(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 198 677 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
01.02.2012 Bulletin 2012/05

(21) Numéro de dépôt: **08805166.9**

(22) Date de dépôt: **09.10.2008**

(51) Int Cl.:
H05H 1/42 *(2006.01)*

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/EP2008/063516

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2009/047284 (16.04.2009 Gazette 2009/16)

(54) **DISPOSITIF D'INJECTION DE CHARGE LIQUIDE A MELANGER/CONVERTIR AU SEIN D'UN DARD PLASMA OU D'UN FLUX GAZEUX**

EINRICHTUNG ZUM EINSPRITZEN EINER IN EINER PLASMANADEL ODER EINER GASFÖRMIGEN STRÖMUNG ZU MISCHENDEN/UMZUSETZENDEN FLÜSSIGEN LADUNG

DEVICE FOR INJECTING A LIQUID LOAD TO BE MIXED/CONVERTED INSIDE A PLASMA NEEDLE OR A GASEOUS FLOW

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

(30) Priorité: **12.10.2007 FR 0758267**

(43) Date de publication de la demande:
23.06.2010 Bulletin 2010/25

(73) Titulaire: **Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives**
75015 Paris (FR)

(72) Inventeurs:
- **BROTHIER, Méryl**
  F-13190 Aix-en-Provence (FR)
- **GUENADOU, David**
  F-04100 Manosque (FR)
- **GRAMONDI, Patrick**
  F-13760 Saint-Cannat (FR)

(74) Mandataire: **Ilgart, Jean-Christophe et al**
BREVALEX
95 rue d'Amsterdam
75378 Paris Cedex 8 (FR)

(56) Documents cités:
WO-A-2007/065252
FR-A- 2 780 235
US-A- 3 839 618
US-A- 4 127 760

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

EP 2 198 677 B1

Description

DOMAINE TECHNIQUE ET ART ANTERIEUR

[0001] La présente invention se rapporte au domaine des systèmes d'injection de liquide dans le dard de torches à plasma.

[0002] Parmi les liquides à convertir dans une torche on peut citer les exemples des bio-huiles, ou encore des boues de station d'épuration, ou encore des « slurry » ou particules résultant de la pulvérisation d'un solide, ces particules étant mélangées à un liquide pour l'injection dans le dard d'une torche plasma.

[0003] Une des problématiques majeures rencontrées dans les procédés de gazéification d'une charge liquide par voie plasma, en particulier dans le cas de la bio-huile, est d'utiliser au mieux la torche à plasma pour effectuer la conversion.

[0004] Dans le cas de la bio-huile, celle-ci est obtenue par pyrolyse flash, qui est un procédé thermochimique (à une température $T \approx 500°C$) dans lequel la biomasse est chauffée rapidement sous défaut stoechiométrique de dioxygène. Sous l'effet de la chaleur, la biomasse se décompose et conduit à la formation de gaz permanents, de vapeurs condensables, d'aérosols et de résidus carbonés. Après refroidissement et condensation des composés volatils et des aérosols, on obtient typiquement un liquide marron foncé, la bio-huile. Celle-ci est ensuite gazéifiée par injection dans une torche à plasma.

[0005] Le prétraitement de la bio-huile permet d'injecter de la biomasse dans un dard de torche à plasma pour la gazéifier. En effet la biomasse serait, sans cette étape de prétraitement, hétérogène, difficilement dispersable (du moins sans un broyage préalable coûteux) et difficile à injecter sous pression car solide. Par ailleurs en terme de coût d'acheminement de la biomasse vers les usines de gazéification, une pré-transformation de type pyrolyse flash peut s'avérer avantageuse.

[0006] Pour bien convertir un liquide, et en particulier de la bio-huile en gaz de synthèse, par une torche plasma, on recherche un bon équilibre entre les différents paramètres influençant la réaction, notamment le temps de séjour du liquide dans le dard plasma, la température du dard plasma, la surface d'échange entre le réactif et le milieu plasma et la composition du milieu.

[0007] Une mauvaise gazéification de la bio-huile produit non seulement un mauvais rendement matière, rédhibitoire en terme de rentabilité de procédé, mais aussi un gaz de synthèse de mauvaise qualité, c'est-à-dire que le gaz n'a pas un niveau de pureté suffisant pour une utilisation ultérieure comme intermédiaire de la synthèse de bio-carburant du fait de la présence de goudrons (seuil d'admissibilité voisin de 0,1 mg/Nm3). La présence de ces goudrons pose de nombreux problèmes dans les différentes applications visées notamment lors de la synthèse de carburant par procédés de type Fischer-Tropsch où, sous l'action de la chaleur et de catalyseur, ils forment, par cokéfaction, des suies et un dépôt de composés hydrocarbonés lourds. Ceci diminue sensiblement la durée de vie du catalyseur utilisé pour la synthèse Fischer-Tropsch.

[0008] De plus, le dard plasma issu d'une torche à plasma a comme principales caractéristiques une température élevée (de 5000 à 7000K), une vitesse d'écoulement élevée (800 à 1200 $m.s^{-1}$) ainsi qu'une viscosité élevée. Avec de telles caractéristiques, les particules qu'on tente d'introduire au coeur du dard ont tendance à rebondir sur ce dernier.

[0009] Il existe donc un réel besoin industriel de disposer d'un dispositif d'injection de liquide pour optimiser sa dispersion et/ou sa conversion au coeur d'un dard plasma.

[0010] Les techniques proposées à ce jour pour l'injection de liquide pour sa dispersion/conversion par un dard plasma se répartissent en quatre grandes familles.

[0011] Une première famille regroupe les méthodes d'injection basées sur la nébulisation préalable du liquide avant l'injection dans le dard plasma. Ce type de solution favorise la surface d'échange entre le réactif et le milieu plasma comme dans le brevet FR 2 565 992. La mise en oeuvre de ce procédé est faite au moyen d'un dispositif permettant d'introduire la matière pulvérisée de manière concentrique autour de l'écoulement gazeux chaud à l'aide d'un gaz vecteur. Il est conféré au gaz plasma un mouvement rotatoire dans le générateur de plasma afin d'obtenir une turbulence dans la matière pulvérisée à écoulement concentrique, l'écoulement gazeux chaud réchauffant le mélange. Le fait qu'il soit difficile de donner suffisamment de vitesse au liquide nébulisé est compensé par l'ajout d'un gaz vecteur auquel on donne la vitesse nécessaire pour pénétrer le dard plasma et en créant une turbulence entre la matière à convertir et l'écoulement gazeux chaud. Néanmoins ce procédé ne permet pas de pénétrer en profondeur dans le dard plasma et la réaction de gazéification a lieu en périphérie, ne profitant pas des hautes températures disponibles en profondeur du dard plasma. De plus, on dilue le dard plasma avec un gaz supplémentaire froid, ce qui est pénalisant en terme de rendement énergétique, sachant qu'il faut par ailleurs généralement une quantité de gaz vecteur non négligeable pour fractionner finement un liquide. En outre, dans le cas d'un liquide relativement visqueux et comportant des fines et susceptibles de coker, le système de nébulisation avec la mise en oeuvre d'injecteur de diamètre relativement restreint constitue une difficulté du fait du bouchage prévisible du dispositif.

[0012] Une deuxième famille concerne les méthodes d'injection basées sur le forçage du mélange. Dans ce cas

plusieurs configurations sont envisageables. Par exemple le plasma peut passer dans un canal percé de trous d'injection obligeant ainsi le liquide injecté à entrer dans le dard plasma. Divers documents évoquent cette technique, comme par exemple les documents FR 1 509 436 ou US 5 906 757. Dans le premier document cité, on force le jet plasma à circuler dans un tube muni d'un accroissement de diamètre, créant ainsi une détente du jet plasma dans la zone d'accroissement et donc une zone de turbulence dans le plasma. Le liquide est injecté dans cette zone et forme un anneau ou cylindre turbulent annulaire autour du dard plasma. Dans le deuxième document, on fait circuler le plasma dans un tube muni d'au moins un injecteur disposé radialement, ce qui permet d'injecter le liquide avec une composante tangentielle dans le plasma. Ce type de solution favorise le temps de séjour car le liquide est injecté en périphérie du dard plasma, où la vitesse d'écoulement du plasma est moins élevée (de l'ordre de 100m/s comparé à la vitesse régnant au coeur du dard pouvant dépasser 500m/s.) Néanmoins cette solution génère des pertes énergétiques dues au transfert thermique avec les parois du canal. De plus cette solution ne force pas le liquide à entrer en profondeur dans le dard plasma, ne permettant pas de bénéficier de l'effet de température ni des espèces réactives constitutives du coeur du dard plasma.

[0013] Une troisième famille regroupe les méthodes d'injection utilisant plusieurs torches plasma. Un exemple de réalisation de cette méthode est évoqué dans le document CA 2 205 578. Le principe de cette méthode est d'emprisonner un jet de réactif dans une confluence d'au moins deux jets plasma, le point de confluence des jets plasma se trouvant sur l'axe d'injection du réactif. Ce type de solution permet l'injection du liquide directement en profondeur du dard plasma. Dans ce cas c'est la température qui est favorisée car on profite des hautes températures régnant au coeur du dard plasma.

[0014] Ce type de solution pose des problèmes de pertes énergétiques.

[0015] En effet les flux des torches sont canalisés, ne laissant pas de degré de liberté sur l'optimisation de l'injection du liquide à convertir par rapport à une configuration figée des torches plasma.

[0016] En outre le jet n'est pas fractionné et donc l'échange thermique entre le liquide à convertir et le milieu plasma n'est pas optimum.

[0017] Autre problème, l'injection du liquide en un point n'optimise pas l'utilisation du dard. En effet on n'utilise pas tout le volume de ce dernier.

[0018] Encore un autre problème résulte du fait que l'injection se fait au coeur du dard : on obtient par conséquent un temps de séjour court car la vitesse d'écoulement du plasma y est élevée. Par ailleurs, du fait de l'utilisation de plusieurs torches plasma, un problème ou un besoin de maintenance sur l'une d'elles impose l'arrêt de l'ensemble des torches.

[0019] Un autre problème, posé par l'utilisation de plusieurs torches, est la nécessité de disposer d'une alimentation électrique pour chaque torche, ce qui augmente ainsi les pertes énergétiques. Pour compenser ces pertes thermiques, il faut alors augmenter le nombre de torche pour un débit donné, ce qui n'est pas très bon thermiquement. Enfin, le fait d'utiliser plusieurs torches est susceptible d'entraîner des instabilités qui ne peuvent que difficilement être encaissées par un système d'injection centré.

[0020] Une dernière famille regroupe les méthodes d'injection utilisant une pièce intermédiaire située dans la torche plasma. Pour se faire on interpose sur le trajet de l'écoulement gazeux chaud un dispositif de mise en forme de cet écoulement gazeux chaud et on amène la matière fluide à une buse, créant ainsi un courant de matière fluide dont la direction est semblable à la direction de l'écoulement gazeux chaud, comme décrit dans les brevets FR 2 614 751 et WO-A1-2007/065252. Avec ce type de dispositif on injecte le fluide directement au coeur de l'écoulement gazeux chaud, les particules à convertir se retrouvant ainsi prisonnières de l'écoulement gazeux chaud étant donné la viscosité élevée de celui-ci. Cette méthode permet de bénéficier de la température et du temps de séjour dans le dard plasma grâce à la possibilité d'injection à contre-courant de l'écoulement du plasma. Cependant la pièce doit être refroidie pour sa tenue mécanique à cause des hautes températures (causant des pertes thermiques), refroidissant et perturbant également le plasma. Par ailleurs des risques de bouchages peuvent survenir dans les phases de démarrage ou d'arrêts du fait du niveau de la température au niveau de la buse.

[0021] On voit donc bien que la plupart des méthodes d'injection de liquide pour sa dispersion/conversion au coeur d'un dard plasma ne favorisent qu'un seul des paramètres que sont, soit le temps de séjour dans le dard plasma, soit l'utilisation de la température du dard plasma, soit la surface d'échange entre le réactif et le milieu plasma, soit enfin la composition de milieu. La première famille s'appuie sur la surface d'échange entre le réactif et le milieu plasma, la deuxième sur le temps de séjour, la troisième sur l'utilisation de la température et la dernière reposent sur deux paramètres, le temps de séjour et l'utilisation de la température.

[0022] Ainsi, aucune des solutions présentées n'est donc à même de répondre simultanément aux exigences suivantes :

- l'optimisation du temps de séjour du liquide dans le dard plasma,
- l'utilisation optimale de la température du dard plasma,
- la maximisation du développement de la surface d'échange entre le réactif et le milieu plasma,
- la bonne utilisation de la composition du milieu pour la conversion.

[0023] Il se pose donc le problème d'effectuer une injection de liquide pour sa dispersion/conversion au coeur d'un dard plasma pour obtenir le meilleur équilibre entre le temps de séjour du liquide dans le dard plasma, la température du dard plasma, la surface d'échange entre le réactif et le milieu plasma, et la composition du milieu.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

[0024] L'invention concerne d'abord un dispositif d'injection de matière liquide dans une torche plasma, comportant N ($N \geq 1$) groupes, ou sections, d'injecteurs Gi (i=1,...N) disposés sur le pourtour d'une zone d'écoulement du plasma, ou à distance de la zone d'écoulement du dard plasma, ou en dehors de cette zone d'écoulement, chaque groupe ou section comportant au moins ni ($ni \geq 2$) injecteurs qui sont disposés par exemple de part et d'autre de l'axe ou de la zone d'écoulement du plasma ou dans un plan sensiblement perpendiculaire à l'axe d'écoulement du plasma, de manière à injecter dans le plasma au moins une partie de ladite matière liquide suivant une direction au moins partiellement opposée à la direction d'écoulement du plasma.

[0025] Dans la plupart des cas, on aura $N \leq 15$ ou à 20.

[0026] Les ni injecteurs d'un même groupe d'injecteurs Gi peuvent être disposés sur le pourtour de la zone d'écoulement du plasma, avec un écart angulaire de 360 ° / (ni) l'un par rapport à l'autre. Ils sont de préférence disposés de manière à réaliser une confluence des jets de liquide qu'ils injectent dans le plasma. Ils ne sont pas en contact direct avec le dard ou avec une zone d'écoulement du plasma.

[0027] Au moins un injecteur peut comporter un profil intérieur hélicoïdal, de manière à communiquer au fluide une composante de mouvement rotationnelle pouvant favoriser la dispersion du liquide à l'impact au coeur du dard plasma.

[0028] Au moins un injecteur peut comporter des moyens piézoélectriques pour fractionner le liquide injecté.

[0029] Un dispositif selon l'invention peut comporter N groupes d'injecteurs (N>1) disposés le long de l'axe d'écoulement plasma, des injecteurs de différents groupes d'injecteurs comportant des angles d'incidence différents par rapport à l'axe d'écoulement du plasma. Cette disposition permet notamment une meilleure répartition, dans le plasma, de la charge liquide à traiter. De préférence, plus un groupe d'injecteurs est éloigné de la base du dard plasma, plus son angle d'incidence par rapport à l'axe d'écoulement du plasma est faible.

[0030] Un dispositif selon l'invention peut comporter en outre des moyens pour injecter, dans au moins une partie des injecteurs, des trains de jets liquides en impulsion ou des jets liquides, par exemple à pression oscillante (variable en fonction du temps).

[0031] Avantageusement, un ou plusieurs des injecteurs comporte en outre chacun une buse d'injection de vapeur pour injecter un jet de vapeur simultanément au jet de liquide.

[0032] Un dispositif selon l'invention peut comporter en outre des moyens de mise sous pression de la charge liquide à convertir. La pression de certains jets peut être modifiée de manière à, notamment dans certaines configurations des jets, permettre un ajustement de l'angle d'injection des jets dont la précision est modifiée.

[0033] Avantageusement, des moyens peuvent être prévus pour séparer, d'une part les composés organiques lourds du liquide à convertir, et d'autre part de la phase légère de ce même liquide.

[0034] Des moyens de préparation d'un liquide à injecter peuvent comporter en outre des moyens pour vaporiser la phase aqueuse avant qu'elle ne soit injectée.

[0035] Un dispositif selon l'invention peut comporter en outre des moyens optiques pour contrôler la qualité d'injection et éventuellement adapter les paramètres d'injection de la charge liquide à convertir à des modifications du dard plasma.

[0036] Plus généralement, des moyens peuvent être prévus pour adapter l'injection de la charge liquide à convertir à des modifications du dard plasma.

[0037] L'invention concerne également un procédé d'injection de matière liquide dans un dard de torche plasma, dans lequel on injecte le liquide par N ($N \geq 1$) groupes d'injecteurs Gi (i=1,...N) disposés sur le pourtour d'une zone d'écoulement du plasma, ou à distance de la zone d'écoulement du dard plasma, chaque groupe comportant au moins ni ($ni \geq 2$) injecteurs disposés, par exemple, de part et d'autre de l'axe ou de la zone d'écoulement du plasma ou en dehors de cette zone et/ou dans un plan sensiblement perpendiculaire à l'axe d'écoulement du plasma, au moins une partie de ladite matière liquide étant injectée dans le plasma suivant une direction au moins partiellement opposée à la direction d'écoulement de ce dernier.

[0038] Là encore, les n injecteurs d'un même groupe d'injecteurs peuvent être disposés sur le pourtour de la zone d'écoulement du plasma, avec un écart angulaire de 360°/n l'un par rapport à l'autre. Ils sont de préférence disposés de manière à réaliser une confluence des jets de liquide qu'ils injectent dans le plasma.

[0039] Un dispositif et un procédé selon l'invention s'appliquent particulièrement bien à un liquide de type bio-huile, ou à une boue de station d'épuration, ou à un mélange de particules solides et d'un liquide.

