

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
28 novembre 2024 (28.11.2024)



(10) Numéro de publication internationale
WO 2024/240751 A1

(51) Classification internationale des brevets :
F23N 1/00 (2006.01) C03B 5/237 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2024/063930

(22) Date de dépôt international :
21 mai 2024 (21.05.2024)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
FR2305081 23 mai 2023 (23.05.2023) FR

(71) Déposant : SAINT-GOBAIN ISOVER [FR/FR] ; Tour
Saint-Gobain, 12 Place de l'Iris, 92400 COURBEVOIE
(FR).

(72) Inventeurs : GUILLET, Thibault ; Norra Malmvägen 76,
Häggvik, 19162 SOLLENTUNA (SE). BARBA ROSSA,
Guillaume ; Tour Saint-Gobain, 12 Place de l'Iris, 92400
COURBEVOIE (FR).

(74) Mandataire : SAINT-GOBAIN RECHERCHE ; 39 Quai
Lucien Lefranc, 93300 AUBERVILLIERS (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,
KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA,
NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO,
RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH,

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR CALIBRATING THE PARAMETERS OF A DEVICE FOR AUTOMATICALLY CONTROLLING A FURNACE

(54) Titre : MÉTHODE ET SYSTÈME POUR CALIBRER LES PARAMÈTRES D'UN DISPOSITIF D'ASSERVISSEMENT D'UN FOUR

[Fig. 3]

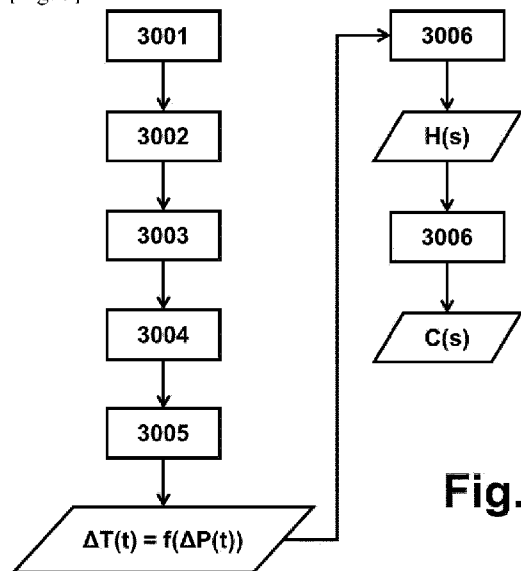


Fig. 3

(57) Abstract: Disclosed is a method for calibrating the parameters of a device for automatically controlling a furnace, preferably a submerged-combustion furnace, for melting a mixture (1001a) of batch materials comprising mineral waste. The method makes it possible to obtain optimal values for the parameters of the transfer function of the automatic-control device. It is based on: - modelling the thermal behaviour of the furnace (1002) using a non-stationary heat transfer function $H(s)$ with, as input data, the variations as a function of time in the temperature ΔT of the mixture (1001a) of molten batch materials; said variations being measured following modification (3004), for a given and limited period of time, of at least one operating parameter of the furnace (1002) selected from the moisture content in the mixture (1001a) of batch materials, the pull of the furnace, the charging rate of the mixture (1001a) of batch materials, the power of the heating means (2002a-c), and/or the amount of organic compounds or of carbon-containing fuels in the mixture (1001a) of batch materials; - modelling the parameters of the transfer function $C(s)$ of the automatic-control device (2010) applied to the modelled transfer function $H(s)$.

(57) Abrégé : Méthode pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement d'un four, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange (1001a) de matières premières comprenant des déchets minéraux. La méthode permet l'obtention de valeurs optimales pour les paramètres de la fonction de transfert du dispositif d'asservissement. Elle repose sur : - la modélisation du comportement thermique du four (1002) à l'aide d'une fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire avec, comme données d'entrée, les variations temporelles de la température ΔT du

TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS,
ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

mélange (1001a) de matières premières en fusion; les dites variations étant mesurées suite à la modification (3004), pour une période donnée et limitée de temps, d'au moins un paramètre de fonctionnement du four (1002) choisi parmi la teneur en humidité dans le mélange (1001a) de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange (1001a) de matières premières, la puissance du moyen de chauffage (2002a-c), et/ou la quantité de composés organiques ou de combustibles carbonés dans le mélange (1001a) de matières premières; - la modélisation des paramètres de la fonction de transfert C(s) du dispositif d'asservissement (2010) appliquée à la fonction H(s) de transfert modélisée.

Description

Titre de l'invention : Méthode et système pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement d'un four

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne une méthode et un système pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement d'un four, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange de matière premières comprenant des déchets minéraux. Elle se rapporte également à un four, de préférence à combustion immergée, qui met en œuvre ladite méthode ou ledit système.

Arrière-plan technique

- [0002] Il est une pratique courante d'employer un four à combustion immergée (FCI), également appelé four à brûleur immergé (FBI), pour la fusion d'un mélange de matières premières vitrifiables. Dans ce type de four, des moyens de combustion tels que des brûleurs oxygène / air - carburant sont directement immergés dans le mélange de matières premières vitrifiables et dans le bain de verre fondu formé. L'injection directe, sous forme d'un flux, des réactifs et des produits gazeux de combustion dans le bain de verre, puis leur expansion et leur remontée rapide, accélèrent la fusion et améliorent l'homogénéité du bain.
- [0003] US 351 413 B, J. T. WAINWRIGHT 26.10.1886 décrit, par exemple, une méthode d'injection d'air et/ou de carburant tel que gaz ou pétrole dans un bain de verre fondu de manière que lesdits gaz circulent et chauffent à travers le bain avant que leur combustion n'ait lieu sous ou à proximité de la surface du bain. Le bain est ainsi constamment remué et mélangé, permettant ainsi de demeurer chaud.
- [0004] US 1 656 828 A, POWELL EDWARD R, 17.01.1928 décrit un procédé et un dispositif de fabrication de laine de roche dans lesquels un mélange de matières premières est introduit dans une cuve verticale munie d'une chambre de combustion inclinée et adjacente. La chambre de combustion comprend un brûleur disposé de manière que les gaz de combustion pénètrent et fondent le mélange de matières premières à la base inférieure de la cuve. A la base de la cuve, une ouverture permet l'écoulement du verre fondu au travers d'un jet d'air pour le soufflage de verre fondu sous la forme de fibres.
- [0005] FR 876569 A, UNION DES VERRERIES MECANIQUES, 10.11.1942 décrit un four à combustion immergée comprenant une cuve verticale munie, dans sa partie inférieure, d'au moins un brûleur immergé avec une pression de fluide de combustion de plus de 0,2 atmosphères et une vitesse supérieure à 30 mètres par seconde.
- [0006] WO 2009 091 558 A1, GAS TECHNOLOGY INST [US] 29.07.2009 décrit un four à

combustion immergée comprenant une cuve avec double paroi à circulation de fluide. La sole du four est munie d'une pluralité de brûleurs immergés dont l'arrangement spatial relatif est optimisé pour améliorer l'homogénéité thermique du bain de verre et réduire le nombre d'infondus.

- [0007] Outre la cuve adaptée à la fusion du mélange de matières premières vitrifiables, un four à combustion immergée peut comprendre une ou plusieurs autres cuves adjacentes et en communication avec la première cuve, dans lesquelles le verre fondu s'écoule depuis la première cuve pour y subir divers traitements tels que, notamment, un affinage.
- [0008] DE 651 687 C, GLASHUETTE ACHERN A G, 18.10.1937 décrit un four comprenant une cuve de fusion verticale et rotative alimentée en matière premières par une ouverture supérieure à l'aide d'une trémie. La cuve comprend, au centre de sa base inférieure, orienté selon l'axe de révolution de la cuve, un brûleur immergé, et est munie, en périphérie de ladite base inférieure, d'ouvertures permettant l'écoulement du verre vers une cuve inférieure d'affinage.
- [0009] GB 1 028 481 A, SELAS CORP OF AMERICA, 04.05.1966 décrit un four muni d'une pluralité de cuves de fusion comprenant chacune, au centre de leur base inférieure, plusieurs brûleurs immergés. Le four comprend en outre une cuve principale d'affinage dans laquelle s'écoule le verre fondu des cuves de fusion.
- [0010] Dans la cadre de la fabrication de fibres minérales, le mélange de matières premières vitrifiables utilisé dans un four à combustion immergée comprend des matières minérales sources d'oxydes, d'hydroxydes et/ou de carbonates de métaux, de métalloïdes, d'alcalins et/ou d'alcalino-terreux dont les proportions relatives sont ajustées de manière à obtenir la composition chimique désirée du verre à l'issue de la fusion.
- [0011] Les matières minérales sont généralement des matières minières telles que, par exemple, le sable de silice, la bauxite, la dolomie, les carbonates de calcium, les carbonates de magnésium et/ou le carbonate de sodium. Elles peuvent être également des co-produits minéraux d'autres industries manufacturières.
- [0012] Néanmoins, dans un objectif de réduction des impacts écologiques des industries manufacturières, notamment de réduction de l'exploitation des ressources naturelles, de la consommation en énergie et des émissions de gaz à effet de serre, il est désormais de pratique courante de substituer tout ou partie des matières premières du mélange par des déchets minéraux dits recyclables.
- [0013] Un premier exemple de déchets minéraux recyclables est le « calcin » dont deux types sont distingués :
- le calcin dit « interne » qui peut comprendre des déchets verriers issus d'un même procédé de manufacture ou d'une même ligne de production de produits verriers et

comprend généralement les rebus de découpe, les produits défectueux détectés et rejetés lors d'un contrôle qualité ou lors des ajustements de compositions de produit ;
- le calcin dit « externe » qui peut comprendre des déchets verriers collectés auprès d'autres procédés ou lignes de manufacture de produits verriers, des consommateurs dans l'objectif de recycler les produits verriers après leur utilisation, par exemple les déchets de déconstruction, les bouteilles en verre, les vitrages usagés....

