

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

(19) Organisation Mondiale de la  
Propriété Intellectuelle  
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2013/092912 A1**

(43) Date de la publication internationale  
27 juin 2013 (27.06.2013)

WIPO | PCT

- (51) Classification internationale des brevets :  
**C10L 9/08** (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/EP2012/076484
- (22) Date de dépôt international :  
20 décembre 2012 (20.12.2012)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :  
1162215 21 décembre 2011 (21.12.2011) FR
- (71) Déposants : **COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES** [FR/FR]; 25, rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR). **CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONALE EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT** [FR/FR]; 42, rue Scheffler, F-75116 Paris (FR).
- (72) Inventeurs : **NOCQUET, Timothee**; 13, rue Billerey, F-38000 Grenoble (FR). **COMMANDRE, Jean-Michel**; 151, rue Alphonse Daudet, F-34790 Grabels (FR). **DUPONT, Capucine**; 30, rue Lazare Carnot, F-38000 Grenoble (FR).
- (74) Mandataires : **AUGARDE, Eric** et al.; Brevalax, 56 boulevard de l'Embouchure, B.P. 27519, F-31075 Toulouse Cedex 2 (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, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, 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, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

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

(54) Title : PROCESS AND DEVICE FOR RAPID TORREFACTION OF BIOMASS

(54) Titre : PROCÉDÉ ET DISPOSITIF DE TORRÉFACTION RAPIDE DE BIOMASSE

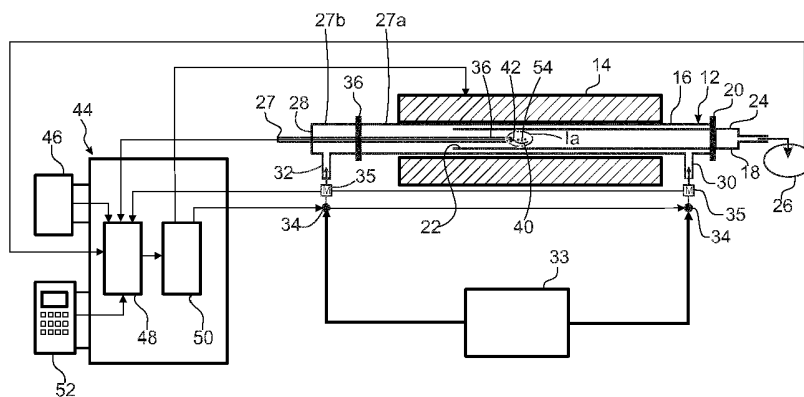


FIG. 1

(57) Abstract : Process for controlling a unit for torrefaction of biomass particles comprising : • the measurement of a mean diameter  $d_p$  of the biomass particles; • as a function of the diameter  $d_p$ , calculation of a maximum torrefaction temperature  $T_g^{max}$  for which the ratio of a characteristic time of the torrefaction to a characteristic time of the heat transfer at the level of the particles is equal to a minimum value; • adjusting the torrefaction temperature to a value less than or equal to said maximum torrefaction temperature  $T_g^{max}$ ; • adjusting the torrefaction time to a value such that the final yield by weight of the torrefaction is equal to a predefined target value.

(57) Abrégé : Procédé de commande d'une unité de torréfaction de particules de biomasse comprenant : • la mesure d'un diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse; • en fonction du diamètre  $d_p$ , calcul d'une température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  pour laquelle le rapport d'un temps caractéristique de la torréfaction à un temps caractéristique du transfert thermique au niveau

[Suite sur la page suivante]

WO 2013/092912 A1



---

des particules est égal à une valeur minimale; • réglage de la température de torréfaction à une valeur inférieure ou égale à ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$ ; • réglage de la durée de torréfaction à une valeur telle que le rendement massique final de la torréfaction soit égal à une valeur cible prédéfinie.

## PROCÉDÉ ET DISPOSITIF DE TORRÉFACTION RAPIDE DE BIOMASSE

### DESCRIPTION

#### DOMAINE TECHNIQUE

5 La présente invention se rapporte au domaine de la valorisation de la biomasse par voie thermochimique.

Elle concerne un procédé de traitement thermique de particules de biomasse, du type connu sous le nom de torréfaction. Un tel traitement permet de préparer une charge de biomasse en vue de faciliter son fractionnement par broyage  
10 pour le préparer à:

- la gazéification dans un réacteur à flux entraîné ;
- la co-combustion avec du charbon.

Par « particules », il faut comprendre tout type de morceaux, grains, copeaux, fragments ou débris de biomasse de nature solide.

15 Le terme biomasse désigne tout type de matériau d'origine végétale, animale ou fongique, pouvant devenir source d'énergie par combustion.

L'invention porte notamment, mais non exclusivement, sur la torréfaction de biomasse lignocellulosique, telle que du bois.

Elle concerne en particulier un procédé de commande d'une unité de  
20 torréfaction de particules de biomasse dans laquelle les particules sont torréfiées pendant une durée de torréfaction  $t_r$ , dans un fluide, de préférence un gaz, porté à une température de torréfaction  $T_g$ .

Cette invention concerne également un procédé de torréfaction utilisant ce procédé de commande, un dispositif de commande permettant de mettre en  
25 œuvre ledit procédé de commande, ainsi qu'une unité de torréfaction comprenant ce dispositif.

## ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Dans un procédé classique de gazéification, la biomasse est prétraitée (séchée et broyée grossièrement, à une dimension de l'ordre du centimètre), puis convertie dans un gazéifieur en gaz de synthèse, principalement en H<sub>2</sub> et CO. Celui-ci peut ensuite être transformé par réaction catalytique en carburant liquide du type Diesel Fischer Tropsch, méthanol/DME ou alcools, dihydrogène, ou en carburant gazeux du type connu sous le nom anglais *Synthetic Natural Gas*.

Un réacteur de gazéification particulièrement intéressant est le réacteur à flux entraîné. Fonctionnant à haute température, typiquement entre 1000 et 1600°C, avec des temps de séjour de quelques secondes, il permet d'obtenir un gaz pratiquement exempt de goudrons dans le gaz de synthèse. Dans ces conditions, les transferts thermiques et de matière sont intenses, et la conversion complète de la biomasse implique de l'injecter sous forme de particules de dimension inférieure à 1 mm, et de préférence de l'ordre de 100 µm à 500 µm.

Or, il est difficile et donc cher de réduire la taille des particules de biomasse au-dessous du centimètre, en particulier dans le cas de biomasse lignocellulosique, du fait de la nature fibreuse de cette biomasse. Cette nature fibreuse se traduit notamment par la présence de micro-fibrilles de nature à favoriser l'agglomération, non souhaitable, des particules broyées.

Une solution consiste à pré-broyer la biomasse de façon à obtenir des particules dont la dimension caractéristique est de l'ordre du centimètre, à torréfier ces particules, puis à les broyer jusqu'à obtenir des particules de forme sensiblement sphérique et lisse dont la dimension caractéristique est de l'ordre de 100 µm à 500 µm, pour enfin les injecter dans le réacteur à flux entraîné.

Dans la seconde application proposée, la biomasse peut être valorisée dans les centrales thermiques par co-combustion avec du charbon. Les difficultés techniques actuelles sont semblables à celles rencontrées avec le réacteur à flux entraîné, puisque la biomasse doit être injectée avec le charbon sous forme pulvérisée. La torréfaction de la charge de biomasse permet son injection dans le réacteur ainsi que l'harmonisation de ses propriétés avec celles du charbon, ce qui permet d'utiliser les

centrales thermiques dimensionnées pour du charbon. La torréfaction constitue ainsi une solution de prétraitement de la biomasse pour ce procédé.

La torréfaction est habituellement considérée par la communauté scientifique comme étant un traitement thermique doux de la biomasse, entre 200°C et 300°C environ, sous atmosphère en absence ou défaut d'oxygène, et qui dure classiquement de quelques dizaines de minutes à plusieurs heures. Lors de cette transformation thermique, les particules de biomasse perdent de la masse à volume quasi constant à mesure de l'avancée de la réaction. Cela rend les particules mécaniquement plus fragiles, et augmente ainsi leur broyabilité. Cela altère aussi la nature fibreuse de la biomasse, et rend les particules torréfiées plus lisses et plus sphériques, ce qui facilite leur injection dans le réacteur de gazéification.

Par ailleurs, lors de la torréfaction, des gaz sont émis. Parmi ces gaz, on trouve des espèces incondensables, c'est-à-dire gazeuses à température ambiante, et des espèces condensables qui sont relâchées sous forme gazeuse lors du traitement thermique et qui condensent ensuite à température ambiante : ce sont principalement de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, et de l'acide acétique. Cela engendre une diminution des rapports O/C et H/C du solide, et une augmentation de sa densité énergétique.

