

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

11 N° de publication :

2 962 622

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

21 N° d'enregistrement national :

10 55539

51 Int Cl⁸ : H 05 H 13/08 (2006.01), E 04 H 3/08, A 61 N 5/10

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 07.07.10.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 13.01.12 Bulletin 12/02.

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

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

71 Demandeur(s) : CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) — FR.

72 Inventeur(s) : MEOT FRANCOIS et MORI YOSHI-
HARU.

73 Titulaire(s) : CENTRE NATIONAL DE LA RECHER-
CHE SCIENTIFIQUE (CNRS).

74 Mandataire(s) : CABINET REGIMBEAU.

54 ACCELERATEUR DE PARTICULES.

57 L'invention concerne un accélérateur de particules
comprenant:

un anneau d'accélération,

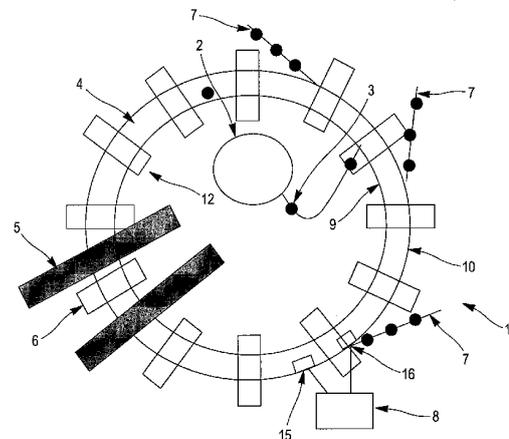
un injecteur de paquets de particules, pour injecter suc-
cessivement des paquets de particules avec une énergie
d'injection dans l'anneau,

une cavité accélératrice, apte à conférer à chaque pa-
quet injecté une accélération dans l'anneau pour accroître
son énergie jusqu'à une énergie d'extraction, ladite accé-
lération étant répétée d'un paquet injecté à l'autre à une fré-
quence de répétition supérieure à 10 Hz,

un électroaimant pour l'application d'un champ magnéti-
que aux paquets, dont l'amplitude est à variation radiale
dans l'anneau et est temporellement constante durant l'ac-
célération,

ledit accélérateur étant caractérisé en ce qu'il comprend
en outre un nombre N, supérieur ou égal à 2, de lignes d'ex-
traction des paquets,

un contrôleur de distribution, pour distribuer successive-
ment à chacune des lignes les paquets à l'énergie d'extrac-
tion, avec la fréquence de répétition divisée par le nombre
N de lignes.



FR 2 962 622 - A1



DOMAINE TECHNIQUE GENERAL

L'invention concerne un accélérateur de particules.

ETAT DE L'ART

5 Les accélérateurs de particules sont des dispositifs électromagnétiques destinés à l'accélération à haute énergie de particules élémentaires, comme par exemple des protons ou des ions.

Les accélérateurs de particules produisent des faisceaux de particules dont la puissance dépend de l'énergie des particules et de la
10 quantité de particules extraites de l'accélérateur par unité de temps, liée à la fréquence de répétition des accélérateurs, c'est-à-dire à leur capacité à répéter fréquemment le cycle d'accélération des particules jusqu'à la haute énergie requise.

Ces accélérateurs peuvent être notamment linéaires ou circulaires.

15 Le besoin s'est fait ressentir depuis plusieurs années de disposer d'un accélérateur circulaire de particules apte à produire des faisceaux de particules multiples et distincts, et ce à courant moyen élevé, égal au nombre moyen de particules émises par unité de temps.

Dans le domaine des accélérateurs circulaires de particules, on
20 connaît entre autres les synchrotrons pulsés et les cyclotrons.

Dans un synchrotron pulsé, les particules sont injectées à basse énergie dans un anneau, et accélérées pour parvenir à l'énergie désirée, via un champ accélérateur, qui est un champ électrique.

Un champ magnétique est appliqué sur les particules, ledit champ
25 étant pulsé au rythme de l'accélération des particules, afin de confiner les particules sur une trajectoire quasi-circulaire.

Une ligne d'extraction généralement unique permet d'extraire les particules ayant atteint la haute énergie requise pour l'application considérée.

30 La solution technologique utilisée dans les synchrotrons requiert l'accroissement du champ magnétique appliqué aux particules.

Ainsi, pour pouvoir disposer d'un faisceau de particules à haute énergie et émis avec une fréquence de répétition élevé, il est nécessaire d'accroître rapidement ce champ magnétique.

Néanmoins, le rythme de montée en champ est limité par l'existence
5 de courants de Foucault dans les aimants de l'anneau, typiquement à 4 Tesla/seconde.

Par conséquent, la fréquence de répétition est limitée, et est de l'ordre de quelques Hz.

Ainsi, pour pouvoir obtenir un courant moyen acceptable, les
10 synchrotrons sont le plus souvent limités à une seule ligne d'extraction.

De plus, les synchrotrons étant en soi peu compacts, ceci n'incite pas à installer plusieurs lignes d'extraction, ce qui aurait tendance à alourdir encore ces machines et poserait de nouvelles difficultés technologiques.

Un autre type d'accélérateur connu est le cyclotron, dans lequel les
15 particules sont injectées continûment au centre du dispositif.

Les particules se voient appliquer un champ accélérateur alternatif, et un champ magnétique orthogonal, ce qui confère aux particules une trajectoire en forme de spirale vers l'extérieur du cyclotron, où elles sont extraites à travers une ligne d'extraction.

20 Dans les cyclotrons, il est quasiment impossible d'obtenir l'émission de plusieurs faisceaux de particules.

En effet, chaque extraction entraîne une perte d'environ un tiers des particules et réduit donc le courant moyen en sortie de l'accélérateur.

Les cyclotrons sont donc le plus souvent limités à une seule ligne
25 d'extraction.

Il est donc nécessaire de proposer un dispositif d'accélération de particules configuré pour répondre aux besoins exprimés.

