

***Proposition d'un réacteur à confinement
électrostatique capable de produire des fusions
nucléaires aneutroniques avec une efficacité
supérieure à 1***

Copyright © 2018

Patrick Lindecker

Maisons-Alfort (France)

22 juillet 2018

Révision A

SOMMAIRE

Page

1. But, présentation et notations utilisées	3
2. Type de fusion et objectif d'efficacité	3
3. Simulation des fusions aneutroniques $H+ \leftrightarrow B11+$	6
4. Résumé des résultats et des solutions obtenus précédemment	10
5. Simulation des deux premières phases, résultats et commentaires	16
6. Conclusion	18
7. Références	18

1. But, présentation et notations utilisées

Le but de cette présentation est d'introduire progressivement la description d'un réacteur à confinement électrostatique permettant de produire des fusions nucléaires aneutroniques du type $H^+ \leftrightarrow B11^+$, avec une efficacité (énergie cinétique des produits de fusion / énergie électrique consommée) supérieure à 1.

Cette présentation s'appuie sur:

- la présentation faite précédemment en référence [1],
- le logiciel Multiplasma 1.6 (en français et en anglais) développé par l'auteur. Multiplasma permet la simulation d'un tel réacteur. Il est proposé au téléchargement en « gracieux » (« freeware »):
http://f6cte.free.fr/MULTIPLASMA_setup.exe.

On peut, éventuellement, lire l'article destiné aux utilisateurs de Multiplasma:
http://f6cte.free.fr/Simulation_d_un_reacteur_a_fusion_nucleaire_par_confinement_electrostatique.pdf

Dans ce qui suit, sont d'abord présentés les objectifs visés et les hypothèses faites, puis un résumé de différentes simulations $H^+ \leftrightarrow B11^+$ faites sur le réacteur « LKR1 ».

Il est ensuite rappelé les résultats et les solutions obtenus précédemment (issus de la référence [1]), dont un réacteur amélioré ("LKR1m3") permettant d'atteindre une efficacité supérieure à 1 en produisant plus de puissance, ainsi que son cycle de fonctionnement.

Un test final permet de mettre en évidence l'intérêt de cette solution.

On met de côté le fait que le projet présenté soit, actuellement, physiquement réalisable ou non.

Notations

- le produit simple est noté « * » ou « x » ou « . »,
- les puissances de 10 sont notées E_x ou 10^x (par exemple 10^{-7} ou E-7),
- "§" pour « chapitre ».

2. Type de fusion et objectif d'efficacité

2.1 Type de fusion aneutronique

La réaction de fusion aneutronique gérée par Multiplasma 1.6 est la suivante :
 $H^+ + B11^+ \rightarrow 3 He4 (+ 8,68 MeV)$

Il est à noter que Multiplasma inclut l'énergie cinétique E_k des ions fusionnant dans :

- l'énergie globale des produits de fusion :
 $H^+ + B11^+ (+E_k) \rightarrow 3 He4 (+ 8,68 MeV + E_k)$,

- l'énergie électrique consommée.

Le noyau d'hydrogène « H⁺ » est un proton.

« B¹¹⁺ » correspond à un atome de bore-11 (5 protons et 6 neutrons) ionisé par perte d'un seul électron (énergie d'ionisation: 8,3 eV). On n'a pas considéré le problème chimique de production de l'atome B¹¹⁺ sachant le bore est sous forme gazeuse dans les boranes (BH₃ par exemple).

La réaction produit 3 noyaux d'hélium-4 (2 protons et 2 neutrons) qui sont des particules chargées et donc susceptibles d'être dirigées et freinées. L'énergie cinétique générée par la fusion, pour l'ensemble des noyaux He₄, est de 8,68 MeV. La répartition de cette énergie entre les noyaux He₄ est probablement aléatoire.

Le gaz choisi est l'hydrogène H₂ car, éventuellement, des fusions entre les ions B¹¹⁺ et les noyaux de H₂ pourraient avoir lieu. Cependant, le mieux est d'avoir la plus basse pression de gaz pour limiter le problème des échanges de charges entre ions et neutres.

Tant l'hydrogène que le bore-11 sont des éléments abondants sur Terre.

Les autres réactions aneutroniques à base de He₃ n'ont pas été implantées dans Multiplasma car l'élément He₃ n'est présent sur Terre qu'à l'état de traces.