- [0014] De manière générale, et davantage pour le calcin externe, le calcin est un mélange des débris de verre de couleurs différentes et de compositions différentes. La surface de ces débris peut également être couverte de couches organiques et/ou inorganiques, couches héritées des différents procédés de fonctionnalisation des surfaces pour certaines applications des produits verriers. Enfin, le calcin peut également comprendre un certain nombre de débris de corps étrangers tels que céramique, faïence, porcelaine, terre cuite, plastique, métaux, composants électroniques...
- [0015] Un deuxième exemple de déchets minéraux recyclables sont les déchets de fibres minérales ensimées ou non, c'est-à-dire avec ou sans liant organique. Ces déchets peuvent être issus des industries manufacturières, des chantiers de bâtiment ou autres travaux et/ou de filières de recyclage.
- [0016] Un troisième exemple de déchets minéraux recyclables sont les matières premières issues des filières de valorisation de la biomasse d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique. Cette matière est utilisable comme combustible, mais également comme moyen d'ajustement de la composition de verre et/ou de son état rédox.
- [0017] Par leur origine, les déchets minéraux recyclables, notamment externes, présentent des taux variables d'humidité et/ou de matières organiques. Lorsqu'ils sont introduits dans le four, cette humidité et ces matières organiques modifient le bilan thermique et chimique du four et provoquent des variations brutales de la température du bain de verre. Les processus d'affinage et d'équilibre rédox du bain de verre sont également perturbés. Le régime stationnaire de chauffe et d'affinage du four est alors déstabilisé. Des baisses de rendement ainsi qu'une génération de produits verriers non conformes pour les applications visées, notamment pour la fabrication de fibres minérales, sont susceptibles d'avoir lieu.
- [0018] Il est donc courant de procéder à des traitements préalables des déchets minéraux pour réduire, voire éliminer, l'humidité et les composés organiques qu'ils contiennent.
- [0019] WO 0248612 A1, SAINT GOBAIN [FR] 20.06.2002 décrit, par exemple, un procédé de destruction et/ou d'inertage de déchets minéraux permettant notamment d'obtenir un calcin valorisable pour la fabrication ultérieure de laine minérale. Dans ce procédé, les déchets minéraux sont introduits dans une phase liquide et/ou mousseuse maintenue à une température d'au moins 800°C et préalablement formée dans une cuve munie

- d'un brûleur immergé à partir d'un mélange de matériaux en partie vitrifiables.
- [0020] WO 2006 018 582 A1, SAINT GOBAIN ISOVER [FR] 23.02.2006 décrit un procédé de traitement des déchets minéraux, en particulier des déchets de fibres minérales, dans lequel de l'oxygène pur ou de l'air enrichi en oxygène est injecté dans une masse de matières à recycler, elle-même soumise à une chauffe via des brûleurs immergés. Grâce à la combustion des composés organiques et à la fusion de la masse, il est possible d'obtenir un calcin valorisable pour la fabrication ultérieure de fibres de verre.
- [0021] US 4877449 A, INST GAS TECHNOLOGY [US] 31.10.1989 décrit un four à combustion immergé comprenant une cuve verticale munie, dans sa partie supérieure, au-dessus du bain de verre, d'une grille refroidie sur laquelle sont déposées des charges solides à l'aide d'une trémie. Les gaz de combustion provenant du bain de verre traversent la grille et chauffent les charges solides provoquant leur fusion et l'écoulement, dans le bain de verre, du liquide ainsi formé.
- [0022] Alternativement, il est possible d'introduire directement, c'est-à-dire sans traitement préalable, les déchets verriers dans le bain de verre d'un four, notamment un four à combustion immergée destiné à la fabrication de fibres minérales. Généralement, il est mis en œuvre un asservissement, tel qu'une boucle rétroactive de régulation, d'au moins un paramètre d'opération, de fonctionnement ou de commande du four, qui permet de compenser les perturbations auxquelles est soumis le four par rapport à son régime stationnaire. Une telle approche est rendue possible par la très faible inertie thermique intrinsèque aux fours à combustion immergée, en particulier ceux dotés d'une double paroi à circulation de fluide.
- [0023] EP 2 433 911 A1, JOHNS MANVILLE [US] 28.03.2012 décrit un procédé et un dispositif de recyclage d'un matelas de laine de verre, dans lesquels ledit matelas est introduit dans le bain de verre d'un four à combustion immergée à une vitesse uniforme d'enfournement. Un dispositif d'asservissement PID ou un système de commande prédictive permet la régulation, en sortie, de plusieurs paramètres d'opération du four, en particulier la vitesse des convoyeurs du matelas, à partir de différents signaux d'entrée, tels que la température du bain de verre, la tirée et/ou la débit de carburant et/ou de comburant dans les brûleurs.
- [0024] WO 2022 / 180 345 A1, SAINT GOBAIN ISOVER [FR] 01.09.2022 décrit un procédé de régulation d'un four à combustion immergée alimenté en un mélange humide de laines minérales et/ou de biomasse, dans lequel le débit d'enfournement du mélange ou la puissance des brûleurs immergés est régulée à l'aide d'un dispositif d'asservissement PID à partir d'une mesure du taux d'humidité dudit mélange.

Résumé de l'invention

Problème technique

- [0025] Un inconvénient majeur des procédés comprenant une étape préalable de traitement des déchets minéraux recyclables est qu'ils requièrent des installations ou des traitements plus complexes, et donc des investissements matériels et financiers plus conséquents pour leur mise en œuvre.
- [0026] Il est donc avantageux de privilégier des procédés et systèmes fondés sur une introduction directe, c'est-à-dire sans traitement préalable, dans le four d'un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux. La particularité de ces procédés et systèmes est qu'ils nécessitent l'implémentation et la configuration de systèmes et processus d'asservissement, tels que les boucles de rétroaction, ou des systèmes à commande prédictive.
- [0027] Toutefois, malgré les progrès réalisés dans l'automatisation des systèmes d'asservissement quant à leur configuration et leur calibration, celles-là ne restent pas triviales pour les fours, notamment à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange de matière premières comprenant des déchets minéraux.
- [0028] Les taux d'humidité et la teneur en composés organiques des déchets minéraux sont très variables selon leur origine et leurs conditions de stockage. Ainsi, au cours du temps de fonctionnement d'un four, notamment à combustion immergée, un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux dans des proportions données est fort susceptible de montrer des variations brusques et importantes de son taux d'humidité et de sa teneur en composés organiques.
- [0029] En outre, la proportion de déchets minéraux dans le mélange est susceptible de varier selon les facilités ou difficultés d'approvisionnement en matières premières. Ces variations peuvent également contribuer à des variations brusques et importantes du taux d'humidité et de la teneur en composés organiques du mélange. Comme expliqué précédemment, de telles variations provoquent des perturbations importantes du bilan thermique et chimique du four. Celui-là sort de son régime stationnaire et peut basculer vers des régimes instables.
- [0030] Il est aussi de pratique courante d'ajouter des combustibles organiques minéraux à base de carbone, généralement solide, au mélange 1001a de matières premières. Ces combustibles constituent une source d'énergie supplémentaire pour le four et sont souvent issus des filières de revalorisation énergétique. Le type et la quantité de combustible peuvent être très variables selon leur origine et leur disponibilité sur le marché. Un exemple typique de combustible peut être le coke de charbon ou de pétrole.
- [0031] Or, il a été constaté que les systèmes d'asservissement, configurés et calibrés de manière automatique, sont en général incapables de corriger ou de compenser, de

manière rapidement convergente et avec des amplitudes limitées de dépassement de consigne, les perturbations engendrées par des variations brusques et intenses du taux d'humidité et de la teneur en composés organiques ou de combustibles carbonés du mélange de matières premières.

[0032] Il demeure donc un besoin d'une méthode et d'un système permettant une calibration fiable et efficace des dispositifs d'asservissement d'un four, notamment à combustion immergée, permettant une réponse rapidement convergente en cas de variation brusques et intenses du taux d'humidité et/ou de la teneur en composés organiques ou de combustibles carbonés d'un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux.

Solution au problème technique

[0033] Dans un premier aspect de l'invention, il est fourni une méthode pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement d'un four, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux

- ledit four comprend au moins une cuve équipée d'au moins un moyen de chauffage, de préférence sous forme d'au moins un brûleur immergé, et au moins un dispositif d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen de chauffage selon une température, T_0 , de consigne ;

- ladite cuve est adaptée à la fusion d'un mélange de matières premières ;
- ledit cuve comprend au moins un dispositif de mesure de température ;
- ledit dispositif de mesure de température est configuré pour la mesure continue de la température dudit mélange de matières premières en fusion, et connecté audit dispositif d'asservissement ;

ladite méthode comprend les étapes suivantes :

- (a) l'introduction continue d'un mélange de matières premières de composition donnée dans la cuve ;

- (b) la mesure continue de la température du mélange de matières premières en fusion à l'aide du dispositif de mesure de température ;

- (c) la chauffe stationnaire du mélange de matières premières en fusion selon une température, T_i , donnée ;

- (d) la modification, pour une période donnée et limitée de temps, sans régulation active par le dispositif d'asservissement, d'au moins un paramètre de fonctionnement du four choisi parmi la teneur en humidité dans le mélange de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange de matières premières, la puissance du moyen de chauffage, et/ou la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés dans le mélange de matières premières ;

- (e) la mesure des variations temporelles de la température, ΔT , du mélange de

matières premières en fusion et de la puissance ΔP du moyen de chauffage;

(f) la modélisation, à l'aide d'un dispositif de traitement de données, du comportement thermique du four à l'aide d'une fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire avec, comme données d'entrée, les variations temporelles de la température ΔT du mélange de matières premières en fusion et du au moins un paramètre de fonctionnement modifié à l'étape (d) ;

(g) la modélisation, à l'aide d'un dispositif de traitement de données, des paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif d'asservissement appliquée à la fonction $H(s)$ de transfert modélisée à l'étape (f).

[0034] Selon d'autres modes avantageux de réalisation :

- la fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire est modélisée à l'aide d'une fonction de transfert de réponse de premier ordre avec ou sans temps mort ;

- à l'étape (d), au moins deux paramètres, de préférence trois paramètres, sont modifiés séquentiellement ou parallèlement ;

- à l'étape (d), la teneur en humidité dans le mélange de matières premières est modifiée de sorte que la variation de la teneur en humidité dudit mélange est comprise entre 0 et 10 %, et/ou la tirée du four est modifiée de sorte que la variation relative de ladite tirée est comprise entre 0 et 2000kg/h ;

- à l'étape (d), la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés dans le mélange de matières premières est modifiée de sorte que la variation relative de ladite quantité de composés organiques ou combustibles carbonés est comprise entre 0 et 15% en poids, de préférence entre 0 et 10% en poids ;

- à l'étape (d), la puissance du moyen de chauffage est modifiée de sorte que la variation relative de ladite puissance par rapport à la puissance initiale est entre 0 et 100%, de préférence 0 et 50%, voire entre 0 et 25% ;

- le dispositif d'asservissement est un régulateur Proportionnel – Intégral – Dérivé (PID) ;

- à l'étape (g), la fonction $H(s)$ de transfert du four prend en outre, en données d'entrées, un ensemble de valeurs simulées, $I(s)$, des variations de la teneur en humidité dans le mélange de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange de matières premières, la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés et/ou la valeur de la température, T_0 , de consigne ;

- les valeurs de la teneur en humidité dans le mélange de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange de matières premières, et/ou la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés sont simulées sous la forme d'un signal aléatoire, tel qu'un bruit blanc ou un bruit rose.

[0035] La méthode selon l'invention peut être utilisée pour la calibration d'un dispositif

d'asservissement d'un four, de préférence à combustion immergée pour la fusion d'un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux.

[0036] Dit autrement, l'invention concerne également l'utilisation d'une méthode selon l'invention pour la calibration d'un dispositif d'asservissement d'un four, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux.

[0037] Dans un deuxième aspect de l'invention, il est fourni un système pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement d'un four, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux,

- le four comprend au moins une cuve équipée d'au moins un moyen de chauffage sous forme d'au moins un brûleur immergé ;

- la cuve est adaptée à la fusion d'un mélange de matières premières ;

ledit système comprend :

- au moins un dispositif de mesure de température, ledit un dispositif de mesure de température étant configuré pour la mesure continue de la température dudit mélange de matières premières en fusion ;

- au moins un dispositif d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen de chauffage ; les paramètres de l'équation de transfert $C(s)$ dudit dispositif d'asservissement étant calibrés à l'aide d'une méthode selon l'invention.

[0038] Dans un troisième aspect de l'invention, il est fourni un four, notamment à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux, dans lequel est implémenté une méthode selon le premier aspect de l'invention.