La torréfaction permet d'obtenir un matériau plus facilement transportable et stockable : la biomasse torréfiée est plus dense énergétiquement que la biomasse brute, plus hydrophobe, et résiste mieux aux dégradations biologiques.

Toutefois, la durée requise des traitements par torréfaction conventionnels induit des coûts industriels qu'il est souhaitable de pouvoir réduire.

Cette durée décroît lorsque l'on accroît la température de torréfaction  $T_g$ , c'est-à-dire la température du fluide dans lequel baignent les particules de biomasse au sein d'un réacteur de torréfaction.

Cependant, une telle augmentation de la température de torréfaction  $T_g$  conduit habituellement à une réduction de l'homogénéité des dimensions des particules obtenues après torréfaction puis broyage. Autrement dit, une telle augmentation de la température de torréfaction  $T_g$  induit en général un étalement de la

distribution de taille des particules torréfiées et broyées. De ce fait, l'obtention de particules de dimensions suffisamment petites pour des applications d'un des types précités, requiert un broyage plus poussé et se révèle donc plus coûteuse.

## EXPOSÉ DE L'INVENTION

5 L'invention a notamment pour but d'apporter une solution simple, économique et efficace à ce problème, et a en particulier pour objet un procédé de torréfaction de particules de biomasse sous une température optimisée pour réduire au mieux la durée du procédé tout en conservant une broyabilité satisfaisante des particules de biomasse torréfiée.

10 L'invention propose à cet effet un procédé de commande d'une unité de torréfaction pour la torréfaction de particules de biomasse pendant une durée de torréfaction  $t_r$  dans un gaz porté à une température de torréfaction  $T_g$ , ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes successives de :

- mesure d'un diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse ;
- 15 – en fonction du diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse, calcul d'une température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  pour laquelle un rapport  $H$  d'un temps caractéristique de la réaction de torréfaction à un temps caractéristique du transfert thermique au niveau des particules de biomasse est égal à une valeur minimale  $H^{min}$  prédéfinie ;
- 20 – réglage de la température de torréfaction  $T_g$  dudit fluide à une valeur inférieure ou égale à ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  ;
- réglage de la durée de torréfaction  $t_r$  à une valeur telle que le rendement massique final  $R$  de la torréfaction soit égal à une valeur cible prédéfinie.

25 On entend par « temps caractéristique » un temps nécessaire pour que le paramètre considéré atteigne un certain pourcentage de sa valeur maximale. Ce pourcentage est couramment choisi égal à 63,2%.

On entend par « rendement massique final » le rapport de la masse des particules après torréfaction à la masse des particules avant torréfaction, ces particules ayant été séchées jusqu'à masse constante (masse sèche), par exemple conformément à

la norme XP CEN/TS 14774-1. Ce rendement diminue donc au cours de l'avancement de la réaction de torréfaction.

Il a été constaté qu'un accroissement de l'homogénéité de la réaction de torréfaction au sein de chaque particule de biomasse permet de réduire la dispersion de la distribution des tailles respectives des particules torréfiées puis broyées.

Le procédé de commande selon l'invention permet de déterminer la température de torréfaction la plus élevée qui soit compatible avec un niveau minimal d'homogénéité de la réaction de torréfaction au sein des particules. Cette homogénéité est en effet d'autant meilleure que le transfert thermique au sein des particules de biomasse est rapide par comparaison à la réaction de torréfaction. L'homogénéité de cette réaction peut donc être estimée à partir de la valeur du rapport  $H$  précité.

Une fois cette température déterminée, on détermine la durée de torréfaction permettant d'aboutir à un rendement massique final prédéterminé.

Le procédé selon l'invention permet donc de maximiser la température de la torréfaction et donc de réduire au mieux la durée de ce traitement thermique, tout en garantissant une bonne efficacité de ce traitement. Cette réduction de durée peut se traduire par une réduction considérable du coût de ce traitement.

Il est à noter que le procédé selon l'invention comprend en outre avantageusement les étapes ultérieures successives de :

- démarrage de la torréfaction à la température de torréfaction  $T_g$  réglée précédemment ;
- arrêt de la torréfaction au bout d'un temps égal à la durée de torréfaction  $t_r$  réglée précédemment.

De plus, la température de torréfaction  $T_g$  est avantageusement réglée égale à ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$ .

Cela permet d'optimiser la vitesse de la réaction de torréfaction, et donc de maximiser le gain de temps et la réduction de coûts permis par l'invention.

La valeur minimale  $H^{min}$  prédéfinie dudit rapport  $H$  est avantageusement supérieure ou égale à 2, de préférence supérieure ou égale à 5, et encore préférentiellement supérieure ou égale à 10.

Comme expliqué ci-dessus, le choix de la valeur minimale de ce rapport  $H$  détermine le degré d'homogénéité de la réaction de torréfaction, et donc le niveau de broyabilité des particules torréfiées.

La valeur cible du rendement massique final  $R$  de la torréfaction est de  
 5 préférence supérieure ou égale à 60%, préférentiellement 70%, et encore plus préférentiellement 80%.

Ces valeurs de rendement massique final permet de garantir la viabilité de la torréfaction en termes de bilan énergétique.

La température de torréfaction  $T_g$  est comprise dans la plage 300°C –  
 10 400°C, préférentiellement dans la plage 300°C - 350°C, et plus préférentiellement dans la plage 325°C – 350°C.

De telles températures permettent en général d'aboutir à une torréfaction relativement rapide tout en conservant un niveau satisfaisant de broyabilité des particules torréfiées.

La durée de torréfaction  $t_r$  est inférieure à 15 minutes, de préférence  
 15 inférieure à 10 minutes, encore plus préférentiellement inférieure à 5 minutes.

Ces durées permettent d'atteindre les niveaux de rendement indiqués ci-dessus pour des températures de torréfaction comprises dans les fourchettes précitées.

Dans un mode de réalisation préféré de l'invention, la température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  est déterminée en fonction de la valeur minimale  $H^{min}$  dudit rapport par la formule :

$$H^{min} = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C p_p d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}}}$$

dans laquelle :

- $k_t$  est une constante de la réaction de torréfaction, considérée comme étant une  
 25 réaction du premier ordre ;
- $\rho_p$  est la masse volumique de la biomasse ;
- $C p_p$  est la chaleur massique de la biomasse ;



- $\lambda_{eff,p}$  est la conductivité thermique effective de la biomasse.

La formule ci-dessus traduit le rapport du temps caractéristique de la réaction de torréfaction au temps caractéristique du transfert thermique interne par conduction et radiation au sein des particules de biomasse.

- 5 Dans un deuxième mode de réalisation préféré de l'invention, la température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  est déterminée en fonction de ladite valeur minimale  $H^{min}$  dudit rapport par la formule :

$$H^{min} = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C p_p d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}} + \min \left( \frac{\rho_p C p_p d_p}{6 h_{conv}} ; \frac{\rho_p C p_p d_p}{6 \omega_p \sigma (T_g^{max} + T_p) (T_g^{max^2} + T_p^2)} \right)}$$

dans laquelle :

- $k_t$  est une constante de la réaction de torréfaction, considérée comme étant une
- 10 réaction du premier ordre ;
- $\rho_p$  est la masse volumique de la biomasse ;
  - $C p_p$  est la chaleur massique de la biomasse ;
  - $\lambda_{eff,p}$  est la conductivité thermique effective de la biomasse ;
  - $\omega_p$  est l'émissivité de la biomasse ;
- 15 –  $h_{conv}$  est le coefficient de transfert thermique externe entre la biomasse et ledit fluide ;
- $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann ;
  - $T_p$  est la température initiale des particules de biomasse avant torréfaction.

- 20 La formule ci-dessus traduit le rapport du temps caractéristique de la réaction de torréfaction à la somme du temps caractéristique du transfert thermique interne par conduction et radiation au sein des particules de biomasse et du minimum des temps caractéristiques respectifs des transferts thermiques externes, c'est-à-dire avec le fluide, par convection et par radiation.

- 25 Cette formule permet donc une meilleure estimation que la formule utilisée dans le premier mode de réalisation de l'invention.

Dans ce deuxième mode de réalisation de l'invention, le coefficient de transfert thermique externe  $h_{conv}$  est de préférence déterminé à partir de la corrélation de Ranz-Marschall, par la formule :

$$h_{conv} = \frac{\lambda_g}{d_p} (2 + 0.6Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/2})$$

dans laquelle :

- 5 –  $Re_p$  est le nombre de Reynolds déterminé par la formule :  $Re_p = \frac{\rho_g \times V_g \times d_p}{\mu_g}$  ;
- $Pr$  est le nombre de Prandtl déterminé par la formule :  $Pr = \frac{\mu_g \times Cp_g}{\lambda_g}$  ;

où :

- $\rho_p$  est la masse volumique du fluide ;
- $\mu_g$  est la viscosité du fluide ;
- 10 –  $\lambda_g$  est la conductivité thermique du fluide ;
- $Cp_g$  est la chaleur massique du fluide ;
- $V_g$  est une vitesse moyenne du fluide.