2.2 Objectifs en terme d'efficacité globale

En référence [1], dans le cadre des réactions de fusion (D-D ou D-T), on a fait l'hypothèse (pessimiste) que le système de conversion était thermodynamique de rendement 0,3. Cette même hypothèse est reprise ici, ce qui justifie que l'efficacité globale du système doit être supérieure, au pire à 1, mais au mieux à 3,333 (= 1 / 0,3). On se fixera, a priori, un objectif d'efficacité minimum (« Emin » par la suite) de 3,333.

De plus, la puissance de fusion doit être la plus grande possible.

2.3 Hypothèses faites

Il y a certaines données que l'on ne trouve pas dans la littérature scientifique accessible. L'auteur a donc dû faire les hypothèses suivantes :

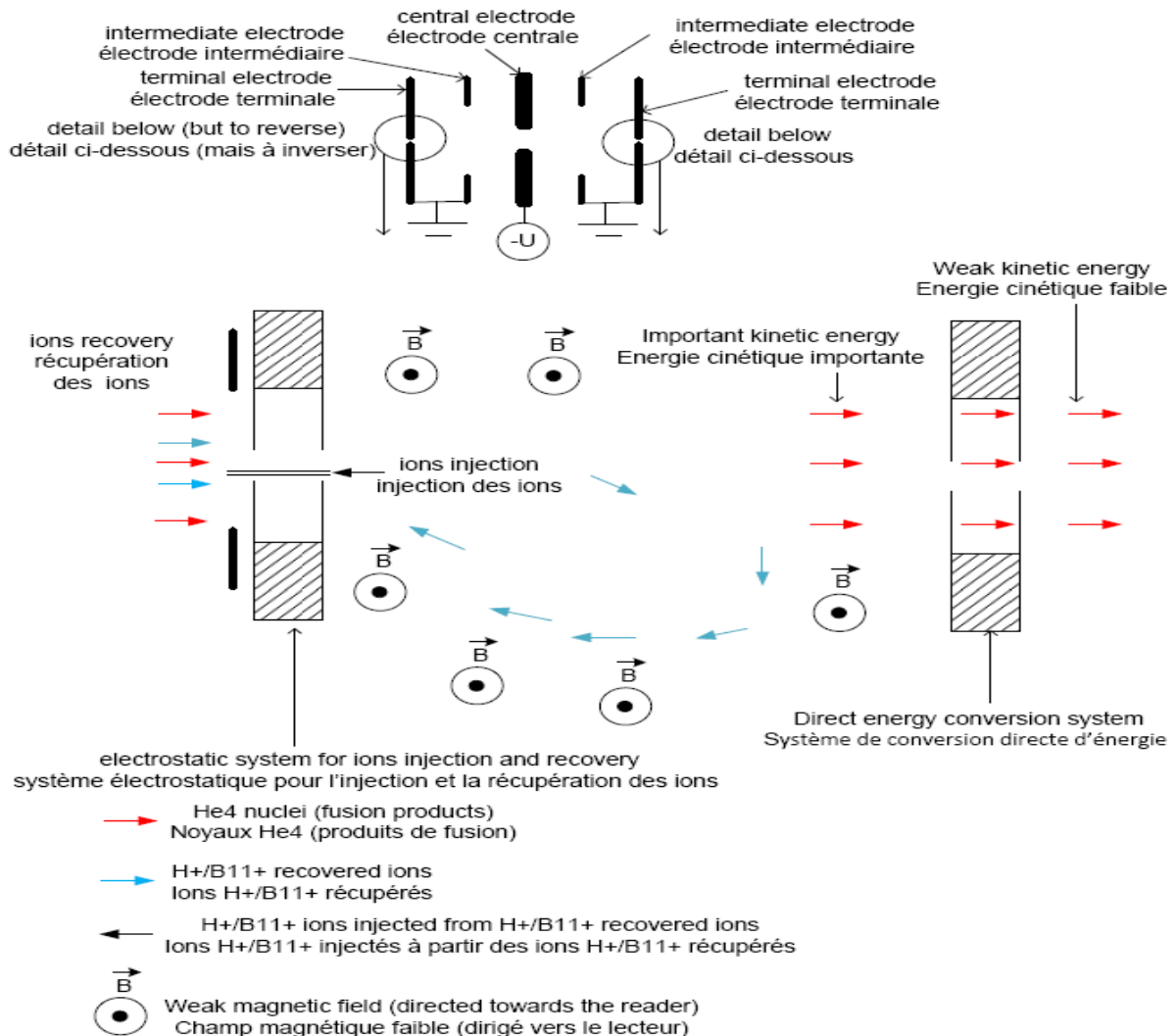
- la section efficace d'échange de charge entre les ions B¹¹⁺ et les molécules de gaz H₂ est la même qu'entre les protons H⁺ et les molécules H₂,
- les ions B¹¹⁺ qui ont un électron manquant ne perdent pas les autres électrons (l'atome B₁₁ ayant initialement 5 électrons), dans les collisions avec les neutres ou dans les collisions coulombiennes. Si c'était le cas les collisions coulombiennes seraient nettement plus fréquentes. Celles-ci dégraderaient la concentration du faisceau d'ions et ferait baisser le nombre de fusions.