[0039] Le four, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux, ledit four comprend :

- une première cuve adaptée à la fusion d'un mélange de matières premières et équipée d'au moins un moyen de chauffage sous forme d'au moins un brûleur immergé,

- au moins un dispositif de mesure de température configuré pour la mesure continue de la température dudit mélange de matières premières en fusion ;

- au moins un dispositif d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen de chauffage et pour recevoir au moins une mesure continue de la température à l'aide dudit dispositif de mesure de température ; les valeurs des paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif d'asservissement étant fixées à partir de valeurs obtenues à l'aide d'une méthode de calibration selon l'invention.

[0040] Selon d'autres modes avantageux de réalisation :

- le four est tel que le moyen de chauffage est un brûleur immergé oxygène / air

- carburant et le dispositif d'asservissement est en outre configuré pour réguler la puissance dudit brûleur immergé en ajustant le débit de carburant injecté dans ledit brûleur en conservant un rapport débit d'oxygène sur débit de carburant constant ;
- [0041] – le four est tel que le moyen de chauffage est un brûleur immergé oxygène / air - carburant et le dispositif d'asservissement est en outre configuré pour injecter de l'oxygène ou de l'air selon un débit total constant d'oxygène ou d'air dans ledit brûleur et dans un bouillonneur, et selon un rapport débit d'oxygène ou d'air sur débit de carburant constant dans le brûleur lorsque la puissance du brûleur immergé varie.
- [0042] Dans un quatrième aspect de l'invention, il est fourni une installation pour la fabrication de fibres minérales comprenant un four à combustion immergée selon le quatrième aspect de l'invention.

Avantages de l'invention

- [0043] Un premier avantage remarquable de l'invention est l'obtention de valeurs optimales pour les paramètres de la fonction de transfert du dispositif d'asservissement d'un four à combustion immergée. Lorsque le four est régulé par un dispositif d'asservissement ainsi calibré, la température du four converge rapidement vers la température de consigne du four en cas de variations brusques et intenses de la température, T_0 , de consigne, la teneur en humidité dans le mélange 1001a de matières premières, de la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange 1001a de matières premières, et/ou de la quantité de composés organiques ou de combustibles carbonés dans le mélange 1001a de matières premières.
- [0044] Un deuxième avantage remarquable est qu'il est possible de modéliser, ou encore de simuler différentes valeurs pour les paramètres de la fonction de transfert du dispositif d'asservissement et de sélectionner celles permettant une régulation optimale du four sans qu'il y ait nécessité d'implémenter physiquement des tests de perturbation sur le four pour évaluer ladite calibration. Le réglage du dispositif d'asservissement requiert donc une moindre sollicitation du four.

Brève description des dessins

- [0045] [Fig.1] est une représentation schématique d'un exemple de ligne de manufacture de fibres de verre ou de roche.
- [0046] [Fig.2] est une représentation schématique en section d'un four à combustion immergée pour la fusion d'un mélange de matière premières comprenant des déchets minéraux.
- [0047] [Fig.3] est un ordinogramme d'une méthode selon le premier aspect de l'invention.
- [0048] [Fig.4] est une représentation graphique de l'évolution de la température d'un four à combustion immergée en fonction du temps après une diminution brutale de sa puissance.

- [0049] [Fig.5] est un exemple de schéma fonctionnel d'un dispositif d'asservissement selon certains modes de réalisation.
- [0050] [Fig.6] est une représentation graphique d'un exemple d'évolution temporelle de la puissance, exprimée en variation relative à la puissance de base, liée aux variations temporelles de la teneur en humidité (cadre supérieur) et de la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés (cadre inférieur).
- [0051] [Fig.7] est une représentation graphique de l'évolution temporelle de puissance (cadre inférieur) et de température (ligne continue, cadre supérieur) d'un four dont les valeurs des paramètres de la fonction de transfert de son dispositif d'asservissement sont préalablement ajustées conformément à l'invention.
- [0052] [Fig.8] est une représentation graphique de l'évolution temporelle de la température (cadre supérieur) et de la puissance (cadre central) d'un four en fonction des variations de la teneur en humidité et de la quantité de matières organiques du mélange de matières premières, et de la tirée du four.

Description détaillée de modes de réalisation

- [0053] En référence à la [Fig.1], une ligne 1000 manufacture de fibres de verre ou de roche par la méthode de centrifugation interne comprend généralement :
- des silos 1001 pour stoker les matières premières 1001a, par exemple des composés minéraux et/ou du calcin ;
 - un four 1002 de fusion de verre ou de roche pour fondre les matières premières 1001a ;
 - un convoyeur 1003 pour transporter les matières premières 1001a depuis les silos 1001 jusqu'au four 1002 ;
 - un ou plusieurs outils de fibrage 1005a, 1005b, 1005c alimentés en verre ou en roche en fusion 1006 ;
 - un canal 1004 ouvert ou fermé d'alimentation pourvu d'ouvertures situées juste au-dessus de chaque outil de fibrage 1005a, 1005b, 1005c pour les alimenter en verre ou en roche en fusion 1006.
- [0054] En référence à la [Fig.2], un four 1002 à combustion immergée comprend généralement au moins une cuve 2001 de fusion en réfractaire munie à sa base d'une série de brûleurs immergés 2002a-c de type comburant-carburant, par exemple oxygène-gaz, air-fuel ou oxygène-fuel. Le four 1002 est alimenté en mélange 1001a de matières premières par un convoyeur 1003 à vis via une ouverture aménagée sur sa paroi latérale. L'ouverture peut être immergée ou émergée. Les brûleurs immergés 2002a-c assurent la fusion du mélange 1001a et le brassage de la fonte 2004.
- [0055] Le four 1002 peut comprendre une deuxième cuve 2005, par exemple une cuve d'affinage, dans laquelle la fonte 2004 s'écoule via une gorge 2006 aménagée à cet effet. La deuxième cuve 2005 peut être munie d'une pluralité de brûleurs 2007 à

flamme disposés au-dessus de la surface de la fonte 2004, d'électrodes immergées ou non et d'un moyen 2008 d'approvisionnement en agent affinant, oxydant et/ou réducteur. Le moyen 2088 d'approvisionnement en agent oxydant ou réducteur peut également être disposé dans la première cuve 2001.

- [0056] Le séjour de la fonte 2004 dans la deuxième cuve en poursuit l'homogénéisation thermique et chimique et permet l'ajustement de son état rédox conformément aux spécifications. Au terme de ce séjour, la fonte 2004 constitue le verre ou la roche en fusion 1006 qui est ensuite acheminée vers des outils de formage, tels que des outils de fibrage 1005a-c via le canal 1004, des outils de manufacture de granulats verriers, ou encore des outils de moulage.
- [0057] La cuve 2001 de fusion dispose d'un dispositif 2009 de mesure de la température, par exemple un thermocouple 2007, immergé ou non, configuré pour une mesure continue de la température, T , dudit mélange 1001a de matières premières en fusion, c'est-à-dire la fonte 2004. Le dispositif de mesure de température est généralement connecté à un dispositif d'asservissement 2010, tel qu'un régulateur Proportionnel – Intégral – Dérivé (PID), permettant la régulation du four selon une température de consigne, T_0 . La température de consigne, T_0 , peut être une valeur fixe ou un profil temporel.
- [0058] Le dispositif d'asservissement 2010 est connecté aux contrôleurs (non représentés) des brûleurs immergés et en ajuste la puissance de sorte que la température, T , de la fonte 2004, atteigne la température, T_0 , de consigne. Dans le cas des brûleurs oxygène-carburant, la puissance des brûleurs est ajustée par variation des débits d'oxygène, de carburant et/ou du rapport de ces deux débits.
- [0059] Le dispositif 2010 d'asservissement peut en outre être configuré pour contrôler la quantité ou le débit d'agent oxydant et réducteur acheminé via le moyen 2008 d'approvisionnement. Ce contrôle peut être exercé via une connexion au dispositif de commande (non représenté) du moyen 2008 d'approvisionnement. Par exemple, le moyen 2008 d'approvisionnement est un convoyeur, le dispositif de commande peut en varier la vitesse de convoyage selon une valeur de consigne fournie par le dispositif d'asservissement 2010.
- [0060] En référence aux [Fig.2] et 3, dans un premier aspect de l'invention, il est fourni une méthode 3000 pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement 2010 d'un four 1002, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange 1001a de matière premières comprenant des déchets minéraux,
- ledit four 1002 comprend au moins une cuve 2001 équipée d'au moins un moyen de chauffage 2002a-c, de préférence sous forme d'au moins un brûleur immergé, et au moins un dispositif 2010 d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen de chauffage 2002a-c ;
 - ladite cuve 2001 est adaptée à la fusion 2004 d'un mélange 1001a de matières

premières ;

- ledit cuve 2001 comprend au moins un dispositif 2009 de mesure de température;
- ledit dispositif 2009 de mesure de température est configuré pour la mesure continue de la température dudit mélange 1001a de matières premières en fusion 2004, et connecté audit dispositif d'asservissement 2010 ;

ladite méthode 3000 comprend les étapes suivantes :

- (a) l'introduction 3001 continue d'un mélange 1001a de matières premières de composition donnée dans la cuve 2001 ;
- (b) la mesure 3002 continue de la température du mélange 1001a de matières premières en fusion 2004 à l'aide du dispositif 2009 de mesure de température;
- (c) la chauffe 3003 stationnaire du mélange 1001a de matières premières en fusion 2004 selon une température, T_i , donnée ;
- (d) la modification 3004, pour une période donnée et limitée de temps, sans régulation active par le dispositif 2010 d'asservissement, d'au moins un paramètre de fonctionnement du four 1002 choisi parmi la teneur en humidité dans le mélange 1001a de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange 1001a de matières premières, la puissance du moyen de chauffage 2002a-c, et/ou la quantité de composés organiques ou de combustibles carbonés dans le mélange 1001a de matières premières ;
- (e) la mesure 3005 des variations temporelles de la température, ΔT , du mélange de matières premières 1001a en fusion 2004;
- (f) la modélisation 3006, à l'aide d'un dispositif de traitement de données, du comportement thermique du four 1002 à l'aide d'une fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire avec, comme données d'entrée, les variations temporelles de la température, ΔT , du mélange 1001a de matières premières en fusion et du au moins un paramètre de fonctionnement modifié à l'étape (d) ;
- (g) la modélisation 3007, à l'aide d'un dispositif de traitement de données, des paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif d'asservissement 2010 appliquée à la fonction $H(s)$ de transfert modélisée à l'étape (f).

[0061] Le dispositif 2009 de mesure de température peut être un thermocouple ou un pyromètre.

[0062] Dans le cadre de l'invention, il est entendu par « combustibles carbonés » tout type de combustible organique minéral à base de carbone, de préférence solide, pouvant être ajouté au mélange 1001a de matières premières. Un exemple de combustible carboné peut être le coke de charbon ou de pétrole.

[0063] Les étapes (f) et (g) de modélisation sont généralement exécutées à l'aide d'un dispositif de traitement de données. Un exemple de dispositif peut être un dispositif configuré pour exécuter automatiquement des séquences d'opérations arithmétiques ou

logiques pour réaliser des tâches ou des actions. Un tel dispositif, généralement appelé ordinateur, peut comprendre une ou plusieurs unités centrales de traitement (CPU) et au moins un dispositif de contrôle adaptés pour exécuter ces opérations.

[0064] Le dispositif peut également comprendre d'autres composants électroniques tels que des interfaces d'entrée/sortie, des dispositifs de stockage non volatils ou volatils, et des bus de communication pour le transfert de données entre les composants à l'intérieur du dispositif. L'un des dispositifs d'entrée/sortie peut être une interface utilisateur pour l'interaction homme-machine, par exemple une interface utilisateur graphique pour afficher des informations compréhensibles par l'homme.

