à disposition de la pièce à chauffer au four ;

35

 - le suivi thermique par le biais d'une modélisation numérique tridimensionnelle du chauffage de la pièce, en temps réel et simultanée au chauffage de la pièce, la modélisation numérique utilisant des paramètres de chauffage actuels (c.-à-d. d'application au moment de la modélisation) du four, un modèle tridimensionnel de la pièce à chauffer, préférablement un modèle du four, et comprenant la prédiction d'un ou plusieurs indicateurs de la température de

40

 - la pièce pour le prochain instant de référence;
 - la comparaison des un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce dudit plan de chauffage aux un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce prédits par la modélisation numérique pour le prochain instant de référence; et

45

 - suite à chaque comparaison, l'adaptation, si nécessaire, des paramètres de chauffage du four en fonction du résultat de la comparaison afin de diminuer un écart entre les un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce du plan de chauffage et les un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce prédits par la modélisation numérique pour le prochain instant de référence.

50

[0005] La pièce à chauffer peut, par exemple, avoir une forme de plaque, de brame, d'une pièce carrée ou autre. La pièce à chauffer peut être en métal, en ce compris toutes les nuances d'acier, depuis les qualités les plus courantes jusqu'aux aciers de haute résistance mécanique de pointe, y compris les aciers inoxydables et les aciers au silicium.

55 **[0006]** Les paramètres de chauffage du four peuvent comprendre, entre autres, la puissance, la température et/ou des réglages des actionneurs, les réglages contrôlant, par exemple, le débit de combustible du four et/ou la vitesse de la pièce dans le four.

[0007] Les indicateurs de la température de la pièce sont reliés directement ou indirectement à la température de la pièce. Ils sont généralement représentatifs de la température de la pièce à chauffer. Des indicateurs de la température

directement reliés à la température peuvent être, par exemple, la température moyenne de la pièce, un profil de température de la pièce, ou encore une cartographie tridimensionnelle de la température de la pièce. Des indicateurs de température indirectement reliés à la température comprennent, par exemple, la chaleur latente de la pièce, l'entropie, l'enthalpie, etc.

[0008] L'obtention du plan de chauffage peut se faire par une simulation numérique prenant en compte la valeur des un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce à l'entrée du four, la valeur désirée des un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce à la sortie du four, un modèle tridimensionnel pour la pièce à chauffer, optionnellement un modèle du four. La simulation numérique détermine alors le plan de chauffage comprenant l'évolution des un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce au cours du chauffage et optionnellement les paramètres de chauffage du four nécessaires à la réalisation de cette évolution.

[0009] L'obtention du plan de chauffage peut se faire autrement, par exemple, le plan de chauffage par la lecture de un ou plusieurs fichiers de données comprenant l'évolution des un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce lors de son chauffage ainsi que les paramètres de chauffage du four nécessaires pour la réalisation de cette évolution. Il sera apprécié que le plan de chauffage n'a pas besoin d'être établi à l'endroit du four sidérurgique ou du four de traitement thermique, mais peut être élaboré ailleurs (p.ex. dans un centre de calcul).

[0010] Optionnellement, le plan de chauffage définit une évolution des un ou plusieurs indicateurs de la température et des paramètres de chauffage du four qui minimisent la consommation d'énergie.

[0011] Préférentiellement, les un ou plusieurs indicateurs de la température définis dans le plan de chauffage sont des valeurs de consigne pour les un ou plusieurs indicateurs de la température ajustés au cours du chauffage dans le four. Autrement dit, une boucle de réglage agira sur les paramètres du four de sorte à ce que les valeurs pour les un ou plusieurs indicateurs de la température actuels correspondent aux valeurs de consigne pour les un ou plusieurs indicateurs de la température.

[0012] La modélisation numérique qui se fait simultanément au chauffage de la pièce opère en « temps réel », ce qui signifie que la modélisation numérique est conçue de sorte à fournir les informations sur les un ou plusieurs indicateurs de la température dans le respect de contraintes strictes de temps. En particulier, la conception de la modélisation numérique est faite de sorte à ce que les valeurs prédites des un ou plusieurs indicateurs de la température soient mises à jour plusieurs fois avant le prochain instant de référence, de façon pouvoir adapter les paramètres de chauffage du four. En d'autres mots, le temps pour obtenir les un ou plusieurs indicateurs de la température par la modélisation numérique est bien inférieur au temps entre deux instants de référence. Dans le contexte du présent document, le terme « instant de référence » désigne un instant pendant le procédé du chauffage (début et fin inclus) auquel il est souhaité avoir une concordance entre les un ou plusieurs indicateurs selon le plan de chauffage et les un ou plusieurs indicateurs prédits par la modélisation. Les instants de référence peuvent comprendre, notamment, la fin du chauffage, des instants auxquels la pièce à chauffer transite d'une zone du four dans un autre, ou d'autres instants. Les instants de référence peuvent être choisis en fonction du matériel existant, p.ex. en fonction des automates de régulation de bas niveau.

[0013] La modélisation numérique tridimensionnelle nécessite une discrétisation de l'espace. Les « pixels tridimensionnels » résultant sont appelés des « voxels ». Les voxels sont préférentiellement de volume inférieur à 1 cm³.

[0014] La modélisation numérique est, préférentiellement, conçue de sorte à pouvoir être réalisée sur un ou plusieurs processeurs graphiques comprenant, chacun, au moins 1024 noyaux de calculs, préférentiellement, au moins 2048 noyaux de calculs, encore plus préférentiellement au moins 4096 noyaux de calculs.

[0015] L'écart entre les un ou plusieurs indicateurs de la température du plan de chauffage et un ou plusieurs indicateurs actuels de la température de la pièce est calculé dans l'espace des paramètres, formé par les un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce, selon une métrique. Cette dernière peut être définie de telle façon à affecter un poids à chaque indicateur de la température lors du calcul de l'écart. Par exemple, la température moyenne de la pièce peut avoir un poids deux fois plus important que celui associé à son profil de température lors du calcul de l'écart.

[0016] Une fois l'écart calculé, la nécessité de l'adaptation peut être déterminée en fonction d'un seuil de tolérance. Si l'écart est inférieur au seuil de tolérance, aucune adaptation n'est faite. Si l'écart est supérieur au seuil de tolérance, l'adaptation des paramètres de chauffage du four est faite afin de réduire cet écart aux instants de référence ultérieurs.

[0017] Plusieurs pièces à chauffer peuvent être présentes dans le four en même temps. Chacune de ces pièces peut posséder un plan de chauffage. Optionnellement, afin que le plan de chauffage de chaque pièce soit le plus réaliste possible, le plan de chauffage de la pièce considérée tient compte des un ou plusieurs autres pièces également présentes dans le four durant le chauffage de la pièce.

[0018] Malgré cela, il est probable qu'il soit impossible de satisfaire simultanément chaque plan de chauffage des pièces présentes dans le four. Selon le type de pièce à chauffer, le respect du plan de chauffage est plus ou moins critique. En conséquence, le procédé comprend préférentiellement l'affectation d'une priorité aux pièces, qui en cas d'incompatibilités de plans de chauffage définit quel plan de chauffage est prioritaire par rapport aux autres.