2.4 A propos de la possibilité (abandonnée) de conversion directe de l'énergie des produits de fusion en électricité

Comme les noyaux He4 sont des particules chargées, on aurait pu faire l'hypothèse que leur énergie cinétique soit convertie en électricité dans un système électrostatique (ou autre), avec un rendement proche de 0,9 (conversion directe d'énergie), ce qui serait intéressant pour un propulseur spatial. Dans ce cas, il suffirait que l'efficacité globale du réacteur soit supérieure à 1,111 ($= 1 / 0,9$), au lieu de 3,333. Malheureusement, les produits de fusion (les noyaux He4) diffuseront probablement dans toutes les directions (suivant une certaine distribution angulaire inconnue) et percuteront les électrodes, sans possibilité de les concentrer le long de l'axe du dispositif (axe Z) dans le but de leur faire traverser un système de conversion directe d'énergie.

A noter que la distribution angulaire des noyaux He4 sera certainement piqué vers l'axe Z, du fait que les ions B11, étant 11 fois plus lourds que les protons, imposeront leur quantité de mouvement suivant l'axe Z aux noyaux He4 (mais il est difficile d'aller plus loin sans expérimentations).

Le schéma ci-dessous montre le réacteur, s'il était possible de concentrer les noyaux He4 le long de l'axe du dispositif ou si la distribution angulaire des noyaux He4 était très piqué suivant l'axe du dispositif.



3. Simulation des fusions aneutroniques $H^+ \leftrightarrow B11^+$

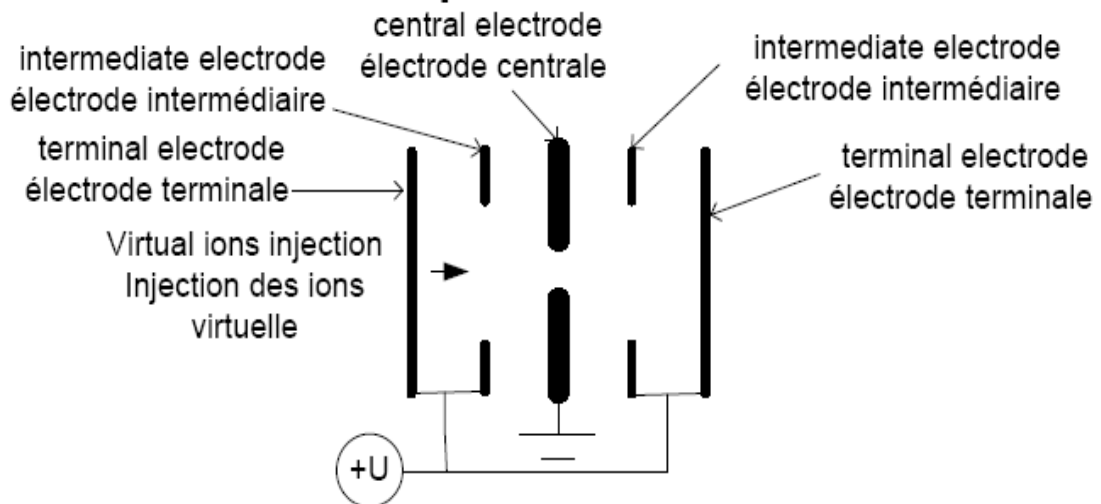
3.1 Généralités

Dans ce qui suit, il est présenté un résumé de différentes simulations faites sur le réacteur « LKR1 » (voir la description en référence [1], §2), qui permettent de montrer l'intérêt de ce réacteur, en fonction de la tension. Cela permettra au lecteur de comparer ces résultats avec ceux obtenus en référence [1] (§3 à 6), dans des conditions comparables.