Par ailleurs, la constante de réaction  $k_t$  est déterminée à partir d'un modèle cinétique de la réaction de torréfaction, et dépend du type de biomasse torréfiée.

- 15 D'une manière générale, la durée de torréfaction  $t_r$  est avantageusement déterminée en fonction de la température de torréfaction  $T_g$  et de la valeur de cible du rendement massique final  $R$  de la torréfaction, au moyen de données expérimentales de corrélation préétablies.

- 20 La durée de torréfaction peut en particulier être déterminée à partir d'une extrapolation des données expérimentales précitées.

- L'invention concerne aussi un procédé de torréfaction de particules de biomasse, de préférence lignocellulosique, pendant une durée de torréfaction  $t_r$  dans un gaz porté à une température de torréfaction  $T_g$  au sein d'une unité de torréfaction,
- 25 comprenant la commande de l'unité de torréfaction au moyen d'un procédé de commande du type décrit ci-dessus.

Ce procédé est avantageusement appliqué à des particules de biomasse dont le diamètre moyen  $d_p$  est inférieur à 40 mm, de préférence inférieur à 20 mm, encore plus préférentiellement inférieur à 10 mm.

Dans une application particulièrement avantageuse de ce procédé, la  
5 biomasse est constituée de bois. Le procédé selon l'invention permet donc d'éviter l'utilisation d'additifs tels que de l'huile.

Par ailleurs, ledit gaz est de préférence un gaz inerte, tel que du diazote N<sub>2</sub>.

10 L'invention concerne également un dispositif de commande d'unité de torréfaction pour la torréfaction de particules de biomasse pendant une durée de torréfaction  $t_r$  dans un fluide porté à une température de torréfaction  $T_g$ , le dispositif de commande étant caractérisé en ce qu'il comprend :

- des moyens de mesure d'un diamètre moyen  $d_p$  de particules de biomasse ;
- 15 – des premiers moyens de calcul configurés pour déterminer, en fonction du diamètre moyen  $d_p$  mesuré des particules de biomasse, une température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  pour laquelle le rapport  $H$  d'un temps caractéristique de la réaction de torréfaction à un temps caractéristique du transfert thermique au sein des particules de biomasse est égal à une valeur minimale  $H^{min}$  prédéfinie ;
- 20 – des premiers moyens de commande configurés pour régler ladite température de torréfaction  $T_g$  à une valeur inférieure ou égale à ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  ;
- des seconds moyens de calcul et de commande configurés pour régler ladite durée de torréfaction  $t_r$  à une valeur telle que le rendement massique final  $R$  de la torréfaction  
25 soit égal à une valeur prédéfinie.

Les moyens de calcul précités permettent une mise en œuvre du procédé selon l'invention d'une manière fiable et rapide.

Le dispositif de commande précité comprend de préférence des moyens de pré réglage de la valeur minimale  $H^{min}$  dudit rapport  $H$  et/ou des moyens de pré réglage du rendement massique final  $R$  de la torréfaction.

5 Ces valeurs peuvent ainsi être aisément modifiées avant chaque traitement de particules de biomasse par torréfaction.

L'invention concerne enfin une unité de torréfaction pour la torréfaction de particules de biomasse pendant une durée de torréfaction  $t_r$ , dans un gaz porté à une température de torréfaction  $T_g$ , comprenant un dispositif de commande du type décrit ci-  
10 dessus, ainsi que des moyens de chauffage pour porter ledit gaz à la température de torréfaction  $T_g$  fixée par ledit dispositif, pendant un temps égal à la durée de torréfaction  $t_r$  fixée par ce dispositif.

#### BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

L'invention sera mieux comprise, et d'autres détails, avantages et caractéristiques de celle-ci apparaîtront à la lecture de la description suivante faite à titre  
15 d'exemple non limitatif et en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique partielle en coupe longitudinale d'une unité de torréfaction selon un mode de réalisation préféré de l'invention ;
- la figure 1a est une vue à plus grande échelle du détail la de la figure 1 ;
- 20 – la figure 2 est un graphe illustrant la relation entre la température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  et le diamètre  $d_p$  des particules de biomasse pour trois valeurs du rapport  $H$  ;
- les figures 3 et 4 sont des graphes illustrant, respectivement pour deux valeurs du diamètre  $d_p$  des particules de biomasse, l'évolution du rendement massique final  $R$  de la  
25 torréfaction en fonction de la durée de torréfaction  $t_r$ , pour trois valeurs de la température  $T_g$  de torréfaction ;
- la figure 5 est une vue schématique partielle de côté d'un dispositif d'estimation expérimentale de l'homogénéité de la torréfaction au sein des particules de biomasse torréfiées ;

– la figure 6 est une vue schématique de dessus d'une particule de biomasse torréfiée, illustrant un principe de mesure mis en œuvre au moyen du dispositif de la figure 5.

Dans l'ensemble de ces figures, des références identiques peuvent désigner des éléments identiques ou analogues.

### EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PRÉFÉRÉS

La figure 1 représente une unité de torréfaction 10 de laboratoire, destinée à la torréfaction de particules de biomasse solide, par exemple de bois, et comprenant un réacteur tubulaire 12, ainsi qu'un élément chauffant 14 formé de résistances électriques entourant le réacteur 12 et capables d'atteindre jusqu'à 1000°C environ.

Le réacteur 12 est du type double enveloppe, et comprend ainsi un tube extérieur 16 en quartz et un tube intérieur 18 également en quartz et s'étendant à l'intérieur du tube extérieur 16 depuis une première 20 des extrémités de ce dernier jusque dans une partie médiane de celui-ci, où le tube intérieur 18 présente une extrémité ouverte 22. L'extrémité opposée 24 du tube intérieur fait saillie au-delà du tube extérieur 16 et est raccordée à un dispositif d'analyse 26. La première extrémité 20 du tube extérieur 16 est fermée autour du tube intérieur 18. Le tube extérieur 16 comporte une première partie 27a comportant la première extrémité 20 du tube 16 et ouverte à son extrémité opposée, ainsi qu'une seconde partie 27b amovible comportant l'extrémité opposée 28 du tube 16. La seconde partie 27b du tube 16 est raccordable à la première partie 27a du tube au moyen d'un raccord 27 comme illustré sur la figure 1.

Le tube extérieur 16 comprend, au voisinage de chacune de ses extrémités opposées 20 et 28, un raccord 30, 32 à une source 33 de gaz inerte sous pression, tel que du diazote N<sub>2</sub>. Chaque raccord 30, 32 est connecté à des moyens 34 de contrôle et à des moyens 35 de mesure du débit de gaz pénétrant dans le réacteur 12.

La seconde extrémité 28 du tube extérieur 16 est pourvue d'un orifice de passage d'une tige 36 présentant à son extrémité disposée à l'intérieur du réacteur 12, un porte-échantillon 40 équipé d'un thermocouple 42. La tige 36 est déplaçable en

translation selon la direction longitudinale, entre une position rétractée dans laquelle le porte-échantillon 40 est proche de la seconde extrémité 28 du tube extérieur 16 et se trouve à l'extérieur de l'alésage de l'élément chauffant 14, et une position déployée dans laquelle le porte-échantillon est écarté de la seconde extrémité 28 du tube extérieur 16 et se situe au sein de l'alésage de l'élément chauffant 14.

Dans l'exemple illustré, la longueur du tube extérieur 16 est d'environ 1290 mm et celle du tube intérieur 18 est d'environ 850 mm. De plus, le diamètre interne du tube extérieur 16 est d'environ 70 mm et celui du tube intérieur 18 est d'environ 55 mm. L'étendue longitudinale de l'élément chauffant 14 est d'environ 620 mm.

L'unité de torréfaction 10 comporte en outre un dispositif de commande 44, représenté très schématiquement sur la figure 1, et relié, en entrée, aux moyens de mesure de débit 35, au thermocouple 42, à des moyens de mesure de température intégrés à l'élément chauffant 14, et au dispositif d'analyse 26, et en sortie, aux moyens de contrôle de débit 34 et à l'élément chauffant 14.

Le dispositif de commande 44 comporte un dispositif 46 de mesure du diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse. Ce dispositif de mesure peut être de tout type conventionnel, fonctionnant par exemple à partir de mesures optiques et d'algorithmes de traitement d'image, ou à partir de capteurs mécaniques. Ce dispositif peut en variante prendre la forme d'une unité d'entrée permettant la saisie d'une valeur du diamètre préalablement mesurée par un opérateur humain.

Le dispositif de commande 44 comporte également une unité de calcul 48 configurée pour déterminer, en fonction du diamètre moyen  $d_p$  et de la température initiale  $T_p$  mesurés des particules de biomasse, une température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  pour laquelle le rapport  $H$  d'un temps caractéristique de la réaction de torréfaction à un temps caractéristique du transfert thermique au niveau des particules de biomasse est égal à une valeur minimale  $H^{min}$  prédéfinie.