[0019] Cette priorité peut être attribuée à chaque pièce à chauffer soit par un utilisateur, soit automatiquement sur base de certains critères. Un de ces critères pourrait être, par exemple, la composition chimique d'une pièce dont il est connu que la température ne peut pas dépasser une certaine valeur ou la masse d'une pièce.

[0020] L'adaptation des paramètres de chauffage se fait, le cas échéant dans le respect de la priorité affectée à chacune des pièces. Dans le cas où les pièces peuvent être « prioritaires » ou « non-prioritaires », la pièce prioritaire verra son plan de chauffage respecté alors que le plan de chauffage des pièces non prioritaires ne sera pas forcément respecté. L'adaptation des paramètres de chauffage du four pour les pièces non prioritaires est faite de façon à ne pas faire dévier le chauffage de chaque pièce prioritaire de son plan de chauffage.

[0021] Optionnellement, un système de priorité à plusieurs niveaux de priorité (plus que deux) peut être implémenté. L'adaptation des paramètres de chauffage du four se fera alors en cascade à partir des pièces les plus prioritaires vers les pièces les moins prioritaires. L'adaptation des paramètres de chauffage du four pour pièces moins prioritaires veillera à ne pas faire dévier le chauffage de chaque pièce plus prioritaire de son plan de chauffage.

[0022] Dans un mode de réalisation préféré, le four sidérurgique ou le four de traitement thermique est un four continu, p.ex. un four à glissière, à longeron tubulaire, à sole mobile, à sole tournante, etc. Le four est, de préférence, subdivisé en plusieurs zones de contrôle, les instants de référence étant, par exemple, les instants auxquels la pièce passe d'une zone à l'autre.

[0023] Un second aspect de la présente invention se rapporte à un logiciel pour contrôler le chauffage d'une pièce par un four sidérurgique ou un four de traitement thermique. Un tel logiciel comprend des instructions, stockées sur un support informatique, qui, lorsqu'elles sont exécutées par un matériel informatique, font en sorte que le matériel informatique mette en oeuvre le procédé comprenant :

- l'obtention d'un plan de chauffage définissant une évolution désirée d'un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce au cours du chauffage dans le four ;
- la modélisation numérique tridimensionnelle du chauffage de la pièce, en temps réel et simultanée au chauffage de la pièce, la modélisation numérique utilisant des paramètres de chauffage actuels du four et un modèle tridimensionnel de la pièce à chauffer et comprenant la prédiction d'un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce pour le prochain instant de référence ;
- la comparaison des un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce du plan de chauffage aux un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce prédits par la modélisation numérique pour le prochain instant de référence ;
- suite à chaque comparaison, l'adaptation, si nécessaire, des paramètres de chauffage du four en fonction du résultat de la comparaison afin de diminuer un écart entre les un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce du plan de chauffage et les un ou plusieurs indicateurs de la température de la pièce prédits par la modélisation numérique pour le prochain instant de référence ; et
- la communication des nouveaux paramètres de chauffage à un centre de contrôle du four.

[0024] Le logiciel est préférablement conçu pour être exécuté en parallèle sur un matériel informatique comprenant plusieurs noyaux de calculs. Le matériel informatique peut être composé de un ou plusieurs processeurs comprenant préférablement, chacun, au moins 1024 noyaux de calculs, plus préférablement, au moins 2048 noyaux de calculs, encore plus préférablement au moins 4096 noyaux de calculs. Le matériel informatique comprend préférablement un ou plusieurs processeurs graphiques.

[0025] Le logiciel peut comprendre, en plus, des instructions, qui, lorsqu'elles sont exécutées par un matériel informatique, font en sorte que le matériel informatique mette en oeuvre la détermination du type de maillage à utiliser (par exemple un maillage carré, triangulaire ou hexagonal) en fonction de la géométrie de la pièce à chauffer. De plus, le logiciel peut être conçu de sorte à déterminer le volume de voxels utilisés par la modélisation numérique du chauffage de la pièce afin qu'une erreur relative de chaque indicateur de température de ladite simulation numérique soit inférieure à 5%, préférablement inférieure à 1 %, plus préférablement inférieure à 0.5%.

[0026] L'erreur relative pour un certain type de maillage m et un certain volume V de voxels d'un indicateur de température $f_{V;m}(\vec{r})$ peut être calculée par comparaison avec une modélisation numérique du même indicateur de température $f_{V';m}(\vec{r})$ pour un maillage de même type m le plus fin possible (V' tend vers 0) :

$$ER_f(V; V') = \frac{\int |f_{V;m}(\vec{r}) - f_{V';m}(\vec{r})|^2 w(\vec{r}) d\vec{r}}{\int |f_{V';m}(\vec{r})|^2 w(\vec{r}) d\vec{r}},$$

où l'intégration se fait sur tout le domaine de la simulation numérique et $w(r)$ est un facteur de pondération dépendant de la position.

[0027] On peut considérer deux cas spécifiques plus en détail. Le premier correspond à l'erreur globale relative (EGR) où le facteur de pondération est constant sur tout le domaine de la modélisation numérique. Le second correspond à l'erreur locale relative (ELR) où le facteur de pondération est plus élevé dans les zones où le contrôle de l'erreur est considéré comme important et moins élevé (voire nul) dans les autres zones.

[0028] Un troisième aspect de la présente invention se rapporte à un four sidérurgique ou un four de traitement thermique pour le chauffage d'une pièce comprenant

- un ou plusieurs détecteurs pour mesurer les paramètres de chauffage actuels du four ;
- un matériel informatique avec un logiciel tel que décrit précédemment et configuré pour réaliser le procédé tel que décrit précédemment.

[0029] Préférentiellement, les un ou plusieurs détecteurs pour mesurer les paramètres de chauffage actuels comprennent un ou plusieurs pyromètres, un ou plusieurs détecteurs de débit de combustible injecté dans ledit four, un ou plusieurs détecteurs de pouvoir calorifique inférieur et d'indice de Wobbe du combustible injecté dans le four ou une combinaison de ces derniers.

Brève description des dessins

[0030] D'autres particularités et caractéristiques de l'invention ressortiront de la description détaillée du mode de réalisation avantageux présenté ci-dessous, à titre d'illustration, avec référence aux dessins annexés qui montrent :

Fig. 1: représente les différents niveaux d'abstraction pour le contrôle du chauffage d'une pièce dans un four de traitement thermique ou un four sidérurgique ;

Fig. 2: est un schéma simplifié représentant un four de traitement thermique continu pour un chauffage contrôlé d'une pièce ;

Fig. 3: est un organigramme montrant les étapes réalisées selon l'invention pour chauffer une pièce dans un four de traitement thermique ;

Fig. 4: est un schéma simplifié représentant un four de traitement thermique pour un chauffage contrôlé de plusieurs pièces ;

Fig. 5: est un graphique représentant l'évolution de la température d'une pièce au cours du chauffage en comparaison avec le plan de chauffage.