[0040] Une partie de la chaleur dégagée par le plasma peut être récupérée par le support d'injecteurs puis ensuite transférée, par conduction, au liquide passant dans les injecteurs.

[0041] On peut avantageusement injecter, dans au moins une partie des injecteurs, des trains de jets liquides en impulsion ou des jets liquides, par exemple dont la pression d'injection varie périodiquement (oscillation).

[0042] Selon un autre mode de réalisation avantageux, on injecte, dans au moins une partie des jets de liquide, un jet de vapeur simultanément au jet de liquide. Le liquide peut être préalablement séparé entre une première partie, vaporisable à relativement basse température (de l'ordre de 80 à 150°C environ) et une deuxième partie, plus lourde, à injecter dans le plasma sous forme liquide.

[0043] Un ajout d'eau dans le liquide à injecter peut également être réalisé, afin d'optimiser la réaction de conversion du liquide à traiter.

[0044] Selon un autre mode de réalisation particulièrement avantageux on forme une couche de vapeur à l'extérieur du dard plasma.

[0045] Les jets de liquide des n injecteurs d'un même groupe d'injecteurs sont de préférence confluents dans le plasma, la zone de confluence des jets étant avantageusement située sensiblement sur l'axe d'écoulement du plasma.

[0046] L'angle d'injection d'au moins un jet dans le plasma peut être modifié, par exemple par variation de la pression de fluide dans ce jet.

[0047] Des contrôles de divers paramètres peuvent être réalisés, par exemple :

- la qualité de l'injection des jets liquides, par exemple par des moyens de type optique ;
- et/ou la qualité du plasma en sortie de torche ;
- et/ou la pulsation du dard plasma, éventuellement par rapport à la pulsation de l'injection de liquide dans le dard plasma.

[0048] Pour permettre un ajustement des paramètres du système à partir de données correspondant à une ou diverses mesures effectuées, il peut être souhaitable de pouvoir ajuster, si besoin est, la composition de la charge et/ou les conditions de fonctionnement du plasma. Par exemple on peut souhaiter ajuster le déphasage entre la période d'une impulsion du dard plasma et la période d'une impulsion de l'injection.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

[0049]

- La figure 1A est un exemple de réalisation détaillée d'un dispositif selon l'invention.
- La figure 1B est un exemple de réalisation détaillée d'un système selon l'invention.
- Les figures 2A à 4 sont des exemples de profils d'injecteurs utilisés dans un dispositif selon l'invention.
- Les figures 5 et 6 illustrent les problèmes de traversée du dard plasma par un jet de liquide (en cas d'excès de quantité de mouvement du jet liquide) et le cas d'une insuffisance de quantité de mouvement du jet liquide ne permettant pas la pénétration du dard plasma.
- La figure 7 représente un impact à fractionnement maximal de jets qui confluent à presque 90° juste avant l'impact.
- Les Figures 8A et 8B illustrent l'impact de jets à confluence non orthogonale induisant la formation de nappe liquide.
- La figure 9 représente une configuration comportant plusieurs sections d'injecteurs le long de l'axe de la torche plasma.
- Les figures 10A à 10C représentent l'injection en impulsions de trains de jets liquides pour minimiser le risque de saturation du dard plasma.
- La figure 11 représente un positionnement possible d'un ensemble de 3 couples d'injecteurs le long de l'axe de la torche plasma et selon deux axes perpendiculaires entre eux.
- La figure 12 représente un profil du coefficient d'échange thermique à la paroi en fonction de l'axe xx' de l'écoulement dard plasma, ainsi que le dard plasma et des portions de la paroi.
- La figure 13 représente schématiquement le positionnement d'un injecteur et d'une buse d'injection de vapeur.
- La figure 14 illustre la constitution d'une couche limite de vapeur riche en eau en limite de dard plasma pour éviter la formation de suies.
- La figure 15 représente une illustration type d'un diagramme de phase du type du système eau-bio-huile.
- La figure 16 représente l'une des interfaces optiques du réacteur, permettant le diagnostic de l'injection par mesure optique.
- La figure 17 représente de manière détaillée la répartition d'un ensemble de trois couples d'injecteurs, ramenés dans un même plan, le long d'un axe d'écoulement plasma.
- La figure 18 représente de manière schématique des volumes élémentaires du dard plasma, pour estimer les taux d'occupation du dard par la charge liquide à convertir.
- La figure 19 représente la formation d'une nappe liquide par confluence de deux jets liquides.
- La figure 20 représente l'évolution du rayon (r) de la nappe de fluide en fonction de l'angle β et de l'angle d'incidence des jets (θ).
- La figure 21 représente un exemple de la fluctuation de l'arc électrique au sein de la torche à plasma, par le suivi

temporel de la tension au niveau des électrodes de la torche.

- La figure 22 représente de manière schématique la répartition, sur la section circulaire autour d'un dard plasma, de trois injecteurs de liquide.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

[0050] Un mode de réalisation de l'invention va être expliqué en liaison avec le schéma de la figure 1A.

[0051] La figure 1B inclut un tel dispositif avec des moyens périphériques complémentaires, décrits plus loin.

[0052] Sur la figure 1A, les références 30, 31 désignent des électrodes entre lesquelles une décharge électrique est produite. Simultanément le passage d'un gaz plasmagène entre ces électrodes conduit à la formation d'un dard plasma 3.

[0053] Des moyens d'alimentation électrique des électrodes sont désignés par la référence 32.

[0054] En sortie des électrodes est disposé un système formant support 2 pour le positionnement et le maintien d'injecteurs de liquide à traiter. Dans une cavité 2' ménagée dans ce support, s'écoule le dard plasma sensiblement selon un axe B désigné par la suite comme l'axe découlement du plasma. Selon un exemple, la cavité 2' est de forme sensiblement cylindrique et l'axe B est axe de symétrie cylindrique de cette cavité. Mais d'autres formes peuvent être choisies pour cette cavité.

[0055] Dans ce support 2 sont disposés au moins deux injecteurs, formant un groupe de deux d'injecteurs.

[0056] Plus généralement, ce sont N groupes Gi d'injecteurs ($N \geq 1$, mais, en général, $N \leq 15$ ou ≤ 20) qui sont disposés dans ce support, chaque groupe Gi comportant au moins deux injecteurs, et, plus généralement, ni ($ni \geq 2$) injecteurs. Les N groupes d'injecteurs sont disposés le long de l'axe d'écoulement du plasma. La disposition de ces injecteurs est décrite plus précisément ci-dessous.

[0057] Sur la figure 1A sont représentés schématiquement 4 injecteurs de liquide désignés par les références 1b, 1d, 1b', 1d'. On a donc en fait deux groupes G1 et G2 de, chacun, deux injecteurs de liquide. On distingue également, sur cette même figure, 4 autres injecteurs, ou buses, 1a, 1c, la', 1c' qui permettent, comme expliqué ci-dessous, l'injection séparée de vapeur, chacun d'entre eux en coopération avec l'un des injecteurs 1b, 1d, 1b', 1d'.

[0058] Les injecteurs 1b, 1d, 1b', 1d' de liquide sont dirigés vers la zone dans laquelle doit être formé le dard plasma 3, de manière à injecter le liquide avec un mouvement ayant une composante suivant une direction A (voir flèche A sur les figures 7, 8, 9, 10A-C, 14, 17) opposée à la direction B d'écoulement du plasma (voir également flèche B sur les mêmes figures). Les injecteurs sont ici disposés par groupe de deux ou par paire, chaque paire, ou les orifices de sortie de ces injecteurs (orifices par lesquels la matière à traiter est éjectée vers le plasma), formant un axe I-I'

[0059] (voir figure 7) sensiblement perpendiculaire à l'axe ou à la direction B d'écoulement du plasma, les deux injecteurs de chaque paire étant disposés de manière sensiblement diamétralement opposée sur le pourtour du support 2 et étant dirigés vers la zone dans laquelle le plasma 3 est formé.

[0060] Lorsqu'un groupe Gi d'injecteurs comporte 3 injecteurs - et plus généralement ni injecteurs - ceux-ci, ou leurs orifices, sont disposés sensiblement dans un même plan perpendiculaire à l'axe d'écoulement du plasma (sur la figure 7 ce plan serait un plan de trace I-I', perpendiculaire au plan de la figure et à l'axe B). Ils sont alors disposés de préférence sensiblement à 120° - et plus généralement à 360°/n - l'un de l'autre (voir par exemple la figure 22 qui représente une vue schématique en coupe d'un support 2 d'injection, perpendiculairement à l'axe B d'écoulement du plasma avec un groupe de 3 injecteurs 1b, 1b' , 1b" dans un même plan, à sensiblement 120° l'un de l'autre).

[0061] Les angles, par rapport à l'axe B d'écoulement du plasma, des axes de projection de liquide en sortie d'injecteurs d'un même groupe d'injecteurs, ou axes de sortie des injecteurs de ce groupe - injecteurs qui sont disposés de manière sensiblement diamétralement opposée par rapport à l'axe d'écoulement du plasma dans le cas ni = 2 - sur la périphérie du support 2 (voir injecteurs 1b et 1b' des figures 1A, 1B, 7, 8, 10A - 10C) sont sensiblement égaux entre eux (en valeur absolue).

[0062] Une structure plus complexe est représentée en figures 9, 11, 17, 18, où le dispositif comporte 3 paires ou groupes G1, G2, G3 d'injecteurs, 1b, 1b', 1d, 1d', 1f, 1f' disposés le long de l'axe B, sur 3 axes différents mais perpendiculaires à l'axe B. Là encore, les angles, par rapport à l'axe B d'écoulement du plasma, des axes de projection ou de sortie d'injecteurs d'un même groupe (ces injecteurs sont situés sur la périphérie de la zone d'écoulement du plasma, mais à une même position le long de l'axe d'écoulement de ce plasma, c'est-à-dire sensiblement sur un même axe perpendiculaire à cet axe d'écoulement), sont sensiblement égaux en valeur absolue. Ainsi, sur la figure 17, l'angle de l'axe de chacun des injecteurs 1b, 1b' (groupe G1) avec l'axe B est égal à n/2, l'angle de l'axe de chacun des injecteurs 1d, 1d' (groupe G2) avec l'axe B est égal à n/4, et l'angle de l'axe de chacun des injecteurs 1f, 1f' (groupe G3) avec l'axe B est égal à n/6.

[0063] Plus généralement, quel que soit le nombre ni d'injecteurs d'un même groupe Gi (ces injecteurs sont donc disposés dans un même plan perpendiculaire à la direction B d'écoulement du plasma):

- les angles que font les axes de projection ou de sortie de ces injecteurs, situés dans ce même plan, avec l'axe de propagation du plasma, sont égaux ou sensiblement égaux entre eux,

- ou les angles que font les directions d'incidence des jets des injecteurs de ce groupe pénétrant dans le plasma, avec l'axe de propagation du plasma, sont égaux ou sensiblement égaux entre eux.

[0064] De manière pratique, les injecteurs de la figure 17 ont été représentés dans un même plan (celui de la figure), mais sont de préférence plutôt disposés comme indiqué en figure 11, c'est-à-dire suivant des axes alternativement orthogonaux entre eux et à la direction d'écoulement du plasma. Sur la figure 11 on distingue donc 3 groupes d'injecteurs, G1, G2, G3 et tous les angles entre les axes de projection et l'axe d'écoulement du plasma sont sensiblement égaux à 90°; l'angle au sommet du cône formé par les injecteurs et le point de convergence sur l'axe d'écoulement du plasma est alors égal à, sensiblement, 180°.

[0065] On voit, sur les modes de réalisation des figures 9, 17, 18, que, plus les injecteurs d'un groupe d'injecteur sont éloignés de la base 33 du dard plasma 3, plus l'angle d'incidence, par rapport à cet axe, des injecteurs de ce groupe est faible (sur la figure 17, on passe d'un angle de $\pi/2$ pour les injecteurs 1b, 1b' à un angle de n/4 pour les injecteurs 1d, 1d', puis à un angle de n/6 pour les injecteurs 1f, 1f' qui sont les plus éloignés de la base du plasma). Cette disposition permet, comme expliqué plus loin, d'optimiser le taux d'occupation dans le plasma tout en réduisant les risques de saturation de ce dernier.

[0066] Ainsi, quel que soit leur nombre, les injecteurs d'un même groupe, de par leur positionnement dans le support 2 et leur orientation, permettent d'imposer une confluence de jets (continus ou discontinus), assurant à chacun d'entre eux de s'appuyer sur l'(les) autre(s) pour se fractionner au niveau de l'axe de propagation du dard plasma.

[0067] Par cette orientation des injecteurs, la quantité de mouvement résultante des jets confluents se retrouve, en grande partie, dans le sens inverse A de l'écoulement B du dard plasma. Ceci permet d'assurer une augmentation du temps de séjour de la matière à convertir dans le dard, ainsi qu'un fractionnement secondaire optimal induit par le dard plasma. En effet, la matière étant injectée avec une quantité de mouvement l'entraînant dans le sens opposé au sens de propagation du plasma, une durée supplémentaire sera nécessaire, par rapport à une injection dans le même sens que le plasma, pour être entraînée par ce dernier. En outre le fractionnement secondaire induit par le dard plasma est fonction de la vitesse relative entre le dard et le fluide à convertir : les directions opposées, d'une part du liquide, et d'autre part de l'écoulement du plasma, assurent une optimisation de cette vitesse relative.

[0068] Comme on peut le constater sur les figures 5-10C, 13, 14, 17, 18, les injecteurs ne sont pas en contact (ni à proximité immédiate) avec le dard. Sont donc minimisés les risques de cokéfaction (phénomène dû à la température au niveau des injecteurs) et donc les risques de bouchages des injecteurs. De plus, la nécessité de refroidir les injecteurs est moins forte, ce qui favorise le rendement thermique, l'écoulement de liquide à relativement grande vitesse pour un liquide (cf. l'exemple de réalisation ci-dessous) assurant une limitation de température qui permet dans certains cas de pouvoir se dédouaner d'un refroidissement spécifique. Ce refroidissant peut lui même être assuré par la charge à convertir et, avantageusement, la part non cokéfiable issue de l'amont de la ligne 41 (figure 1B). Cet effet bénéfique sur le transfert thermique est renforcé du fait que, dans la présente invention, le dard plasma 3 n'est plus canalisé par des parois l'épousant au plus près. Les parois de la cavité 2' et le support des injecteurs 2 étant relativement éloignés du dard plasma ou n'ayant de rôle de confinement du dard, on limite ainsi les pertes thermiques, ce qui induit une augmentation du rendement énergétique.

[0069] D'une manière générale, la distance injecteur-entrée dans le dard plasma (qui peut être à titre indicatif de l'ordre de 10 fois (voire plus) le diamètre du dard) permet d'assurer un temps de vol du jet avant l'entrée dans le dard qui complète le réchauffement du jet et permet le cas échéant de volatiliser une fractions des espèces légères (ayant pu rester dans le jet liquide injecté) qui ne nécessitent pas forcément des hautes températures présentes au coeur du dard plasma pour être converties. Ceci permet d'optimiser le temps de présence du jet dans le dard et d'utiliser le dard plasma spécifiquement pour les espèces particulièrement réfractaires à la conversion.

[0070] Les injecteurs disposés de la manière décrite ci-dessus permettent, en fonction de la quantité de mouvement disponible pour chaque jet, d'injecter la charge liquide dans le dard plasma 3 (ou dans le flux chaud dense) de manière à le traverser totalement jusqu'à l'axe d'écoulement du plasma, et de manière à ce que les jets se rencontrent sensiblement sur cet axe et s'appuient les uns sur les autres lors de cette rencontre, ce qui augmente leur fractionnement. On évite ainsi la situation, illustrée sur la figure 5, de traversée partielle du dard plasma par le jet, sans que celui-ci puisse arriver sur l'axe sans pulvérisation significative, ou même la situation de non pénétration du plasma par le jet (figure 6). Dans le cas de la figure 6, le jet 10 de liquide est brisé par le simple contact avec les bords du plasma 3. Sur la figure 17 sont représentés les trois points A1, A2, A3 (tous trois situés sur l'axe B d'écoulement du plasma), de rencontre des jets des différents groupes d'injecteurs.

[0071] Ce fractionnement, après confluence des jets sensiblement sur l'axe d'écoulement du plasma, permet une dispersion optimisée, dès l'impact des jets (cas d'un fractionnement maximal, avec impact à confluence quasiment perpendiculaire juste avant la confluence, comme illustré sur la figure 7) ou à confluence non orthogonale, plutôt réduite (cas d'un écoulement tel qu'illustré en figures 8A, 8B, avec des jets 10, 10' moins inclinés par rapport à l'axe d'écoulement du plasma et des injecteurs situés plus en aval le long de cet axe que dans la configuration de la figure 7). Dans le premier cas (figure 7), le fractionnement primaire est favorisé alors que, dans le second cas, on obtient un accroissement

du temps de séjour de la matière au sein du dard plasma 3 et une augmentation de la surface d'échange (le liquide passe d'un tronçon cylindrique 10, 10' à une nappe 13, figure 8B) entre le liquide à convertir et le dard plasma 3.

[0072] Avant le fractionnement, imposé par les forces de cisaillement induites par l'écoulement du plasma 3, on cherche de préférence à réaliser une confluence des jets 10, 10' des injecteurs d'un même groupe d'injecteurs, ou situés dans un même plan, ou sur un même axe perpendiculaire à l'axe découlement du plasma. On entend par confluence un impact des jets 10, 10' entre eux avant que le fractionnement de ces derniers ne survienne ; cette situation de confluence est représentée sur la figure 7, la figure 6 illustrant le problème de non -pénétration du jet dans le dard plasma. Les figures 7, 8A et 8B illustrent la maîtrise du risque de traversée partielle ou de non pénétration du dard plasma par le jet liquide. Les figures 8B et 19 représentent d'ailleurs de manière plus détaillée la formation d'une nappe 13 liquide par confluence de deux jets 10, 10'.