[0065] Le dispositif de traitement des données peut avantageusement comprendre une ou plusieurs unités de traitement graphique (GPU) dont la structure parallèle les rend plus efficaces que les unités centrales de traitement dans l'exécution de calculs complexes.

[0066] L'étape (g) de modélisation du comportement thermique du four 1002 à l'aide d'une fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire permet d'avoir l'obtention d'un modèle numérique du four 1002 à partir duquel il est possible de modéliser les paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif d'asservissement 2010 sans qu'il soit nécessaire d'intervenir physiquement sur le four 1002 pour mettre en œuvre cette modélisation. En d'autres termes, la fonction $H(s)$ de transfert fournit un modèle du four 1002 sur lequel le dispositif d'asservissement 2010 peut être appliqué, via sa fonction $C(s)$ de transfert, afin, dans l'étape (g), de déterminer les valeurs des paramètres dudit dispositif pour une régulation optimale du four 1002.

[0067] Grâce à la méthode selon le premier aspect de l'invention, il est donc possible de modéliser, ou encore de simuler, différentes valeurs pour les paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ et de sélectionner celles permettant une régulation optimale du four 1002 sans qu'il y ait nécessité d'implémenter physiquement des tests sur le four 1002 pour l'évaluer. Un avantage remarquable est que le four 1002 est considérablement moins sollicité pour le réglage du dispositif d'asservissement 2010.

[0068] Dans l'étape (f), le comportement thermique du four 1002 est modélisé à l'aide d'une fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire.

[0069] Selon un exemple de mode de réalisation, l'équilibre thermique du four 1002 peut être modélisé à l'aide de l'équation suivante :

$$Mc_p \frac{\partial T(t)}{\partial t} = P(t) - \varphi + I(t) \text{ où } T \text{ est la température du four 1002 y compris la fonte}$$

2004, t est le temps, M est la masse du four 1002 y compris la fonte 2004 qu'il contient, c_p est la capacité thermique massique du four y compris la fonte 2004, $P(t)$ est la puissance du moyen de chauffe à l'instant t , φ est la puissance nécessaire pour fondre le mélange 1001a de matières premières selon une vitesse d'enfournement donnée, et $I(t) = \delta(t) + \Omega(t)$ est la variation instantanée de puissance liée aux variations

temporelles de la teneur, $\delta(t)$, en humidité δ et de la quantité $\Omega(t)$ de composés organiques ou combustibles carbonés dans le mélange 1001a de matières premières.

[0070] La puissance $I(t)$ peut comprendre en outre les variations temporelles de la tirée $\psi(t)$ du four et/ou la vitesse $v(t)$ d'enfournement du mélange 1001a de matières premières.

[0071] Généralement, dans le cas de transferts thermiques de type convectif, la puissance φ varie proportionnellement à l'écart entre la température $T(t)$ du four 1002 y compris la fonte 2004 à l'instant t et une température dite fictive T_p de couche limite. La température T_p de couche limite peut être interprétée comme une température représentative de la température de la fonte 2004 à proximité des parois du four 1002 et du mélange 1001a de matières premières non fondues. La puissance φ peut alors être estimée à l'aide de la relation suivante :

$$\varphi = \beta(T(t) - T_p) \text{ où } \beta \text{ et } T_p \text{ sont des constantes inconnues a priori.}$$

[0072] En posant $x(t) = T(t) - T_0$ et $u(t) = P(t) - P_0$, avec T_0 la température de consigne et P_0 la puissance de base pour atteindre la température T_0 de consigne sans perturbation, c'est-à-dire avec $I(t) = 0$, une fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire dans le domaine de Laplace peut être :

$$X(s) = H(s)[U(s) + I(s)]$$

[0073] avec

$$H(s) = \frac{1}{Mc_p s + \beta} = \frac{1}{\beta} \left(\frac{\gamma}{s + \gamma} \right)$$

[0074] et

$$\gamma = \frac{\beta}{Mc_p}$$

[0075] A l'état initial, c'est-à-dire avant toute perturbation du four 1002, la température, $T(t)$, du four 1002 suit la température de consigne, T_0 , soit $T(t) = T_0$ pour la puissance de base, P_0 :

$$\beta = \frac{P_0}{(T_0 - T_p)}$$

[0076] Et

$$H(s) = \frac{(T_0 - T_p)}{P_0} \left(\frac{\gamma}{s + \gamma} \right)$$

[0077] Les grandeurs M , c_p , T_p et β ne sont généralement pas connues et dépendent de la structure du four 1002, de ses matériaux constitutifs, de la nature chimique de la fonte 2004 et de sa quantité. β dépend également de la vitesse d'enfournement du mélange 1001a de matières premières.

[0078] Conformément au premier aspect de l'invention, la modélisation du comportement thermique du four 1002 est modélisé à l'aide de la fonction $H(s)$ de transfert avec, comme données d'entrée, les variations temporelles de la température ΔT du mélange 1001a de matières premières en fusion et du paramètre de fonctionnement modifié à

l'étape (d). Les variations temporelles de la température ΔT du mélange 1001a de matières premières en fusion et du paramètre de fonctionnement modifié à l'étape (d) peuvent être interprétés comme les conséquences d'une perturbation introduite par la modification, à l'étape (d), d'au moins un paramètre de fonctionnement du four. L'exploitation de cette perturbation permet de calculer les paramètres de la fonction $H(s)$ de transfert, notamment la constante γ et la température T_p .

[0079] Selon certains modes de réalisation, la fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire est modélisée à l'aide d'une fonction de transfert de réponse de premier ordre avec ou sans temps mort.

[0080] Généralement, les fours à combustion immergée présentent une certaine inertie et lorsqu'un de leurs paramètres de fonctionnement est brusquement modifié, sous la forme d'une impulsion, la réponse dudit four 1002 n'est pas immédiate. Le four 1002 montre un délai de réponse à la perturbation.

[0081] Selon un exemple de mode de réalisation, pour une réponse impulsionnelle en puissance, par exemple à la suite d'une variation brusque de puissance sous la forme d'un pas unitaire $U(s) = \Delta P/s$, et une variation nulle, $\Delta I = \Delta \delta + \Delta \Omega = 0$, de la teneur en humidité et de la quantité de composés organiques, la réponse peut être écrite sous la forme :

$$X(s) = H(s) \frac{\Delta P}{s} = \frac{(T_0 - T_p)}{P_0} \left(\frac{\gamma}{s(s+\gamma)} \right) \Delta P$$

[0082] Où $\Delta P = P_1 - P_0$ est la variation, sous la forme d'un pas unitaire, de la puissance P_0 initiale à la puissance P_1 différente de P_0 .

[0083] Dans le domaine temporel, cette fonction a pour expression, pour $t > 0$:

$$f(t) = \frac{(P_1 - P_0)}{P_0} (T_0 - T_p) (1 - e^{-\gamma t})$$

[0084] Les valeurs des paramètre γ et T_p peuvent être obtenues en procédant à un ajustement de fonction $f(t)$ sur les variations temporelles de la température ΔT du mélange 1001a de matières premières en fusion et de la puissance ΔP du moyen de chauffage 2002a-c.

[0085] A l'étape (d), pour une période donnée et limitée de temps, sans régulation active par le dispositif 2010 d'asservissement, est modifié au moins un paramètre de fonctionnement du four 1002 choisi parmi la teneur en humidité dans le mélange 1001a de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange 1001a de matières premières, la puissance, du moyen de chauffage 2002a-c, et/ou la quantité de composés organiques ou de combustibles carbonés dans le mélange 1001a de matières premières.

[0086] Le nombre et la nature des paramètres de fonctionnement à modifier dépend de la composition du mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux et de la précision recherchée pour la calibration des paramètres d'asservissement.

[0087] Selon certains modes de réalisation, à l'étape (d), au moins deux paramètres, voire au

moins trois paramètres, de fonctionnement sont modifiés séquentiellement ou parallèlement. La modification d'au moins deux, voire trois paramètres, est généralement suffisante pour une modélisation représentative du comportement thermique d'un four, notamment à combustion immergée et, in fine, une modélisation précise des paramètres de la fonction de transfert du dispositif 2010 d'asservissement pour une régulation efficace.

- [0088] Comme discuté précédemment, les taux d'humidité et la teneur en composés organiques ou en combustibles carbonés des déchets minéraux peuvent être très variables selon leur origine et leurs conditions de stockage. Au cours du temps de fonctionnement d'un four à combustion immergée, un mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux dans des proportions données peut montrer des variations brusques et importantes de son taux d'humidité et de sa teneur en composés organiques ou en combustibles carbonés.
- [0089] Ainsi, selon certains modes de réalisation, à l'étape (d), la teneur en humidité dans le mélange 1001a de matières premières est modifiée de sorte que la variation de la teneur en humidité dudit mélange est comprise entre 0 et 10 %, et/ou la tirée du four est modifiée de sorte que la variation relative de ladite tirée est comprise entre 0 et 2000kg/h.
- [0090] Ces intervalles de variation en tirée des fours et en teneur en humidité des mélanges de matière premières comprenant des déchets minéraux permettent une calibration efficace des dispositifs d'asservissement des fours, notamment à combustion immergée.
- [0091] Selon certains modes de réalisation, le four 1002 peut comprendre au moins un moyen 2011 de mesure de l'humidité dudit mélange 1001a de matières premières. Ce moyen peut être tout type de capteur d'humidité adapté à la mesure de l'humidité du mélange 1001a de matières premières. Il peut être disposé au niveau du convoyeur 1003 juste avant l'enfournement, ou encore, plus en amont, dans les silos 1001 de stockage. Le moyen 2011 de mesure de l'humidité permet une mesure précise de la variation de la teneur en humidité du mélange 1001a à l'étape (d).
- [0092] Selon d'autres modes de réalisation, à l'étape (d), la quantité de composés organiques dans le mélange 1001a de matières premières est modifiée de sorte que la variation relative de ladite quantité de composés organiques ou combustibles carbonés est comprise entre 0 et 15% en poids, de préférence entre 0 et 10% en poids.
- [0093] Ces intervalles de variation en quantité de composés organiques permettent une modélisation de la fonction $H(s)$ de transfert du four 1002 et, ensuite, de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif 2010 d'asservissement qui, lorsque cette dernière est à terme implémentée dans un dispositif 2010 entraîne une convergence rapide de la température du four 1002 à la température de consigne en cas de variation brusques et

intenses de la teneur en composés organiques ou en combustibles carbonés du mélange de matières premières comprenant des déchets minéraux.