Le rapport  $H$  est défini par la formule :

$$H = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C p_p d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}} + \min \left( \frac{\rho_p C p_p d_p}{6 h_{conv}} ; \frac{\rho_p C p_p d_p}{6 \omega_p \sigma (T_g + T_p)(T_g^2 + T_p^2)} \right)}$$

dans laquelle :

- $k_t$  est une constante de la réaction de torréfaction, considérée comme étant une réaction du premier ordre ;
- $\rho_p$  est la masse volumique des particules de biomasse ;
- 5 -  $Cp_p$  est la chaleur massique de ces particules ;
- $\lambda_{eff,p}$  est la conductivité thermique effective de ces particules, donnée par la formule :

$$\lambda_{eff,p} = \varepsilon_p \lambda_g + (1 - \varepsilon_p) \lambda_p \text{ où } \varepsilon_p \text{ est la porosité des particules de biomasse et } \lambda_p \text{ est la conductivité thermique de ces particules ;}$$

- 10 -  $\omega_p$  est l'émissivité de ces particules ;
- $h_{conv}$  est le coefficient de transfert thermique externe entre ces particules et le gaz inerte ;
- $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann égale à  $5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ .

Il est à noter que le numérateur de la formule ci-dessus correspond au  
15 temps caractéristique de la réaction de torréfaction tandis que le dénominateur correspond au temps caractéristique du transfert thermique au sein des particules de biomasse. Le premier terme de ce dénominateur correspond à un temps caractéristique du transfert thermique par conduction et radiation au sein des particules de biomasse tandis que le deuxième terme correspond au minimum des temps caractéristiques  
20 respectifs des transferts thermiques externes par convection et par radiation.

L'unité de calcul 48 détermine la constante de la réaction  $k_t$  à partir de données préenregistrées pour un ou plusieurs types de biomasse à torréfier, comme cela apparaîtra plus clairement dans ce qui suit.

L'unité de calcul 48 détermine le coefficient de transfert thermique  
25 externe  $h_{conv}$  à partir de la corrélation de Ranz-Marschall, par la formule :

$$h_{conv} = \frac{\lambda_g}{d_p} (2 + 0.6 Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/2})$$

dans laquelle :

- $Re_p$  est le nombre de Reynolds déterminé par la formule :

$$Re_p = \frac{\rho_g \times V_g \times d_p}{\mu_g} ;$$

- $Pr$  est le nombre de Prandtl déterminé par la formule :

$$Pr = \frac{\mu_g \times Cp_g}{\lambda_g};$$

et où :

- $\rho_g$  est la masse volumique du gaz inerte ;
- 5 -  $\mu_g$  est la viscosité de ce gaz ;
- $\lambda_g$  est la conductivité thermique de ce gaz ;
- $Cp_g$  est la chaleur massique de ce gaz ;
- $V_g$  est une vitesse de ce gaz par rapport aux particules de biomasse.

La vitesse  $V_g$  est déterminée par la formule :

$$V_g = D_g / S_{18}$$

10 dans laquelle  $D_g$  est le débit total de gaz injecté par les raccords 30 et 32, qui peut par exemple être de l'ordre de 1 L/min, et  $S_{18}$  est la section du tube intérieur 18.

Le dispositif de commande 44 comporte en outre une unité de contrôle 50 configurée pour régler la température de torréfaction  $T_g$  à une valeur inférieure ou, de  
15 préférence, égale, à la température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  déterminée par l'unité de calcul 48.

De plus, l'unité de calcul 48 précitée est configurée pour calculer une durée de torréfaction  $t_r$  pour laquelle, compte tenu de la température de torréfaction  $T_g$ , rendement massique final  $R$  de la torréfaction soit égal à une valeur prédéfinie.

20 A cet effet, l'unité de calcul 48 comporte une mémoire dans laquelle sont enregistrées des données expérimentales donnant le rendement massique final  $R$  correspondant à différents triplets {température de torréfaction  $T_g$ ; durée de torréfaction  $t_r$ ; diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse}. L'unité de calcul est ainsi configurée pour déterminer la durée de torréfaction  $t_r$  par extrapolation à partir de  
25 ces données préenregistrées.



L'unité de contrôle 50 est configurée pour interrompre le traitement par torréfaction au sein du réacteur 12 au bout de la durée de torréfaction  $t_r$  déterminée par l'unité de calcul 48.

Le dispositif de commande 44 comporte en outre une unité d'entrée 52  
5 permettant la saisie de la valeur minimale  $H^{min}$  du rapport  $H$  précité et du rendement massique final  $R$  souhaité de la torréfaction.

De préférence, l'unité d'entrée permet en outre la saisie du type de biomasse à torréfier, auquel cas l'unité de calcul comporte une mémoire dans laquelle sont enregistrées les valeurs des paramètres relatifs à différents types de biomasse, c'est-  
10 à-dire la constante de la réaction  $k_t$ , la masse volumique  $\rho_p$ , la chaleur massique  $Cp_p$ , la conductivité thermique effective  $\lambda_{eff,p}$ , et l'émissivité  $\omega_p$ . En variante, l'unité d'entrée peut être configurée pour permettre une saisie directe des valeurs respectives de ces paramètres ou de paramètres permettant de les déterminer.

Il en est de même pour les paramètres relatifs au gaz inerte, c'est-à-dire  
15 la masse volumique  $\rho_g$  de celui-ci, sa viscosité  $\mu_g$ , sa conductivité thermique  $\lambda_g$ , et sa chaleur massique  $Cp_g$ .

L'unité de torréfaction 10 décrite ci-dessus est une unité destinée à être utilisée à des fins expérimentales en laboratoire, pour de petits volumes de biomasse. Toutefois, la description qui précède peut être aisément adaptée par l'homme du métier  
20 à tout type d'unité de torréfaction, notamment à visée industrielle, pour la torréfaction de grands volumes de biomasse.

L'unité de torréfaction 10 décrite ci-dessus peut être utilisée de la manière suivante pour la torréfaction d'un échantillon 54 de particules de biomasse.

25 Dans un premier temps, l'échantillon 54 peut éventuellement être pesé après séchage jusqu'à masse constante.

Après mise en marche du dispositif de commande 44, un opérateur saisit, au moyen du dispositif d'entrée 52, le type de biomasse à torréfier, la valeur minimale  $H^{min}$  du rapport  $H$  précité, ainsi que la valeur du rendement massique final  $R$   
30 souhaité de la torréfaction.

L'unité de calcul détermine alors la température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  compatible avec ces valeurs, ainsi que la durée de torréfaction  $t_r$  correspondante.

5 Le dispositif de commande 44 provoque ensuite la mise en marche de l'élément chauffant 14 et sa régulation en température à partir des moyens de mesure de température intégrés à cet élément chauffant.

10 Par ailleurs, la seconde partie 27b du tube extérieur 16 étant détachée de la première partie 27a de celui-ci, l'opérateur dispose l'échantillon 54 sur le porte-échantillon 40 qui se trouve alors à l'extérieur du réacteur 12. L'opérateur raccorde ensuite la seconde partie 27b du tube extérieur 16 sur la première partie 27a de celui-ci, et dispose le porte-échantillon 40 du côté de la seconde extrémité 28 du tube extérieur, à l'extérieur de la région entourée par l'élément chauffant 14, en maintenant la tige 36 dans sa position rétractée.

15 Le dispositif de commande 44 commande les moyens de contrôle de débit 34 et la source de gaz inerte 33 de manière à ce que du gaz sous pression pénètre constamment par les raccords 30 et 32 du tube extérieur 16 du réacteur 12. Un débit de gaz correspondant s'échappe ainsi vers le dispositif d'analyse 26, de manière à purger le réacteur 12.

20 Le gaz injecté dans le réacteur 12 par le raccord 30 proche de la première extrémité 20 du tube extérieur 16 est réchauffé entre les tubes extérieur 16 et intérieur 18 avant d'atteindre une région médiane du réacteur 12 entourée par l'élément chauffant 14. Le gaz injecté dans le réacteur 12 par l'autre raccord 32 permet de baigner l'échantillon 54 afin de le maintenir à sa température initiale avant le début de la torréfaction et empêcher ainsi que le traitement thermique de l'échantillon 54 ne  
25 s'amorce de manière non contrôlée. Il est à noter que le débit de gaz injecté par cet autre raccord 32 est de préférence égal au tiers du débit total de gaz injecté dans le réacteur 12 par les deux raccords 30 et 32. Le dispositif de commande 44 régule l'élément chauffant 14 de sorte que la température du gaz au sein du réacteur 12, déterminée par les moyens de mesure de température intégrés à l'élément chauffant 14, demeure constamment

égale à une température de torréfaction  $T_g$  qui peut être inférieure, ou de préférence égale, à la température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  déterminée précédemment.