Description détaillée d'un mode de réalisation préféré de l'invention

[0031] La Fig. 1 est un organigramme d'un procédé de commande d'un four de traitement thermique ou d'un four sidérurgique selon un mode de réalisation de l'invention. Le procédé comprend différents niveaux organisés de manière hiérarchique. Dans l'exemple illustré, cette hiérarchie est composée de quatre niveaux, numérotés de 0 à 3, qui sont décrits dans la suite. Dans une mise en oeuvre pratique du procédé illustré, utilisant p.ex. un ou plusieurs programmes d'ordinateur, les différents niveaux peuvent représenter des couches d'abstraction. Dans un tel cas, on définit, p.ex. par le biais d'une interface de programmation, pour chaque couche d'abstraction les types d'entrées et de sorties qu'elle peut recevoir, respectivement émettre.

[0032] Au niveau 3, le procédé accepte des commandes 14 de clients, qui fixent, p.ex. le type de la pièce, la qualité finale, les dimensions, la date ultime de livraison, etc. En fonction des commandes sont alors définies (de manière automatique et/ou manuelle) les valeurs de consigne en rapport avec les pièces à chauffer. Ces valeurs de consigne peuvent comprendre, en particulier, l'objectif de température moyenne finale et l'objectif d'uniformité de température. D'autres particularités concernant le chauffage des pièces peuvent également être définies, comme p.ex. une température maximale à ne pas dépasser, un taux de chauffage à respecter, etc.

[0033] Les valeurs de consigne en rapport avec les pièces à chauffer sont transmises au niveau 2 du procédé. À ce niveau sont générées les valeurs de consigne 18 (de haut niveau) pour le four, qui comprennent, p.ex. les objectifs de puissance (globale et/ou par zone du four) et/ou des objectifs de débit de combustible destiné aux différents brûleurs, les objectifs de température du four (des parois, des gaz d'échappement, etc.), ainsi que les objectifs de vitesse de

transit des pièces dans le four ou dans ses différentes zones.

[0034] Au niveau 1, le four est piloté de sorte à atteindre et à respecter les valeurs de consigne 18 de haut niveau reçues du niveau 2. Les valeurs de consigne 18 sont comparées à des valeurs actuelles, indicatives de l'état opérationnel du four, mesurées par des capteurs 22 et/ou estimées. Les capteurs 22 peuvent comprendre, par exemple, des capteurs de température des parois du four, des capteurs mesurant la température des gaz d'échappement, des capteurs de débit de combustible, etc. A ce niveau, le procédé réalise donc une boucle de réglage qui génère des valeurs de consigne 20 (de bas niveau) pour des actionneurs 23 du four sur base des valeurs de consigne 18 de haut niveau et de l'état opérationnel actuel. Les actionneurs commandés par le niveau 1 comprennent, p.ex. des actionneurs de vannes automatiques contrôlant le débit de combustible et/ou des moteurs contrôlant l'avancement des pièces à chauffer.

[0035] Le niveau 0 a l'accès direct aux ressources matérielles du four et comprend, p.ex. les pilotes du matériel employé, notamment celui des actionneurs. Au niveau 0 a lieu, notamment, la traduction des valeurs de consigne 20 de bas niveau en des signaux électriques contrôlant les actionneurs 23 du four. Le niveau 0 peut comprendre des boucles de réglage afin de garantir que les actionneurs 23 réagissent comme prévu aux commandes du niveau 1. De telles boucles de réglage peuvent comprendre des capteurs 24, p.ex. des capteurs intégrés dans les actionneurs 23.

[0036] Fonctionnellement, chaque niveau de commande du four peut être conçu comme une boucle de réglage qui adapte les paramètres contrôlés par le niveau concerné de sorte à établir ou à maintenir la conformité avec les valeurs de consignes provenant du niveau supérieur. Si l'état actuel du niveau concerné n'est pas en accord avec les valeurs de consignes imposées par le niveau supérieur, une adaptation des valeurs de consignes pour le niveau inférieur est effectuée afin d'établir ou de rétablir la conformité.

[0037] La hiérarchie de différents niveaux d'abstraction permet à un opérateur du four de le programmer en définissant des valeurs de consigne 16 en rapport avec la pièce à chauffer et/ou des valeurs de consigne 18 de « haut niveau » en rapport avec le four sans devoir programmer directement les valeurs de consigne de « bas niveau ».

[0038] Le procédé de chauffage selon l'invention utilise un plan de chauffage pour programmer le four. Dans le modèle hiérarchique détaillé ci-dessus, l'établissement du plan de chauffage appartient au niveau 2. En effet, le plan de chauffage est établi pour une pièce à chauffer afin d'atteindre les objectifs la concernant (p.ex. température moyenne à la sortie du four, uniformité de la distribution de température sur l'ensemble de la pièce.) Le plan de chauffage est établi par une simulation numérique du chauffage de la pièce par le four. La simulation utilise un modèle de la pièce ainsi que, optionnellement, un modèle du four qui imite le comportement du four. Les types de réglages que le modèle du four peut subir sont identiques à ceux que le procédé de niveau 2 peut effectuer sur le four réel. La simulation visant à obtenir le plan de chauffage est exécutée dans le cadre d'un procédé d'optimisation d'une fonction de coût (reflétant p.ex. la consommation énergétique, le temps de chauffage ou autre). Dans le cadre de ce procédé d'optimisation, les réglages du modèle du four dans la simulation sont ajustés jusqu'à ce qu'un réglage satisfaisant soit trouvé. Le plan de chauffage finalement obtenu contient une courbe de chauffage dite « optimale » de la pièce (c.-à-d. des données indiquant l'évolution de la température de la pièce en fonction du progrès du chauffage) ainsi que les réglages correspondants du four. On notera que ces réglages ne seront pas nécessairement statiques mais que le plan de chauffage peut déterminer une évolution des réglages en fonction du progrès du chauffage.

[0039] Le plan de chauffage définit une programmation initiale du four. Selon l'invention, il est prévu de surveiller le respect du plan de chauffage par le biais d'un suivi thermique réalisé à l'aide d'une modélisation numérique tridimensionnelle 28 du chauffage de la pièce, en temps réel et simultanée au chauffage de la pièce. Le suivi thermique s'appuie, entre autre, sur des paramètres opérationnels (paramètres de chauffage actuels) du four qui sont injectés dans la modélisation numérique qui comprend un modèle tridimensionnel de la pièce à chauffer ainsi que, optionnellement, un modèle du four. Si l'état thermique de la pièce à chauffer, prédit par la modélisation numérique, diffère de l'état prévu par le plan de chauffage pour le prochain instant de référence, une adaptation des réglages du four est effectuée. Cette adaptation est choisie de sorte à rétablir à un instant de référence ultérieur (de préférence au prochain instant de référence) la conformité entre l'état thermique réel de la pièce et l'état thermique prescrit par le plan de chauffage. On note que ce procédé d'adaptation des réglages du four représente une boucle de réglage au niveau 2 de la hiérarchie susmentionnée, dans laquelle les indicateurs de température de la pièce aux instants de référence prévus par le plan de chauffage sont des valeurs de consigne. Les paramètres activement réglés par cette boucle comprennent avantageusement les débits de combustible destinés aux différents brûleurs. Si ces paramètres ne sont pas directement accessibles par le niveau 2, ils peuvent être réglés de manière indirecte via des objectifs de puissance et/ou de température imposés au niveau 1.