- [0094] Selon d'autres modes de réalisation, complémentaires ou non, à l'étape (d), la puissance du moyen de chauffage (2002a-c) est modifiée de sorte que la variation relative de ladite puissance par rapport à la puissance initiale est entre 0 et 100%, de préférence 0 et 50%, voire entre 0 et 25%.
- [0095] A titre d'exemple illustratif, la [Fig.4] représente l'évolution de la température (ligne en pointillés) d'un four à combustion immergée en fonction du temps après l'introduction de 5,7% massique de coke dans un mélange 1001a de matières premières suivi d'une diminution brutale de la puissance du four de 287kW à 173kW. A l'introduction du coke, en raison de l'énergie libérée par sa combustion, la température du four 1002, initialement à $T_0 = 1175^\circ\text{C}$, a augmenté pour atteindre 1288°C . Sur la [Fig.4], le temps $t=0$ correspond au moment où la puissance est brutalement diminuée, sous la forme d'un pas unitaire, de 287kW à 173kW. L'évolution de la température est représentée par les figurés en forme de points.
- [0096] La réponse $f(t)$ précédemment décrite pour une réponse impulsionnelle peut s'écrire avec $P_0 = 287\text{kW}$, $P_1 = 173\text{kW}$ et $T_0 = 1175^\circ\text{C}$:
- $$f(t) = \frac{(173-287)}{287} (1175 - T_p) (1 - e^{-\gamma t})$$
- [0097] Pour déterminer les valeurs des paramètres T_p et γ , la réponse $f(t)$ peut être ajustée sur les données de la [Fig.4] à l'aide d'une méthode des moindres carrés avec T_p et γ comme paramètres d'ajustement. L'ajustement optimal, illustré sur la [Fig.4] par la ligne pleine, permet d'obtenir les valeurs suivantes pour les paramètres T_p et γ :
- $$T_p = 888^\circ\text{C}, \gamma = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{Hz}$$
- [0098] La fonction $H(s)$ de transfert permettant de modéliser le comportement thermique dans le présent exemple peut donc s'écrire :
- $$H(s) = \frac{(1175-888)}{287} \left(\frac{5,8 \cdot 10^{-4}}{s + 5,8 \cdot 10^{-4}} \right)$$
- [0099] Et la grandeur Mc_p , représentant la capacité thermique du four 1002 indépendante de sa masse, peut être calculée :
- $$Mc_p \approx 1.7 \text{ MJ/K}$$
- [0100] A l'étape (g), les paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif d'asservissement 2010 sont modélisés en l'appliquant à la fonction $H(s)$ de transfert du four 1002, obtenue à l'étape (f).
- [0101] Une fois le comportement thermique du four 1002 modélisé à l'aide de la fonction $H(s)$ de transfert, il est possible de modéliser les paramètres de la fonction $C(s)$ de transfert du dispositif d'asservissement 2010 appliquée à la fonction $H(s)$ de transfert du four.
- [0102] Cette modélisation peut notamment être mise en œuvre par simulation afin de

déterminer de manière ex-situ les valeurs optimales des paramètres de la fonction $C(s)$ de transfert pour une régulation efficace du four 1002. Les logiciels de calcul numérique tels que Matlab ou Scilab mettent à disposition des fonctions et algorithmes adaptées à ce type de simulation.

[0103] En référence à la [Fig.5], un exemple de modélisation peut consister en boucle itérative d'optimisation dans laquelle les paramètres de la fonction $C(s)$ de transfert du dispositif d'asservissement sont ajustés jusqu'à ce que la puissance P de consigne calculée par ladite fonction $C(s)$ à partir d'un écart ε entre la température T du four 1002 et une température T_0 de consigne pour ledit four 1002 permet au four 1002 d'atteindre ladite température T_0 de consigne lorsque ladite puissance P augmentée de la puissance $I(s)$ est fournie, en donnée d'entrée, à la fonction $H(s)$ de transfert du four 1002. $I(s) = \delta(s) + \Omega(s)$ est la variation instantanée de puissance liée aux variations temporelle de la teneur, $\delta(s)$, en humidité δ et de la quantité $\Omega(s)$ de composés organiques ou combustibles carbonés dans le mélange 1001a de matières premières.

[0104] Lors de l'exécution de la boucle itérative d'exécution, les paramètres de la fonction $C(s)$ de transfert du dispositif d'asservissement 2010 peuvent être ajustés manuellement, à l'aide d'une méthode d'ajustement telle que la méthode Ziegler–Nichols, la méthode Cohen–Coon, la méthode Åström–Hägglund, ou encore automatiquement à l'aide d'une méthode d'optimisation numérique.

[0105] Avec la fonction $H(s)$ de transfert de l'exemple de la [Fig.4], le diagramme de la [Fig.5] peut, par exemple, se transcrire à l'aide de la formule suivante :

$$X(s) = H(s) (U(s) + I(s)) U(s) = C(s) \varepsilon(s)$$

[0106] Avec $\varepsilon(t) = -x(t)$. D'où :

$$X(s) = \frac{H(s)}{1+H(s)C(s)} I(s)$$

[0107] Selon des modes préférés de réalisation, le dispositif 2010 d'asservissement est un régulateur Proportionnel – Intégral – Dérivé (PID).

[0108] La fonction $C(s)$ de transfert du dispositif d'asservissement 2010 peut s'écrire dans le domaine de Laplace :

$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$ ou K_p , K_i et K_d sont respectivement les paramètres ou gains proportionnel, intégral, et dérivé.

[0109] Selon une autre écriture, la fonction $C(s)$ de transfert peut avoir la forme suivante :

$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$ où τ_i et τ_d sont respectivement les constantes de temps d'intégration et de dérivé et, $\tau_i = K_p/K_i = K_p T_i$ et $\tau_d = K_d/K_p = T_d/K_p$.

[0110] Il a été constaté que, dans la plupart des fours industriels, les mesures de température, T , du mélange 1001a de matières premières en fusion 2004 peuvent être affectées d'un bruit important. Afin d'éviter les divergences de régulation, il peut être avantageux de négliger le terme dérive de la fonction $C(s)$ de transfert sans qu'il y ait d'incidence

notoire sur les performances de régulation du dispositif d'asservissement.

[0111] La fonction $C(s)$ peut alors s'écrire :

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s}$$

[0112] Ou encore $C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$

[0113] La fonction $C(s)$ de transfert permet de calculer, en temps réel, un gain pour la correction de la consigne des régulateurs de puissance du moyen 2002a-c de chauffage sous forme d'au moins un brûleur immergé. L'unité du gain dépend du type de régulateur utilisé. Par exemple, dans le cas d'un brûleur immergé, il peut correspondre à un pourcentage du débit de combustible, par exemple, un débit volumique de gaz, injecté dans le brûleur. La valeur du débit peut être liée à un niveau de puissance du brûleur selon une relation linéaire.

[0114] A partir de l'exemple précédent, la valeur de consigne en sortie du dispositif 2010 d'asservissement peut s'écrire selon la relation suivante :

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \varepsilon(s)$$

[0115] La puissance, P , de consigne en entrée du four 1002 peut s'écrire :

$$P = P_0 + K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t \varepsilon(t') dt' \right)$$

[0116] La modélisation des paramètres, K_p et τ_i , de la fonction $C(s)$ de transfert du dispositif d'asservissement 2010 peut alors consister à en ajuster les valeurs qui minimisent les variations temporelles de température dans une simulation du système en régulation.

[0117] Cet ajustement peut être réalisé manuellement, à l'aide d'une méthode d'ajustement telle que la méthode Ziegler-Nichols, la méthode Cohen-Coon, la méthode Åström-Hägglund, ou encore automatiquement à l'aide d'une méthode d'optimisation numérique.

[0118] Pour l'exemple de la [Fig.4] et une fréquence α de mesure du dispositif 2009 de mesure de température fixée supérieure à γ , soit $\alpha = 1$ Hz, il s'agit d'ajuster par itération les valeurs des paramètres, K_p et τ_i , de manière à obtenir $x(t)$ proche de zéro dans le temps. L'avantage est qu'il est possible d'évaluer la stabilité, dans le temps, du four en cours de régulation lorsqu'il est soumis à des perturbations dites usuelles pour les applications dans le domaine verrier. Un autre avantage est la possibilité de la prise en compte, lors de la modélisation, de la fréquence d'échantillonnage du dispositif 2009 de mesure de la température.

[0119] Selon certains modes de réalisation, à l'étape (g), la fonction $H(s)$ de transfert du four 1002 prend en outre, en données d'entrées, un ensemble de valeurs simulées, $I(s)$, des variations de la teneur en humidité dans le mélange 1001a de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange 1001a de matières premières, la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés et/ou la valeur de la

température, T_0 , de consigne.

- [0120] Selon certains modes préférés de réalisation, les valeurs de la teneur en humidité dans le mélange 1001a de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange 1001a de matières premières, et/ou la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés sont simulées sous la forme d'un signal aléatoire, tel qu'un bruit blanc ou un bruit rose.
- [0121] Selon un exemple de modélisation des paramètres, K_p et τ_i de la fonction $C(s)$ de transfert du dispositif d'asservissement pour l'exemple des [Fig.4] et 5, en référence à la [Fig.6], les variations instantanées, exprimées en variations relatives $\delta(t)$ et $\Omega(t)$, de la puissance $I(t) = \delta(t) + \Omega(t)$ liée aux variations temporelles de la teneur en humidité (cadre supérieur) et de la quantité Ω de composés organiques ou combustibles carbonés (cadre inférieur) sont d'abord générées sous la forme d'un bruit rose. Les valeurs des paramètres K_p et τ_i sont ensuite ajustées manuellement par itération de manière à obtenir une température proche de la température de consigne au cours du temps.
- [0122] Sur la [Fig.7], sont représentées les variations correspondantes de puissance (cadre inférieur) et de température (ligne continue, cadre supérieur) du four 1002 obtenues avec les valeurs ajustées des paramètres K_p et τ_i suivantes :
- $$K_p = 2,2 \text{ kW} / ^\circ \text{C} \tau_i = 478 \text{ s}$$
- [0123] La [Fig.7] montre que ces valeurs de paramètres K_p et τ_i permettent un asservissement efficace de la température T (ligne continue, cadre supérieur) du four 1002 à la température T_0 de consigne (ligne discontinue, cadre supérieur) sur l'ensemble de variations instantanées de la puissance $I(s)$ de la [Fig.6].
- [0124] Afin de valider la performance d'un dispositif d'asservissement calibrés avec les valeurs des paramètres K_p et τ_i ainsi ajustées, celles-là ont été implémentées dans le dispositif d'asservissement d'un four industriel présentant la même fonction $H(s)$ de transfert que celle de l'exemple des [Fig.4] et 5. Le four industriel, fonctionnant en conditions réelles et industrielles, a ensuite été soumis à des variations brutales de la température, T_0 , de consigne, de sa tirée, de la teneur en humidité et de la quantité de matières organiques ou combustibles carbonés, tels que coke, contenus du mélange de matières premières.
- [0125] Le comportement du four ainsi soumis à de telles variations est représenté sur la [Fig.8]. Dans le cadre supérieur, est représentée l'évolution temporelle de la température (cadre supérieur, ligne continue) du four et de la température T_0 de consigne (ligne en pointillés). Dans le cadre central, est représentée l'évolution temporelle de la puissance du four. Dans le cadre inférieur sont représentées les variations brutales de la tirée (ligne en tirets) du four, de la teneur en humidité (ligne continue) et de la quantité de matières organiques ou combustibles carbonés (ligne en