PRESENTATION DE L'INVENTION

30 L'invention propose de pallier ces inconvénients.

A cet effet, l'invention propose un accélérateur de particules comprenant :
un anneau d'accélération,

- un injecteur de paquets de particules, apte à injecter successivement des paquets de particules avec une énergie d'injection dans l'anneau,
 au moins une cavité accélératrice, apte à conférer à chaque paquet injecté une accélération dans l'anneau pour accroître son énergie jusqu'à
 5 une énergie d'extraction, ladite accélération étant répétée d'un paquet injecté à l'autre à une fréquence de répétition supérieure à 10 Hz,
 au moins un électroaimant pour l'application d'un champ magnétique aux paquets, dont l'amplitude est à variation radiale dans l'anneau et est temporellement constante durant l'accélération,
 10 ledit accélérateur étant caractérisé en ce qu'il comprend en outre un nombre N, supérieur ou égal à 2, de lignes d'extraction des paquets,
 un contrôleur de distribution, configuré pour distribuer successivement à chacune des lignes les paquets à l'énergie d'extraction,
 15 avec une fréquence égale à la fréquence de répétition divisée par le nombre N de lignes.

Selon une variante les N lignes d'extraction sont disposées régulièrement sur un pourtour de l'anneau selon une symétrie d'angle $2\pi/N$.

20

Selon une autre variante le contrôleur de distribution comprend au moins un aimant d'extraction apte à appliquer un champ magnétique d'extraction des paquets vers les lignes.

25 Selon une autre variante l'aimant d'extraction est positionné dans l'anneau à une position radiale correspondant à une énergie ou gamme d'énergie d'extraction des paquets désirée.

Selon une autre variante l'aimant d'extraction a une épaisseur radiale
 30 correspondant à une énergie ou gamme d'énergie d'extraction des paquets désirée.

Selon une autre variante le contrôleur comprend pour chaque ligne d'extraction

au moins un premier aimant d'extraction, et

5 au moins un deuxième aimant d'extraction positionné à proximité d'une entrée de la ligne.

Selon une autre variante l'accélérateur comprend pour chaque ligne d'extraction au moins un aimant d'extraction, dont la position radiale et/ou l'épaisseur radiale est différente d'une ligne d'extraction à l'autre, pour la
10 sélection d'énergies ou gammes d'énergie d'extraction de paquets différentes d'une ligne d'extraction à l'autre.

Selon une autre variante l'injecteur est apte à injecter les paquets dans l'anneau à une énergie d'injection variable selon le paquet injecté.

15

Selon une autre variante l'injecteur est apte à injecter les paquets dans l'anneau à un rayon d'injection variable selon le paquet injecté.

L'invention concerne également un bâtiment de traitement, cylindrique à
20 base circulaire, comprenant

Un accélérateur tel que défini précédemment et

N salles de traitement reliées aux N lignes d'extraction.

Selon une autre variante les N salles de traitement sont disposées selon
25 une symétrie d'angle $2\pi/N$.

L'invention présente de nombreux avantages.

Un avantage de l'invention est d'offrir un accélérateur capable de
30 fournir une multiplicité de faisceaux de particules avec un courant moyen élevé.

Un autre avantage de l'invention est de permettre l'émission d'une multiplicité de faisceaux de particules de manière quasi-simultanée.

Un autre avantage encore de l'invention est d'offrir une grande stabilité de fonctionnement.

Enfin, un autre avantage de l'invention est de fournir une multiplicité de faisceaux de particules dans des gammes d'énergie différentes et réglables.

5

PRESENTATION DES FIGURES

D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit, qui est purement illustrative et non limitative, et qui doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :

10 - la figure 1, est une représentation schématique du principe d'un accélérateur de particules selon l'invention ;

- la figure 2, est une représentation d'un mode de réalisation d'une cavité accélératrice pouvant être utilisé dans un accélérateur de particules selon l'invention ;

15 - la figure 3 est une vue schématique de dessus d'un bâtiment de traitement utilisant l'accélérateur selon l'invention ;

- la figure 4 est une vue en coupe du bâtiment de la figure 3.

DESCRIPTION DETAILLEE

20 On a schématisé en Figure 1 un accélérateur 1 de particules sur lequel repose l'invention.

L'accélérateur 1 est un accélérateur à champ fixe et gradients alternés, également connu sous l'acronyme anglo-saxon « FFAG » (*Fixed Field Alternating Gradient*).

25 L'accélérateur 1 comprend un injecteur 2 de paquets 3 de particules, apte à injecter successivement des paquets 3 de particules dans un anneau 4 d'accélération de l'accélérateur 1.

On entend par paquets 3 de particules une pluralité de particules regroupées. Il s'agit le plus souvent de milliards de particules regroupées
30 entre elles, mais sur une distance inférieure à la circonférence de l'anneau 4.

Les particules en question peuvent être de natures très diverses selon les applications envisagées : protons, hadrons, ions...

L'injecteur 2 est par exemple un cyclotron ou tout autre dispositif d'injection similaire.

L'injecteur 2 injecte chaque paquet 3 de particules dans l'anneau 4 de l'accélérateur avec une énergie d'injection E_{in} .

5 Un ordre de grandeur de cette énergie d'injection est de 10MeV, mais cette valeur dépend des applications et des particules envisagées.

On désigne par anneau dans le cadre de la présente description une forme généralement annulaire.

L'insertion de chaque paquet 3 de particules s'opère au niveau du
10 pourtour intérieur 9 de l'anneau 4. Une fois injectés, les paquets 3 sont entraînés dans l'anneau 4.

Des cavités 5 accélératrices sont prévues le long de l'anneau 4. Ces cavités 5 appliquent un champ accélérateur aux paquets 3, afin de les accélérer et ainsi accroître leur énergie. Il s'agit typiquement d'un champ
15 électrique radiofréquence. Un mode de réalisation d'une cavité accélératrice est représenté en Figure 2.

On connaît notamment de l'état de la technique les cavités accélératrices dites « VITROVAC », qui est un matériau magnétique amorphe utilisé dans ces cavités accélératrices.