[0040] La Fig. 2 montre un four de traitement thermique 12 de type continu utilisé pour le chauffage d'une pièce 10 (p.ex. un demi-produit sidérurgique). Le four 12 comprend une glissière 26 pour porter la pièce 10 à chauffer. Le four 12 comprend plusieurs capteurs 22, 24 pour mesurer les paramètres de chauffage actuels du four 12. Ces capteurs 22, 24 comprennent, par exemple, un ou plusieurs pyromètres pour mesurer la température des parois du four 12, un ou plusieurs détecteurs de débit de combustible pour mesurer le flux de combustible injecté dans les brûleurs, un ou plusieurs détecteurs pour mesurer le pouvoir calorifique inférieur et/ou l'indice de Wobbe du combustible, etc. Les paramètres de chauffage actuels du four 12 comprennent grandeurs directement mesurées par les capteurs 22, 24

(p.ex. la température actuelle des parois du four 12 ou les débits actuels de combustible) et/ou des grandeurs déduites des mesures (p.ex. la puissance actuelle du four 12).

[0041] Le procédé de chauffage d'une pièce par un four à plusieurs zones est représenté sous forme d'ordinogramme à la Fig. 3.

[0042] Préalablement au chauffage proprement dit de la pièce, un plan de chauffage est établi (étape S10) par simulation numérique sur base d'un modèle tridimensionnel de la pièce et, optionnellement, d'un modèle du four. Comme indiqué plus haut dans le texte, le plan de chauffage définit des valeurs de consigne pour la pièce (des indications de température de la pièce aux instants de référence), qui permettent d'arriver, en fin de chauffage, à la température moyenne finale désirée de la pièce et à l'uniformité de la température finale désirée. Le plan de chauffage contient en outre les réglages du four, qui, d'après la simulation résultent dans la courbe de chauffage optimale de la pièce.

[0043] Le plan de chauffage est communiqué au four (étape S12). Les réglages prévus par le plan de chauffage sont utilisés pour programmer (étape S14) le four pour le chauffage de la pièce.

[0044] La pièce placée sur une glissière, est ensuite enfournée (étape S16) et commence à être chauffée dans la première zone ($i=1$, étape S18).

[0045] Au fur et à mesure que la pièce progresse dans le four, le suivi thermique de la pièce, en temps réel et simultanément au chauffage de la pièce, est réalisé à partir des paramètres actuels de chauffage du four mesurés par les capteurs du four (étape S20), du plan de chauffage, d'un modèle de la pièce et, optionnellement, d'un modèle du four, on modélise le chauffage de la pièce dans la zone i et on prédit l'état de chauffage de la pièce en fin de zone i (étape S22).

[0046] La conformité du chauffage de la pièce au plan de chauffage est vérifiée à la prochaine étape (étape S24): si le chauffage de la pièce prédit par la modélisation numérique pour la fin de zone i est conforme au plan de chauffage, aucune modification des réglages du four par rapport à ceux prévus par le plan de chauffage n'est nécessaire. Dans le cas contraire, une adaptation des réglages, destinée à rétablir au prochain instant de référence (c.-à-d. à la fin de la zone i) la conformité entre l'état thermique réel de la pièce et l'état thermique prescrit par le plan de chauffage, est élaborée (étape S26) et appliquée (étape S28). Il sera apprécié que, les étapes S20, S22, S24, S26, S28 peuvent être répétées plusieurs fois sur une même zone i tant que la fin de la zone i n'est pas atteinte (étape S31). Dans un exemple pratique, une vérification de la conformité du chauffage de la pièce au plan de chauffage pourrait être effectuée environ toutes les 10 à 60 s (p.ex. toutes les 30 s), mais on comprendra que cette fréquence dépend de plusieurs facteurs, notamment de la complexité de la modélisation et de la puissance de calcul mise à disposition.

[0047] Si la pièce n'a pas atteint la fin de la dernière zone du four (vérifié à l'étape S32), la pièce passe ensuite dans la zone suivante du four (dans l'ordinogramme, ceci se traduit par l'incrément de l'indice i à l'étape S30). Tant que la pièce n'a pas atteint la fin de la dernière zone du four (vérifié à l'étape S32), le procédé décrit ci-dessus est répété pour la nouvelle zone. L'arrivée de la pièce à la fin de la dernière zone termine le chauffage de la pièce (étape S34).

[0048] En pratique, la conformité du déroulement du chauffage au plan de chauffage est vérifiée grâce à la détermination d'une grandeur caractérisant l'écart entre le jeu de valeurs théoriques (du plan de chauffage) et du jeu de grandeurs réelles (estimées par la modélisation parallèle au chauffage) en rapport avec l'instant de référence. L'écart peut être comparé à un seuil de tolérance afin de déterminer si une correction des réglages est indiquée.

[0049] Selon un mode de réalisation du plan de chauffage, l'évolution de la température de la pièce est donnée par la température moyenne de la pièce aux différents instants de référence. La Fig. 5 représente la température moyenne 38 de la pièce au cours du chauffage (ligne continue), prédite sur base de la modélisation numérique et la température moyenne 36 de la pièce au cours du chauffage (ligne discontinue) donnée par le plan de chauffage. Dans le cas illustré, on constate qu'un écart significatif entre la valeur cible et la valeur réelle de la température moyenne se creuse lors du passage de la pièce dans la seconde zone. Une correction des réglages du four, dans le but de remettre le chauffage de la pièce en conformité avec le plan de chauffage pour le prochain instant de référence (étapes S20, S22, S24, S26, S28, voir Fig. 3), est effectuée. Dans l'exemple illustré, aucune autre déviation entre le plan de chauffage et le chauffage réel de la pièce n'est constatée.

[0050] La modélisation numérique tridimensionnelle réalise un suivi thermique de la pièce en résolvant les équations physiques relatives, entre autre, aux transferts de chaleur (comprenant, entre autre, les transferts de chaleur par conduction et optionnellement par rayonnement). La modélisation numérique est réalisée en temps réel, ce qui signifie qu'elle est conçue de sorte à fournir la température actuelle de la pièce dans le respect de contraintes strictes de temps. En particulier, la conception de la modélisation numérique est faite de sorte à garantir (en fonction des puissances de calcul mises en oeuvre) que les indicateurs de température prédits par la modélisation soient mis à jour suffisamment fréquemment avant les instants de référence afin de pouvoir corriger les paramètres de chauffage du four pour rétablir la conformité de l'état thermique de la pièce au plan de chauffage pour le prochain instant de référence. De plus, la modélisation numérique est programmée de telle façon à pouvoir être exécutée en parallèle sur un ou plusieurs processeurs graphiques, chacun d'entre eux étant doté d'une multitude de noyaux de calculs.

[0051] La modélisation numérique du chauffage de la pièce par le four sur le matériel informatique requiert une discrétisation de l'espace (tridimensionnel). Cette discrétisation introduit inévitablement des imprécisions numériques. Les voxels associés à la discrétisation peuvent être de forme cubique (ou d'une autre forme). Plus le volume des voxels

est grand, plus l'erreur numérique introduite par la discrétisation de l'espace est susceptible d'être importante. En cas de maillage mal adapté, l'estimée de la température moyenne de la pièce obtenue par modélisation numérique ne sera pas représentative de la valeur réelle. En conséquence, la modélisation numérique est réalisée avec un maillage en adéquation avec les besoins. Le maillage peut être défini, p.ex. par le choix de voxels ayant des formes définies (p.ex. parallélépipédiques) et des volumes suffisamment petits. , préférablement, de volume inférieur à 1 cm³.