Rappel rapide du réacteur « LKR1 » et de son fonctionnement

Pour ce modèle (« LKR1 »), l'injection des ions est faite (de façon virtuelle) à 15 mm de l'électrode centrale.

Preliminar diagram of the reactor Schéma préliminaire du réacteur



Les électrodes de potentiel positif par rapport à l'électrode centrale repoussent les ions (de charge positive) vers l'électrode centrale. Les ions se mettent alors à circuler sans fin entre ces 2 électrodes terminales avec une fréquence bien définie, un peu comme dans un système masse-ressort. A chaque fois que les ions passent à travers la lentille électrostatique, ils sont focalisés (ce qui est nécessaire du fait de la tendance du faisceau d'ions à la dispersion).

On laisse le faisceau d'ions circuler entre les 2 électrodes terminales, en produisant des fusions au passage. Au fur et à mesure les points de rebroussement des ions vont se rapprocher des électrodes terminales.

Quand le premier ion heurtera, en fin de course, une électrode terminale, le confinement sera perdu.

A noter qu'avec une petite charge électrique, la perte du confinement se fait toujours sur une des électrodes terminales et jamais sur l'électrode centrale.

Après le premier ion, au fur et à mesure, les ions vont percuter à très faible vitesse les électrodes terminales.

Conditions de simulation

Toutes les simulations ont été faites sur 10000 pas de temps.

La densité de courant (Cd) est la valeur maximum possible:

- pour la tension (U),
- pour la durée d'injection.

Ces tests donnent pour un ensemble de tensions, la charge électrique maximum (Q) que le réacteur peut confiner durant un temps limité, l'efficacité et la puissance de fusion.

3.2 Résultats de la simulation pour des fusions H+ <-> B11+ à la pression de gaz de 10 pPa

A la page suivante, on trouvera un tableau des résultats puis la courbe exprimant l'efficacité E (sans dimension) et la puissance de fusion P (en W) en fonction de la tension U sur les électrodes (en MV).

On voit que E croît rapidement jusqu'à 6,835 pour une tension de 7 MV puis décroît lentement.

La valeur idéale pour la tension U est celle pour laquelle la puissance exploitable EP est maximum. Pour l'efficacité minimum $E_{min}=3,333$, la puissance exploitable est nulle.

Pour $E>3,333$, la puissance électrique produite est égale à $P/3,333$, la puissance électrique consommée vaut P/E et donc la puissance exploitable vaut $P/3,333 - P/E = P \times (0,3 - 1/E)$

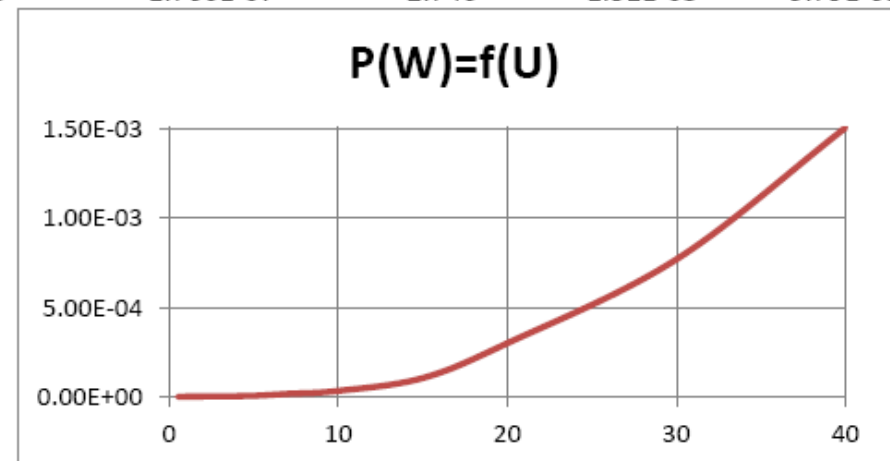
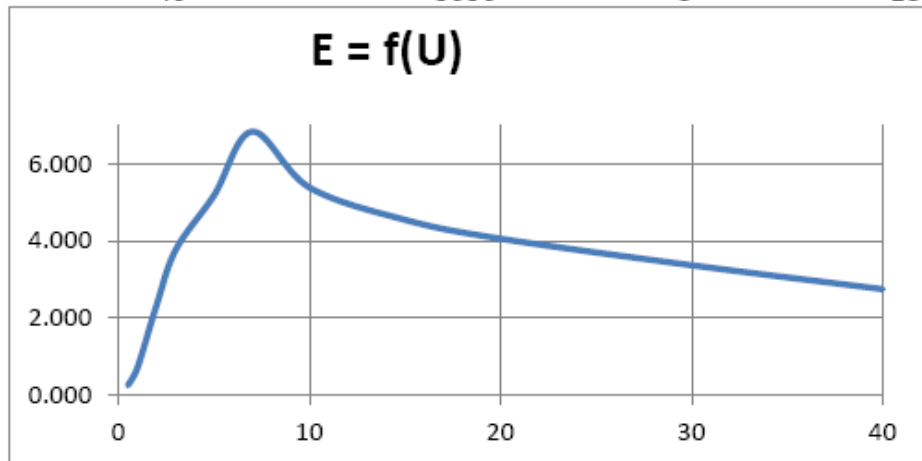
A partir des valeurs trouvées, la valeur idéale pour U (à la puissance exploitable maximum) est de 20 MV.