[0073] Le point ou la zone de confluence, située sur l'axe d'écoulement du plasma, forme le sommet d'un cône dont des génératrices sont par ailleurs constituées par une ligne imaginaire reliant la zone ou le point de confluence et l'orifice de sortie de chacun des injecteurs dont les jets se retrouvent en ce point ou dans cette zone de confluence, donc chacun des injecteurs d'un même groupe d'injecteurs. Le demi-angle au sommet du cône est égal à l'angle formé entre la direction d'injection de chaque injecteur de liquide et l'écoulement du plasma, ou à l'angle formé par la direction du jet incident au point de confluence et l'axe d'écoulement du plasma.

[0074] Ainsi, sur la figure 17, le groupe d'injecteurs 1d, 1d' forme, avec le point A2 de confluence des jets de ces deux injecteurs, un cône dont le sommet est justement le point A2. Chacune des droites $\Delta 2$, $\Delta'2$, qui relie ce point à l'orifice de sortie de l'un de ces deux injecteurs forme une génératrice du cône correspondant.

[0075] De même, sur cette même figure 17, le groupe d'injecteurs 1f, 1f' forme, avec le point A3 de confluence des jets de ces deux injecteurs, un cône dont le sommet est le point A3. Chacune des droites $\Delta 3$, $\Delta'3$, qui relie ce point A3 à l'orifice de sortie de l'un de ces deux injecteurs forme une génératrice du cône correspondant.

[0076] La confluence d'au moins deux jets, et l'éventuelle formation d'une nappe de liquide, permettent de réaliser une optimisation de la surface d'échange et du temps de séjour au sein de dard plasma.

[0077] On atomise donc les jets confluents, directement au sein du plasma, en bénéficiant de l'impact entre les jets, de l'effet de cisaillement dû à l'écoulement du plasma et on bénéficie de la température la plus élevée (celle du coeur du plasma) et des espèces réactives.

[0078] La confluence des jets permet de s'affranchir d'un problème, à savoir l'optimisation de la quantité de mouvement permettant d'introduire le liquide au coeur du dard plasma. En effet, il suffit de donner suffisamment de quantité de mouvement au jet pour qu'il puisse pénétrer le dard, mais sans le risque que le jet traverse le dard en cas de dépassement, même limité, de la quantité de mouvement limite (qui équivaut quasiment, du moins en ordre de grandeur, à celle du dard plasma). On obtient ainsi un degré de liberté supplémentaire et un niveau de fractionnement double (à savoir celui dû au plasma (différence de vitesse entre le liquide et le dard) et celui dû à l'impact) tout en permettant de réaliser un compromis entre l'atteinte des hautes températures du plasma et le temps de séjour du liquide au sein du dard.

[0079] La longueur h (figure 5) du jet continu 10 pénétrant dans le dard plasma et non soumis au fractionnement est :

- d'une part, fonction (en ordre de grandeur) de la racine carré du rapport (noté q) de la quantité de mouvement du jet liquide 10 à celle du dard plasma 3 ; de préférence, q est supérieur à 1, de préférence encore supérieur à 2,
- d'autre part, fonction de l'angle d'injection (noté θ, il s'agit de l'angle entre l'axe d'écoulement du plasma et les directions des jets),
- mais également fonction de la distance réduite (rapport de la longueur x du jet avant sa pénétration dans le dard au diamètre (d) de l'injecteur du jet injecté).

[0080] Il est possible, selon les caractéristiques de l'écoulement, de trouver un angle optimal (θ^*) permettant de maximiser la longueur du jet (hmax) avant fractionnement. Dans des régimes d'écoulement où l'hydrodynamique prime sur l'effet thermique (hypothèse d'un maintien du jet à l'état liquide avant fractionnement au sein du dard), la longueur du jet sans fractionnement peut être approchée par une expression du type :

$$h = f(\theta, x/d).\sqrt{q} \quad ;$$

avec $hmax = f(\theta^*, x/d).\sqrt{q}$

[0081] Dans cette expression, x et d sont fixés pour une configuration donnée.

[0082] Il existe donc, au plus (dans le cas où l'angle de l'injection n'est pas dépendant de la quantité de mouvement, ce qui est le cas pour un débouchant d'injecteur sans profilé), deux degrés de liberté (θ et q) pour optimiser l'injection.

La plage de variation du paramètre θ est moins importante que celle du paramètre q.

[0083] La multiplicité des injecteurs (deux par section ou groupe d'injecteurs sur les figures 1A et 1B, trois sur la figure 22, mais il est possible d'en prévoir plus pour un ou plusieurs groupes d'injecteurs) permet d'augmenter la surface d'échange et d'utiliser au mieux le volume du dard plasma, en évitant d'engorger celui-ci par la charge à traiter. Pour ce faire, on cherche à garantir un taux maximal d'occupation du dard, ou taux de saturation, afin d'éviter son engorgement sans pour autant trop réduire le taux de charge au sein du dard plasma (sinon le traitement d'un kilogramme de charge liquide à convertir serait trop couteux). D'une manière générale, on cherche à :

- injecter la quantité maximale admissible de charge au vu de l'apport de puissance du dard plasma 3 et de l'enthalpie de transformation de la charge,
- minimiser les risques de saturation locale du dard en liquide et donc tenter de garantir une bonne répartition de la teneur en charge liquide au sein du dard (cf. figure 9 où les nuances de gris donnent une indication sur la teneur en charge liquide dans le volume du dard) ; ainsi, au niveau de la confluence des jets, le taux de charge est important (surtout sur la première confluence, la plus proche de la base 33 du plasma, voir figures 17 et 18 et l'exemple de réalisation donné plus loin) et tend à diminuer du fait de la conversion plus ou moins avancée juste en amont d'une nouvelle injection). La qualité de la répartition ne peut être présupposée comme optimale, mais elle peut néanmoins être approchée a priori (voir à ce sujet l'exemple de réalisation donné plus loin) et ajustée a posteriori en contrôlant la qualité de l'injection par des diagnostics appropriés, par exemple à l'aide des moyens 5 et 6 de la figure 1.

[0084] Le taux de saturation peut être variable en fonction de la nature du dard et des propriétés physico-chimiques de la charge à traiter (volatilité, tension de surface,...). A titre indicatif, un taux de charge local inférieur à 1 % (volume de liquide sur volume élémentaire du tronçon de dard englobant ce volume de liquide (cf. δVi défini dans l'exemple de réalisation) permet de se préserver du risque de saturation du dard (sachant par ailleurs qu'il existe un facteur d'au moins 1000 entre le volume occupé par un liquide et celui occupé par sa vapeur lorsque ce dernier se vaporise).

[0085] Afin de minimiser les risques d'engorgement du dard, il est ainsi possible de mettre en oeuvre les configurations suivantes :

- des groupes d'injecteurs répartis selon différentes cotes longitudinales du dard plasma (voir les structures des figures 9, 10A-C, 17, 18) et/ou avec des axes d'incidence ou des angles d'injection différents (voir les mêmes figures où tous les groupes d'injecteurs ont des angles d'injection différents d'un groupe à l'autre),
- et/ou une injection de trains de jet liquide par impulsions, potentiellement déphasée entre les tronçons ou les groupes d'injecteur (dans le cas d'une injection pulsée), afin de répartir le taux de charge du plasma (ou du flux gazeux permettant la conversion). Cette situation est représentée en figures 10A-10C, sur lesquelles seuls 2 injecteurs 1b, 1b' sont représentés, d'abord comme émettant chacun un jet de matière; cette matière 3' va être localisée, dans un premier temps, dans une zone située en avant (figure 10A) du plasma 3, puis entraînée dans le sens de l'écoulement du plasma, alors que les injecteurs n'émettent plus de matière (figure 10B) ; lorsque les injecteurs émettent chacun un nouveau jet de matière 3'' celle-ci est d'abord localisée dans une zone en amont du plasma (figure 10C), en amont de la zone dans laquelle se situe alors la matière 3' injectée par le premier jet. La durée séparant la fin d'une impulsion d'injection de liquide et le début de la suivante est alors de préférence au minimum le temps du déplacement du volume élémentaire de plasma ; en d'autres termes, on cherche à injecter, dans le plasma, un volume de liquide permettant un renouvellement suffisant de la zone d'injection dans le plasma, pour admettre une nouvelle impulsion d'injection.

[0086] Ceci permet notamment une alternance d'injection entre différents tronçons d'injecteurs, la vitesse d'écoulement du flux gazeux étant généralement très importante (cas d'un dard plasma).

[0087] Selon encore un autre mode de réalisation qui peut être combiné avec les précédents, des moyens peuvent être prévus pour injecter une vapeur, comme illustré sur les figures 1A, 13 et 14 où des injecteurs ou buses 1d, 1d' de vapeur sont disposés de manière à injecter chacun un jet de vapeur 100, 100' suivant une direction formant un angle Ψ avec la direction d'injection 10, 10' des injecteurs 1b, 1b' de charge liquide. Cette injection de vapeur permet d'apporter un degré de liberté supplémentaire sur l'angle d'injection résultant entre le jet liquide et le dard plasma. Comme on le voit en effet sur les figures 13 et 14, la vapeur 100, 100' fait dévier la trajectoire initiale du liquide de manière plus ou moins importante en fonction du rapport entre la quantité de mouvement du jet de vapeur et celle du jet de la charge liquide à convertir. Dans ce cas, le point ou la zone de confluence A0, située sur l'axe B d'écoulement du plasma, forme le sommet d'un cône dont des génératrices sont par ailleurs constituées par les directions D1 et D2 des jets incidents en ce point de confluence.

[0088] Le gaz injecté peut avantageusement être la part facilement volatilisable (à une température comprise par exemple entre 80 et 150°C environ) du liquide à convertir (c'est-à-dire la part qui n'a a priori pas nécessairement besoin d'être injectée dans le plasma pour être vaporisée ou convertie). Cette fraction est par nature (puisque constituée

d'éléments légers) moins soumise au phénomène de cokéfaction. Pour injecter cette part volatilisable sous forme de vapeur il est possible de réaliser une démixtion préalable, permettant de séparer la partie organique du liquide à convertir, difficilement volatilisable, et plutôt réfractaire à la conversion, et nécessitant donc un traitement par le plasma, de la partie aqueuse vaporisable, généralement plus aisée à convertir. Des moyens pour effectuer une telle démixtion sont décrits plus loin avec les moyens de préparation de charge.

[0089] La quantité de cette partie aqueuse vaporisable peut également éventuellement être ajustée avec une injection d'eau additionnelle afin de garantir la gazéification complète de la bio-huile en cas de déficit d'oxygène et d'hydrogène, notamment dû à une composition spécifique de la bio-huile.

[0090] A titre indicatif, la bio-huile, pour une formule brute moyenne de type ($CH_{1,9}O_{0,7}$), a besoin d'une quantité équivalente d'eau de 0,3 mole par mole de bio-huile, pour être totalement gazéifiée selon la formule :

$$CH_{1,9}O_{0,7} + 0{,}3\ H_20 \rightarrow 1{,}25\ H_2 + CO \qquad \text{(réaction 1)}.$$

[0091] Dans cette réaction, une quantité d'eau insuffisante conduira néanmoins à une réaction, mais déséquilibrée, et qui aboutira à la formation de suies.

[0092] Une injection fractionnée (injection de la part volatilisable sous forme de vapeur et de la part non vaporisée sous forme liquide dans le plasma) permet non seulement, comme expliqué ci-dessus, d'ajuster la quantité d'eau, mais également de réserver l'occupation du coeur de la zone plasma à la charge la plus difficile à convertir, afin que cette dernière soit totalement déstructurée et soit le moins possible diluée par d'autres composés ne nécessitant pas forcément de très hautes températures pour être convertis. En d'autres termes, n'est injecté dans le dard plasma que ce qui doit y être converti, la part vaporisable en dehors du plasma étant avantageusement utilisée d'une autre manière.

[0093] Par ailleurs, en plus de l'effet de changement d'angle d'injection du jet liquide et d'ajustement de la composition stoechiométrique, l'insufflation de vapeur permet éventuellement de chauffer préalablement la charge liquide avant son entrée dans le plasma. Elle permet également de minimiser la présence de suies (phase solide issues de la mauvaise gazéification de la charge liquide) au sortir du dard 3. En effet, la vapeur d'eau, n'ayant pas une quantité de mouvement suffisante par rapport à celle du dard plasma 3 pour y pénétrer, elle va être recirculée, comme illustré en figure 14, par entraînement induit par le dard plasma 3, ce qui va constituer une couche de vapeur 11, 11' riche en eau en limite du dard plasma. Les références 110, 110' désignent un nuage de vapeur circulant accumulé de chaque côté du plasma du fait de l'injection de vapeur, et à partir desquels les couches 11, 11' vont être formées. Les suies se forment très rapidement (vitesse de formation inférieure au millième de seconde) en faisant intervenir des phénomènes de croissance et d'agrégation, il est donc intéressant de gainer le dard plasma par ces zones 11, 11' riches en vapeur d'eau pour limiter cette formation de suies relativement réfractaires à la gazéification une fois celles-ci ayant atteint des tailles pénalisantes (pouvant dépasser le micron) en terme de temps de gazéification.

[0094] Pour minimiser la formation de suies, il est également possible de jouer sur la composition du gaz plasmagène introduit dans la torche. La composition du gaz plasmagène peut être contrôlée, au niveau de l'injection dans les électrodes 3b de formation du plasma (figure 1A).

[0095] Les injecteurs de liquide 1b, 1b', 1d, 1d' peuvent avoir par exemple des débouchants profilés, dont l'ouverture 12, de diamètre ou de dimension maximale Φ, permet à la fois de ne pas être soumis au bouchage intempestif du fait de la présence de fines dans le liquide à injecter, mais garantit également une répartition satisfaisante du débit au sein du dard plasma en leur extrémité. Un tel injecteur est représenté schématiquement sur les figures 2A et 2B, à titre illustratif, en coupe et en vue de face. L'ouverture 12 n'est pas symétrique par rapport à une direction définie par l'axe d'extension DD' de l'injecteur. Cette ouverture dirige ou dévie le fluide vers l'un des côtés de l'axe DD'.

[0096] Ces profilés permettent, optionnellement, selon la pression de fluide imposée en amont du débouchant, d'imposer un angle d'injection $\alpha + \delta\alpha$ variable dans une plage $\delta\alpha$ limitée, la limite étant imposée par le profilé et par l'écoulement, comme illustré sur les figures 3A et 3B : sur ces figures, une première pression, correspondant à une première quantité de mouvement q1, permet d'obtenir un angle d'injection égal à α (figure 3A), tandis qu'une deuxième pression, correspondant à une deuxième quantité de mouvement q2 > q1, permet d'obtenir un angle d'injection égal à $\alpha + \delta\alpha$ (figure 3B). Ce profilé permet ainsi de pouvoir ajuster les angles d'injection du liquide, à l'aide simplement de la pression, à convertir sans avoir recours à des pièces mobiles, difficiles à mettre en oeuvre dans un procédé dont les contraintes de température et d'étanchéité sont importantes.

[0097] La paroi intérieure de ces débouchants peut également comporter un filetage hélicoïdal 120, comme illustré sur la figure 4, permettant d'impulser une quantité de mouvement rotationnelle au fluide, ce qui a pour conséquence de permettre d'augmenter le fractionnement de ce dernier au sein du dard plasma 3. Cette option permet d'injecter des jets continus ou discontinus.

[0098] Selon un autre exemple, les injecteurs, qui peuvent être alors du type décrit ci-dessus, ou même des débouchants droits, peuvent être équipés d'éléments piézoélectriques permettant de faire vibrer l'injecteur et de fractionner le liquide. Cette option permet d'injecter des trains de jets discontinus. Plus généralement, un fractionnement peut être favorisé par le recourt à un phasage approprié entre la pulsation du dard plasma due aux mouvements de l'arc électrique

au sein de la torche à plasma et les pulsations de pression du jet de liquide à convertir.

[0099] Des moyens de mise sous pression de la charge à convertir, identifiés sur la figure 1 par les références 4g, 4g', permettent d'assurer la vitesse d'injection et donc la quantité de mouvement du fluide à injecter. Ces moyens, décrits plus loin, peuvent permettre un ajustement de la pression et peuvent être pilotés par exemple par des moyens 7a (figure 1B) de type microprocesseur.

[0100] D'une manière générale, au-delà du taux d'occupation et de la longueur de jet avant leur fractionnement, les éléments suivants peuvent notamment être pris en considération pour optimiser l'infection

- le temps de parcours du jet avant sa confluence avec un autre jet (ce temps se décomposant entre le temps de vol avant pénétration dans le dard et la durée de parcours au sein du dard). Ce temps permet le cas échéant d'élever la température du fluide et d'accroître ainsi, par la diminution de la viscosité induite, son fractionnement lors de l'impact des jets,
- le temps de fragmentation du jet en gouttelettes,
- le temps de mise à l'équilibre à la vitesse de l'écoulement du dard plasma d'une gouttelette issue du fractionnement après l'impact des jets (une gouttelette à l'équilibre ne subissant quasiment plus de fractionnement par cisaillement),
- le temps d'évaporation des gouttelettes (du moins pour la partie volatilisable),
- le temps de séjour du liquide au sein du dard plasma (sans compter le temps de vol avant l'impact).