Dès que le dispositif d'analyse 26 indique au dispositif de commande 44 que le taux de dioxygène présent au sein du réacteur 12 est suffisamment bas, de sorte  
5 que ce réacteur se trouve rempli d'un milieu gazeux inerte propice à la torréfaction, et si la température du gaz a atteint la température de torréfaction  $T_g$ , la tige 36 est déplacée en translation jusque dans sa position déployée illustrée sur la figure 1, soit manuellement par un opérateur humain, soit automatiquement au moyen d'un dispositif robotisé prévu à cet effet (non représenté sur la figure 1).

10 La régulation en température de l'élément chauffant 14 peut dès lors être basée sur une mesure de température réalisée par le thermocouple 42 disposé au plus près de l'échantillon 40 pour un maximum de précision. La mesure de température peut bien entendu être réalisée par tout autre moyen dans le cadre de la présente invention.

15 Au bout d'une durée égale à la durée de torréfaction  $t_r$ , déterminée précédemment, la tige 36 est déplacée vers sa position rétractée, soit manuellement par l'opérateur humain, soit automatiquement au moyen du dispositif robotisé précité.

20 Une application particulière du procédé de torréfaction décrit ci-dessus à la torréfaction de particules de Hêtre va maintenant être décrite.

Pour ce matériau, les valeurs des paramètres nécessaires au calcul du rapport  $H$  sont par exemple :

- $\rho_p = 710 \text{ Kg.m}^{-3}$  ;
- $Cp_p = 1522 \text{ J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  ;
- 25 -  $\lambda_p = 0,112 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$  ;
- $\varepsilon_p = 0,7$  ;
- $\omega_p = 0,9$ .

De plus, la constante de réaction  $k_t$  est déterminée conformément aux travaux de Di Blasi et Branca présentés dans l'article Di Blasi, C. and C. Branca (2001) :

"Kinetics of Primary Product Formation from Wood Pyrolysis.", Industrial & Engineering Chemistry Research 40(23): 5547-5556.

Cette constante de réaction  $k_t$  est donc estimée par la formule :

$$k_t = 4,38 \cdot 10^9 e^{-141200/R.T_g}$$

5 Le gaz utilisé étant du diazote N<sub>2</sub>, les valeurs des paramètres correspondants sont bien connues de l'homme du métier. Il est rappelé que la conductivité thermique de ce gaz s'obtient par la formule :

$$\lambda_g = \frac{\mu_g}{M_g} \left[ 1,3(Cp_g M_g - R) + 14644 - \frac{2928,8}{T_g/T_{c_g}} \right]$$

dans laquelle :

- $M_g$  est la masse molaire du gaz égale à 0,028 kg/mol ;
- 10 -  $R$  est la constante des gaz parfaits égale à 8,3145 J/(mol.K) ;
- $T_{c_g}$  est la température critique du gaz (-146°C) ;
- $Cp_g$  est la chaleur massique du gaz qui s'obtient par la formule :

$$Cp_g = \frac{6,5 + 0,001T_g}{M_g} * 4,18$$

La figure 2 représente trois courbes illustrant la relation entre la température de torréfaction  $T_g$  et le diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse pour que le rapport  $H$  calculé par la formule ci-dessus soit égal respectivement à 2, 5 et 10, dans le cas de particules de Hêtre torréfiées sous diazote N<sub>2</sub>, ces particules étant initialement à une température  $T_p = 25^\circ C$ .

Ce type de graphe illustre le principe mis en œuvre dans le dispositif de commande 44 décrit ci-dessus consistant à déterminer la température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  garantissant un niveau minimal d'homogénéité  $H^{min}$  prédéfini, en fonction du diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse.

Les figures 3 et 4 illustrent des données préenregistrées dans le dispositif de commande 44, permettant de déterminer par extrapolation la durée de torréfaction  $t_r$  en fonction de la température de torréfaction  $T_g$  et du rendement massique final  $R$  souhaité (sur base sèche).

A titre d'information, ces données ont pu être obtenues expérimentalement au moyen de l'unité de torréfaction 10 décrite ci-dessus, en ajustant manuellement la température de torréfaction  $T_g$  et la durée de torréfaction  $t_r$  au cours de différents essais, et en mesurant à chaque fois le rendement massique  $R$  obtenu en fin  
5 de torréfaction.

La figure 3 se rapporte à des expérimentations faites avec des particules de diamètre moyen égal à 10 mm, tandis que la figure 4 se rapporte à des expérimentations faites avec des particules de diamètre moyen égal à 5 mm. Dans les deux cas, trois valeurs de température de torréfaction  $T_g$  ont été testées, à savoir 300°C,  
10 325°C et 350°C.

Ces expériences ont permis de valider la formule utilisée pour le calcul de la constante de réaction  $k_t$ , et donc du temps caractéristique de la réaction de torréfaction, à partir du modèle cinétique de Di Blasi et Branca comme expliqué ci-dessus. En effet, la différence entre le rendement théorique fourni par ce modèle et celui mesuré  
15 expérimentalement est en moyenne de 4% pour les particules de 5mm de diamètre, et de 8% en moyenne pour les particules de 10mm.

De plus, un second thermocouple a été utilisé lors de ces expériences. Ce thermocouple a été disposé à l'intérieur d'une particule de biomasse. Une comparaison entre la température au sein de la particule mesurée par ce thermocouple  
20 et la température du gaz inerte mesurée par le thermocouple 42 décrit ci-dessus a permis de déterminer expérimentalement le temps de réchauffement de la particule. Ces mesures ont permis de valider le calcul du temps caractéristique de transfert thermique expliqué ci-dessus puisque la différence entre ce temps caractéristique et celui mesuré expérimentalement représente en moyenne 10% du temps mesuré expérimentalement  
25 pour les particules de 5 mm et en moyenne 7% du temps mesuré expérimentalement pour les particules de 10 mm.

Les graphes des figures 3 et 4 montrent de plus que la torréfaction peut être conduite rapidement, en moins de 9 minutes pour les deux tailles de particules testées, avec une perte de masse inférieure à 30%.

Bien entendu, des données fondées sur un plus grand nombre d'expériences peuvent être enregistrées dans le dispositif de commande 44 de manière à accroître la précision du calcul de la durée de torréfaction  $t_T$ .

5                    Au terme d'expériences du type décrit ci-dessus, l'homogénéité de la torréfaction au sein des particules de biomasse peut être vérifiée par des mesures et comparée aux résultats fournis par le calcul décrit ci-dessus.

La figure 5 illustre un dispositif d'analyse permettant de conduire de telles mesures.

10                    Le principe de ce dispositif d'analyse repose sur la mesure de la profondeur de pénétration, dans les particules de Hêtre torréfiées, d'un poinçon soumis à une contrainte donnée.

15                    Les particules de Hêtre torréfiées sont préalablement coupées de manière à permettre une mesure sur une surface plane, à cœur et en périphérie de l'échantillon.

20                    Chaque échantillon 54' ainsi obtenu est maintenu stable sur une pièce de métal 110 par collage. Dans un premier temps, le poinçon 112 est amené à la surface de l'échantillon ; une pré-contrainte, mesurée par un capteur de force 114, est appliquée comme référence des analyses, puis une contrainte supérieure est appliquée et l'enfoncement du poinçon 112 qui en résulte est mesuré à l'aide du comparateur.

25                    Cette mesure est répétée en divers points 115 sur un axe médian 116 de l'échantillon (figure 6), c'est-à-dire « à cœur », et en périphérie, à 2mm du bord, de manière à comparer l'effet du traitement thermique à la surface et au cœur de l'échantillon. Plusieurs mesures peuvent avantageusement être réalisées sur le même axe pour obtenir une valeur moyenne de l'enfoncement, et s'affranchir de l'hétérogénéité du matériau de l'échantillon. Ces mesures ne devraient pas être réalisées sur des zones d'extrémité 118 de l'échantillon à cause des effets de bord.

30                    D'une manière générale, une application particulière des dispositifs et procédés de torréfaction selon l'invention à des particules de Hêtre a été décrite ci-

dessus, mais il est bien entendu que l'invention peut être appliquée à tout type de particules de biomasse.

En particulier, l'invention peut être appliquée à tous les types de bois, à tous les feuillus, tels que le Hêtre, mais aussi aux résineux. Ces derniers ont en effet une réactivité moins importante que le Hêtre, et permettent donc d'obtenir plus facilement des valeurs élevées du rapport  $H$  traduisant l'homogénéité de la réaction de torréfaction.