[0052] La Fig. 4 illustre le chauffage simultané de plusieurs pièces 10a-10c dans le four 12. Ces pièces 10a-10c peuvent avoir, a priori, différentes formes et différentes compositions chimiques. Selon un mode de réalisation de l'invention, un plan de chauffage est établi pour chaque pièce. Lors de l'établissement de ces plans de chauffage il est de préférence tenu compte de la présence des autres pièces à chauffer dans le four aux différents instants.

[0053] Lorsque plusieurs pièces à chauffer 10a-10c, possédant chacune son plan de chauffage, sont présentes en même temps dans le four 12, la conformité du chauffage de chaque pièce à leur plan de chauffage respectifs n'est parfois pas possible. La conformité du chauffage au plan de chauffage peut, pourtant, être critique pour certains types de pièces. Dès lors, une priorité peut être attribuée à chaque pièce à chauffer.

[0054] Une pièce prioritaire par rapport aux autres pièces verra son plan de chauffage respecté alors que le plan de chauffage des pièces moins prioritaires ne sera pas forcément respecté tant que la pièce prioritaire est présente dans le four. Ceci est dû au fait que le réglage de niveau 2 adapte les réglages du four pour faire respecter le plan de chauffage ayant actuellement la priorité.

[0055] Alors que des modes de réalisation particuliers viennent d'être décrits en détail, l'homme du métier appréciera que diverses modifications et alternatives à ceux-là puissent être développées à la lumière de l'enseignement global apporté par la présente divulgation de l'invention. Par conséquent, les agencements et/ou procédés spécifiques décrits ci-dessus sont censés être donnés uniquement à titre d'illustration, sans intention de limiter la portée de l'invention.

Revendications

1. Un procédé de chauffage contrôlé d'une pièce par un four sidérurgique ou un four de traitement thermique comprenant :

l'obtention d'un plan de chauffage définissant une évolution désirée d'un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce au cours du chauffage dans ledit four;

la mise à disposition de ladite pièce à chauffer audit four;

la modélisation numérique tridimensionnelle du chauffage de ladite pièce, en temps réel et simultanée au chauffage de ladite pièce, la modélisation numérique utilisant des paramètres de chauffage actuels dudit four ainsi qu'un modèle tridimensionnel de la pièce à chauffer et comprenant la prédiction des un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce pour un prochain instant de référence ;

la comparaison des un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce dudit plan de chauffage aux un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce prédits par ladite modélisation numérique pour le prochain instant de référence; et

suite à cette comparaison, l'adaptation, si nécessaire, desdits paramètres de chauffage du four en fonction du résultat de ladite comparaison afin de diminuer un écart entre les un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce dudit plan de chauffage et les un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce prédits par ladite modélisation numérique pour le prochain instant de référence.

2. Le procédé selon la revendication 1, dans lequel l'obtention du plan de chauffage comprend la détermination du plan de chauffage selon des critères de qualité finale désirée de la pièce et minimisant, préférablement, la consommation d'énergie.

3. Le procédé selon les revendications 1 ou 2, dans lequel les un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce dudit plan de chauffage sont des valeurs de consigne pour les un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce au cours du chauffage dans ledit four, les valeurs de consignes étant utilisées lors de l'étape d'adaptation.

4. Le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel lesdits paramètres de chauffage du four comprennent la puissance, la température ou des réglages des actuateurs, les réglages contrôlant, par exemple, le débit de combustible dudit four et/ou la vitesse de ladite pièce dans ledit four.

5. Le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la modélisation numérique tridimensionnelle du chauffage de ladite pièce est réalisée sur un processeur graphique comprenant plusieurs noyaux de calcul.

6. Le procédé selon la revendication 5, dans lequel le processeur graphique comprend au moins 1024 noyaux de calculs, préférablement, au moins 2048 noyaux de calculs, encore plus préférablement au moins 4096 noyaux de calculs.

7. Le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel la discrétisation de l'espace pour ladite modélisation numérique du chauffage de ladite pièce comprend des voxels de volume inférieur à 1 cm³.

8. Le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel ledit plan de chauffage de ladite pièce tient compte d'une ou de plusieurs autres pièces également présentes dans ledit four durant le chauffage de ladite pièce.

9. Le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel une priorité est attribuée à chaque pièce à chauffer par ledit four, l'attribution de la priorité se faisant soit par un utilisateur, soit automatiquement sur base de certains critères, l'adaptation desdits paramètres de chauffage se faisant en tenant compte de la priorité affectée à chacune des pièces.

10. Le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel le four sidérurgique ou le four de traitement thermique est un four de type continu, le four sidérurgique ou le four de traitement thermique étant subdivisé en plusieurs zones, les instants de référence étant les instants auxquels ladite pièce passe d'une zone à l'autre.

11. Un logiciel, pour contrôler le chauffage d'une pièce par un four sidérurgique ou un four de traitement thermique, comprenant des instructions, qui, lorsqu'elles sont exécutées par un matériel informatique, font en sorte que le matériel informatique mette en oeuvre le procédé comprenant :

l'obtention d'un plan de chauffage définissant une évolution désirée d'un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce au cours du chauffage dans ledit four;

la modélisation numérique tridimensionnelle du chauffage de ladite pièce, en temps réel et simultanée au chauffage de ladite pièce, la modélisation numérique utilisant des paramètres de chauffage actuels dudit four ainsi qu'un modèle tridimensionnel de la pièce à chauffer et comprenant la prédiction d'un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce pour le prochain instant de référence;