- pointillées) du mélange de matières premières.
- [0126] La [Fig.8], cadre supérieur, montre une convergence rapide de la température (ligne continue) du four à la température T_0 de consigne (ligne en pointillés) quelle que soit la nature et la simultanéité des variations (cadre inférieur).
- [0127] Une variation brutale de la teneur δ en humidité (ligne continue) provoque une faible perturbation de la puissance (cadre central) et la température (ligne continue) du four s'écarte peu de la température T_0 de consigne (ligne en pointillés). Les variations brutales de la tirée ψ (cadre inférieur ligne en tirets) du four après 5h et peu avant 15h provoquent des variations brutales de puissance (cadre central), et la température (ligne continue), après une première dérive, converge très rapidement vers la température T_0 de consigne (ligne en pointillés). La variation brutale de la quantité Ω de matières organiques ou combustibles carbonés (cadre inférieur ligne en pointillées) vers 17h entraîne des variations fréquentes de puissance qui sont rapidement compensés.
- [0128] En outre, le dispositif d'asservissement est capable de compenser les variations brusques et simultanées, après 07h30 et 19h00 de la température T_0 de consigne (cadre supérieur, ligne en pointillés), de la tirée (cadre inférieur ligne en tirets) du four, de la teneur en humidité (cadre inférieur ligne continue) et de la quantité de matières organiques ou combustibles carbonés (cadre inférieur ligne en pointillées).
- [0129] Les essais de la [Fig.8] démontrent que la présente invention permet une calibration efficace et robuste d'un dispositif d'asservissement d'un four à combustion immergée. Le dispositif 2010 d'asservissement permet une compensation rapide des variations brusques et intenses de température, T_0 , de consigne (variations de 40°C sur la figure), de la teneur en humidité dans le mélange 1001a de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange 1001a de matières premières, et/ou la quantité de composés organiques dans le mélange 1001a de matières premières. La température du four 1002 converge rapidement à la température de consigne avec des amplitudes de dépassement de consigne très limitées dans le temps quelle que soit la nature et la simultanéité des variations.
- [0130] Tous les modes de réalisation du premier aspect de l'invention sont combinables.
- [0131] La méthode selon le premier aspect de l'invention peut avantageusement être utilisée pour la calibration d'un dispositif 2010 d'asservissement 2010 d'un four 1002, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange 1001a de matières premières comprenant des déchets minéraux.
- [0132] Selon un deuxième aspect de l'invention, en référence aux [Fig.2] et 3, il est fourni un système pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement 2010 d'un four 1002, de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange 1001a de matière premières comprenant des déchets minéraux,
- le four 1002 comprend au moins une cuve 2001 équipée d'au moins un moyen de

chauffage 2002a-c sous forme d'au moins un brûleur immergé ;

- la cuve 2001 est adaptée à la fusion 2004 d'un mélange 1001a de matières premières ;
ledit système comprend :

- au moins un dispositif 2009 de mesure de température, ledit un dispositif 2009 de mesure de température étant configuré pour la mesure continue de la température dudit mélange 1001a de matières premières en fusion 2004 ;

- au moins un dispositif 2010 d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen de chauffage 2002a-c ; les paramètres de l'équation de transfert $C(s)$ dudit dispositif 2010 d'asservissement étant calibrés à l'aide d'une méthode selon l'un des quelconques modes de réalisation du premier aspect de l'invention.

[0133] Selon un troisième aspect de l'invention, il est fourni un four 1002, de préférence à combustion immergée, pour la fusion 2004 d'un mélange 1001a de matière premières comprenant des déchets minéraux, ledit four 1002 comprend :

- une première cuve 2001 adaptée à la fusion 2004 d'un mélange de matières premières et équipée d'au moins un moyen 2002a-c de chauffage sous forme d'au moins un brûleur immergé,

- au moins un dispositif 2009 de mesure de température pour la mesure continue de la température dudit mélange 1001a de matières premières en fusion 2004 ;

- au moins un dispositif 2010 d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen 2002a-c de chauffage et pour recevoir au moins une mesure continue de la température à l'aide dudit un dispositif 2009 de mesure de température ; les valeurs des paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif 2010 d'asservissement étant fixées à partir de valeurs obtenues à l'aide d'une méthode de calibration selon l'un des quelconques modes de réalisation du premier aspect de l'invention.

[0134] La méthode de calibration permettant de déterminer les valeurs des paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif 2010 d'asservissement peut être mise en œuvre à l'aide d'un système selon le deuxième aspect de l'invention.

[0135] De même que pour le premier aspect de l'invention, le four 1002 peut comprendre au moins un moyen 2011 de mesure de l'humidité dudit mélange 1001a de matières premières.

[0136] Selon certains modes de réalisation, le moyen 2002a-c de chauffage est un brûleur immergé oxygène / air-carburant et le dispositif 2010 d'asservissement est en outre configuré pour réguler la puissance dudit brûleur immergé en ajustant le débit de carburant injecté dans ledit brûleur en conservant un rapport débit d'oxygène sur débit de carburant constant.

[0137] Selon certains modes alternatifs de réalisation, le moyen 2002a-c de chauffage est un brûleur immergé oxygène / air - carburant et le dispositif 2010 d'asservissement est en outre configuré pour injecter de l'oxygène ou de l'air selon un débit total constant

d'oxygène ou d'air dans ledit brûleur et dans un bouillonneur, et selon un rapport débit d'oxygène ou d'air sur débit de carburant constant dans le brûleur lorsque la puissance du brûleur immergé varie.

[0138] Dans un quatrième aspect de l'invention, il est fourni une installation pour la fabrication de fibres minérales, telle qu'une ligne de manufacture de fibres de verre ou de roche, comprenant un four 1002 selon l'un des quelconques modes de réalisation du troisième aspect de l'invention.

[0139] La présente invention, dans tous ses aspects, peut être mise en œuvre, sans y être limitée, dans de nombreux procédés et lignes de manufacture de produits verriers tels que, par exemple, la laine de verre, la laine de roches, les fibres de verre textiles, le verre plat ou le verre creux.

Liste des références

Littérature brevet

- [0140] US 351 413 B, J. T. WAINWRIGHT 26.10.1886.
- [0141] US 1 656 828 A, POWELL EDWARD R, 17.01.1928.
- [0142] FR 876569 A, UNION DES VERRERIES MECANIQUES, 10.11.1942.
- [0143] WO 2009 091 558 A1, GAS TECHNOLOGY INST [US] 29.07.2009.
- [0144] DE 651 687 C, GLASHUETTE ACHERN A G, 18.10.1937.
- [0145] GB 1 028 481 A, SELAS CORP OF AMERICA, 04.05.1966.
- [0146] WO 0248612 A1, SAINT GOBAIN [FR] 20.06.2002.
- [0147] WO 2006 018 582 A1, SAINT GOBAIN ISOVER [FR] 23.02.2006.
- [0148] US 4877449 A, INST GAS TECHNOLOGY [US] 31.10.1989.
- [0149] EP 2 433 911 A1, JOHNS MANVILLE [US] 28.03.2012.
- [0150] WO 2022 180 345 A1, SAINT GOBAIN ISOVER [FR] 01.09.2022.

Revendications

[Revendication 1]

Méthode (3000) pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement (2010) d'un four (1002), de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange (1001a) de matières premières comprenant des déchets minéraux,

- ledit four (1002) comprend au moins une cuve (2001) équipée d'au moins un moyen de chauffage (2002a-c), de préférence sous forme d'au moins un brûleur immergé, et au moins un dispositif (2010) d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen de chauffage (2002a-c) selon une température, T_0 , de consigne ;
- ladite cuve (2001) est adaptée à la fusion (2004) d'un mélange (1001a) de matières premières ;
- ledit cuve (2001) comprend au moins un dispositif (2009) de mesure de température;
- ledit dispositif (2009) de mesure de température est configuré pour la mesure continue de la température dudit mélange (1001a) de matières premières en fusion (2004), et connecté audit dispositif d'asservissement (2010) ;

ladite méthode (3000) comprend les étapes suivantes :

- (a) l'introduction (3001) continue d'un mélange (1001a) de matières premières de composition donnée dans la cuve (2001) ;
- (b) la mesure (3002) continue de la température du mélange (1001a) de matières premières en fusion (2004) à l'aide du dispositif (2009) de mesure de température ;
- (c) la chauffe (3003) stationnaire du mélange (1001a) de matières premières en fusion (2004) selon une température, T_i , donnée ;
- (d) la modification (3004), pour une période donnée et limitée de temps, sans régulation active par le dispositif (2010) d'asservissement, d'au moins un paramètre de fonctionnement du four (1002) choisi parmi la teneur en humidité dans le mélange (1001a) de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange (1001a) de matières premières, la puissance du moyen de chauffage (2002a-c), et/ou la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés dans le mélange (1001a) de matières premières ;
- (e) la mesure (3005) des variations temporelles de la température, ΔT , du mélange de matières premières (1001a) en fusion (2004) et de

la puissance ΔP du moyen de chauffage (2002a-c) ;
(f) la modélisation (3006), à l'aide d'un dispositif de traitement de données, du comportement thermique du four (1002) à l'aide d'une fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire avec, comme données d'entrée, les variations temporelles de la température ΔT du mélange (1001a) de matières premières en fusion et du au moins un paramètre de fonctionnement modifié à l'étape (d) ;
(g) la modélisation (3007), à l'aide d'un dispositif de traitement de données, des paramètres de la fonction de transfert $C(s)$ du dispositif d'asservissement (2010) appliquée à la fonction $H(s)$ de transfert modélisée à l'étape (f).

- [Revendication 2] Méthode (3000) selon la revendication 1, telle que la fonction $H(s)$ de transfert de chaleur non-stationnaire est modélisée à l'aide d'une fonction de transfert de réponse de premier ordre avec ou sans temps mort.
- [Revendication 3] Méthode (3000) selon l'une quelconque des revendications 1 à 2, telle que, à l'étape (d), au moins deux paramètres, de préférence trois paramètres, sont modifiés séquentiellement ou parallèlement.
- [Revendication 4] Méthode (3000) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, telle que, à l'étape (d), la teneur en humidité dans le mélange (1001a) de matières premières est modifiée de sorte que la variation de la teneur en humidité dudit mélange est comprise entre 0 et 10 %, et/ou la tirée du four est modifiée de sorte que la variation relative de ladite tirée est comprise entre 0 et 2000kg/h.
- [Revendication 5] Méthode (3000) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, telle que, à l'étape (d), la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés dans le mélange (1001a) de matières premières est modifiée de sorte que la variation relative de ladite quantité de composés organiques ou combustibles carbonés est comprise entre 0 et 15% en poids, de préférence entre 0 et 10% en poids.
- [Revendication 6] Méthode (3000) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, telle que, à l'étape (d), la puissance du moyen de chauffage (2002a-c) est modifiée de sorte que la variation relative de ladite puissance par rapport à la puissance initiale est entre 0 et 100%, de préférence 0 et 50%, voire entre 0 et 25%.
- [Revendication 7] Méthode (3000) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, telle que le dispositif (2010) d'asservissement est un régulateur

Proportionnel – Intégral – Dérivé (PID).

[Revendication 8]

Méthode (3000) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, telle que, à l'étape (g), la fonction $H(s)$ de transfert du four (1002) prend en outre, en données d'entrées, un ensemble de valeurs simulées, $I(s)$, des variations de la teneur en humidité dans le mélange (1001a) de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange (1001a) de matières premières, la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés et/ou la valeur de la température, T_0 , de consigne.

[Revendication 9]

Méthode (3000) selon la revendication 8, telle que les valeurs de la teneur en humidité dans le mélange (1001a) de matières premières, la tirée du four, la vitesse d'enfournement du mélange (1001a) de matières premières, et/ou la quantité de composés organiques ou combustibles carbonés sont simulées sous la forme d'un signal aléatoire, tel qu'un bruit blanc ou un bruit rose.

[Revendication 10]

Utilisation d'une méthode (3000) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9 pour la calibration d'un dispositif (2010) d'asservissement d'un four (1002), de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange (1001a) de matières premières comprenant des déchets minéraux.