[0101] Le tableau I suivant donne les ordres de grandeurs de chacun de ces temps sachant qu'ils ne correspondent pas tous à des phénomènes dont les contributions seraient équivalentes au titre de la conversion de la charge. Les temps de conversion chimique étant quant à eux inconnus en milieu plasma, aucune valeur n'est donnée.

[0102] La présente invention permet d'optimiser l'injection de la charge liquide pour que les phénomènes physiques (notamment fractionnement et évaporation) soient optimisés.

Tableau I

Temps caractéristiques	Temps de vol au sein du dard avant intersection des jets	Temps de ragmentation	Temps de mise à l'équilibre hydrodynamique	Temps caractéristique pour evaporation des gouttelettes	Temps de séjour (après impact)
ordre de grandeur	$\sim 10^{-2}$ s	$< 10^{-3}$ s	$< 10^{-1}$ s	$\leq 10^{-3}$ s	$\sim 10^{-3}$ s

[0103] Les paramètres les plus importants pour la conversion de la charge liquide sont le temps de fragmentation, le temps caractéristique pour l'évaporation des gouttelettes et le temps de séjour (après impact).

[0104] Le temps de mise à l'équilibre des gouttelettes est relativement long par rapport aux autres phénomènes, mais il n'est pas nécessaire de chercher à tout prix à ce que cette mise à l'équilibre intervienne (la mise à l'équilibre hydrodynamique ne traduit en fait que le fait que tout le potentiel de cisaillement du dard a été utilisé, la vitesse relative plasma/liquide étant nulle dès lors que cet équilibre intervient).

[0105] Le temps de vol au sein du dard avant impact n'est, quant à lui, pas négligeable devant le temps de séjour après impact.

[0106] Cette analyse indique qu'il est préférable de procéder au fractionnement du liquide le plus en amont possible de l'écoulement plasma (sans saturer le dard) et le plus possible dans l'axe de symétrie longitudinal (axe B) de ce dernier, cette approche maximisant le temps de séjour des fines gouttelettes au sein du dard plasma.

[0107] Les moyens ou le dispositif formant support d'injecteurs 2 contribuent au bon positionnement et maintien de ces derniers. Ces moyens sont solidaires de la torche.

[0108] Le support d'injecteurs peut comporter des moyens pour accueillir N ($N \geq 1$) groupe (s) Gi ($i = 1,...N$), chacun comportant ni injecteurs ($ni \geq 2$) positionnés comme expliqué ci-dessus. Deux groupes d'injecteurs Gi et Gj ($i \neq j$) différents peuvent comporter un nombre d'injecteurs ni et nj différents l'un de l'autre. Le support d'injecteur entourant le dard plasma, celui-ci possède une forme annulaire pouvant être fractionné par tronçon (2a, 2b, 2c) afin d'obtenir un degré de liberté quant aux angles entre les différents plans d'injection (un groupe de deux injecteurs forme un plan (plan d'injection) avec le point de confluence des deux jets issus de ces injecteurs) comme ce qui peut être visualisé pour le cas de la figure 11 où ces plans sont alternativement perpendiculaires entre eux. Chaque groupe d'injecteurs de la figure 11 comporte deux injecteurs. Ces deux injecteurs définissent aussi un axe, perpendiculaire à l'axe B d'écoulement du plasma, mais aussi un plan, avec le point de convergence.

[0109] Afin de permettre aux injecteurs de fonctionner dans des conditions optimisées, de température et d'angle

d'injection notamment, le support permet de maintenir en température le liquide à injecter, pour en maîtriser notamment la viscosité et compléter un préchauffage ayant pu avoir lieu en amont au cours d'une éventuelle étape de préparation de la charge, comme expliqué ci-dessous. Le liquide étant ainsi, avant injection, déjà porté à une température proche de la température de conversion, le temps de séjour au coeur du dard plasma est optimisé, car utilisé non pas (ou peu) pour chauffer le liquide, mais plutôt pour le convertir rapidement après son fractionnement.

[0110] Le matériau du support et/ou de l'injecteur peut être de type réfractaire tout en permettant un transfert thermique suffisant pour permettre un transfert thermique pouvant assurer un préchauffage du liquide à injecter, sans induire des températures superficielles de support d'injecteur trop élevées pour ces derniers ni de risques de cokéfaction de la charge à injecter.

[0111] En effet, il peut être mis en évidence, comme illustré sur la figure 12, qu'une augmentation importante du flux de chaleur peut être attendue au droit du support 2 de l'injecteur, zone de rupture du dard plasma 3 propice à des échanges convectifs importants. Sur cette figure, les références 2a, 2b, 2c désignent trois tronçons du support 2 des injecteurs. Ces trois tronçons sont, en cours de fonctionnement de la torche, disposés autour du dard plasma 3. Le tronçon 2c, qui correspond à l'extrémité du dard plasma 3, est celui par rapport auquel le coefficient d'échange thermique est à son maximum, comme indiqué sur la partie supérieure de la figure 12.

[0112] Une partie du support 2 d'injecteurs peut donc être utilisée pour récupérer une partie de la chaleur provenant du dard plasma 3. Cette chaleur récupérée peut ensuite être transférée, par conduction, au liquide passant dans les injecteurs. Ce moyen de préchauffage du liquide permet d'en réduire la viscosité, il devient donc plus fluide et va être mieux fractionné dans le plasma. Le cas échéant, en cas de contrainte thermique trop forte au niveau du pic du coefficient d'échange, le tronçon 2c peut être déporté en aval de l'écoulement plasma.

[0113] On rappelle qu'un ajustement modéré de l'angle d'injection en fonction de la quantité de mouvement appliquée est possible selon le profilé des débouchants, et en fonction de l'injection de vapeur, comme déjà expliqué ci-dessus.

[0114] Le dispositif de la figure 1A peut comporter divers moyens périphériques supplémentaires. De tels moyens sont représentés schématiquement sur la figure 1B.

[0115] Des moyens 4 peuvent ainsi être prévus pour préparer la charge liquide et mettre en pression et/ou en température le liquide à injecter par les injecteurs dans le dard 3 du plasma.

[0116] Éventuellement, des moyens 5, 5a, 5b peuvent être prévus pour réaliser un contrôle de la qualité de l'injection.

[0117] Des moyens 6 peuvent permettre un suivi de la pulsation de la torche à plasma à laquelle est associée la batterie d'injecteurs.

[0118] Des moyens 7a, 7b de traitement des données permettent, à partir de données correspondant à diverses mesures effectuées sur le système, par exemple à partir de données fournies par les moyens 5a, 5b, 6 de réajuster, si besoin est, la composition de la charge et/ou les conditions de fonctionnement du plasma. Par exemple ces moyens permettent d'ajuster, par exemple de minimiser, le déphasage entre la période d'une impulsion du dard plasma 3 et la période d'une impulsion de l'injection.

[0119] Selon un exemple de réalisation les moyens 4 de préparation (mise en pression et en température) de la charge comportent par exemple :

- un réservoir 4a de réserve tampon de la charge liquide brute,
- un réservoir d'eau 4b (ce peut être de l'eau chargée en résidus organiques issus du traitement d'effluents),
- un réservoir 4c de démixtion ou d'ajustement de la teneur en eau (pour que la réaction de conversion puisse être totale d'un point de vue stoechiométrique).

[0120] Eventuellement un décanteur 4d permet la séparation grossière des phases issues de la démixtion du liquide brut, si cette dernière est possible.

[0121] En effet, ce phénomène de démixtion (il existe un diagramme de phase pour, par exemple, la bio-huile comme pour d'autres composés hydrocarbonés spécifiques ; cf. figure 15) qui est relativement préjudiciable dans bon nombre de procédés peut être, dans le cas de la présente invention, utilisé avantageusement pour séparer les composés organiques lourds, et difficiles à convertir, de la phase légère, plus aisée à convertir, sans surcoût financier important. Une fois séparée, la phase lourde pourra avantageusement être injectée au coeur du dard plasma, au sortir de la torche à plasma (le plus porche possible de la base 33, voir figure 17 et 18) pour bénéficier, au mieux, de la zone optimisant le fractionnement, alors que la phase plus légère (et plus aisée à convertir à priori), pourra être injectée en queue de dard plasma ou comme vapeur au niveau de buses d'injection de vapeur (comme les buses 1a, 1a' sur la figure 13), permettant également de créer un degré de liberté supplémentaire quant à l'angle d'injection de la charge liquide à convertir.

[0122] Des filtres (ici au nombre de deux) ou des moyens séparateurs (par exemple de type centrifugeuse) 41, 41' peuvent permettre une séparation plus fine des phases issues du décanteur.

[0123] Une pompe 4k' permet de recycler la phase non souhaitée (par exemple la phase organique dans la zone de préparation de la phase aqueuse) dans les moyens 4d pour réaliser la décantation.

[0124] Des moyens 4h permettent de réaliser une mesure de la teneur en eau en sortie du réservoir 4c de démixtion. En effet, afin de contrôler le phénomène de démixtion, une mesure de la teneur en eau peut être réalisée (par exemple par une mesure de type Karl Fischer).

[0125] On peut connaître par ailleurs, par mesure de composition élémentaire, à l'aide des moyens 4i, en amont de l'introduction de la charge liquide organique dans le volume tampon 4c, la teneur en carbone, oxygène et hydrogène de la charge à convertir.

[0126] Il est alors possible de connaître la quantité d'eau à additionner pour garantir une gazéification complète (telle que décrite par exemple par la réaction 1 ci-dessus).

[0127] Des moyens 4e d'alimentation en gaz sous pression (par exemple : de l'azote, ou du CO_2, ou du méthane ou de la vapeur d'eau) peuvent être prévus au droit d'un réservoir tampon 4f, situé sur la ligne d'injection, pour solubiliser au besoin ce gaz dans la charge liquide.

[0128] Ce gaz pourra, au sortir des injecteurs, commencer à désorber et permettre un ajustement de la composition du milieu (notamment en espèces oxydantes). Cette solubilisation d'un gaz suivi de sa désorption rapide (du fait des gradients de température et de pression importants) au coeur du réacteur, mais surtout du dard plasma, permet de favoriser le phénomène de fractionnement visé. En effet, elle est susceptible d'entraîner la formation de gouttelettes de gaz au sein du liquide à convertir qui, sous l'effet de la température seront enclines, par microéclatement à fractionner localement le liquide injecté.

[0129] Le gaz à solubiliser peut représenter une faible masse par rapport au liquide à convertir (au contraire de la nébulisation par gaz vecteur). Ceci conduit à un fractionnement du liquide à convertir et permet également d'apporter un réactif supplémentaire pour la conversion de ce dernier.

[0130] Des moyens 4g, 4g' de mise en pression de la charge à convertir permettent d'assurer sa vitesse d'injection et donc sa quantité de mouvement. Ces moyens permettent un ajustement de la pression pour maintenir celle-ci, continue ou variable, selon une périodicité et un signal (pression sinusoïdale par exemple en fonction du temps) adaptés à l'écoulement du dard plasma ; en particulier on obtient ainsi une possibilité de faire osciller la pression d'injection pour s'adapter aux fluctuations du dard plasma, que met en évidence, par exemple, l'oscilloscope 6a. Ces moyens 4g, 4g' sont pilotés par le microprocesseur 7a.

[0131] Un système 4j de distribution de solide divisé et de tensio-actif permet optionnellement une formulation *in situ* d'une charge de type slurry.

[0132] Un échangeur thermique 4m, lui aussi optionnel, permet de vaporiser la phase aqueuse avant qu'elle ne soit injectée, en vue de former une phase vapeur à injecter séparément, comme déjà expliqué ci-dessus, par exemple par les buses 1a, 1a', 1c, 1c' de la figure 1A. Pour chauffer cette phase aqueuse, on peut récupérer la chaleur issue d'un système de refroidissement du réacteur et des électrodes de la torche à plasma.

[0133] Des moyens 4p, 4o permettent un contrôle de la bonne séparation (par décantation) par mesure de densité des phases, au droit du décanteur 4d de démixtion.

[0134] Les moyens 4i, 4h, 4o, 4p fournissent des mesures à des moyens de type processeur 7a pour gérer la préparation du liquide à injecter.

[0135] Les conduits 40, 41 qui vont permettre respectivement d'injecter la phase liquide, et éventuellement la phase vapeur séparée, peuvent être chauffés, par exemple par un cordon chauffant, ou encore par du gaz chaud récupéré en sortie de torche 3 et injecté dans une double enveloppe autour des conduits.

[0136] Un dispositif selon l'invention peut comporter des moyens 5 pour contrôler la qualité de l'injection.

[0137] Un exemple de ces moyens est un ensemble de diagnostic optique 5a permettant, par analyse d'images au travers d'un ou plusieurs hublot(s) 51, 53, comme représenté plus précisément sur la figure 16, de procéder au diagnostic de la qualité de la fragmentation.

[0138] Un tel ensemble comporte par exemple une caméra haute définition 5b et un laser pulsé 5b' permettant d'éclairer et visualiser la position ou le déplacement des gouttelettes de charge liquide au sein du dard. Eventuellement, un système de filtres 55, associées à la caméra 5a et adaptés à la nature des gaz plasmagènes, permet de s'affranchir de l'émissivité propre du plasma et de distinguer les gouttelettes de liquide éclairé par le faisceau du laser. Un gaz neutre de balayage (de l'azote sur la figure 16) permet d'éviter un dépôt de suie sur le hublot 51.

[0139] Un second exemple de ces moyens est un ensemble 5c de diagnostic permettant, au sortir du réacteur (ou même à différentes cotes à l'intérieur du réacteur, si le temps de séjour des gaz dans ce dernier est trop important) de suivre la composition des gaz permanents. A partir des données obtenues par ces mesures, on peut en déduire un premier ordre de grandeur de la performance du niveau de l'injection (par exemple par un suivi du taux de conversion, ou du niveau de fractionnement au sein du dard)).

[0140] Parallèlement à cela, il est possible de coupler la mesure avec une mesure de type PID (détection par Photo-Ionisation à l'aide d'une lampe UV, d'énergie voisine de 10,6 eV), pour ne pas être perturbé par la matrice gazeuse des gaz refroidis, donnant en ligne une estimation de la teneur en goudrons et bio-huile ou de la charge organique non totalement convertie. Ces dispositifs sont précédés d'un système de trempe thermique et de filtres (classiques et non représentés) pour figer la cinétique de conversion des espèces, permettre le refroidissement du flux gazeux et éliminer

les possibles traces de suies avant l'introduction des flux à analyser, par exemple dans un chromatographe 5c en phase gazeuse, et dans le PID.

[0141] En fonction des résultats des moyens de diagnostic, les moyens 7a processeurs, qui peuvent intégrer un système de régulation propre, actionnent les éléments de pilotage du système d'injection et de préparation de la charge (angle d'injection, quantité de mouvement, teneur en eau, ...) pour adapter ces derniers.

[0142] Des moyens peuvent en outre être prévus pour adapter l'injection de la charge liquide à convertir à d'éventuelles modifications du dard plasma, et notamment à d'éventuelles variations de la pulsation de la torche.

[0143] En effet le dard issu d'une torche à plasma d'arc soufflé peut être sujet à des pulsations du fait des instabilités générées, notamment lors de la rupture et la régénération de l'arc électrique à l'intérieur de la tête de torche. Ces modifications (notamment du niveau de température) sont relativement périodiques et peuvent être suivies indirectement par l'enregistrement en continu de la tension aux bornes des électrodes 30, 31 (figure 1A), comme illustré en figure 21. La périodicité des pulsations du dard issues de la torche étant relativement constante pour une torche et des conditions de fonctionnement données, il n'est pas nécessairement utile (et de toute façon cela est parfois impossible du fait de la fréquence de pulsation) d'adapter en temps réel l'injection à ces pulsations. On peut cependant contrôler l'absence de dérive de la périodicité et la bonne synchronisation des pulsations avec les injections de jet liquide (si celles-ci sont pulsées), notamment pour :

- limiter les risques d'engorgement du dard plasma avec la charge à convertir,
- bénéficier d'un dard plasma qui soit le plus efficace possible (et donc le plus chaud) sur une période donnée.

[0144] En cas de constatation de dérive de la périodicité (pouvant être mesurée par un oscilloscope 6 à acquisition rapide, figure 1B), il est possible d'ajuster les paramètres d'injection pour se caler dans la périodicité choisie.

[0145] Pour ce faire, le système de diagnostic est relié lui aussi au processeur 7a qui compare régulièrement les paramètres de périodicité et de phase entre la commande de l'injection et les pulses du dard plasma.

[0146] Le fonctionnement d'un dispositif selon l'invention peut être décrit de la manière suivante.

[0147] La torche plasma produit le dard plasma 3, dans lequel les injecteurs de liquide injectent la charge à convertir.

[0148] Des moyens de préparation de la charge fournissent une charge adaptée aux injecteurs.

[0149] Des moyens de diagnostic de la qualité de l'injection permettent d'observer la fragmentation des jets et de suivre la composition des gaz permanents.

[0150] Par ailleurs, des moyens de contrôle permettent de réaliser un suivi de la pulsation de la torche.

[0151] Les moyens de diagnostic, les moyens de contrôle et les moyens de préparation de la charge envoient les informations qu'ils ont recueillies à des moyens 7a, 7b de traitement des données.

[0152] À leur tour, ces moyens de traitement des données peuvent commander les moyens de préparation de la charge, en vue d'une adaptation de la composition de la charge en fonction des informations recueillies.

[0153] Les moyens de traitement permettent également de contrôler les impulsions des injecteurs par rapport aux impulsions du plasma, par exemple pour les recaler par rapport à ces dernières.