20 Les paquets 3 suivent dans l'anneau 4 une trajectoire en forme de spirale, qui tend à les éloigner du pourtour intérieur 9 de l'anneau 4 et à les rapprocher du pourtour extérieur 10.

L'accélérateur 1 comprend en outre au moins un électroaimant 6 apte à appliquer un champ magnétique aux paquets 3 dans l'anneau 4.

25 L'invention concerne les deux grandes classes de FFAG, qui sont les FFAG à focalisation « variante » ou « invariante ».

Dans les FFAG à focalisation « invariante », le paquet 3 de particules accélérées subit une focalisation invariante, c'est-à-dire que les fonctions optiques et le nombre d'onde des paquets sont inchangés au cours de
30 l'accélération, et que le chromatisme est nul.

A cet effet, les électroaimants 6 sont configurés pour appliquer un champ magnétique non-linéaire, de la forme $B \propto B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k$, où r est la position radiale dans l'anneau, prise à partir du centre de l'anneau, et r_0 , k des constantes. De plus, le champ B_0 est temporellement constant durant 5 l'accélération des paquets de particules. Il peut cependant varier d'un cycle d'accélération à l'autre.

Dans les FFAG à focalisation « variante », le paquet 3 de particules accélérées subit une focalisation variante, c'est-à-dire que les fonctions optiques et le nombre d'onde des paquets 3 varient avec l'énergie des 10 paquets 3 de particule au cours de l'accélération, et que le chromatisme est non-nul.

Dans ce cas, les électroaimants 6 sont configurés pour appliquer un champ magnétique linéaire, de la forme $B \propto B_0 \cdot r$, où r est la position radiale dans l'anneau. De plus, le champ B_0 est temporellement constant durant 15 l'accélération des paquets particules. Il peut cependant varier d'un cycle d'accélération à l'autre.

Dans les deux classes de FFAG précitées concernées par l'invention, l'amplitude B du champ magnétique appliqué par les électroaimants 6 est à variation radiale (r) dans l'anneau 4 et est 20 temporellement constante durant l'accélération.

Un avantage important de l'application d'un champ magnétique d'amplitude constante durant l'accélération des particules est d'obtenir une grande stabilité de fonctionnement, qu'il s'agisse du champ magnétique, de l'alimentation électrique des électroaimants, ou des conditions d'injection et 25 d'extraction de particules. Ceci contraste avec les synchrotrons pulsés nécessitant une montée en champ magnétique, ce qui impose des limitations sur la fréquence de répétition.

Des plus, les cavités accélératrices sont plus simples à mettre en œuvre que celles utilisées dans les synchrotrons pulsés, puisqu'elles ne 30 nécessitent pas de système de rebouclage (« feedback »), étant donné que l'accélérateur ne nécessite pas une montée en champ des aimants.

Les électroaimants 6 ont pour fonction à la fois de guider les paquets 3 dans l'anneau 4, et d'assurer un confinement de la trajectoire en spirale des paquets 3 à l'intérieur de l'anneau 4, et ainsi d'éviter une divergence et une perte des paquets 3.

5 L'accélérateur 1 comprend en outre un nombre N , supérieur ou égal à 2, de lignes 7 d'extraction des paquets 3. En Figure 1, trois lignes 7 sont représentées.

Ces lignes 7 sont en général disposées à proximité du pourtour extérieur 10 de l'anneau 4.

10 Ces N lignes peuvent être disposées de manière régulière autour de l'anneau 4, et avantageusement avec une symétrie d'angle $2\pi/N$.

Le champ accélérateur appliqué par les cavités 5 accélératrices entraîne un accroissement de l'énergie des paquets 3. Au fur et à mesure de l'accroissement en énergie des paquets 3, ceux-ci s'éloignent vers le
15 pourtour extérieur 10 de l'anneau 4.

Les accélérateurs de type FFAG sont caractérisés en ce qu'ils autorisent une fréquence de répétition élevée, c'est-à-dire qu'ils permettent d'accélérer les paquets 3 rapidement de sorte à accroître leur énergie de l'énergie d'injection E_{in} jusqu'à l'énergie d'extraction E_{out} à laquelle les
20 paquets 3 sont extraits de l'accélérateur.

L'accélération de l'énergie d'injection E_{in} jusqu'à l'énergie d'extraction E_{out} requise est ainsi répétée d'un paquet 3 injecté à l'autre à une fréquence de répétition f_{rep} au minimum supérieure à 10 Hz.

Le plus souvent, cette fréquence de répétition peut être de plusieurs
25 centaines de Hz.

Ceci est rendu possible car l'accélération des paquets et leur accroissement en énergie ne sont pas limités par le rythme de montée en champ des aimants, comme dans les synchrotrons pulsés. La fréquence de répétition n'est limitée que par la quantité de radiofréquence des cavités 5
30 accélératrices.

L'accélération et donc l'accroissement en énergie sont très rapides. L'énergie d'extraction peut par exemple valoir 100 MeV, et est en général

comprise entre 30 et 250 MeV. Cette énergie d'extraction dépend de l'application et des particules.

L'accélérateur 1 comprend en outre un contrôleur 8 de distribution, configuré pour distribuer successivement à chacune des lignes 7 les
5 paquets 3, avec une fréquence égale à la fréquence de répétition f_{rep} divisée par le nombre N de lignes, lorsque lesdits paquets 3 ont atteint l'énergie d'extraction E_{out} . Ce contrôleur est très schématiquement représenté en Figure 1.

Le contrôleur 8 a donc pour fonction de distribuer successivement les
10 paquets 3 accélérés aux différentes lignes 7, lorsque ceux-ci ont atteint l'énergie d'extraction E_{out} requise.

Ainsi, chaque ligne 7 d'extraction reçoit un paquet 3 avec une fréquence égale à la fréquence de répétition divisée par le nombre N de lignes 7, soit f_{rep}/N (ce qui correspond à une période de $1/(f_{rep}/N)$).