[Revendication 11]

Système pour calibrer les paramètres d'un dispositif d'asservissement (2010) d'un four (1002), de préférence à combustion immergée, pour la fusion d'un mélange (1001a) de matière premières comprenant des déchets minéraux,

- le four (1002) comprend au moins une cuve (2001) équipée d'au moins un moyen de chauffage (2002a-c) sous forme d'au moins un brûleur immergé ;

- la cuve (2001) est adaptée à la fusion (2004) d'un mélange (1001a) de matières premières ;

ledit système comprend :

- au moins un dispositif (2009) de mesure de température, ledit un dispositif (2009) de mesure de température étant configuré pour la mesure continue de la température dudit mélange (1001a) de matières premières en fusion (2004) ;

- au moins un dispositif (2010) d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen de chauffage (2002a-c) ; les paramètres de l'équation de transfert $C(s)$ dudit dispositif (2010) d'asservissement étant calibrés à l'aide d'une méthode (3000) selon

l'une quelconque des revendications 1 à 9.

[Revendication 12]

Four (1002), de préférence à combustion immergée, pour la fusion (2004) d'un mélange (1001a) de matières premières comprenant des déchets minéraux, ledit four (1002) comprend :

- une première cuve (2001) adaptée à la fusion (2004) d'un mélange de matières premières et équipée d'au moins un moyen (2002a-c) de chauffage sous forme d'au moins un brûleur immergé,
- au moins un dispositif (2009) de mesure de température configuré pour la mesure continue de la température dudit mélange (1001a) de matières premières en fusion (2004) ;
- au moins un dispositif (2010) d'asservissement configuré pour réguler la puissance dudit moyen (2002a-c) de chauffage et pour recevoir au moins une mesure continue de la température à l'aide dudit dispositif (2009) de mesure de température ; les valeurs des paramètres de la fonction de transfert C(s) du dispositif (2010) d'asservissement étant fixées à partir de valeurs obtenues à l'aide d'une méthode (3000) de calibration selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.

[Revendication 13]

Four (1002) selon la revendication 12, tel que le moyen (2002a-c) de chauffage est un brûleur immergé oxygène / air -carburant et le dispositif d'asservissement est en outre configuré pour réguler la puissance dudit brûleur immergé en ajustant le débit de carburant injecté dans ledit brûleur en conservant un rapport débit d'oxygène sur débit de carburant constant.

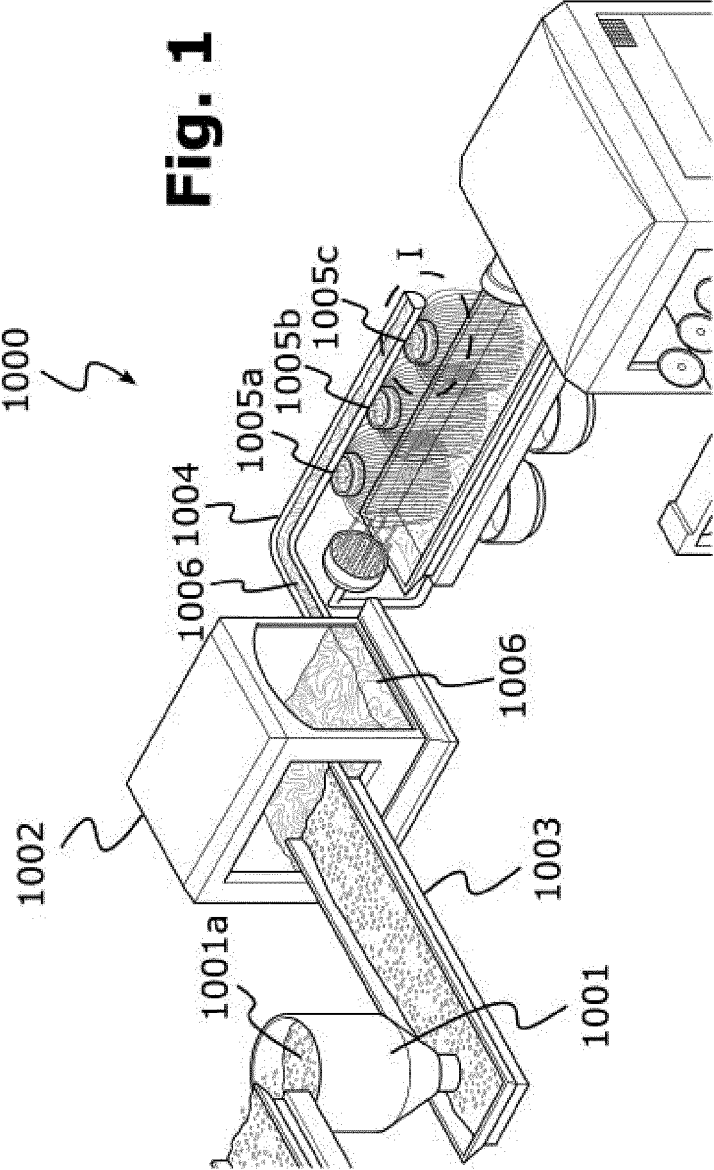
[Revendication 14]

Four selon l'une revendication 12, tel que le moyen (2002a-c) de chauffage est un brûleur immergé oxygène / air - carburant et le dispositif (2010) d'asservissement est en outre configuré pour injecter de l'oxygène ou de l'air selon un débit total constant d'oxygène ou d'air dans ledit brûleur et dans un bouillonneur, et selon un rapport débit d'oxygène ou d'air sur débit de carburant constant dans le brûleur lorsque la puissance du brûleur immergé varie.

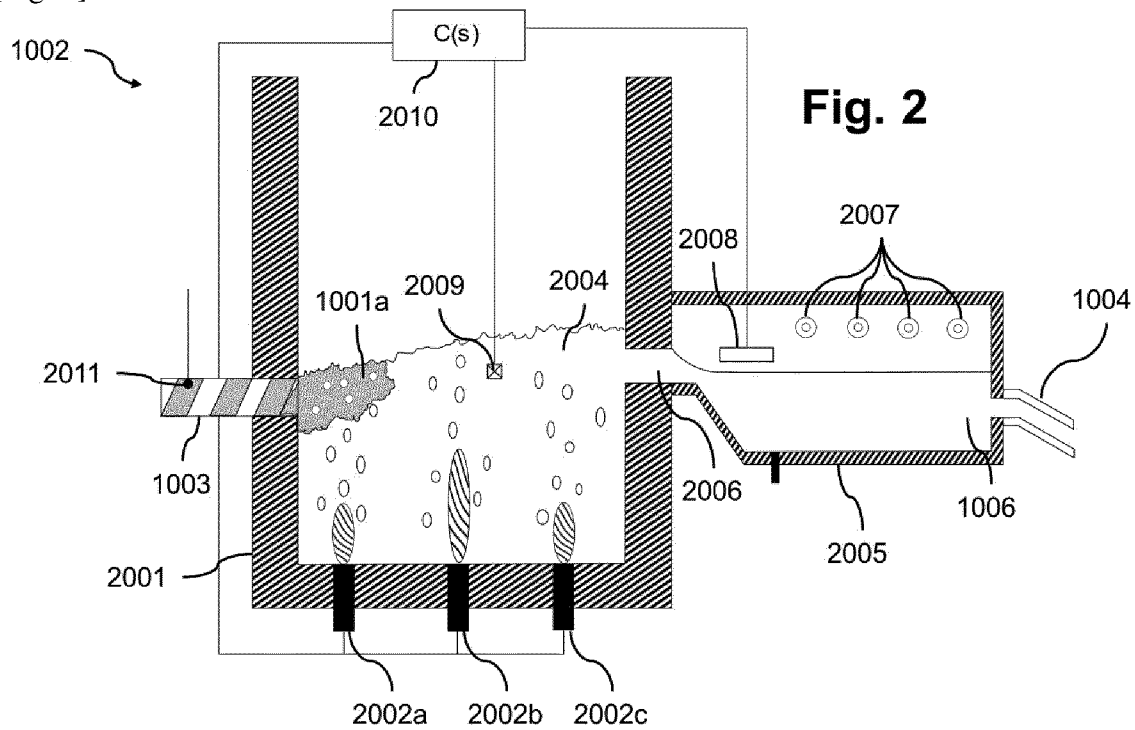
[Revendication 15]

Installation pour la fabrication de fibres minérales comprenant un four (1002) à combustion immergée selon l'une quelconque des revendications 12 à 14.

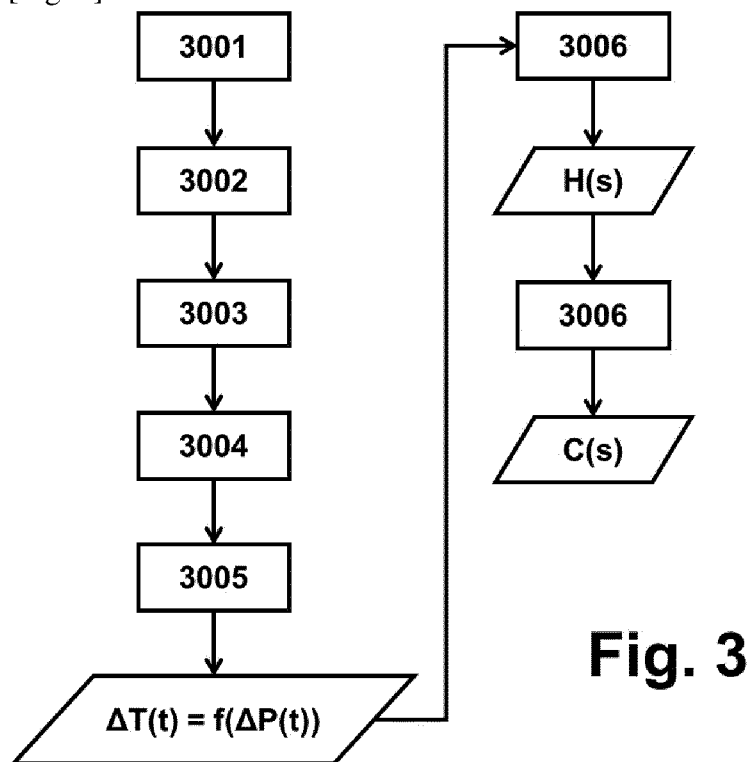
[Fig. 1]



[Fig. 2]



[Fig. 3]



[Fig. 4]