[0154] Un exemple de réalisation d'un système d'injection, conforme à l'invention, va maintenant être donné.

[0155] Cet exemple met en oeuvre une torche plasma à arc non transféré, de puissance 2 MW électrique, en vue de la conversion optimisée de la bio-huile par la meilleure injection de la bio-huile au sein du dard plasma.

[0156] Les données de fonctionnement suivantes ont été retenues :

- diamètre de la tuyère de torche : 60 mm,
- longueur du dard plasma : 300 mm (la température et la vitesse de l'écoulement du dard sont supposées constante sur cette zone, ce qui simplifie les calculs),
- forme du dard : conique,
- température du dard : 7000 K,
- masse volumique du dard : $3{,}49.\ 10^{-2}$ kg/m^3,
- masse volumique de la bio-huile : 1200 kg/m^3,
- rendement thermique de la torche plasma : 90 %,
- enthalpie de transformation de la charge liquide à convertir : 11 MJ/kg (la composition CxHyOz de la charge est supposée idéale pour ne pas avoir à injecter un complément d'eau).

[0157] Au vu de ces données, la capacité maximale du système de traitement (Qmax) est voisine de 600 kg/h. Un nombre raisonnable de 6 injecteurs peut être retenu pour assurer cette distribution au sein du dard plasma, les axes des injecteurs étant alternés comme présenté en figure 11. La figure 17 donne, pour une représentation où les injecteurs seraient dans le même plan (celui de la figure), les différentes notations pour le positionnement et les angles des injecteurs ; en particulier :

- R et L sont respectivement le rayon du plasma à sa base, mesuré à partir de l'axe d'écoulement du plasma, et la longueur du dard plasma à partir de la base,
- ri désigne la longueur, mesurée sur l'axe d'écoulement du plasma, de la zone de fractionnement ou des nappes liquides, lors de la confluence des jets,
- la position, sur l'axe d'écoulement du plasma, de chaque zone de confluence de deux jets est désignée par xi,
- Hi désigne la position, sur un axe perpendiculaire à l'axe d'écoulement du plasma et placé dans le plan de la figure, de l'intersection de chaque perpendiculaire à l'axe d'écoulement passant par chaque point de confluence de jets avec l'un des grands côtés du triangle schématisant le dard plasma,
- x'i (respectivement H'i) désigne la position, sur l'axe d'écoulement du plasma (respectivement sur un axe perpendiculaire à cet axe d'écoulement et placé dans le plan de la figure), de la projection orthogonale de l'intersection de chaque jet avec le côté le plus proche du triangle schématisant le dard plasma.

[0158] Avec les notations de la figure 17 et 18 (sur lesquelles le dard plasma est schématisé par un triangle) on a :

$$x'i = \frac{R + xi.\tan\theta_i}{R/L + \tan\theta_i} \qquad \text{(avec i = 2 ou 3),}$$

Hi' = tanθi . xi'- tanθi.xi (avec i = 2 ou 3),
Hi = R - R/L. xi (avec i = 1, 2 ou 3).

[0159] Les Hi sont indiqués sur la figure 17.

[0160] Sans perturbation spécifique, la confluence de deux jets permet d'obtenir la formation d'une nappe liquide résultante dont la longueur dépend notamment de l'angle d'incidence des jets. D'une manière générale, il est possible d'estimer le rapport $er/(\Phi/2)^2$ en fonction de l'angle β tel que défini sur la figure 19, où Φ est le diamètre d'injection de l'injecteur correspondant).

[0161] En extrapolant les maxima de r (distance entre le point de confluence des jets 10, 10' et un point courant R de la périphérie de la nappe) en fonction de l'angle d'incidence θ des jets et en posant que l'épaisseur e des nappes 13 est d'un ordre de grandeur plus petit que le rayon des jets liquides confluents 10, 10', les valeurs maximales (du fait qu'en réalité le dard plasma tend à réduire le développement de ces nappes liquides) suivantes des longueurs des nappes résultantes de la confluence des jets peuvent être données en premières approximations :

r_1	r_2	r_3
≈3-4 Φ_1	22,5 Φ_2	45 Φ_3

(Φ_i : étant le diamètre d'injection des jets des injecteurs i).

[0162] Les volumes élémentaires δVi définis comme décrits dans la figure 18 permettent alors de définir les taux d'occupation de la charge liquide τi) pour les volumes élémentaires englobant les points d'injection.

[0163] Soit δVi le volume élémentaire englobant le point de cote xi, la valeur de ce volume élémentaire à l'expression suivante :

$$\delta Vi = 1/3.\ \pi\ .\ [ri + (xi' - xi)].\ (Hi'^2 + Hi'.\ Hi + Hi^2).$$

[0164] En notant qi le rapport de la quantité de mouvement du jet de l'injecteur i par rapport à celle du dard plasma, et Qi le débit de liquide de l'injecteur i, on peut fixer la règle suivante :

- si xi augmente, alors :
  - supérieur à 1 pour assurer la pénétration θi et Φi diminuent tous deux, mais restent chacun un paramètre de conduite du processus ;
  - Qi, lui aussi paramètre de conduite, diminue, mais ΣQi < Qmax,
  - τi peut être variable, même si il tend à baisser, et reste inférieur à 1 %,
  - qi, lui aussi paramètre de conduite, est choisi du dard par le liquide.

[0165] En suivant cette règle la configuration pour l'exemple de réalisation recherchée peut être celle indiquée en tableau II, configuration pour laquelle il pourra être recherché, en cours de fonctionnement, la minimisation de ε (distance entre deux zones d'occupation du dard par de la matière liquide, voir figure 18) et l'ajustement des τi (au vu des éléments de diagnostic de la qualité de l'injection) au moyen des paramètres de conduite que sont θi, Qi et qi :

Tableau II.

Injecteur 1b, 1b'						Injecteur 1d, 1d'						Injecteur 1f, 1f'					
q	v	Φ	Q1	θ1	x1	τ1	Q	v	Φ	Q	θ2	x2	τ2	Q	V	Φ	Q3	θ3	x3	τ3
4	8	3	205	90° .	50 .	0,9%	4	8	1,8	75	45°	160	0,3%	1,5	5	1, 2	20	30° :	230	0,3%
	m/s	mm	1/h		mm			m/s	mm	1/h		mm			m/s		1/h		mm	

[0166] Plus généralement, au-delà de cet exemple, quelle que soit la configuration retenue (donc quel que soit le nombre de groupes d'injecteurs et le nombre d'injecteurs par groupe d'injecteurs) on pourra avantageusement chercher à ce que, pour deux groupes d'injecteurs, dont le premier est plus proche de la base 33 du plasma que le deuxième, le premier ayant des paramètres $\tau 1$, $\theta 1$, $\Phi 1$, q1 et Q1 et le deuxième ayant des paramètres $\tau 2$, $\theta 2$, $\Phi 2$, q2 et Q2 :

- $\theta 1 > \theta 2$ et $\Phi 1 > \Phi 2$;
- Q1>Q2, mais $\Sigma Qi < Qmax$ (Qmax = débit total (défini en fonction de la puissance thermique disponible dans le dard plasma et l'enthalpie de transformation de la charge (énergie pour convertir la charge par unité de masse), soit ici environ 600 1/h) $\tau 1$ et $\tau 2 < 1$ % ;
- q1 et q2 sont tous deux supérieurs à 1.

[0167] D'une manière générale, le dispositif constituant la présente invention permet, pour assurer la meilleure conversion possible de la charge, de trouver le meilleur compromis entre :

- un fractionnement optimisé du liquide à convertir permettant une optimisation de la surface d'échange entre le liquide et le dard plasma,
- un temps de séjour de la charge au sein du dard le plus important possible,
- une utilisation maximisée des températures les plus importantes au sein du dard plasma,
- une utilisation maximisée de la teneur en espèces actives du dard plasma,

sachant que la conversion de la charge est elle-même une fonction croissante des paramètres précédemment cités (Conversion = f (t, $S_{\text{échange milieu/réactif}}$, T°, Comp)).

[0168] L'invention s'applique à la conversion de liquides tels que les bio-huiles, ou encore des boues de station d'épuration, ou encore des « slurry » ou particules résultant de la pulvérisation d'un solide, ces particules étant mélangées à un liquide pour l'injection dans la torche plasma.

[0169] L'invention s'applique également à l'injection et/ou la conversion d'un liquide de type bio-huile ou, plus généralement, renfermant potentiellement de fines particules ou, plus généralement encore, relativement difficiles à nébuliser (ou atomiser) de par ses propriétés physico-chimiques (notamment sa viscosité).

[0170] Un procédé de gazéification de la bio-huile permet de fournir un gaz adapté à la production de carburant de synthèse.

[0171] Comme déjà expliqué en introduction, la bio-huile peut être obtenue par pyrolyse flash, procédé thermochimique (à une température $T \approx 500°C$) dans lequel la biomasse est chauffée rapidement en absence d'oxygène. Sous l'effet de la chaleur, la biomasse se décompose et conduit à la formation de gaz permanents, de vapeurs condensables, d'aérosols et de résidus carbonés. Après refroidissement et condensation des composés volatils et des aérosols, on obtient typiquement un liquide marron foncé, la bio-huile. Celle-ci est ensuite gazéifiée par injection dans une torche à plasma, selon la présente invention, ce qui permet de limiter ou d'éviter la présence de goudrons (on est en dessous de la valeur limite de 0,1 mg/Nm3).

[0172] L'invention peut également être avantageusement mise en oeuvre pour le cas de procédés nécessitant l'utilisation de dard plasma ou de flamme(s) ou d'un fluide relativement chaud(s) ou générant une grande quantité de mouvement ne rendant pas aisé le mélange entre la charge et ce dard (ou cette flamme ou ce fluide chaud ou générant une grande quantité de mouvement).

[0173] Un système selon l'invention permet en outre d'accepter les variations de densité du liquide à convertir. En effet, avec d'autres systèmes, s'il y a variation de la densité du liquide, un ajustement pouvant être lourd est nécessaire.

[0174] Dans une variante d'un procédé selon l'invention on injecte, dans au moins une partie des jets de liquide, un jet de vapeur simultanément au jet de liquide. Avantageusement, le liquide est alors préalablement séparé entre une première partie, vaporisable à une température inférieure à la température moyenne du plasma et une deuxième partie, à injecter dans le plasma sous forme liquide.

[0175] Dans une variante d'un procédé selon l'invention on injecte du liquide avec des injecteurs de différents groupes d'injecteurs comportant des angles d'incidence différents par rapport à l'axe d'écoulement du plasma.

Revendications

1. Dispositif d'injection de matière liquide dans une torche à plasma, comportant N (N > 1) groupes d'injecteurs Gi (i=1,...N) disposés sur le pourtour d'une zone d'écoulement du plasma (3), et le long de l'axe d'écoulement du plasma, selon différentes cotes longitudinales, chaque groupe Gi comportant au moins ni (ni > 2) injecteurs (1b, 1b', 1d, 1d', 1f, 1f') qui sont disposés de manière à ce que chacun injecte dans le plasma ladite matière liquide suivant une direction (10, 10') au moins partiellement opposée à la direction d'écoulement du plasma, les ni injecteurs

d'un même groupe d'injecteurs Gi étant disposés sur le pourtour de la zone d'écoulement du plasma avec un écart angulaire de 360°/(ni) l'un par rapport à l'autre et de manière à ce que les ni jets de liquide qu'ils injectent dans le plasma forment chacun la génératrice d'un cône dont le sommet est situé sensiblement sur l'écoulement du plasma.

2. Dispositif selon la revendication 1, l'angle d'incidence des axes de projection des injecteurs, par rapport à l'axe découlement du plasma, étant d'autant plus faible que les injecteurs sont disposés loin de la base (33) du dard plasma (3).

3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, au moins un injecteur comportant des moyens piézoélectriques pour fractionner le liquide injecté.

4. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, au moins un injecteur comportant un profil intérieur hélicoïdal (120).

5. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, comportant en outre des moyens pour injecter dans au moins une partie des injecteurs des trains de jets liquides en impulsion.

6. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 5, au moins une partie des injecteurs comportant en outre chacun une buse (1a, 1a', 1c, 1c') d'injection de vapeur pour injecter un jet de vapeur simultanément au jet de liquide.

7. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 6, comportant en outre des moyens (4g, 4g') de mise sous pression de la charge liquide à convertir.

8. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 7, comportant en outre des moyens pour séparer d'une part les composés organiques lourds du liquide à convertir, et d'autre part de la phase légère de ce même liquide et/ou des moyens (4m') pour vaporiser la phase aqueuse avant qu'elle ne soit injectée.

9. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 8, comportant en outre des moyens optiques pour contrôler et éventuellement adapter la qualité de l'injection de la charge liquide à convertir à des modifications du dard plasma.

10. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 9, comportant en outre des moyens (6, 7) pour adapter l'injection de la charge liquide à convertir à des modifications du dard plasma.

11. Procédé d'injection de matière liquide dans une torche plasma, dans lequel on injecte le liquide par N (N > 1) groupes d'injecteurs Gi (i=1,...N) disposés sur le pourtour d'une zone d'écoulement du plasma (3), et le long de l'axe d'écoulement du plasma, selon différentes cotes longitudinales, chaque groupe comportant au moins ni (ni > 2) injecteurs (1b, 1b', 1d, 1d', 1f, 1f') disposés de manière à ce que chacun injecte au moins une partie de ladite matière liquide dans le plasma suivant une direction au moins partiellement opposée (A) à la direction d'écoulement (B) de ce dernier, les ni injecteurs d'un même groupe d'injecteurs étant disposés sur le pourtour de la zone d'écoulement du plasma avec un écart angulaire de 360°/(ni) l'un par rapport à l'autre et de manière à ce que les jets de liquide qu'ils injectent dans le plasma forment chacun la génératrice d'un cône dont le sommet est situé sensiblement sur l'écoulement du plasma.

12. Procédé selon la revendication 11, le liquide étant une bio-huile, ou une boue de station d'épuration, ou un mélange de particules solides et d'un liquide.

13. Procédé selon l'une des revendications 11 ou 12, une partie de la chaleur dégagée par le plasma étant récupérée par le support d'injecteurs puis ensuite transférée, par conduction, au liquide passant dans les injecteurs.

14. Procédé selon l'une des revendications 11 à 13, dans lequel on ajoute de l'eau dans le liquide à injecter et/ou on forme une couche (11, 11') de vapeur à l'extérieur du dard plasma et/ou dans lequel une quantité de mouvement rotationnelle est appliquée à au moins un jet de liquide.

15. Procédé selon l'une des revendications 11 à 14, dans lequel l'angle d'injection d'au moins un jet dans le plasma est modifié, par exemple par variation de la pression de fluide dans ce jet.

Claims

1. Device to inject liquid matter into a plasma torch, comprising N (N > 1) groups of injectors Gi (i=1, ...N) arranged on the periphery of a plasma flow region (3), and along the plasma flow axis, as per different longitudinal points, each group Gi comprising at least ni (ni ≥ 2) injectors (1b, 1b', 1d, 1d', 1f, 1f) which are arranged so that each injects said liquid matter into the plasma in a direction (10, 10') at least partly opposite the direction of flow of the plasma, the ni injectors of one same group of injectors Gi being arranged on the periphery of the plasma flow region with an angle difference of 360°/(ni) relative to each other, and so that the liquid streams they inject into the plasma each form the generatrix of a cone whose tip lies substantially on the plasma flow.

2. Device according to claim 1, the angle of incidence of the projection axes of the injectors, relative to the plasma flow axis, being smaller the further the injectors lie distant from the base (33) of the plasma plume (3).

3. Device according to claim 1 or 2, at least one injector comprising piezoelectric means to fractionate the injected liquid.

4. Device according to any of claims 1 to 3, at least one injector comprising an inner helical profile (120).

5. Device according to any of the preceding claims further comprising means to inject in at least part of the injectors pulsed trains of liquid streams.

6. Device according to any of claims 1 to 5, at least part of the injectors each further comprising a vapour injection nozzle (1a, 1a', 1c, 1c') to inject a stream of vapour simultaneously with the stream of liquid.

7. Device according to any of claims 1 to 6, further comprising means (4g, 4g') to pressurize the liquid feed to be converted.

8. Device according to any of claims 1 to 7, further comprising means to separate firstly the heavy organic compounds of the liquid to be converted, and secondly the light phase of this same liquid and/or means (4m') to vaporize the aqueous phase before it is injected.

9. Device according to any of claims 1 to 8, further comprising optical means to control and optionally to adapt the quality of injection of the feed to be converted to changes in the plasma plume.

10. Device according to any of claims 1 to 9, further comprising means (6, 7) to adapt the injection of the liquid feed to be converted to changes in the plasma plume.

11. Method to inject liquid matter into a plasma torch, wherein the liquid is injected via N (N > 1) groups of injectors Gi (i=1,...N) arranged on the periphery of a plasma flow region (3), and along the plasma flow axis, as per different longitudinal points, each group comprising at least ni (ni ≥ 2) injectors (1b, 1b' , 1d, 1d' , 1f, 1f') arranged so that each injects at least part of said liquid matter into the plasma in a direction (A) at least partly opposite the direction of flow (B) of the plasma, the ni injectors of one same group of injectors being arranged on the periphery of the plasma flow region with an angle difference of 360°/(ni) relative to each other, and so that the liquid streams they inject into the plasma each form the generatrix of a cone whose tip lies substantially on the plasma flow.

12. Method according to claim 11, the liquid being a bio-oil, or sludge from a wastewater treatment plant, or a slurry.

13. Method according to claim 11 or 12, part of the heat emanated by the plasma being recovered by the support of the injectors and then transferred, by conduction, to the liquid passing through the injectors.