Ceci est très avantageux, puisque la fréquence f_{rep}/N est élevée, étant donné que l'accélérateur 1 est apte, de par sa structure, à accélérer très rapidement les paquets de l'énergie d'injection E_{in} à l'énergie d'extraction E_{out} , c'est-à-dire à réaliser une fréquence de répétition f_{rep} élevée (l'accélérateur répète donc les cycles d'accélération avec une
20 fréquence de répétition élevée).

Comme énoncé précédemment, la fréquence de répétition f_{rep} est supérieure à 10 Hz, et est de l'ordre de plusieurs centaines de Hz dans beaucoup d'applications.

Par conséquent, au niveau de la sortie de chacune des lignes 7
25 d'extraction, on dispose d'un faisceau de particules à courant moyen élevé, puisque les paquets 3 de particules à haute énergie sont extraits de l'anneau 4 à travers chaque ligne 7 à une fréquence élevée.

La fréquence d'émission des faisceaux de particule en sortie des lignes 7 est par exemple comprise entre 10 et 200 Hz, soit un courant
30 moyen de plusieurs dizaines de nano-ampères.

Ainsi, l'invention offre une multiplicité de faisceaux à fort courant moyen pouvant être utilisés indépendamment en sortie de chacune des lignes 7 d'extraction.

Etant donné que la fréquence du faisceau de particules émis en sortie de chaque ligne 7 d'extraction est élevée, il s'avère que du point de vue d'un utilisateur, celui-ci dispose en fait d'un faisceau continu.

On dispose donc d'une multiplicité de faisceaux de particules émis
5 quasi-simultanément et à haute fréquence, ce qui est très avantageux par rapport aux techniques de l'art antérieur, et offre de nombreuses applications.

L'invention exploite donc la fréquence de répétition élevée des accélérateurs de type FFAG.

10 Afin d'extraire les paquets 3 de l'accélérateur, le contrôleur 8 de distribution comprend en général au moins un aimant d'extraction 15. Ce type d'aimant est appelé « kicker » par l'homme du métier et est très schématiquement représenté en Figure 1.

L'aimant 15 d'extraction est contrôlé pour appliquer un champ
15 magnétique d'extraction permettant de dévier le paquet 3 de sa trajectoire vers la ligne 7 d'extraction.

En général, chaque ligne 7 d'extraction est associée à au moins un aimant d'extraction.

Dans certains modes de réalisation, un deuxième aimant 16
20 d'extraction est positionné à proximité d'une entrée de la ligne d'extraction 7. Ce deuxième aimant est connu de l'homme du métier sous l'appellation de « septum » et est très schématiquement représenté en Figure 1. Il permet également de contrôler la trajectoire des paquets 3 pour les diriger dans la ligne 7 d'extraction. Le septum est éventuellement pulsé.

25 Avantageusement, on associe à chaque ligne 7 d'extraction un premier (« kicker ») et un deuxième aimants 15, 16 d'extraction (« septum »).

Au fur et à mesure de l'accroissement en énergie du paquet, le paquet 3 s'éloigne vers le pourtour extérieur 10. Il existe donc une
30 correspondance entre la position radiale (r) de la trajectoire du paquet 3 dans l'anneau 4 et son énergie.

Lorsque le paquet 3 est en mouvement à proximité du pourtour extérieur 10, celui-ci a atteint l'énergie maximum pouvant être obtenue avec

l'accélérateur 1 dans sa configuration, qui dépend notamment du champ accélérateur, du champ magnétique, et de l'énergie d'injection.

Dans un mode de réalisation, on souhaite extraire les paquets de particules avec une énergie d'extraction E_{out} égale à l'énergie maximum de l'accélérateur 1, c'est-à-dire à une position radiale de trajectoire maximum.

L'aimant d'extraction 15 est alors avantageusement situé à proximité du pourtour extérieur 10 de l'anneau 4. L'aimant d'extraction 15 applique un champ magnétique d'extraction aux paquets 3 pour les dévier vers les lignes 7 d'extraction.

Un réglage fin de l'énergie d'extraction E_{out} peut être obtenu en synchronisant l'application du champ magnétique d'extraction par l'aimant d'extraction 15 avec l'instant où le paquet 3 de particules se situe sur la trajectoire dont la position radiale correspond à l'énergie d'extraction désirée.

Si l'on souhaite modifier l'énergie maximum pouvant être obtenue avec l'accélérateur 1, il est nécessaire de modifier le champ accélérateur appliqué par les cavités 5, mais également le champ magnétique appliqué par les électroaimants 6, sans quoi les paquets 3 de particules vont diverger et ne sortiront plus au niveau du rayon maximum (pourtour extérieur 10) de l'accélérateur.

Dans un autre mode de réalisation, on souhaite pouvoir extraire le paquet 3 non pas à l'énergie maximum, correspondant à une trajectoire dont la position radiale est située à proximité du pourtour extérieur 10, mais à une énergie ou gamme d'énergie inférieure correspondant donc à une trajectoire de position radiale intermédiaire dans l'anneau 4.

Dans ce cas, l'extraction peut être réalisée en utilisant au moins un aimant 15 d'extraction (« kicker ») dont le champ magnétique est contrôlé pour dévier les paquets 3, ledit aimant étant localisé au niveau de la position radiale correspondant à l'énergie ou gamme d'énergie d'extraction E_{out} requise. Ainsi, on positionne le « kicker » à proximité du tour *ad hoc* du paquet spiralant vers le pourtour extérieur.

Alternativement, il est possible d'utiliser un aimant d'extraction 15 ayant une épaisseur radiale correspondant à une énergie ou gamme

d'énergie d'extraction E_{out} des paquets 3 désirée. Cet aimant, de par son épaisseur radiale (« empâtement radial »), permet de dévier uniquement les paquets d'énergie désirée vers les lignes 7, ou dont l'énergie est située dans la gamme d'énergie requise.

5 L'invention permet de disposer d'une multiplicité de faisceaux d'énergies ou de gammes d'énergie variables et ajustables selon les lignes 7.