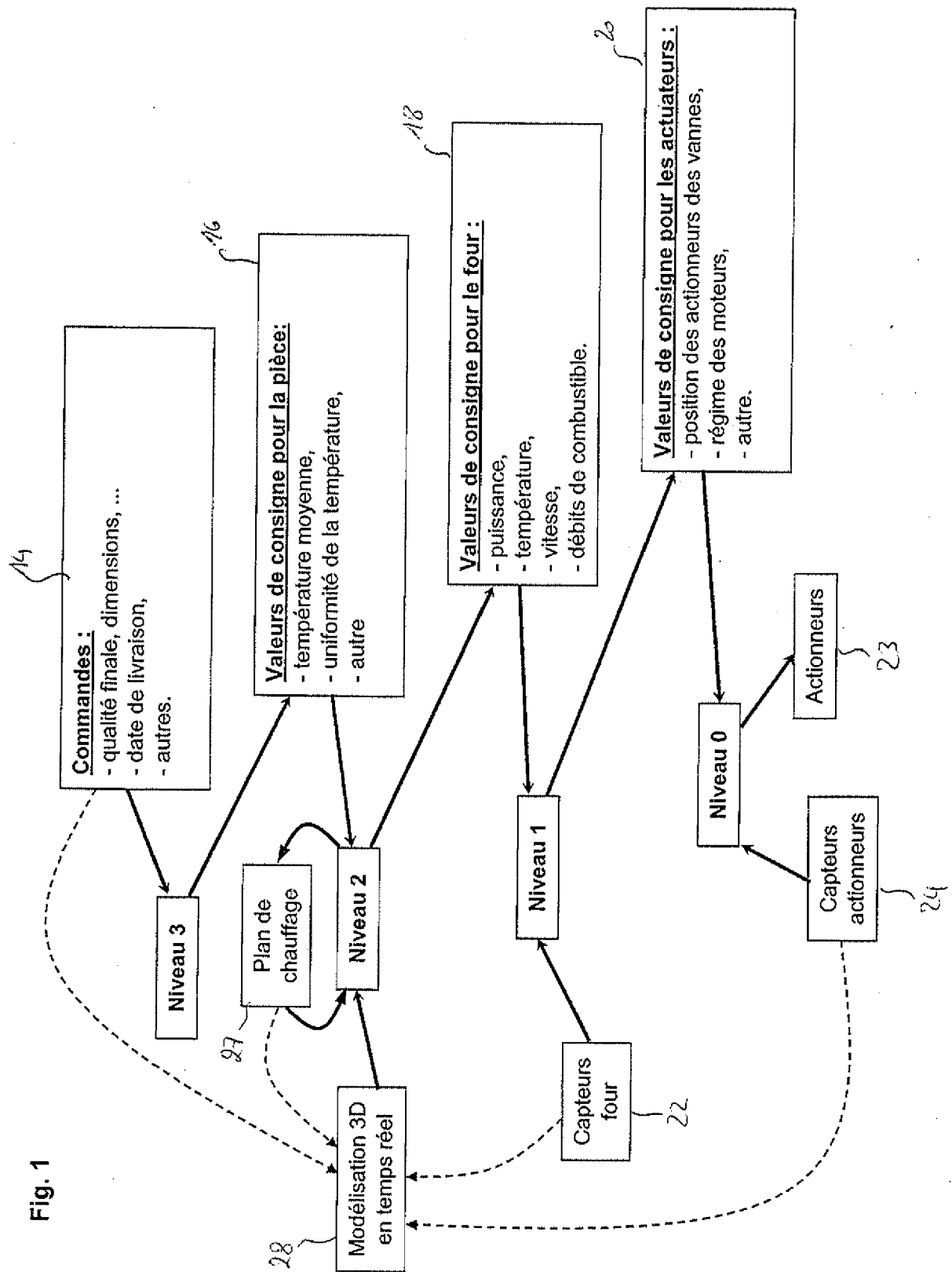
la comparaison des un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce dudit plan de chauffage aux un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce prédits par ladite modélisation numérique pour le prochain instant de référence;

suite à chaque comparaison, l'adaptation, si nécessaire, desdits paramètres de chauffage du four en fonction du résultat de ladite comparaison afin de diminuer un écart entre les un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce dudit plan de chauffage et les un ou plusieurs indicateurs de la température de ladite pièce prédits par ladite modélisation numérique pour le prochain instant de référence; et

la communication des nouveaux paramètres de chauffage audit four.

12. Un four sidérurgique ou un four de traitement thermique pour le chauffage d'une pièce comprenant un ou plusieurs détecteurs pour mesurer les paramètres de chauffage actuels dudit four; un matériel informatique avec un logiciel selon la revendication 11 configuré pour réaliser le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10.

13. Le four sidérurgique ou le four de traitement thermique tel que revendiqué à la revendication 12, dans lequel lesdits détecteurs pour mesurer les paramètres de chauffage actuels comprennent un ou plusieurs pyromètres et/ou thermocouples, un ou plusieurs détecteurs de débit de combustible injecté dans ledit four, un ou plusieurs détecteurs de pouvoir calorifique inférieur et d'indice de Wobbe du combustible injecté dans le four ou une combinaison de ces derniers.