14. Method according to claims 11 to 13, wherein, water is added to the liquid to be injected and/or a layer (11, 11') of vapour is formed outside the plasma plume and/or a quantity of rotational movement is applied to at least one stream of liquid.

15. Method according to any of claims 11 to 14, wherein the angle of injection of at least one stream into the plasma is modified, for example by varying the pressure of the liquid in this stream.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Injektion von flüssigem Material in einen Plasmabrenner, umfassend N (N > 1) Gruppen von Injektoren Gi (i = 1, ..., N), die auf der Umrandung von einem Strömungsbereich des Plasmas (3) und entlang der Strömungsachse des Plasmas an unterschiedlichen longitudinalen Positionen angeordnet sind, wobei jede Gruppe Gi wenigstens ni (ni ≥ 2) Injektoren (1b, 1b', 1d, 1d', 1f, 1f') umfasst, die derart angeordnet sind, dass jeder das flüssige Material in das Plasma längs einer Richtung (10, 10') wenigstens teilweise entgegengesetzt zu der Richtung der Strömung des Plasmas injiziert, wobei die ni Injektoren einer gleichen Gruppe von Injektoren Gi auf der Umrandung des Strömungsbereichs des Plasmas mit einem Winkelabstand von 360°/(ni) voneinander angeordnet sind, und so, dass die ni Injektorstrahlen von Flüssigkeit, welche sie in das Plasma injizieren, jeweils die Erzeugende eines Konus bilden, dessen Spitze sich im Wesentliche auf der Strömung des Plasmas befindet.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Inzidenzwinkel der Projektionsachsen der Injektoren in Bezug auf die Strömungsachse des Plasmas umso geringer ist, je weiter die Injektoren von der Basis (33) das Plasmakerns (3) entfernt sind.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, wobei wenigstens ein Injektor piezoelektrische Mittel umfasst, um die injizierte Flüssigkeit aufzuteilen.

4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei wenigstens ein Injektor ein spiralförmiges Innenprofil (120) umfasst.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiterhin umfassend Mittel, um wenigstens in einem Teil der Injektoren Folgen von Flüssigkeitsstrahlen im Impulsbetrieb zu injizieren.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei wenigstens ein Teil der Injektoren weiterhin jeweils eine Dampfinjektionsdüse (1a, 1a', 1c, 1c') umfasst, um einen Dampfstrahl gleichzeitig mit dem Flüssigkeitsstrahl zu injizieren.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, weiterhin umfassend Mittel (4g, 4g'), um die umzuwandelnde flüssige Ladung unter Druck zu setzen.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, weiterhin umfassend Mittel, um einerseits die schweren organischen Bestandteile der umzuwandeinden Flüssigkeit und andererseits die leichte Phase der gleichen Flüssigkeit zu separieren, oder/und Mittel (4m'), um die wässrige Phase zu verdampfen, bevor sie injiziert wird.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, weiterhin umfassend optische Mittel, um die Qualität der Injektion der umzuwandelnden flüssigen Ladung zu steuern/regeln und sie gegebenenfalls an Modifikationen des Plasmakerns anzupassen.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, weiterhin umfassend Mittel (6, 7), um die Injektion der umzuwandelnden flüssigen Ladung an Modifikationen des Plasmakerns anzupassen.

11. Verfahren zur Injektion von flüssigem Material in einen Plasmabrenner, wobei man die Flüssigkeit durch N (N > 1) Gruppen von Injektoren Gi (i = 1, ... N) injiziert, die auf der Umrandung von einem Strömungsbereich des Plasmas (3) und entlang der Strömungsachse des Plasmas an unterschiedlichen longitudinalen Positionen angeordnet sind, wobei jede Gruppe wenigstens ni (ni >= 2) Injektoren (1b, 1b', 1d, 1d', 1f, 1f) umfasst, die derart angeordnet sind, dass jeder wenigstens einen Teil des flüssigen Materials in das Plasma längs einer Richtung injiziert, die wenigstens teilweise der Richtung (B) der Strömung von dem Letzteren entgegengesetzt ist (A), wobei die ni Injektoren von einer gleichen Gruppe von Injektoren auf der Umrandung des Strömungsbereichs des Plasmas mit einem Winkelabstand von 360°/(i) voneinander angeordnet sind, und auf eine solche Weise, dass die Flüssigkeitsstrahlen, die sie in das Plasma injizieren, jeweils die Erzeugende eines Konus bilden, dessen Spitze sich im Wesentlichen auf der Strömung des Plasmas befindet.

12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei die Flüssigkeit ein Bio-Öl ist oder ein Schlamm einer Kläranlage oder eine Mischung von festen Partikeln und einer Flüssigkeit.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 oder 12, wobei ein Teil der Wärme, die durch das Plasma abgegeben

wird, von dem Träger der Injektoren ausgenommen wird und anschließend durch Wärmeleistung an die Flüssigkeit übertragen wird, welche die Injektoren passiert.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 13, wobei man der zu injizierenden Flüssigkeit Wasser zufügt oder/und man eine Dampfschicht (11, 11') außerhalb von dem Plasmakern bildet oder/und wenigstens einem Flüssigkeitsstrahl eine Drehbevsiegungskomponente verliehen wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 14, wobei der Injektionswinkel von wenigstens einem Strahl in dem Plasma modifiziert wird, beispielsweise durch Variation des Fluiddrucks in diesem Strahl.

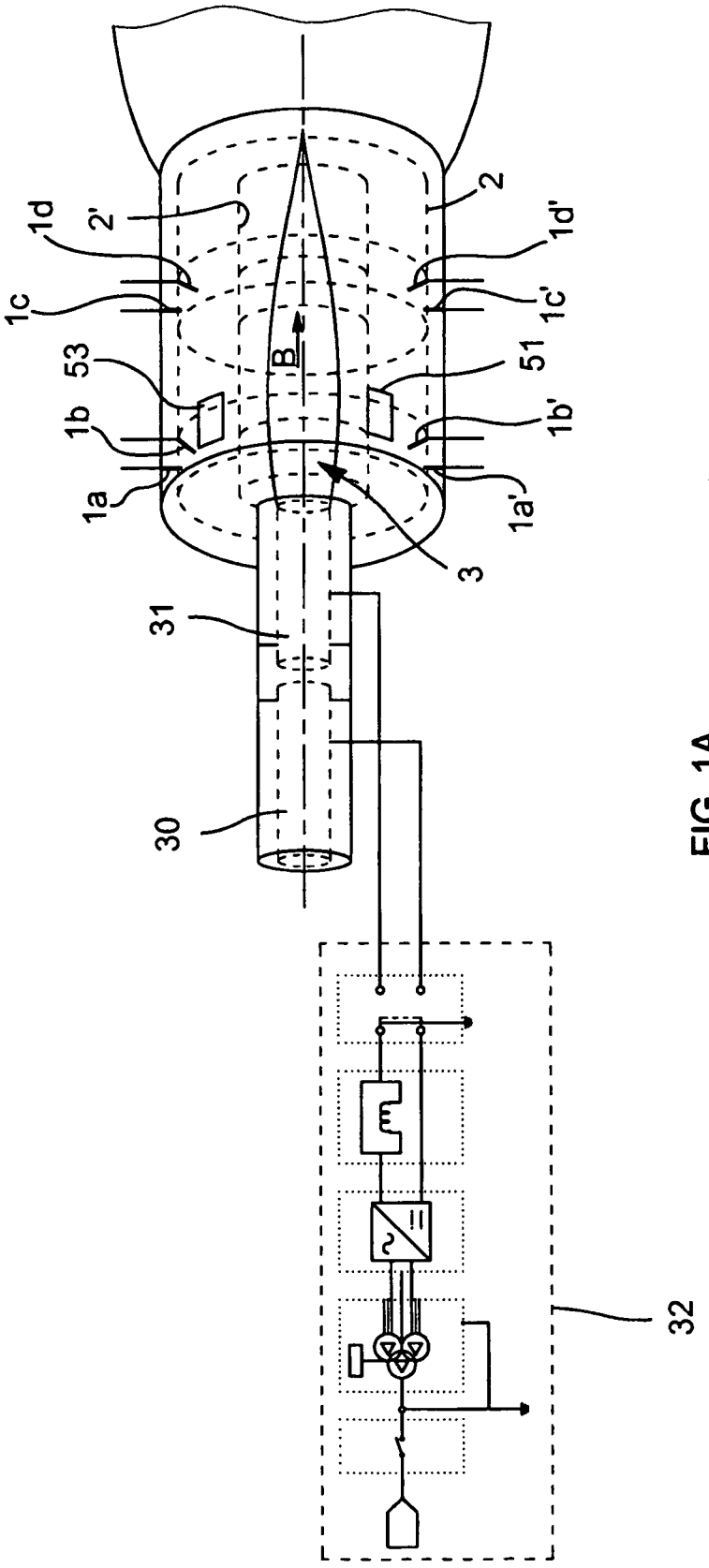
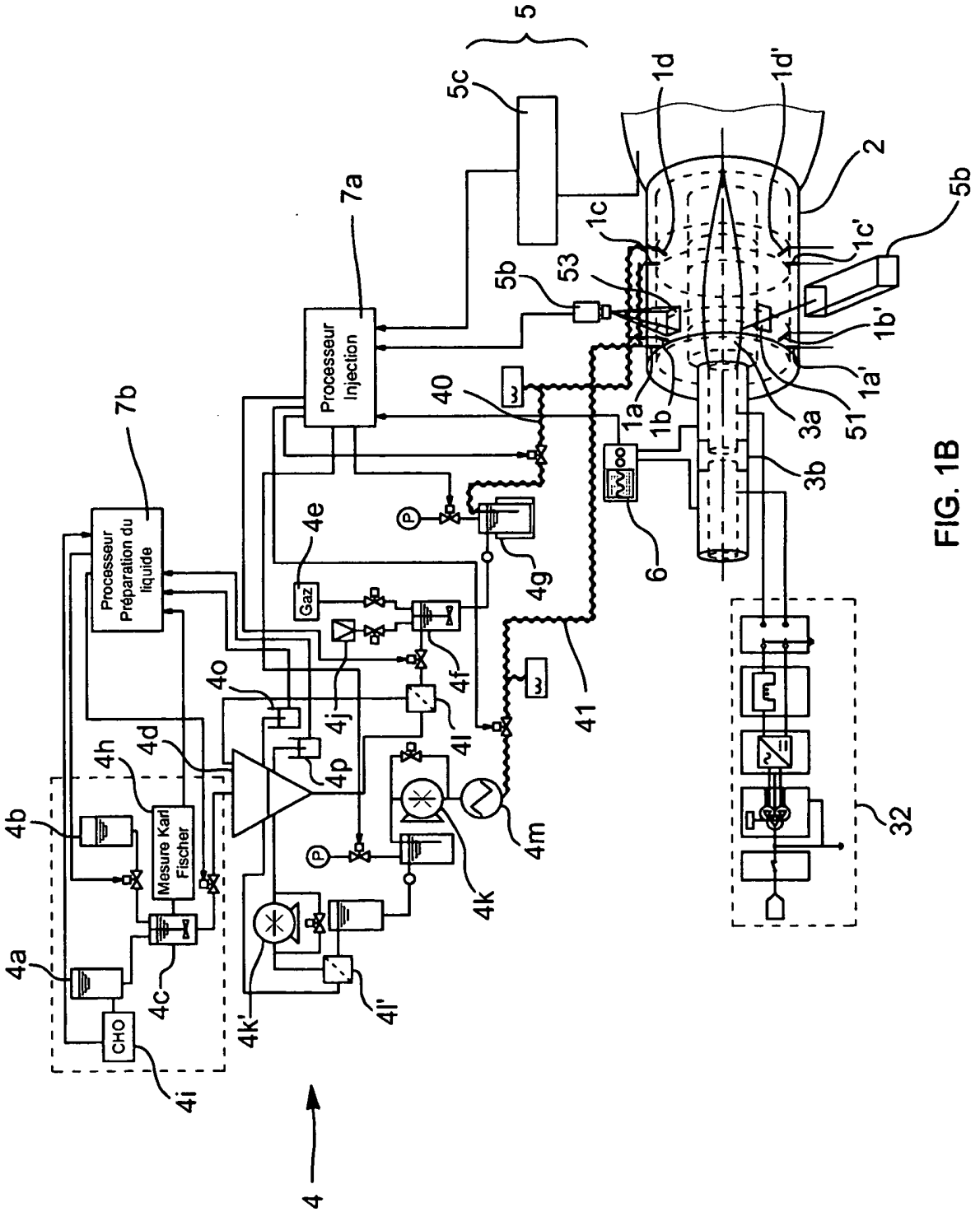


FIG. 1A


5
5c
1d
1d'
2
5b
7a
1c
1c'
Processeur Injection
5b
53
1b'
40
1a'
1a
1b
3a
51
7b
3b
Processeur Préparation du liquide
4e
Gaz
6
4g
4f
4o
4j
41
4l
4d
4h
4p
4b
Mesure Karl Fischer
4m
4k
32
4a
4c
4k'
4l'
CHO
4i
4
FIG. 1B