**REVENDICATIONS**

1. Procédé de commande d'une unité (10) de torréfaction pour la torréfaction de particules (54) de biomasse, préférentiellement lignocellulosique, pendant une durée de torréfaction  $t_r$  dans un gaz porté à une température de torréfaction  $T_g$ , ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes successives de :
- mesure d'un diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse ;
  - en fonction du diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse, calcul d'une température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  pour laquelle un rapport  $H$  d'un temps caractéristique de la réaction de torréfaction à un temps caractéristique du transfert thermique au niveau des particules de biomasse est égal à une valeur minimale  $H^{min}$  prédéfinie ;
  - réglage de la température de torréfaction  $T_g$  dudit fluide à une valeur inférieure ou égale à ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  ;
  - réglage de la durée de torréfaction  $t_r$  à une valeur telle que le rendement massique final  $R$  de la torréfaction soit égal à une valeur cible prédéfinie.
2. Procédé de commande selon la revendication 1, dans lequel la température de torréfaction  $T_g$  est réglée égale à ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$ .
3. Procédé de commande selon la revendication 1 ou 2, dans lequel ladite valeur minimale  $H^{min}$  prédéfinie dudit rapport  $H$  est supérieure ou égale à 2, de préférence supérieure ou égale à 5, et encore préférentiellement supérieure ou égale à 10.
4. Procédé de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite valeur cible du rendement massique final  $R$  de la



torréfaction est supérieure ou égale à 60%, préférentiellement 70%, et plus préférentiellement 80%.

5 5. Procédé de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite température de torréfaction  $T_g$  est comprise dans la plage 300°C – 400°C, préférentiellement dans la plage 300°C - 350°C, et plus préférentiellement dans la plage 325°C – 350°C.

10 6. Procédé de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite durée de torréfaction  $t_r$  est inférieure à 15 minutes, de préférence inférieure à 10 minutes, encore plus préférentiellement inférieure à 5 minutes.

15 7. Procédé de commande selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  est déterminée en fonction de ladite valeur minimale  $H^{min}$  dudit rapport par la formule :

$$H^{min} = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C_{p,p} d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}}}$$

dans laquelle :

- $k_t$  est une constante de la réaction de torréfaction, considérée comme étant une réaction du premier ordre ;
- 20 -  $\rho_p$  est la masse volumique de la biomasse ;
- $C_{p,p}$  est la chaleur massique de la biomasse ;
- $\lambda_{eff,p}$  est la conductivité thermique effective de la biomasse.

25 8. Procédé de commande selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  est déterminée en fonction de ladite valeur minimale  $H^{min}$  dudit rapport par la formule :

$$H^{min} = \frac{1/k_t}{\frac{\rho_p C p_p d_p^2}{36 \lambda_{eff,p}} + \min \left( \frac{\rho_p C p_p d_p}{6 h_{conv}} ; \frac{\rho_p C p_p d_p}{6 \omega_p \sigma (T_g^{max} + T_p)(T_g^{max^2} + T_p^2)} \right)}$$

dans laquelle :

- $k_t$  est une constante de la réaction de torréfaction, considérée comme étant une réaction du premier ordre ;
- $\rho_g$  est la masse volumique de la biomasse ;
- 5 -  $C p_p$  est la chaleur massique de la biomasse ;
- $\lambda_{eff,p}$  est la conductivité thermique effective de la biomasse ;
- $\omega_p$  est l'émissivité de la biomasse ;
- $h_{conv}$  est le coefficient de transfert thermique externe entre la biomasse et ledit fluide ;
- 10 -  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann ;
- $T_p$  est la température initiale des particules de biomasse avant torréfaction.

9. Procédé de commande selon la revendication précédente, dans lequel ledit coefficient de transfert thermique externe  $h_{conv}$  est déterminé à partir de la
- 15 corrélation de Ranz-Marschall, par la formule :

$$h_{conv} = \frac{\lambda_g}{d_p} (2 + 0.6 Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/2})$$

dans laquelle :

- $Re_p$  est le nombre de Reynolds déterminé par la formule :

$$Re_p = \frac{\rho_g \times V_g \times d_p}{\mu_g} ;$$

- $Pr$  est le nombre de Prandtl déterminé par la formule :

$$20 \quad Pr = \frac{\mu_g \times C p_g}{\lambda_g} ;$$

où :

- $\rho_p$  est la masse volumique du fluide ;
- $\mu_g$  est la viscosité du fluide ;
- $\lambda_g$  est la conductivité thermique du fluide ;
- 25 -  $C p_g$  est la chaleur massique du fluide ;
- $V_g$  est une vitesse du fluide par rapport aux particules de biomasse.

10. Procédé de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la durée de torréfaction  $t_r$  est déterminée en fonction de la température de torréfaction  $T_g$  et de la valeur de cible du rendement massique final  $R$  de la torréfaction, au moyen de données expérimentales de corrélation préétablies.

11. Procédé de torréfaction de particules de biomasse (54), préférentiellement de biomasse lignocellulosique, pendant une durée de torréfaction  $t_r$  dans un gaz porté à une température de torréfaction  $T_g$  au sein d'une unité de torréfaction (10), caractérisé en ce qu'il comprend la commande de ladite unité de torréfaction (10) au moyen d'un procédé de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes.

12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel le diamètre moyen  $d_p$  des particules de biomasse est inférieur à 40 mm, de préférence inférieur à 20 mm, encore plus préférentiellement inférieur à 10 mm.

13. Procédé selon la revendication 11 ou 12, dans lequel la biomasse est constituée de bois.

14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 13, dans lequel ledit gaz est un gaz inerte, tel que du diazote  $N_2$  par exemple.

15. Dispositif (44) de commande d'unité (10) de torréfaction pour la torréfaction de particules de biomasse pendant une durée de torréfaction  $t_r$  dans un fluide porté à une température de torréfaction  $T_g$ , le dispositif de commande (44) étant caractérisé en ce qu'il comprend :

- des moyens (46) de mesure d'un diamètre moyen  $d_p$  de particules de biomasse (54) ;
- des moyens de calcul (48) configurés pour déterminer, en fonction du diamètre moyen  $d_p$  mesuré des particules de biomasse, une température de torréfaction maximale

$T_g^{max}$  pour laquelle le rapport  $H$  d'un temps caractéristique de la réaction de torréfaction à un temps caractéristique du transfert thermique au niveau des particules de biomasse est égal à une valeur minimale  $H^{min}$  prédéfinie ;

– des moyens de commande (50) configurés pour régler ladite température de torréfaction  $T_g$  à une valeur inférieure ou égale à ladite température de torréfaction maximale  $T_g^{max}$  ;

– des moyens de calcul et de commande (48, 50) configurés pour régler ladite durée de torréfaction  $t_r$  à une valeur telle que le rendement massique final  $R$  de la torréfaction soit égal à une valeur prédéfinie.

10

16. Dispositif de commande selon la revendication 15, comprenant en outre des moyens (52) de pré réglage de ladite valeur minimale  $H^{min}$  dudit rapport  $H$  et/ou des moyens de pré réglage du rendement massique final  $R$  de la torréfaction.

15

17. Unité (10) de torréfaction pour la torréfaction de particules de biomasse (54) pendant une durée de torréfaction  $t_r$  dans un gaz porté à une température de torréfaction  $T_g$ , caractérisée en ce qu'elle comprend un dispositif de commande (44) selon la revendication 15 ou 16, ainsi que des moyens de chauffage (14) pour porter ledit gaz à la température de torréfaction  $T_g$  fixée par ledit dispositif (44), pendant un temps égal à la durée de torréfaction  $t_r$  fixée par ce dispositif (44).