A cet effet, chaque ligne d'extraction 7 comprend au moins un aimant 15,16 d'extraction, dont la position radiale et/ou l'épaisseur radiale est
10 différente d'une ligne 7 d'extraction à l'autre. Ceci autorise la sélection d'énergies ou gammes d'énergie d'extraction E_{out} de paquets 3 différentes d'une ligne 7 d'extraction à l'autre.

Alternativement, pour obtenir des faisceaux d'énergie variable, on peut faire varier l'énergie d'injection E_{in} pour chaque paquet 3 inséré par
15 l'injecteur 2.

Puisque les paquets 3 sont injectés à une énergie différente (par exemple inférieure), ceux-ci vont suivre une trajectoire différente dans l'anneau 4 si le champ magnétique appliqué par les électroaimants 6 n'est pas modifié en conséquence.

20 Par conséquent, il est nécessaire de faire varier l'amplitude du champ magnétique appliqué par les électroaimants 6, c'est-à-dire du champ B_0 . Le changement de champ magnétique appliqué les électroaimants 6 requiert une durée qui est de l'ordre de 100ms, ce qui est compatible avec un courant moyen des faisceaux en sortie de l'accélérateur 1 de plusieurs
25 dizaines de nano-ampères par ligne, et est compatible avec un taux d'irradiation supérieur à 5 Gy./mn dans des applications de type protonthérapie.

On peut également envisager de faire varier le rayon d'injection des paquets 3 dans l'anneau 4, par exemple en utilisant un injecteur linéaire de
30 type LINAC (« linear accelerator ») et un « stripping foil » dans l'accélérateur 1.

Une autre solution pour accéder à des faisceaux d'énergie variable consiste à utiliser un dégradeur de faisceau en sortie d'une ou plusieurs

des lignes 7 d'extraction, bien connu de l'homme du métier, permettant de modifier l'énergie des faisceaux en sortie des lignes 7 d'extraction.

Toutefois, il n'est pas nécessaire d'utiliser les dégradeurs de faisceaux encombrants et coûteux de l'art antérieur, comme ceux utilisés
5 dans l'état de l'art pour les cyclotrons.

En effet, les dégradeurs utilisés pour les cyclotrons sont le plus souvent intégrés dans de lourdes installations appelés ESS (« Energy Selection System »).

Ceci est avantageux en termes d'environnement neutronique, de
10 mesures de protection contre les rayonnements, de volume de béton, de volume de blindage, et de coût de l'accélérateur.

L'invention connaît de nombreuses applications, aussi bien dans les domaines de l'irradiation industrielle, que les outils de recherche.

Elle peut par exemple s'appliquer à la caractérisation de matériaux,
15 ou au revêtement de matériaux par dépôt de couches.

Une application non limitative de l'accélérateur selon l'invention est la radiothérapie, et notamment l'hadronthérapie, qui est une méthode de thérapie du cancer utilisant des paquets 3 de hadrons.

Le fait d'installer une salle de traitement de patients en sortie de
20 chacune des N lignes 7 d'extraction de l'accélérateur 1 selon l'invention permet d'alimenter les N salles de traitement de manière quasi-continue (à une fréquence typiquement de l'ordre de 100-200Hz) par un faisceau de hadrons à fort courant moyen.

En terme d'irradiation, la dose est supérieure à 1 Gy.l/mn par ligne,
25 et même supérieure à 5-10 Gy.l/mn en protonthérapie.

Il est à noter que du point de vue de l'opérateur dans la salle de traitement, tout se passe comme si le faisceau était émis de manière continue.

Ainsi, il est possible de traiter simultanément N patients, ce qui
30 permet de réduire les délais d'attente et donc les coûts de traitement.

Contrairement aux solutions de l'art antérieur, il n'est plus nécessaire d'attendre la fin du traitement opéré dans les salles voisines. Au contraire, l'invention rend possible le traitement simultané de plusieurs patients. On

multiplie ainsi le nombre de patients traités dans un laps de temps donné. On peut en outre augmenter la durée de traitement des patients, sans avoir à bloquer les autres salles de traitement.

Il est de plus envisageable de consacrer de manière permanente une
5 salle à la qualification du faisceau, tandis que les autres salles sont toujours disponibles pour traiter des patients. Dans l'art antérieur, la qualification du faisceau rendait indisponible les autres salles de traitement.

De plus, étant donné que l'invention donne accès à des faisceaux
d'énergie variable, chaque salle de traitement peut disposer d'un faisceau à
10 une énergie ou gamme d'énergie différente. Ceci est très avantageux pour les opérateurs des salles de traitement et rend l'invention très flexible. Chaque opérateur peut traiter des tumeurs localisées à des profondeurs différentes, c'est-à-dire avec une profondeur de pic de Bragg différente.

Le coût général d'un traitement basé sur l'accélérateur selon
15 l'invention est réduit par rapport à l'art antérieur, pour de multiples raisons. La solution technologique proposée est notamment moins complexe que les synchrotrons pulsés, qui nécessitent des aimants pulsés lourds à mettre en œuvre. Par ailleurs, les cyclotrons imposent de nombreuses difficultés techniques, comme par exemple la protection contre le rayonnement par
20 d'épaisses couches de bétons.

De manière générale, l'invention permet de révolutionner l'architecture des bâtiments de traitement, et notamment des hôpitaux spécialisés dans le traitement des patients par hadronthérapie, carbothérapie ou autre.

25 Les centres de traitement (centres d'hadronthérapie, protonthérapie...) de l'art antérieur utilisent des synchrotrons ou des cyclotrons basés sur une unique ligne d'extraction des paquets de particules, alimentant des salles de traitement contigües. Au vu des limitations technologiques des accélérateurs de l'art antérieur, ces salles de
30 traitement ne sont pas alimentées simultanément, mais les unes après les autres.

La géométrie du bâtiment de traitement, généralement rectangulaire, en découle, ainsi que l'agencement des salles de traitement, disposées de

manière contigüe, et des salles de préparation des patients, en vis-à-vis des salles de traitement.