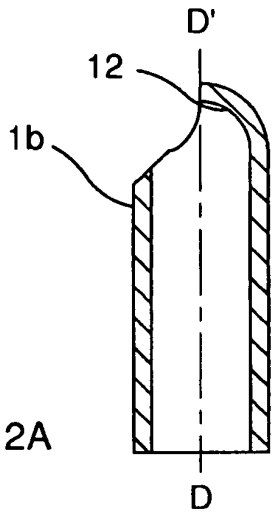


FIG. 2A

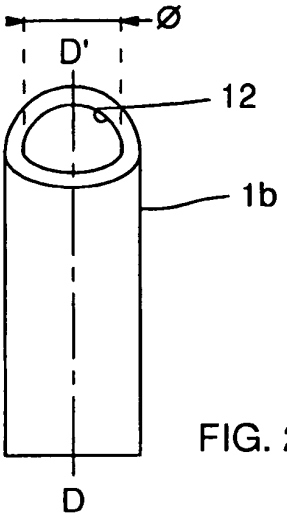


FIG. 2B

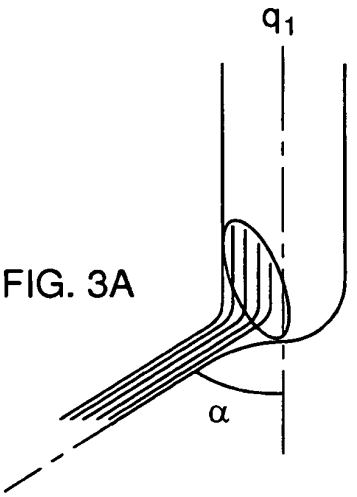


FIG. 3A

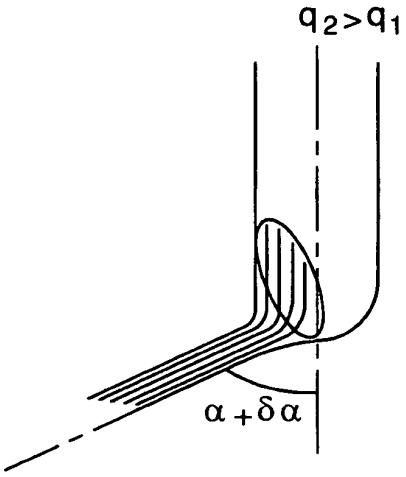


FIG. 3B

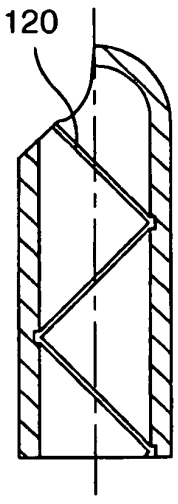


FIG. 4

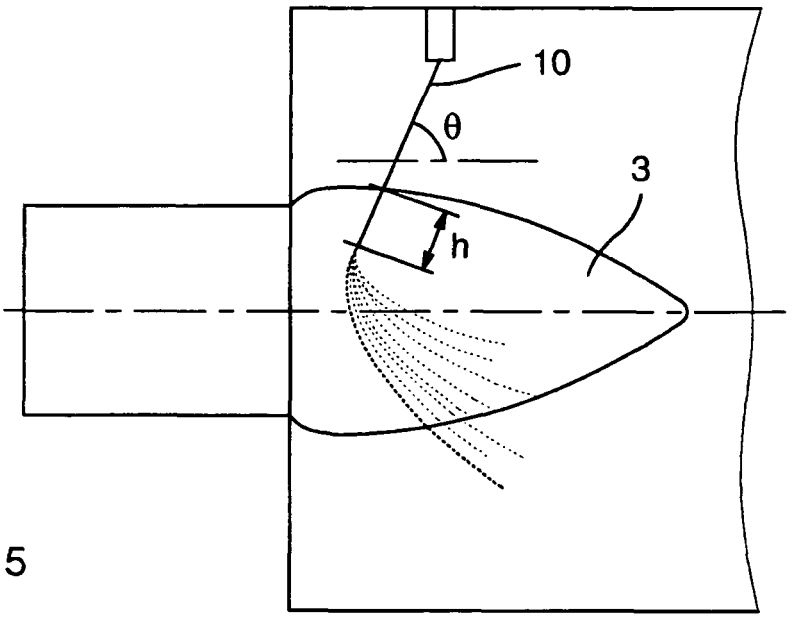


FIG. 5

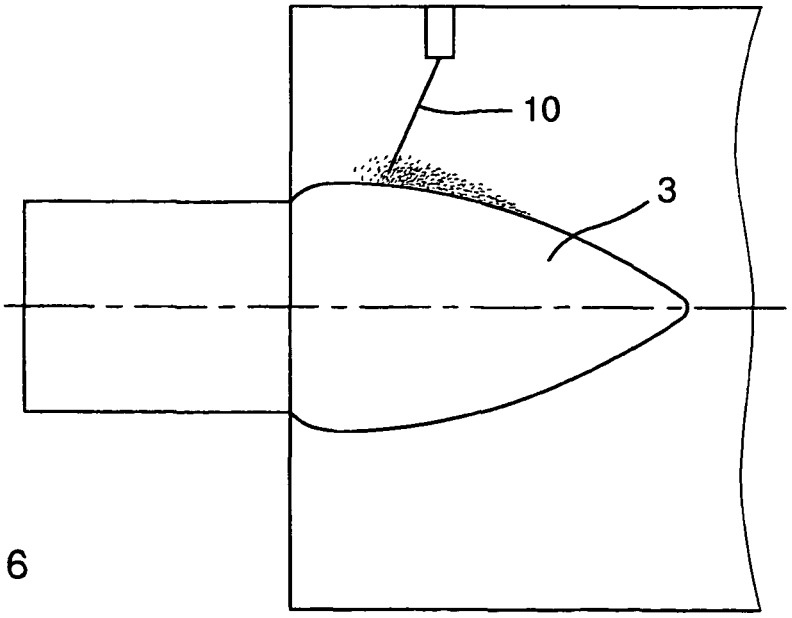


FIG. 6

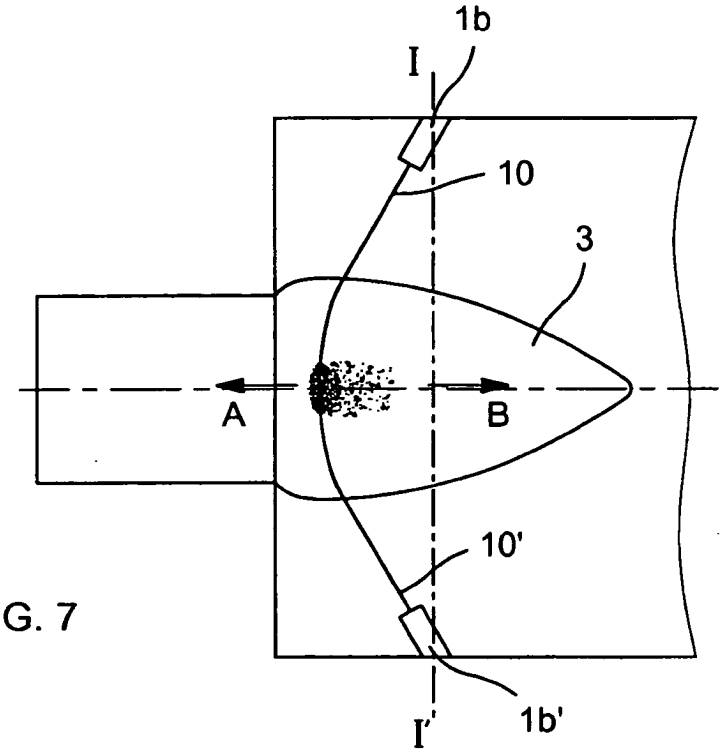


FIG. 7

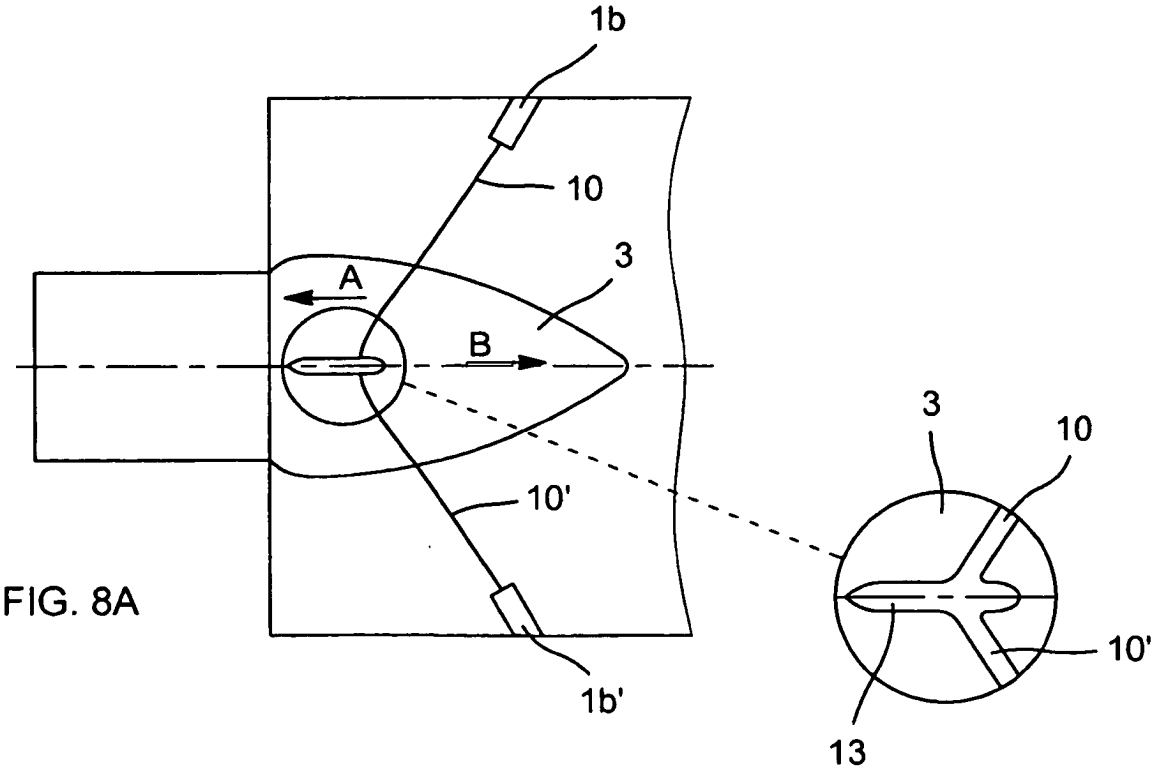


FIG. 8A

FIG. 8B

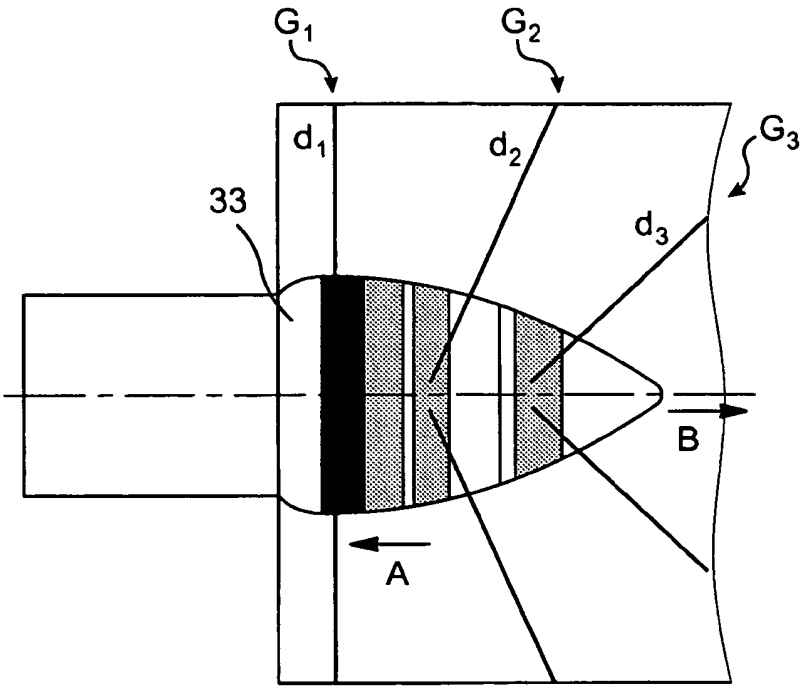


FIG. 9

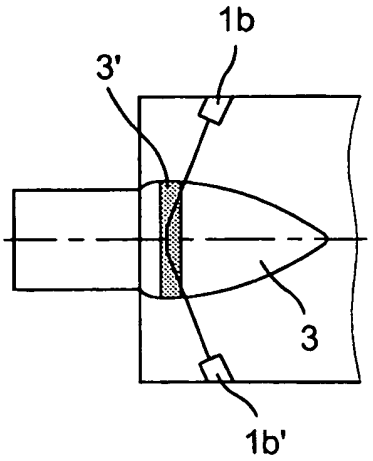


FIG. 10A

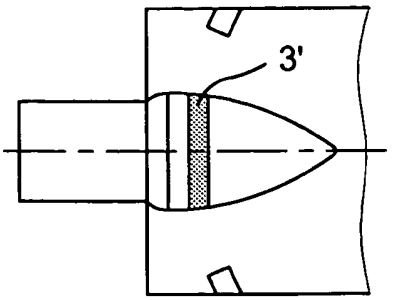


FIG. 10B

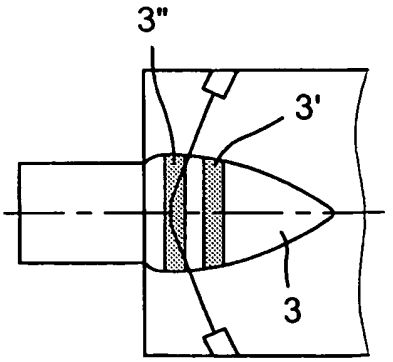


FIG. 10C

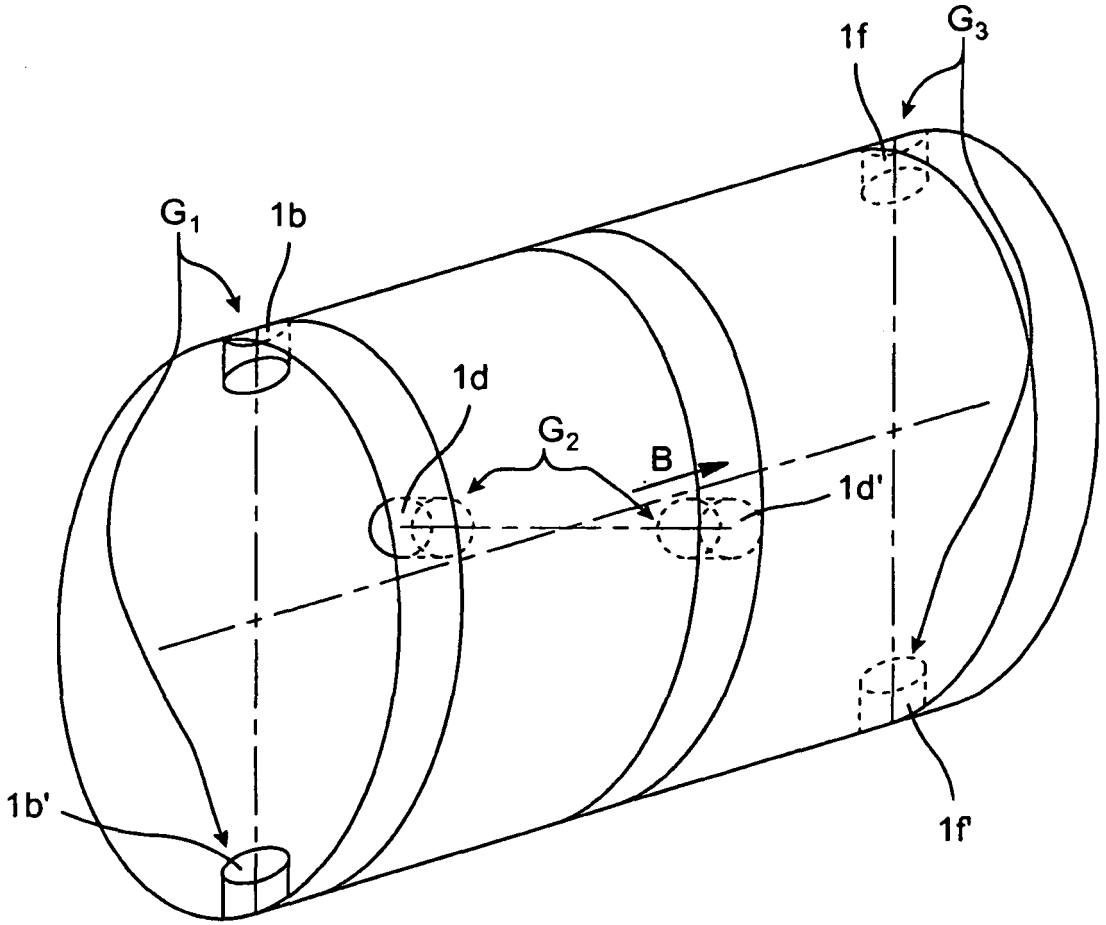


FIG. 11

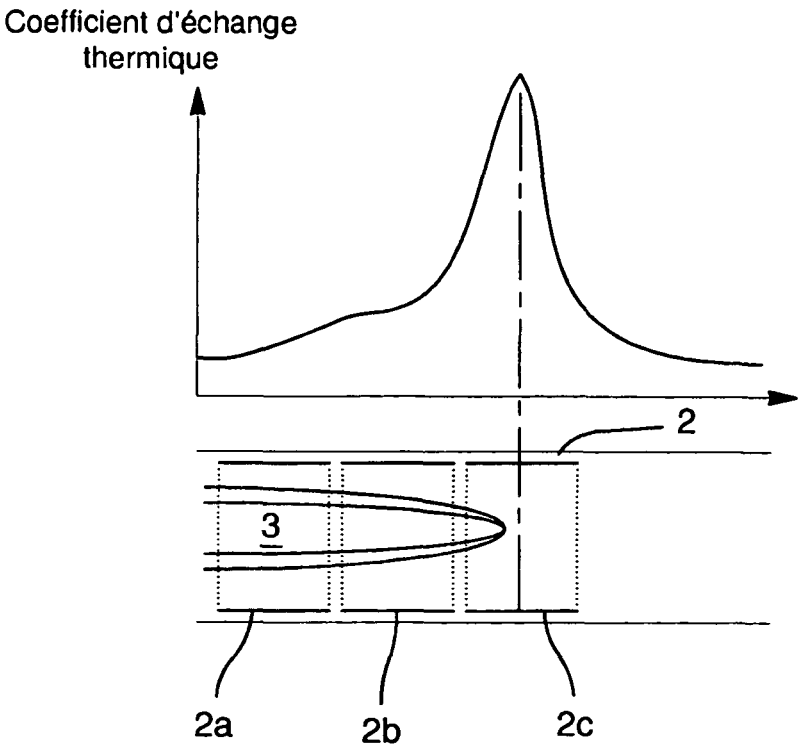

Coefficient d'échange thermique
2
3
2a
2b
2c

FIG. 12

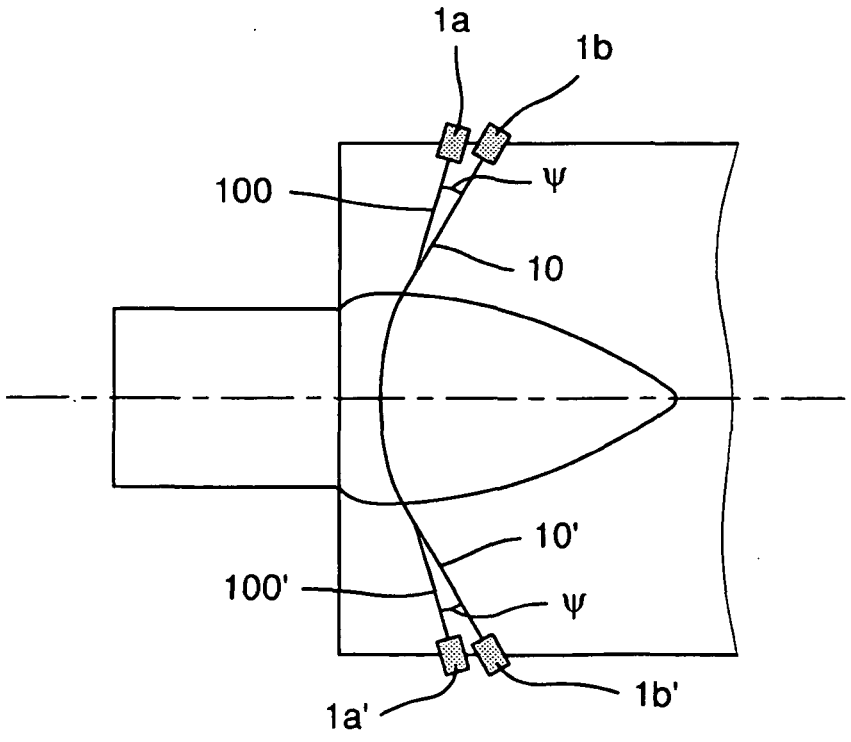

1a
1b
100
ψ
10
10'
100'
ψ
1a'
1b'