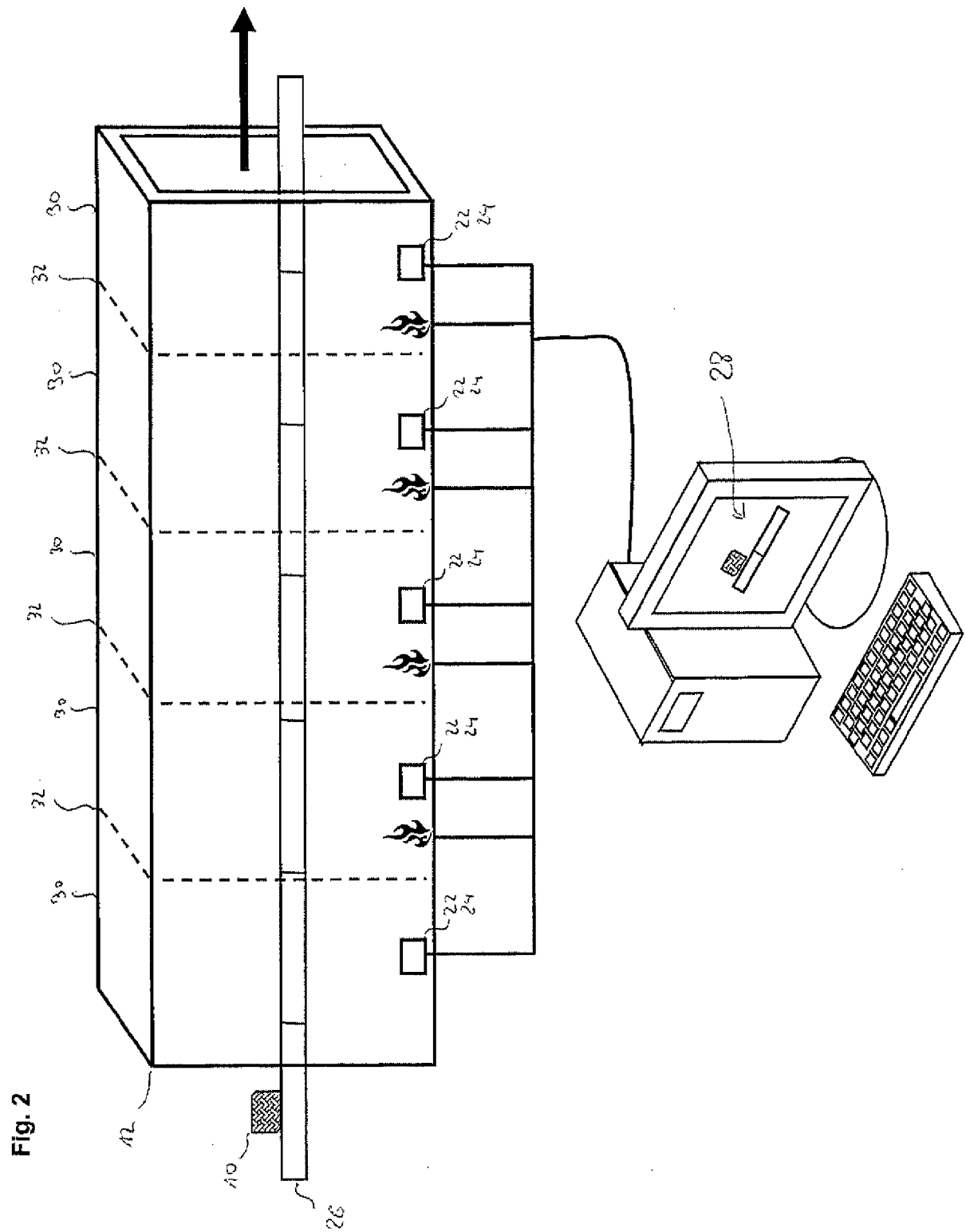
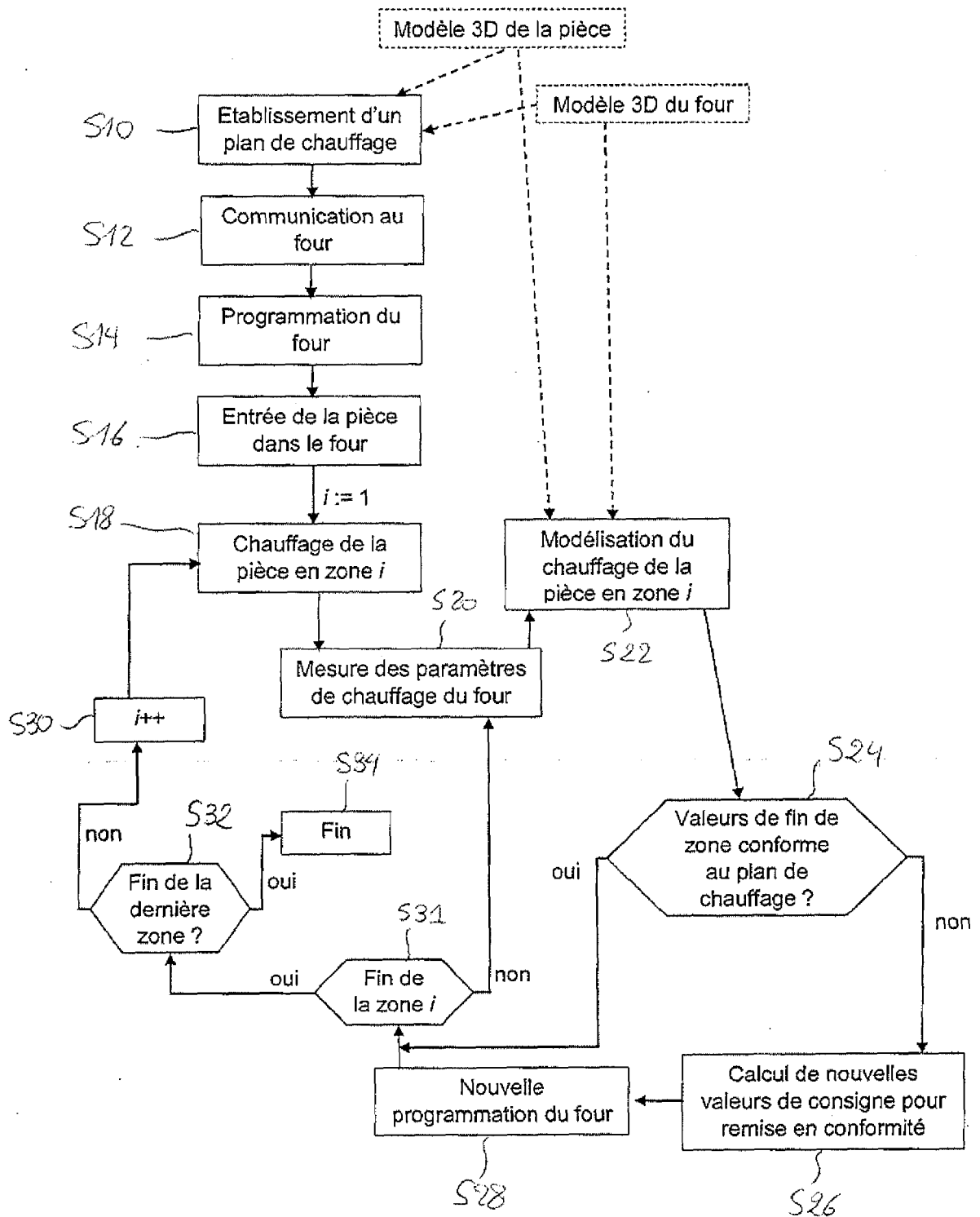