20

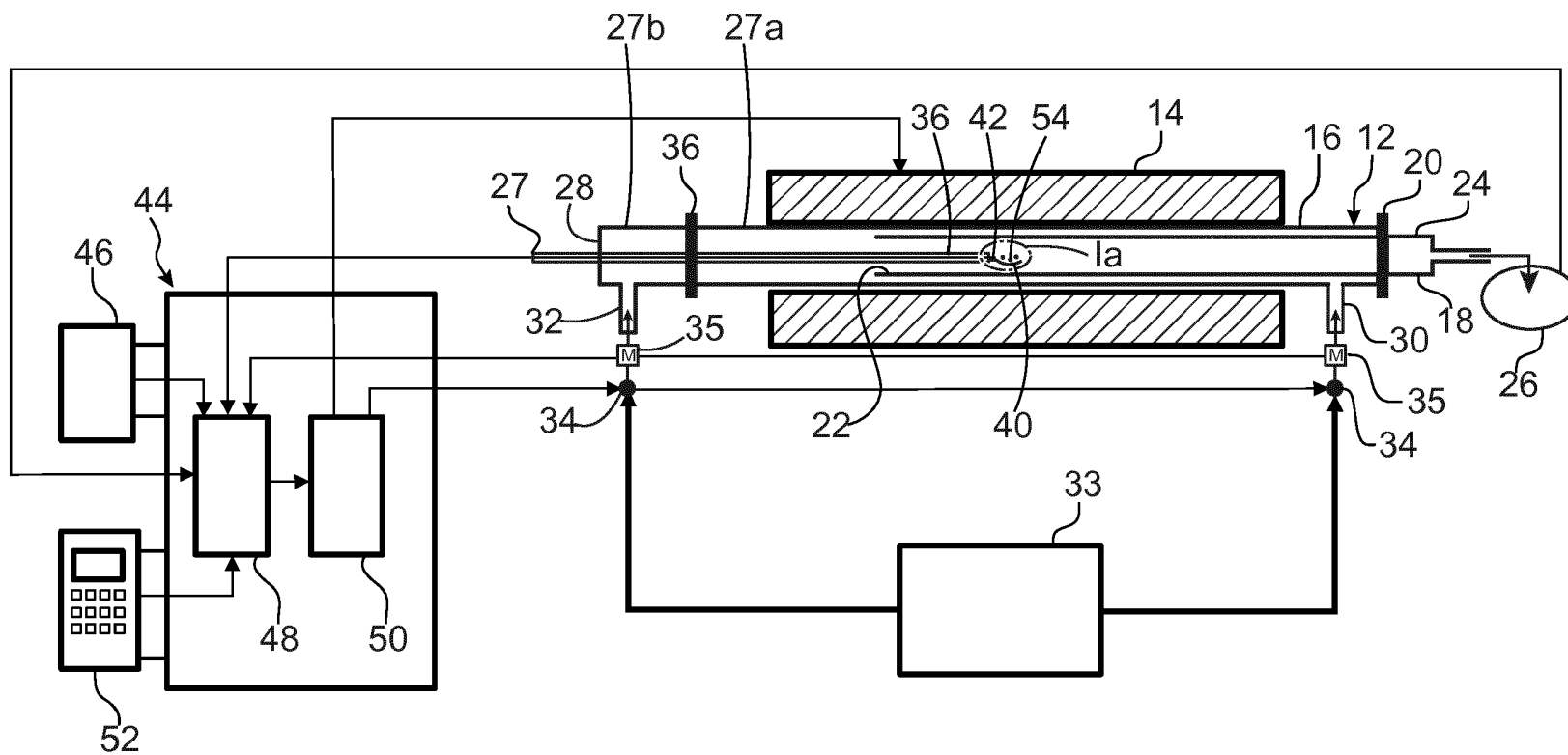


FIG. 1

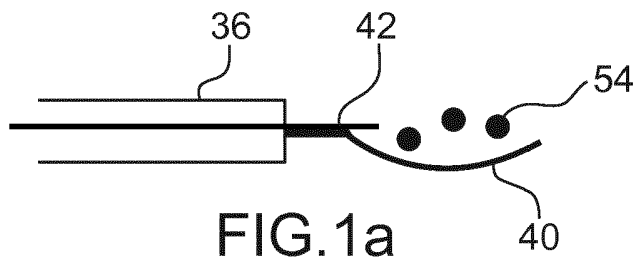


FIG. 1a

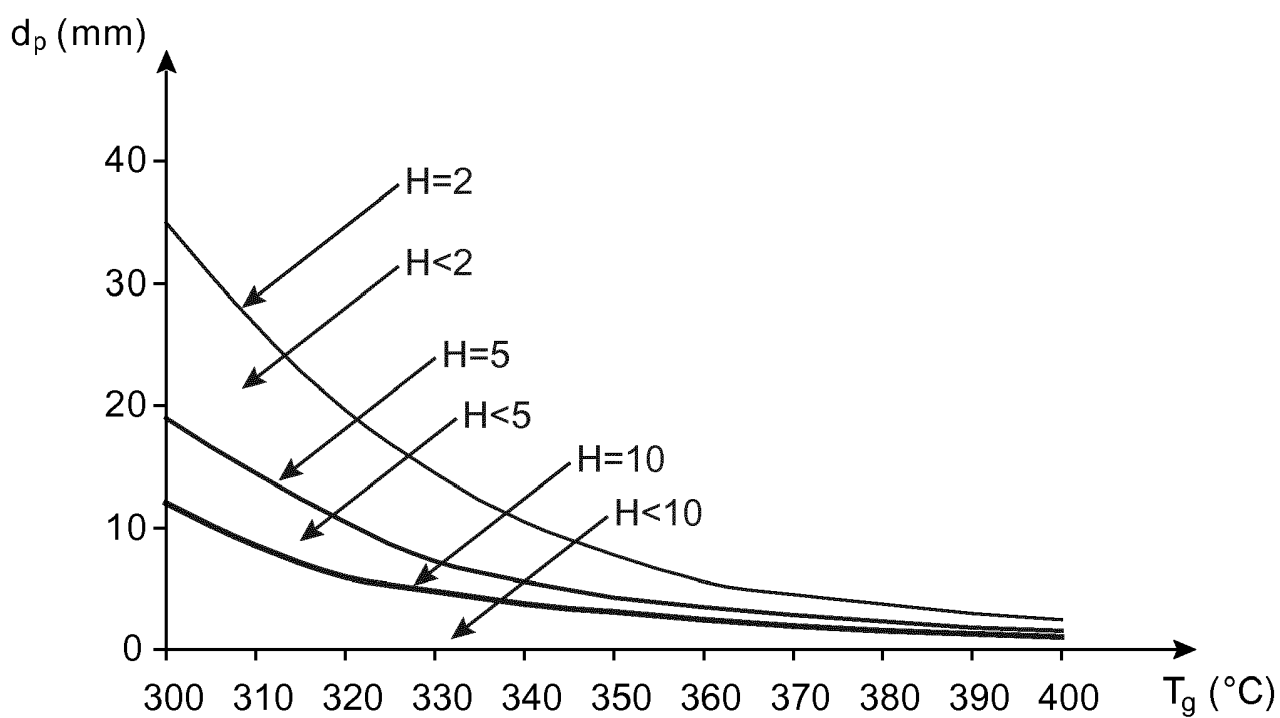


FIG.2

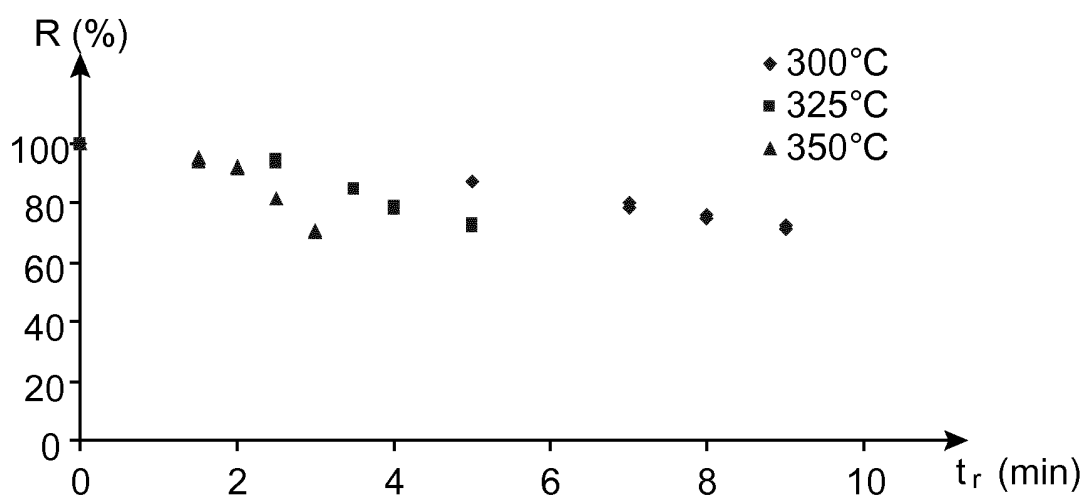


FIG.3

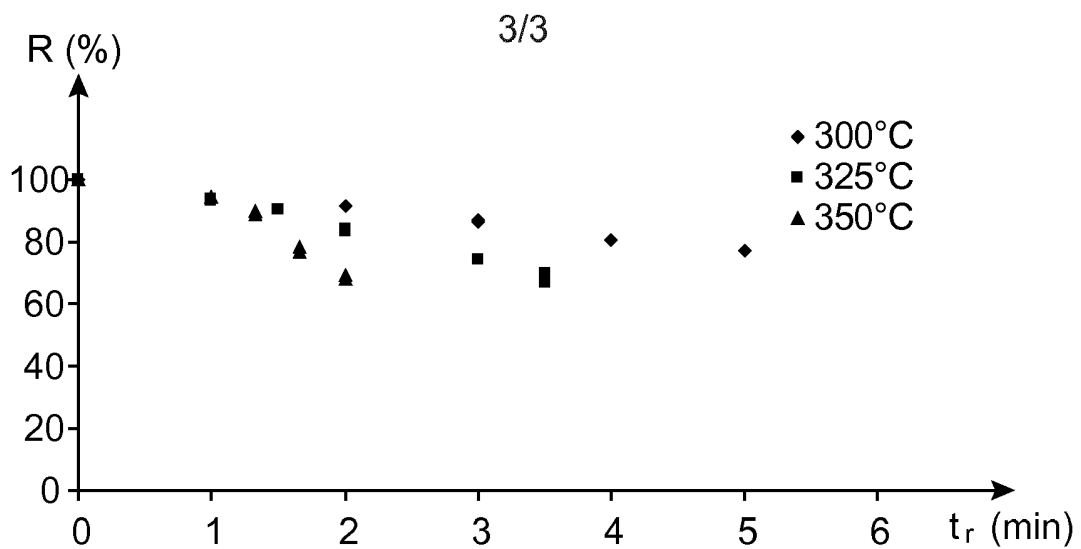


FIG. 4

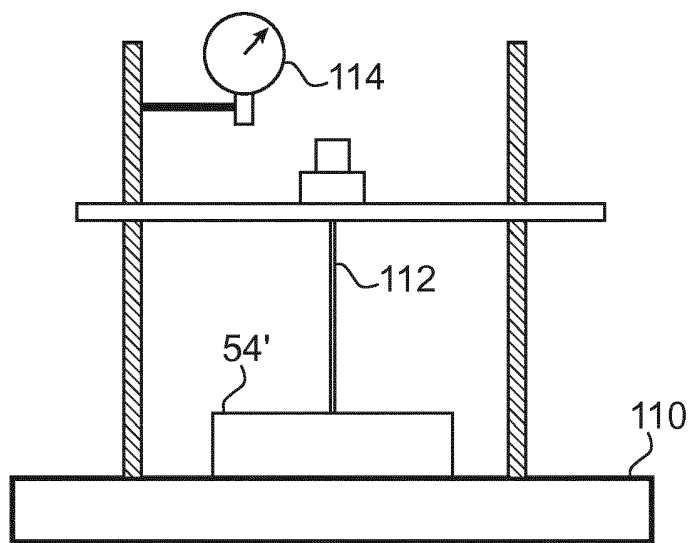


FIG. 5

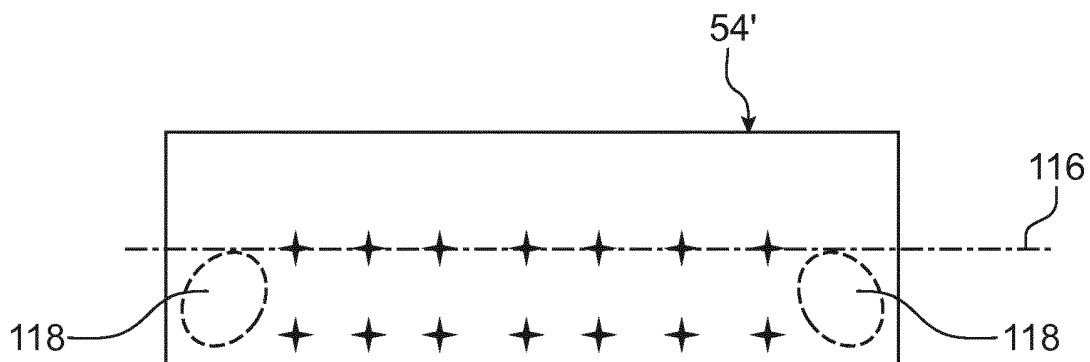


FIG. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2012/076484

<p>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. C10L9/08 ADD.</p> <p>According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC</p>											
<p>B. FIELDS SEARCHED</p> <p>Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) C10L G05D</p> <p>Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched</p> <p>Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data</p>											
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category*</th> <th>Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th>Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td> <p>KLEINSCHMIDT C P: "Overview of international developments in torrefaction", CENTRAL EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE, GRAZ (AUSTRIA), 26-29 JANUARY 2011, 28 January 2011 (2011-01-28), pages 1-9, XP009159020, Retrieved from the Internet: URL:http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2011_graz_torrefaction/Graz%20Kleinschmidt%202011.pdf [retrieved on 2012-05-03] pages 1,7; table 1</p> <p>-----</p> </td> <td>1-17</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td> <p>US 2007/266623 A1 (PAOLUCCIO JOHN A [US]) 22 November 2007 (2007-11-22) paragraph [0146]; claims 16,32; figure 2</p> <p>-----</p> <p>-/--</p> </td> <td>1-17</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	A	<p>KLEINSCHMIDT C P: "Overview of international developments in torrefaction", CENTRAL EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE, GRAZ (AUSTRIA), 26-29 JANUARY 2011, 28 January 2011 (2011-01-28), pages 1-9, XP009159020, Retrieved from the Internet: URL:http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2011_graz_torrefaction/Graz%20Kleinschmidt%202011.pdf [retrieved on 2012-05-03] pages 1,7; table 1</p> <p>-----</p>	1-17	A	<p>US 2007/266623 A1 (PAOLUCCIO JOHN A [US]) 22 November 2007 (2007-11-22) paragraph [0146]; claims 16,32; figure 2</p> <p>-----</p> <p>-/--</p>	1-17
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.									
A	<p>KLEINSCHMIDT C P: "Overview of international developments in torrefaction", CENTRAL EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE, GRAZ (AUSTRIA), 26-29 JANUARY 2011, 28 January 2011 (2011-01-28), pages 1-9, XP009159020, Retrieved from the Internet: URL:http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2011_graz_torrefaction/Graz%20Kleinschmidt%202011.pdf [retrieved on 2012-05-03] pages 1,7; table 1</p> <p>-----</p>	1-17									
A	<p>US 2007/266623 A1 (PAOLUCCIO JOHN A [US]) 22 November 2007 (2007-11-22) paragraph [0146]; claims 16,32; figure 2</p> <p>-----</p> <p>-/--</p>	1-17									
<p><input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.      <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.</p>											
<p>* Special categories of cited documents :</p> <table border="0"> <tr> <td> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"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)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> </td> <td> <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p> </td> </tr> </table>			<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"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)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"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</p> <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p>							
<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"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)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"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</p> <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p>										