On note que la charge électrique maximum confinée (Q) est à peu près proportionnelle à la tension.

Rappel: dans ce document et dans le logiciel Multiplasma, on ne tient pas compte du rayonnement de freinage ("Bremsstrahlung"), car une simple application numérique avec la formule de Larmor appliquée aux ions en constante accélération et décélération montre que la puissance radiative reste négligeable, dans la gamme de tensions ($U \leq 125$ MV) utilisée, par rapport à la puissance de fusion.

Study of E and P = f(U) for H+ <-> B11+ at Pgas=10pPa / Etude de E et P = f(U) pour H+ <-> B11+ à Pgaz=10 pPa

Voltage on electrodes / Tensions sur les électrodes U (MV)	Current density / Densité de courant Cd (A/cm ²)	Time step / Pas de temps Tsp (ps)	Number of injection time steps / Nombre de pas de temps en injection Nos	Charge Q (C)	Yield / Efficacité E	Fusion power / Puissance de fusion P (W)	Exploitable power / Puissance exploitable EP (W)
0.5	4	30	1664	1.997E-09	0.237	1.09E-08	-4.27E-08
1	12	20	1764	4.234E-09	0.707	6.61E-08	-7.37E-08
2	35	10	2496	8.736E-09	2.334	5.89E-07	-7.57E-08
3	64	10	2038	1.304E-08	3.767	1.71E-06	5.92E-08
5	120	10	1578	1.894E-08	5.180	4.77E-06	5.10E-07
7	250	6	2223	3.335E-08	6.835	1.56E-05	2.40E-06
10	370	6	1861	4.131E-08	5.384	3.23E-05	3.69E-06
15	700	6	1519	6.380E-08	4.543	1.04E-04	8.33E-06
20	1300	3	2632	1.026E-07	4.053	2.99E-04	1.59E-05
30	2200	3	2150	1.419E-07	3.362	7.69E-04	1.97E-06
40	3050	3	1865	1.706E-07	2.740	1.51E-03	-9.79E-05