Fig. 3



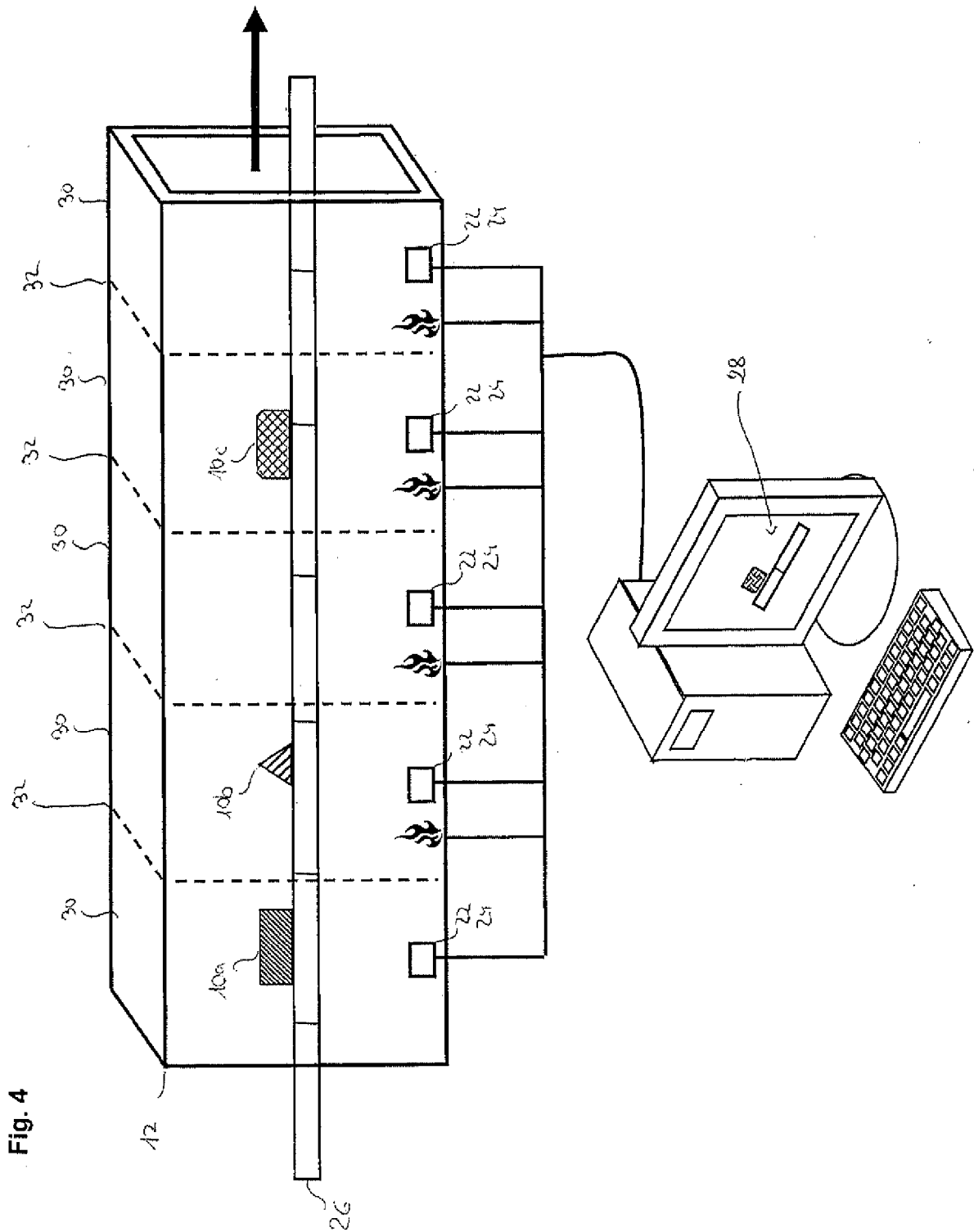
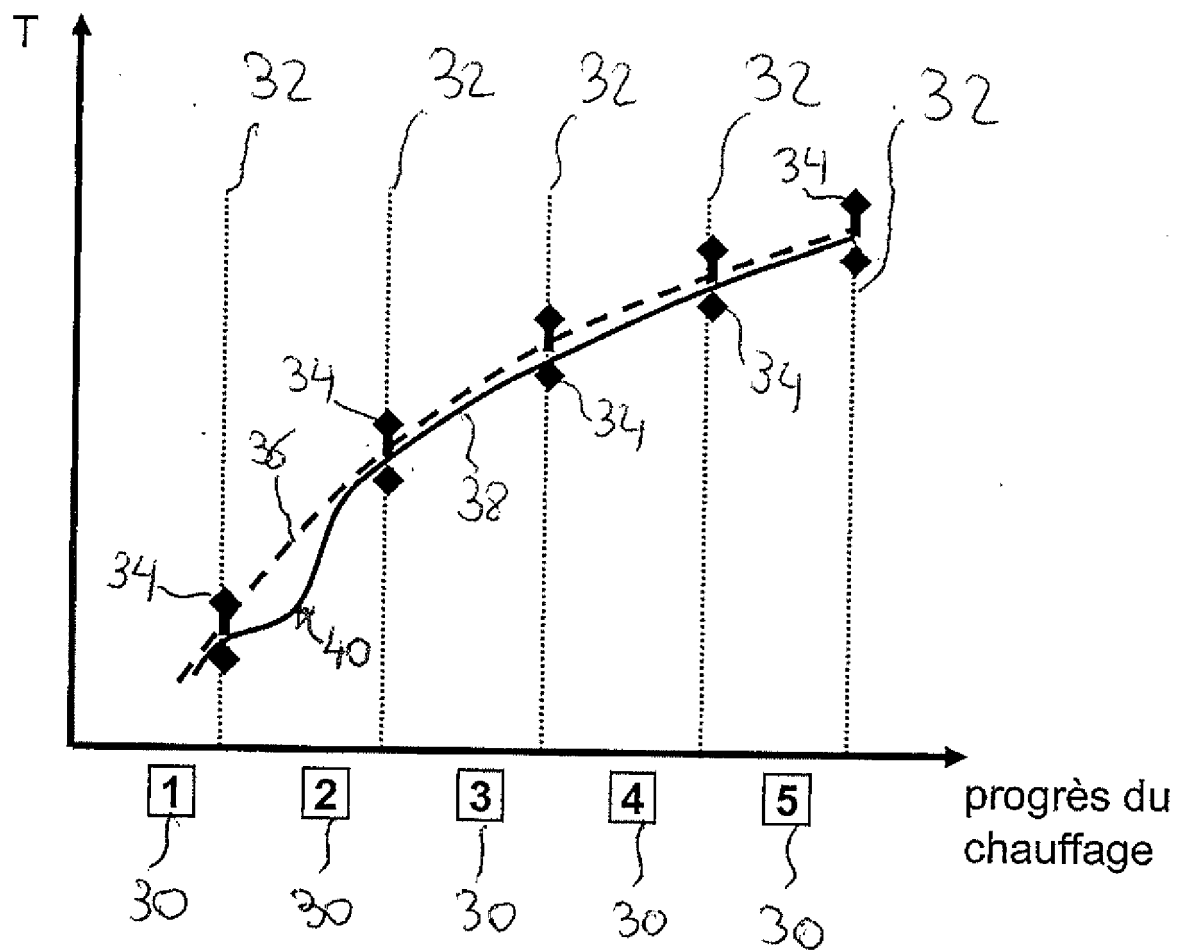


Fig. 5





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 16 16 7875

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	CN 202 306 196 U (SHANDONG XINGKE INTELLIGENT TECHNOLOGY CO LTD) 4 juillet 2012 (2012-07-04) * abrégé *	1,11,12	INV. C21D1/34 F27D19/00 C21D11/00
X	JP H10 204546 A (CHUGAI RO KOGYO KAISHA LTD) 4 août 1998 (1998-08-04) * abrégé; figures 1-3 *	1,11,12	
X	US 5 561 612 A (THAKUR RANDHIR P S [US]) 1 octobre 1996 (1996-10-01) * colonne 3, ligne 65 - colonne 11, ligne 45; revendications 1,12-19; figures 8-10 *	1-13	
A	US 2015/102538 A1 (TAKAHASHI SHINICHI [JP] ET AL) 16 avril 2015 (2015-04-16) * le document en entier *	1-13	
A	GB 2 048 442 A (GEN ELECTRIC) 10 décembre 1980 (1980-12-10) * le document en entier *	1-13	
A	JP 2015 040333 A (JFE STEEL CORP) 2 mars 2015 (2015-03-02) * le document en entier *	1-13	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) C21D F27D G05B
A	US 5 650 026 A (GANYO RICHARD A [US] ET AL) 22 juillet 1997 (1997-07-22) * le document en entier *	1-13	
A	US 5 873 959 A (SCHURKO ROBERT J [US] ET AL) 23 février 1999 (1999-02-23) * le document en entier *	1-13	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 6 octobre 2016	Examineur Gavriliu, Alexandru
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 16 16 7875

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

06-10-2016

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CN 202306196 U	04-07-2012	AUCUN	
JP H10204546 A	04-08-1998	AUCUN	
US 5561612 A	01-10-1996	AUCUN	
US 2015102538 A1	16-04-2015	EP 2871248 A1 JP 5517382 B1 JP W02014007046 A1 KR 20150027099 A US 2015102538 A1 WO 2014007046 A1	13-05-2015 11-06-2014 02-06-2016 11-03-2015 16-04-2015 09-01-2014
GB 2048442 A	10-12-1980	CA 1135957 A DE 3016142 A1 GB 2048442 A JP S6111289 B2 JP S55145120 A US 4257767 A	23-11-1982 13-11-1980 10-12-1980 02-04-1986 12-11-1980 24-03-1981
JP 2015040333 A	02-03-2015	AUCUN	
US 5650026 A	22-07-1997	EP 0778353 A1 US 5650026 A	11-06-1997 22-07-1997
US 5873959 A	23-02-1999	CA 2054423 A1 US 5873959 A	10-02-1993 23-02-1999

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

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 3868094 A [0002] [0003]