Comme illustré en Figures 3 et 4, l'invention propose un bâtiment 20 cylindrique à base circulaire, comprenant l'accélérateur 1 avec ses N lignes 5 7 d'extraction de paquets 3, et N salles de traitement 21 disposées en sortie des N lignes 7 d'extraction. En général, des lignes de transport relient les N lignes 7 d'extraction aux N salles de traitement.

Certaines des salles de traitement peuvent être des salles de recherche, par exemple des salles consacrées à la recherche et 10 développement en radiobiologie.

Le bâtiment de traitement comprend en outre des salles de préparation des patients, des salles de consultation et autres salles généralement présentes dans ce type de bâtiment.

Avantageusement, les N lignes 7 d'extraction de l'accélérateur 1 sont 15 disposées régulièrement sur le pourtour 10 de l'anneau 4, selon une symétrie cylindrique, par exemple selon une symétrie d'angle $2\pi/N$.

De même, les N salles de traitement sont disposées dans le bâtiment 20 de manière régulière, selon une symétrie cylindrique, par exemple selon une symétrie d'angle $2\pi/N$. En général, les N salles de traitement sont 20 disposées à la périphérie du bâtiment. Le bâtiment et ses salles de traitement sont donc adaptés à la symétrie des lignes 7 d'extraction de l'accélérateur 1.

Grâce à cette configuration, l'accès à chacune des N salles de traitement est notamment possible à partir du centre du bâtiment.

25 Dans un mode de réalisation avantageux, et comme illustré en Figure 4, le bâtiment comprend au moins deux étages. Un premier étage (par exemple le sous-sol du bâtiment) comprend l'accélérateur 1, tandis qu'un deuxième étage, situé au-dessus du premier étage, comprend les N salles de traitement 21.

30 Avantageusement, l'accélérateur 1 est disposé au centre du bâtiment 20.

Le bâtiment 20 présente de nombreux avantages par rapport aux bâtiments de l'état de la technique.

Le parcours déambulatoire des patients est réduit de manière substantielle, puisque toutes les salles de traitement sont accessibles à partir du centre du bâtiment. Il s'ensuit une réduction du personnel nécessaire à l'accueil et à la gestion des patients et une réduction des coûts
5 associés.

De plus, le flux de patients est augmenté, étant donné que l'accélérateur permet d'alimenter les N salles de traitement de manière quasi-simultanée.

Avec la configuration du bâtiment décrite précédemment,
10 l'accélérateur et son environnement radiatif sont à l'écart des zones de circulation des personnes, ce qui permet d'optimiser la protection des personnes contre le rayonnement. Les contraintes de sûreté et de protection contre les rayonnements sont donc minimisées.

L'agencement particulier du bâtiment permet en outre nombre
15 d'optimisations architecturales : la minimisation des volumes de béton entrant dans la protection contre les rayonnements ionisants, la minimisation des parcours de câbles et autres distributions de fluides constitutifs de l'accélération de l'accélérateur, l'ajout d'entrées de lumière naturelle dans le bâtiment et dans les zones médicales en particulier
20 (ouvertures sur l'extérieur par la périphérie et au centre par un puits de lumière) etc.

Les applications de l'accélérateur selon l'invention sont très nombreuses. Les exemples cités dans la présente description ne sauraient être considérés comme limitatifs.

REVENDEICATIONS

1. Accélérateur (1) de particules comprenant :
- un anneau (4) d'accélération,
 - 5 un injecteur (2) de paquets (3) de particules, apte à injecter successivement des paquets (3) de particules avec une énergie d'injection (E_{in}) dans l'anneau (4),
 - au moins une cavité (5) accélératrice, apte à conférer à chaque paquet (3) injecté une accélération dans l'anneau (4) pour accroître son
 - 10 énergie jusqu'à une énergie d'extraction (E_{out}), ladite accélération étant répétée d'un paquet (3) injecté à l'autre à une fréquence de répétition (f_{rep}) supérieure à 10 Hz,
 - au moins un électroaimant (6) pour l'application d'un champ magnétique aux paquets (3), dont l'amplitude (B) est à variation radiale (r)
 - 15 dans l'anneau (4) et est temporellement constante durant l'accélération,
 - ledit accélérateur (1) étant **caractérisé en ce qu'il** comprend en outre
 - un nombre N, supérieur ou égal à 2, de lignes (7) d'extraction des paquets (3),
 - 20 un contrôleur (8) de distribution, configuré pour distribuer successivement à chacune des lignes (7) les paquets (3) à l'énergie d'extraction (E_{out}), avec une fréquence égale à la fréquence de répétition (f_{rep}) divisée par le nombre N de lignes (7).
- 25 2. Accélérateur selon la revendication 1, dans lequel les N lignes (7) d'extraction sont disposées régulièrement sur un pourtour (10) de l'anneau (4) selon une symétrie d'angle $2\pi/N$.
- 30 3. Accélérateur selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel le contrôleur (8) de distribution comprend au moins un aimant (15) d'extraction apte à appliquer un champ magnétique d'extraction des paquets (3) vers les lignes (7).

4. Accélérateur selon la revendication 3, dans lequel l'aimant (15) d'extraction est positionné dans l'anneau (4) à une position radiale correspondant à une énergie ou gamme d'énergie d'extraction (E_{out}) des paquets (3) désirée.
- 5
5. Accélérateur selon l'une des revendications 3 ou 4, dans lequel l'aimant d'extraction (15) a une épaisseur radiale correspondant à une énergie ou gamme d'énergie d'extraction (E_{out}) des paquets (3) désirée.
- 10
6. Accélérateur selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel le contrôleur (8) comprend pour chaque ligne (7) d'extraction
au moins un premier aimant (15) d'extraction, et
au moins un deuxième aimant (16) d'extraction positionné à proximité d'une entrée de la ligne (7).
- 15
7. Accélérateur selon l'une des revendications 1 à 6, comprenant pour chaque ligne d'extraction (7) au moins un aimant (15,16) d'extraction, dont la position radiale et/ou l'épaisseur radiale est différente d'une ligne (7) d'extraction à l'autre, pour la sélection d'énergies ou gammes d'énergie d'extraction (E_{out}) de paquets (3) différentes d'une ligne (7) d'extraction à l'autre.
- 20
8. Accélérateur selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel l'injecteur est apte à injecter les paquets (3) dans l'anneau (4) à une énergie d'injection (E_{in}) variable selon le paquet injecté.
- 25
9. Accélérateur selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel l'injecteur est apte à injecter les paquets (3) dans l'anneau (4) à un rayon d'injection variable selon le paquet injecté.
- 30
10. Bâtiment (20) de traitement, cylindrique à base circulaire, comprenant l'accélérateur (1) selon l'une des revendications 1 à 9, et N salles (21) de traitement reliées aux N lignes (7) d'extraction.