<p>Date of the actual completion of the international search</p> <p>18 March 2013</p>		<p>Date of mailing of the international search report</p> <p>27/03/2013</p>									
<p>Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016</p>		<p>Authorized officer</p> <p>Mallet, Philippe</p>									



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2012/076484

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	BERGMAN P C A ET AL: "Torrefaction for biomass upgrading", BIOMASS FOR ENERGY, INDUSTRY AND CLIMATE PROTECTION : 14TH EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE & EXHIBITION ; PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE, 17 - 21 OCTOBER 2005 PARIS,, 21 October 2005 (2005-10-21), pages 206-209, XP008101852, ISBN: 978-88-89407-07-3 [retrieved on 2005-10-21] page 5, left-hand column; figure 1 -----	1-17

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2012/076484

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2007266623 A1	22-11-2007	US 2007266623 A1	22-11-2007
		US 2012093701 A1	19-04-2012
		US 2012124901 A1	24-05-2012
-----			

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°  
PCT/EP2012/076484

<b>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE</b> INV. C10L9/08 ADD.				
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB				
<b>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</b>				
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) C10L G05D				
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				
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</b>				
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées		
A	KLEINSCHMIDT C P: "Overview of international developments in torrefaction", CENTRAL EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE, GRAZ (AUSTRIA), 26-29 JANUARY 2011, 28 janvier 2011 (2011-01-28), pages 1-9, XP009159020, Extrait de l'Internet: URL:http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2011_graz_torrefaction/Graz%20Kleinschmidt%202011.pdf [extrait le 2012-05-03] pages 1,7; tableau 1 ----- -/--	1-17		
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <span style="margin-left: 200px;"><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</span>				
* Catégories spéciales de documents cités:				
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none; vertical-align: top;">                     "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                 </td> <td style="width: 50%; border: none; vertical-align: top;">                     "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                      "&amp;" document qui fait partie de la même famille de brevets                 </td> </tr> </table>			"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
"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		
18 mars 2013		27/03/2013		
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale		Fonctionnaire autorisé		
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Mallet, Philippe		

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 2007/266623 A1 (PAOLUCCIO JOHN A [US]) 22 novembre 2007 (2007-11-22) alinéa [0146]; revendications 16,32; figure 2 -----	1-17
A	BERGMAN P C A ET AL: "Torrefaction for biomass upgrading", BIOMASS FOR ENERGY, INDUSTRY AND CLIMATE PROTECTION : 14TH EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE & EXHIBITION ; PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE, 17 - 21 OCTOBER 2005 PARIS,, 21 octobre 2005 (2005-10-21), pages 206-209, XP008101852, ISBN: 978-88-89407-07-3 [extrait le 2005-10-21] page 5, colonne de gauche; figure 1 -----	1-17

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2012/076484

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2007266623 A1	22-11-2007	US 2007266623 A1	22-11-2007
		US 2012093701 A1	19-04-2012
		US 2012124901 A1	24-05-2012
-----			