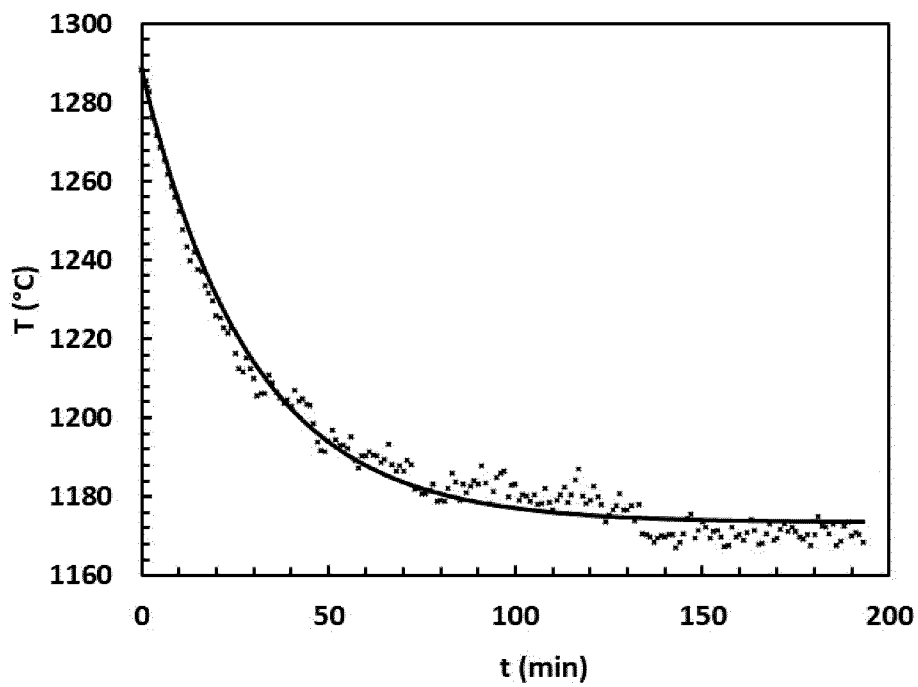


Fig. 4

[Fig. 5]

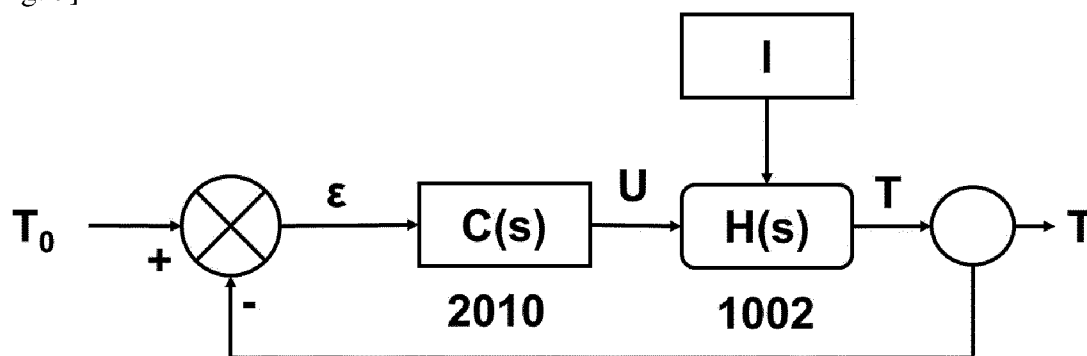


Fig. 5

[Fig. 6]

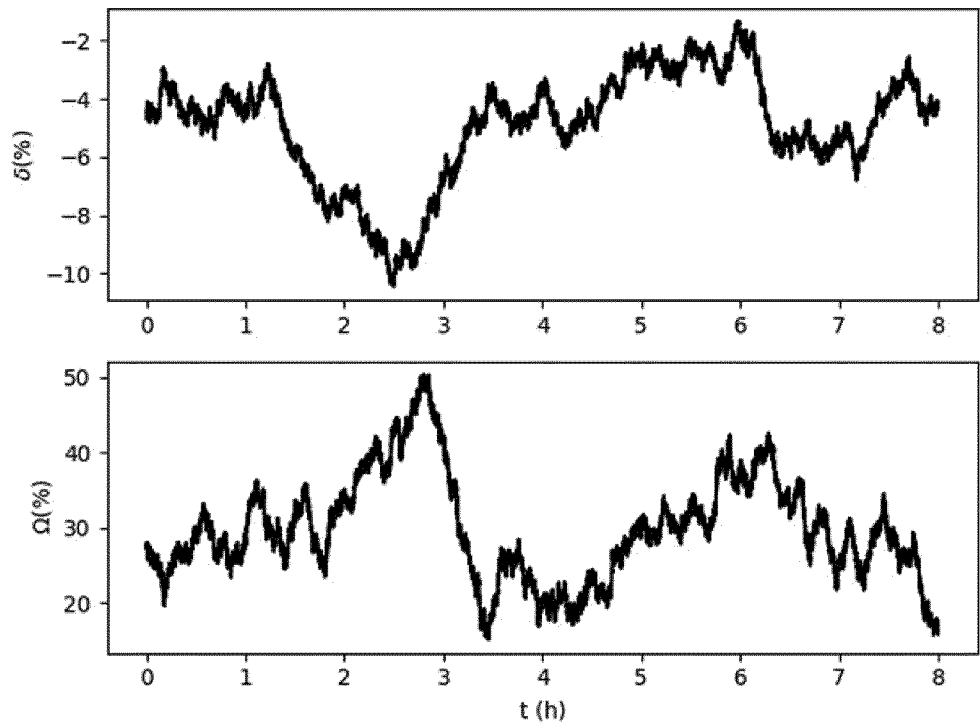


Fig. 6

[Fig. 7]

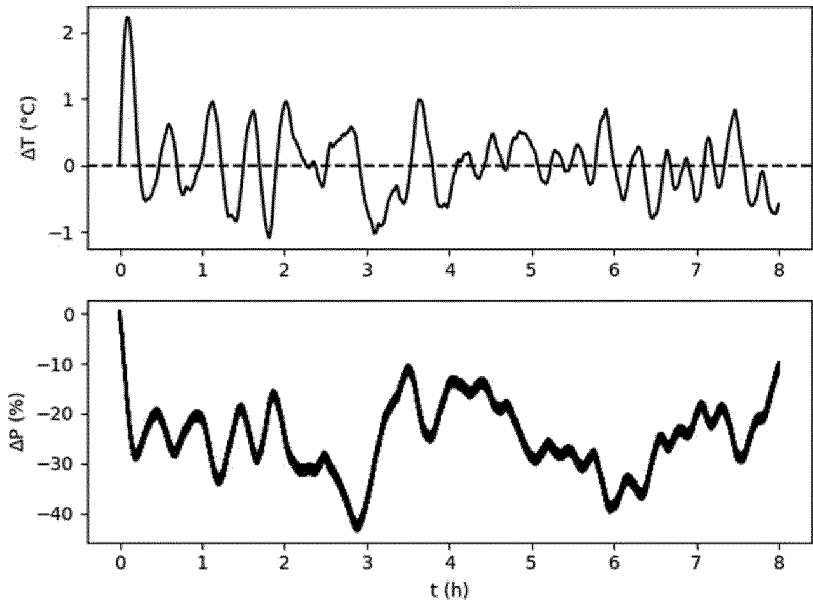
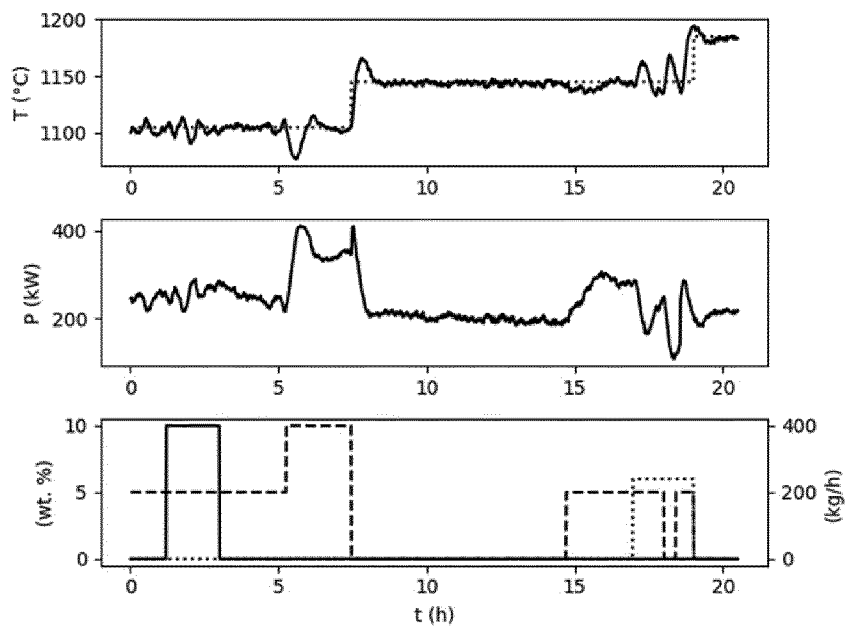


Fig. 7

[Fig. 8]

**Fig. 8**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/063930

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**F23N 1/00**(2006.01)i; **C03B 5/237**(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F23N; C03B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2016002084 A1 (CHARBONNEAU MARK WILLIAM [US]) 07 January 2016 (2016-01-07)	1,3,5,6,8,10-15
A	paragraph [0010] - paragraph [0101]; figures 1-15	2,4,7,9
A	US 2022034586 A1 (PASCH THOMAS [DE] ET AL) 03 February 2022 (2022-02-03) the whole document	1-15
A	WO 2022180345 A1 (SAINT GOBAIN ISOVER [FR]) 01 September 2022 (2022-09-01) cited in the application the whole document	1-15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 July 2024

Date of mailing of the international search report

31 July 2024

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands (Kingdom of the)

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Theis, Gilbert

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2024/063930

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2016002084	A1	07 January 2016	US	2013327092	A1	12 December 2013
				US	2016002084	A1	07 January 2016
				WO	2013188167	A1	19 December 2013

US	2022034586	A1	03 February 2022	CN	112956281	A	11 June 2021
				DE	102018216539	A1	02 April 2020
				EP	3858108	A1	04 August 2021
				ES	2920329	T3	02 August 2022
				US	2022034586	A1	03 February 2022
				WO	2020064280	A1	02 April 2020

WO	2022180345	A1	01 September 2022	AU	2022225146	A1	17 August 2023
				CA	3205727	A1	01 September 2022
				EP	4298065	A1	03 January 2024
				FR	3120233	A1	02 September 2022
				JP	2024507186	A	16 February 2024
				KR	20230151990	A	02 November 2023
				US	2024092673	A1	21 March 2024
				WO	2022180345	A1	01 September 2022

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. F23N1/00 C03B5/237 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE		
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) F23N C03B		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X A A A	US 2016/002084 A1 (CHARBONNEAU MARK WILLIAM [US]) 7 janvier 2016 (2016-01-07) alinéa [0010] - alinéa [0101]; figures 1-15 ----- US 2022/034586 A1 (PASCH THOMAS [DE] ET AL) 3 février 2022 (2022-02-03) le document en entier ----- WO 2022/180345 A1 (SAINT GOBAIN ISOVER [FR]) 1 septembre 2022 (2022-09-01) cité dans la demande le document en entier -----	1, 3, 5, 6, 8, 10-15 2, 4, 7, 9 1-15 1-15
☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
20 juillet 2024		31/07/2024
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Theis, Gilbert

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2024/063930

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2016002084 A1	07-01-2016	US 2013327092 A1	12-12-2013
		US 2016002084 A1	07-01-2016
		WO 2013188167 A1	19-12-2013

US 2022034586 A1	03-02-2022	CN 112956281 A	11-06-2021
		DE 102018216539 A1	02-04-2020
		EP 3858108 A1	04-08-2021
		ES 2920329 T3	02-08-2022
		US 2022034586 A1	03-02-2022
		WO 2020064280 A1	02-04-2020

WO 2022180345 A1	01-09-2022	AU 2022225146 A1	17-08-2023
		CA 3205727 A1	01-09-2022
		EP 4298065 A1	03-01-2024
		FR 3120233 A1	02-09-2022
		JP 2024507186 A	16-02-2024
		KR 20230151990 A	02-11-2023
		US 2024092673 A1	21-03-2024
		WO 2022180345 A1	01-09-2022