FIG. 13

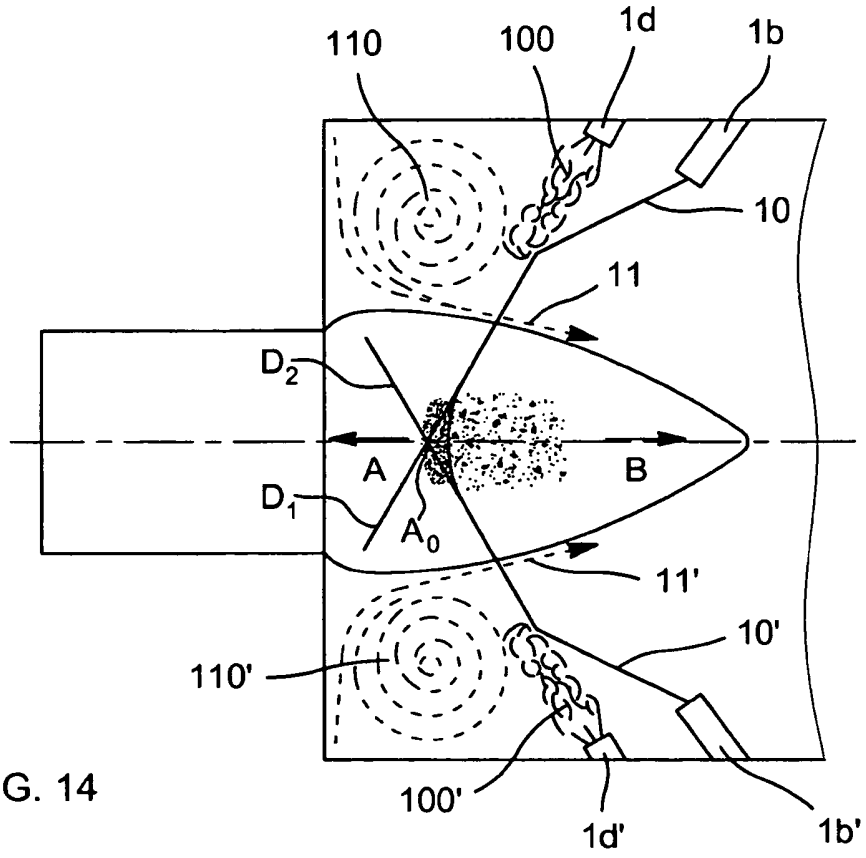

110
100
1d
1b
10
11
D_2
A
B
D_1
A_0
11'
10'
110'
100'
1d'
1b'

FIG. 14

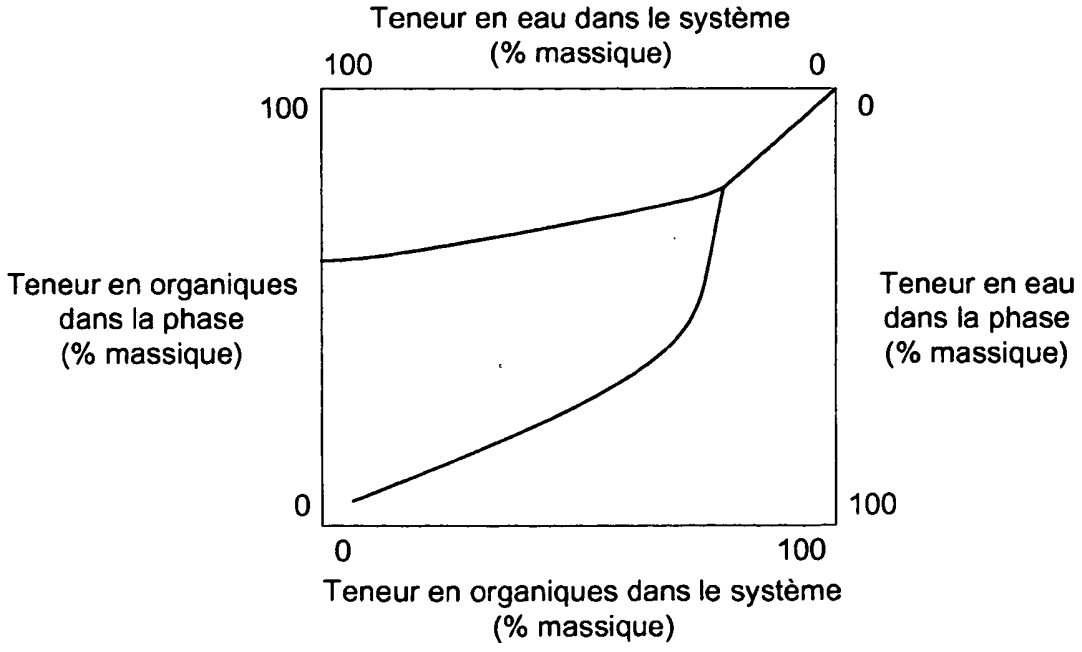

Teneur en eau dans le système
(% massique)
100
0
100
0
Teneur en organiques
dans la phase
(% massique)
Teneur en eau
dans la phase
(% massique)
0
100
0
100
Teneur en organiques dans le système
(% massique)

FIG. 15

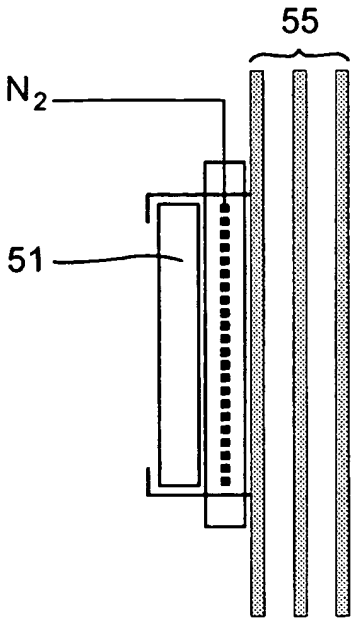

55
N2
51

FIG. 16

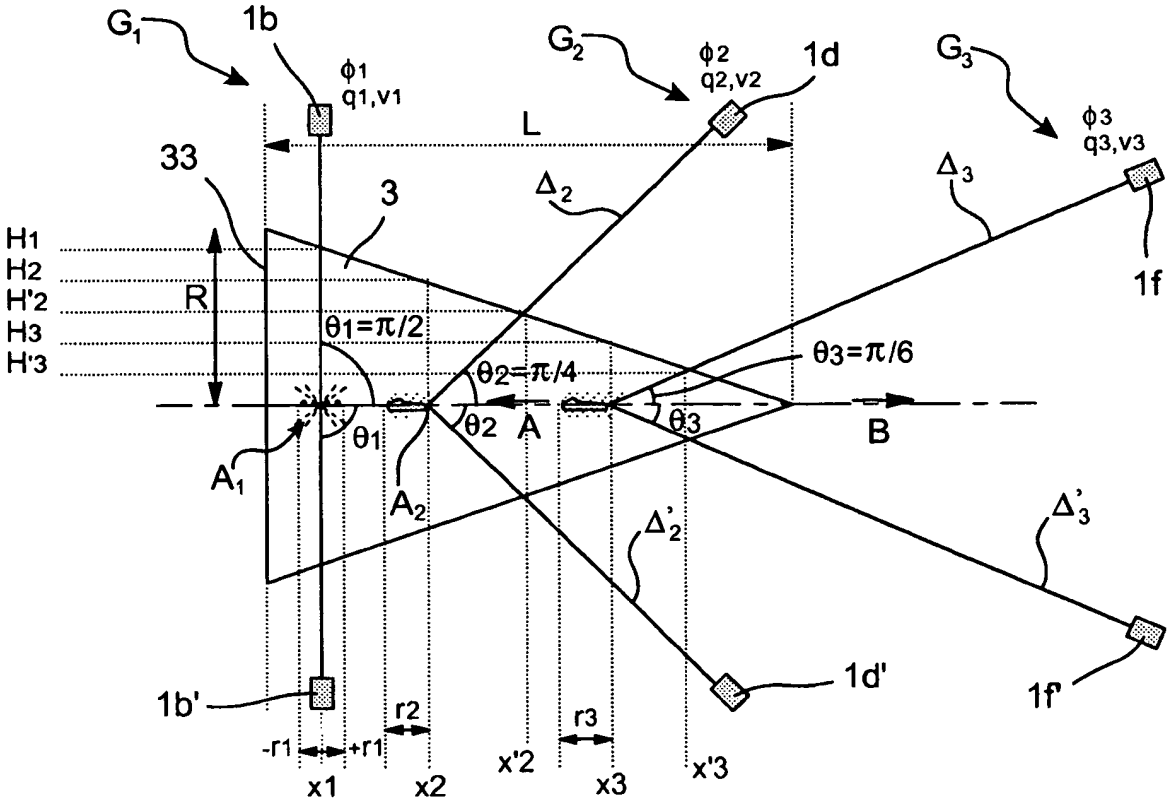

G1
1b
ϕ1
q1,v1
G2
ϕ2
q2,v2
1d
G3
ϕ3
q3,v3
L
33
3
Δ2
Δ3
H1
H2
H'2
H3
H'3
R
θ1=π/2
θ2=π/4
θ3=π/6
θ1
θ2
θ3
A
B
A1
A2
1f
Δ'2
Δ'3
1d'
1f'
1b'
r2
r3
-r1
+r1
x1
x2
x'2
x3
x'3

FIG. 17

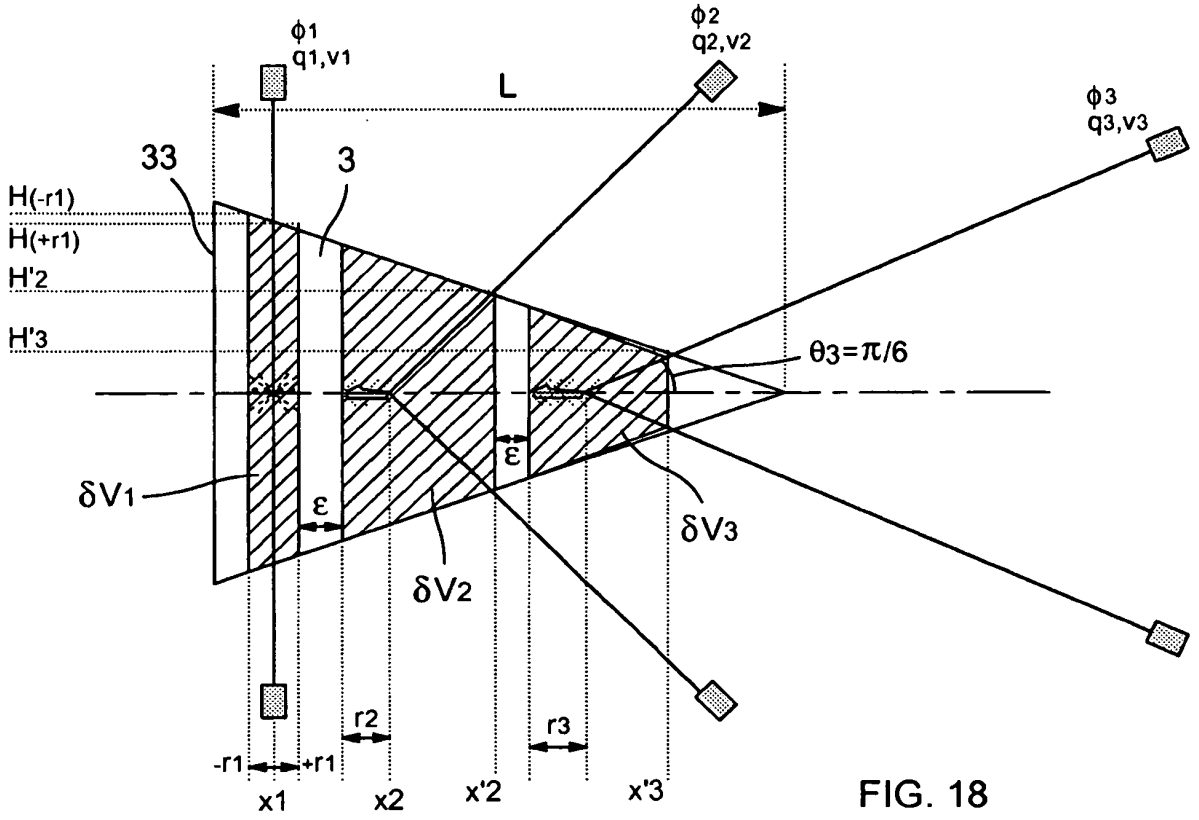

ϕ1
q1,v1
ϕ2
q2,v2
ϕ3
q3,v3
L
33
3
H(-r1)
H(+r1)
H'2
H'3
θ3=π/6
δV1
ε
ε
δV2
δV3
r2
r3
-r1
+r1
x1
x2
x'2
x'3

FIG. 18

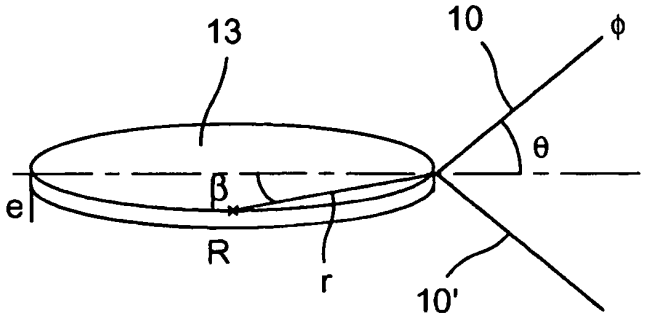

13
10
ϕ
θ
β
e
R
r
10'

FIG. 19

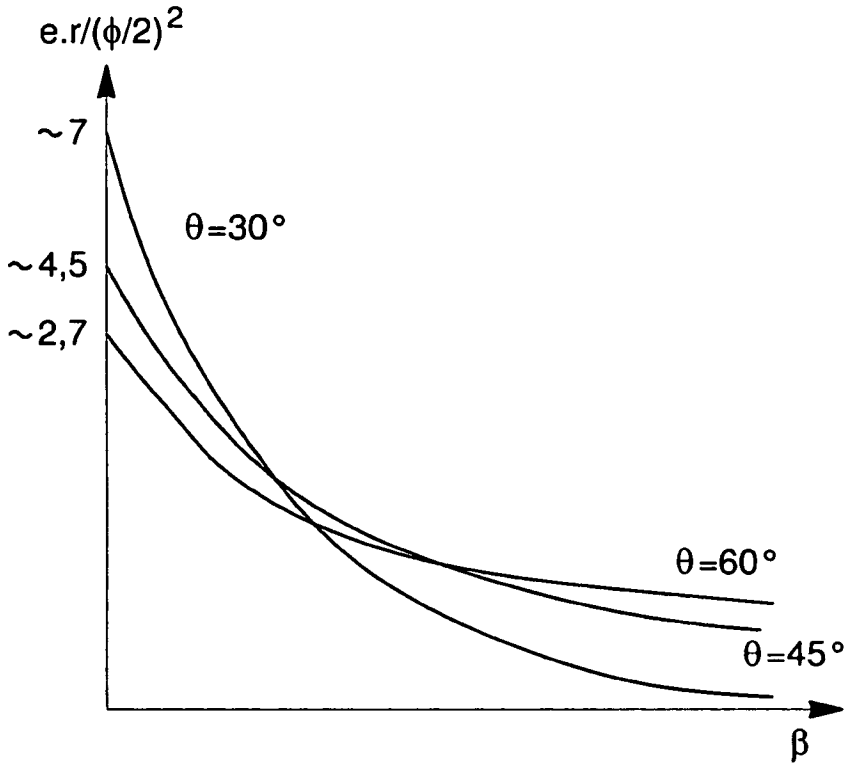

e.r/(ϕ/2)2
~7
~4,5
~2,7
θ=30°
θ=60°
θ=45°
β

FIG. 20

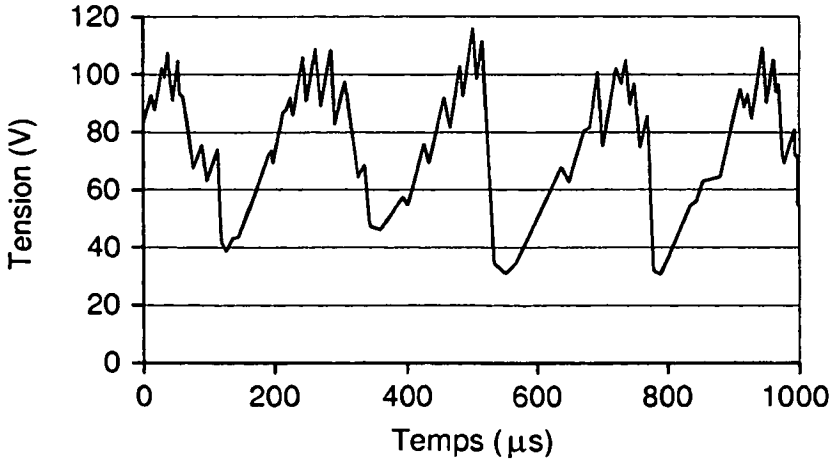

120
100
80
60
40
20
0
Tension (V)
0
200
400
600
800
1000
Temps (µs)

FIG. 21

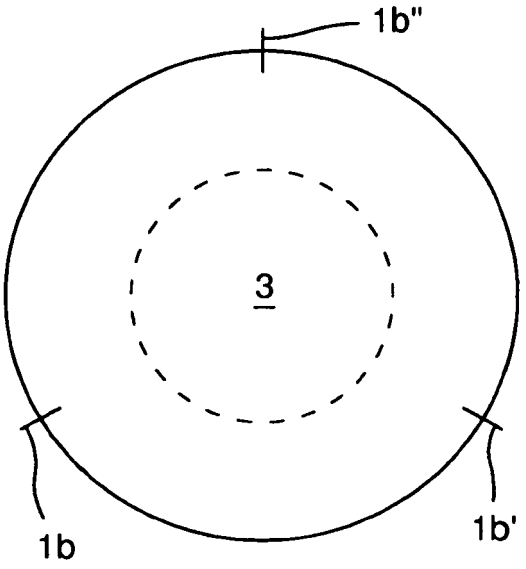


FIG. 22

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

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

Documents brevets cités dans la description

- FR 2565992 **[0011]**
- FR 1509436 **[0012]**
- US 5906757 A **[0012]**
- CA 2205578 **[0013]**
- FR 2614751 **[0020]**
- WO 2007065252 A1 **[0020]**