11. Bâtiment (20) selon la revendication 10, dans lequel les N salles (21) de traitement sont disposées selon une symétrie d'angle $2\pi/N$.

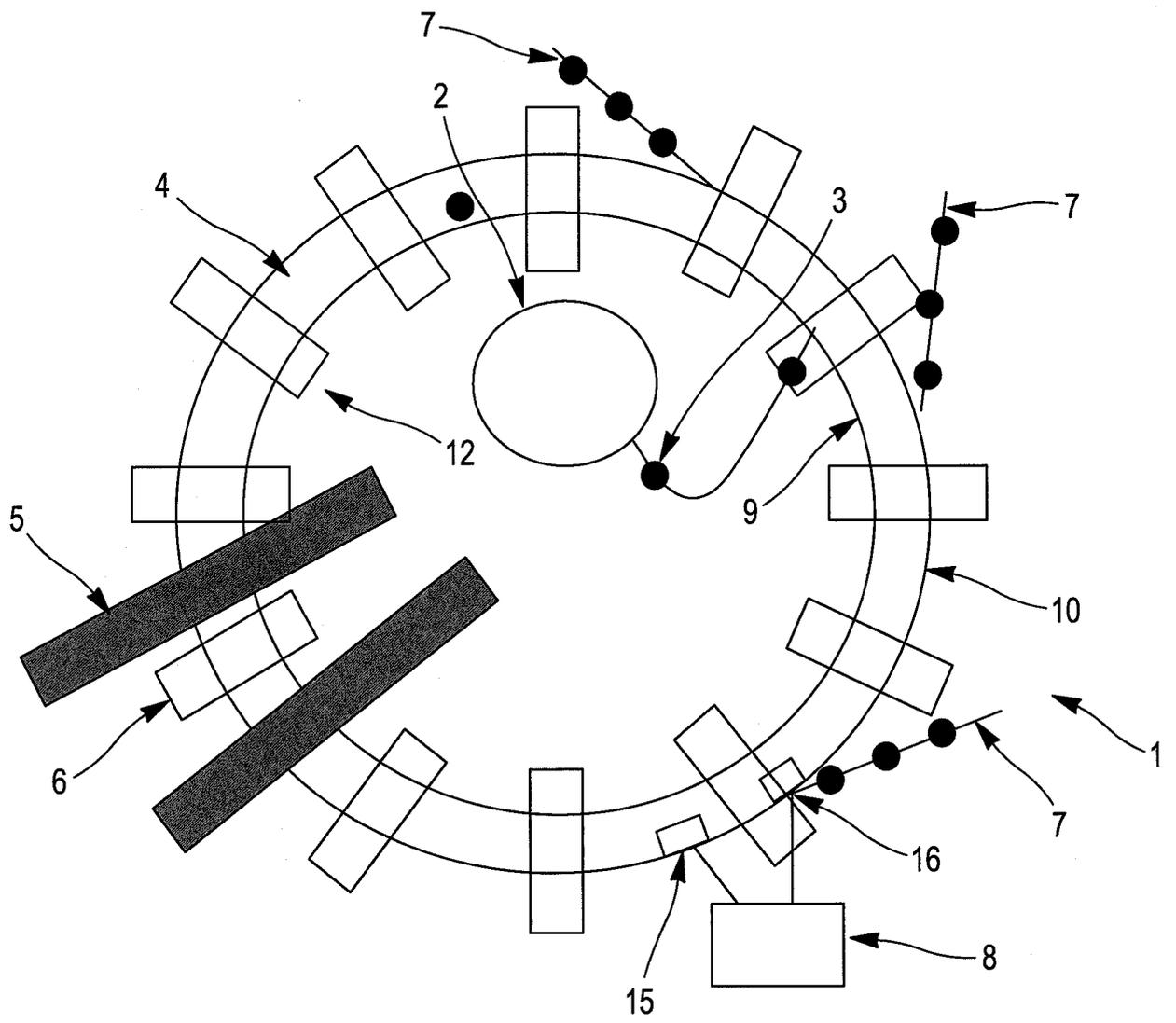


FIG. 1

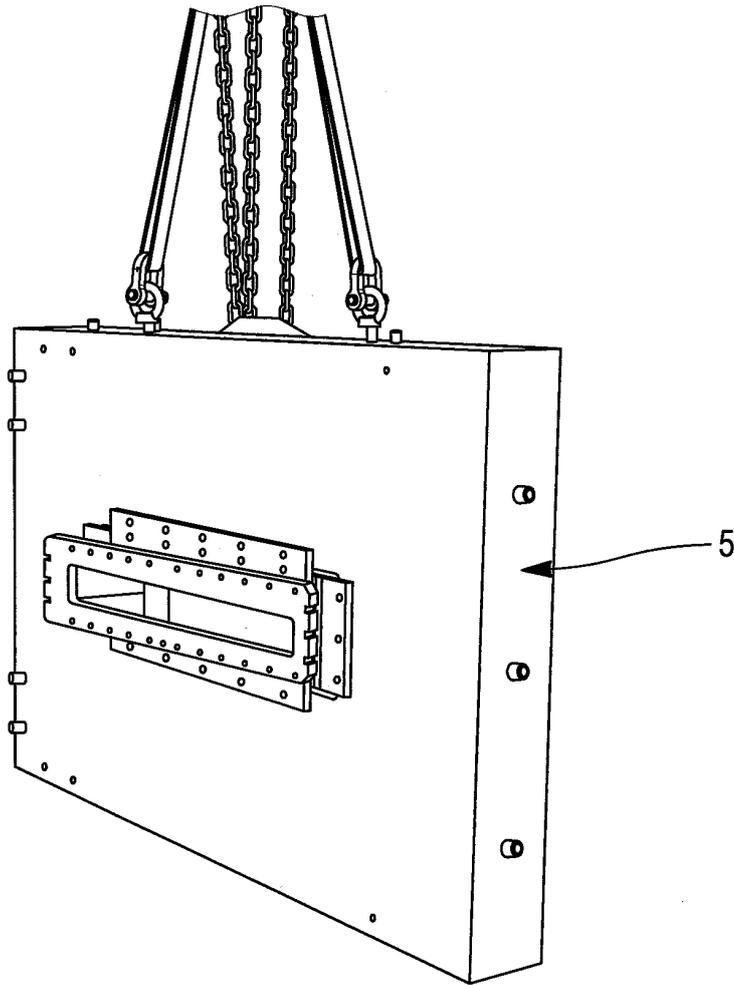


FIG. 2

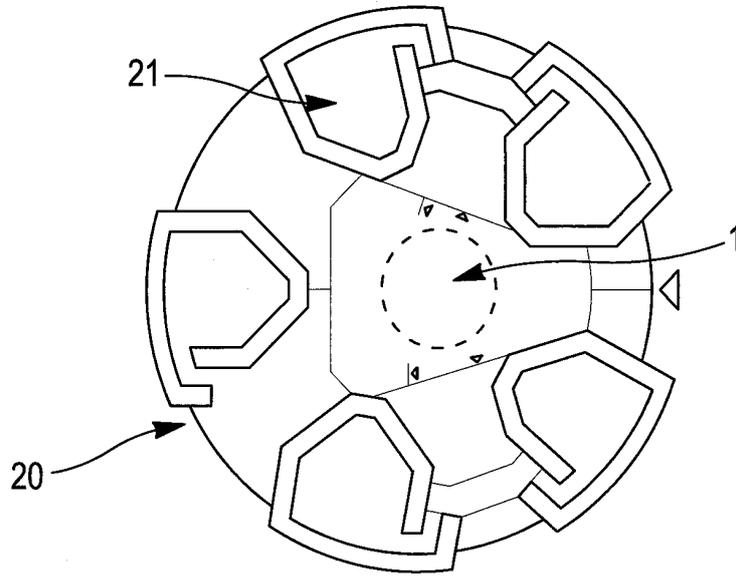


FIG. 3

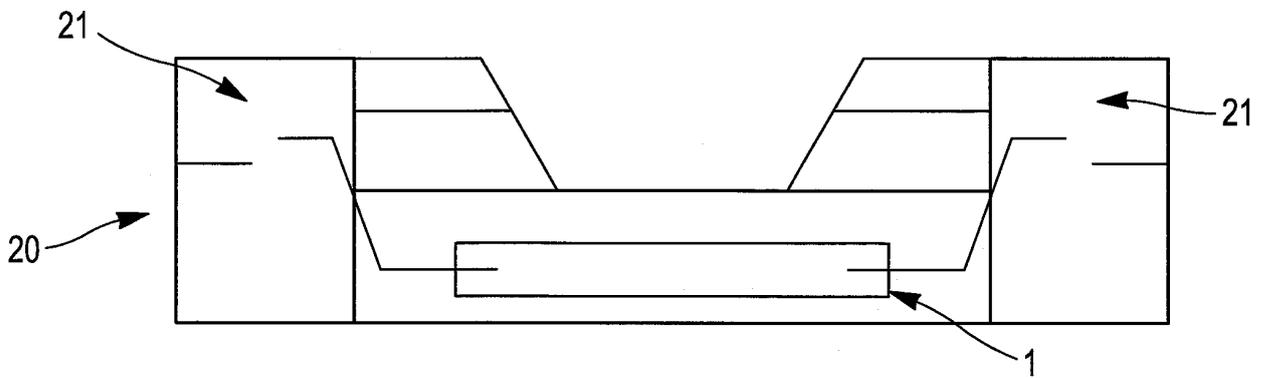


FIG. 4



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 740460
FR 1055539

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	ANTOINE S ET AL: "Principle design of a protontherapy, rapid-cycling, variable energy spiral FFA", NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH, SECTION - A:ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 602, no. 2, 21 avril 2009 (2009-04-21), pages 293-305, XP026080405, ISSN: 0168-9002, DOI: DOI:10.1016/J.NIMA.2009.01.025 [extrait le 2009-01-23]	1,3-8	H05H13/08 E04H3/08 A61N5/10
Y	* abrégé; figures 4,12,18-21; tableaux 1-4 * * alinéas [01.3], [01.4], [04.1], [04.2], [04.4], [05.2] *	2,10,11	
Y	US 4 139 777 A (RAUTENBACH WILLEM L) 13 février 1979 (1979-02-13) * abrégé; figures 7-12 * * colonne 6, ligne 23-25 * * colonne 7, ligne 18-40; revendication 28 *	2,10,11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H05H
A	PAPASH A I ET AL: "Commercial Cyclotrons. Part I: Commercial Cyclotrons in the Energy Range 10-30 MeV for Isotope Production", PHYSICS OF PARTICLES AND NUCLEI, NAUKA, MOSCOW, RU, vol. 39, no. 4, 1 janvier 2008 (2008-01-01), pages 597-631, XP002599603, ISSN: 1063-7796, DOI: DOI:10.1134/S1063779608040060 * abrégé; figures 31,45,46 *	2,10,11	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 février 2011		Crescenti, Massimo	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1055539 FA 740460**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **21-02-2011**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4139777	A	13-02-1979	CA 1063735 A1	02-10-1979
			DE 2653240 A1	02-06-1977
			FR 2332676 A1	17-06-1977
			GB 1561911 A	05-03-1980
			JP 53014297 A	08-02-1978
			ZA 7507266 A	28-09-1977