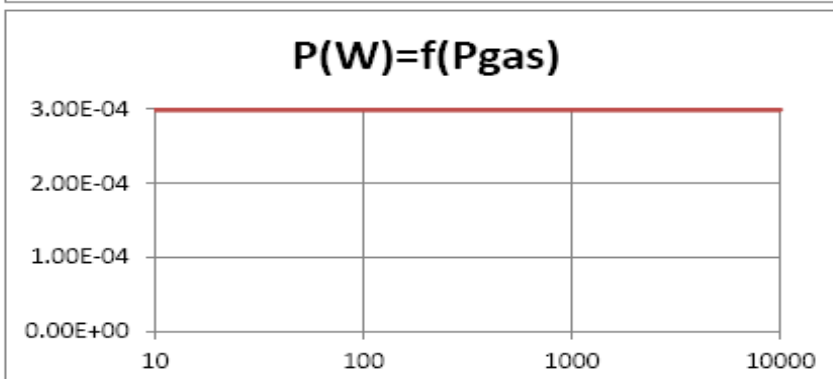
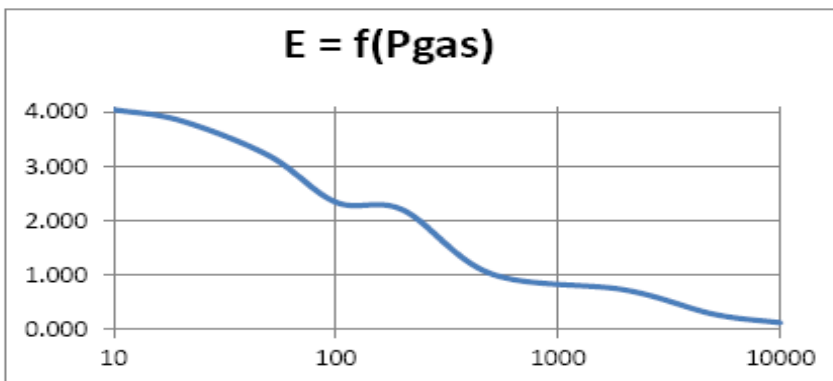
3.2 Résultats de la simulation pour des fusions H+ <-> B11+ à différentes pressions de gaz

On va partir de la « meilleure » solution déterminée précédemment soit une tension de 20 MV et une densité de courant de 1300 A/cm², sous une pression de 10 pPa et on va regarder l'évolution de E et de P en fonction de la pression de gaz. On s'attend à une dégradation des performances du réacteur du fait principalement de l'échange de charge Ions-Neutres mais aussi des collisions élastiques Ions-Neutres.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus. On voit qu'il faut au plus 20 pPa de gaz pour dépasser l'efficacité minimum de 3,333. La puissance de fusion est stable car elle ne dépend des fusions Ions-Neutre que de manière infime.

Study of E and P = f(Pgas), for H+<->B11+ / Etude de E et P = f(Pgaz), pour H+<->B11+
All tests done at 20 MV Cd=1300 A/cm2
Tous les tests faits à 20 MV Cd=1300 A/cm2

Gas pressure / Pression du gaz Pgas (pPa)	Yield / Efficacité E	Fusion power / Puissance de fusion P (W)
10	4.053	2.99E-04
20	3.849	2.99E-04
50	3.200	2.99E-04
100	2.342	2.99E-04
200	2.199	2.99E-04
500	1.019	2.99E-04
2000	0.721	2.99E-04
5000	0.274	2.99E-04
10000	0.114	2.99E-04



4. Résumé des résultats et des solutions obtenus précédemment

Ci-dessous on trouvera un résumé des problèmes et des solutions expliqués plus en détails en référence [1] (§7 à 12).

Problème du confinement

Le problème de ce type de réacteur est la grande difficulté (pour ne pas dire l'impossibilité) de confiner longtemps. Ceci est principalement dû à l'effet de la charge d'espace qui attire puis repousse chaque ion périodiquement et de manière non totalement symétrique. L'énergie des ions est alors « thermalisée » (dispersée). L'échange d'énergie cinétique entre les particules lors des collisions coulombiennes (I-I), est l'autre source de « thermalisation » des énergies, surtout à basse intensité. On peut essayer de limiter la thermalisation mais on ne peut pas l'éviter. Le paramètre principal à suivre depuis le programme Multiplasma est « d_{max} » (distance maximum par rapport au centre).

Solution consistant à augmenter le temps de confinement

On peut augmenter le temps de confinement en limitant la charge d'espace et les collisions coulombiennes par réduction de la charge électrique stockée.

Effectivement en baissant significativement la charge électrique, on peut énormément augmenter le temps de confinement. Mais la puissance de fusion produite sera alors extrêmement faible et sans intérêt pratique.

Cette solution est donc abandonnée. Au contraire, on va ignorer les fusions créées régulièrement et prendre uniquement en compte les fusions créées pendant l'injection et un peu après (avant dispersion des ions). Ce qui signifie que la durée de confinement n'a plus à être la plus grande possible. Au contraire elle sera la plus courte possible pour réduire le temps du cycle. Par la suite, on va chercher à maximiser le nombre de fusions créées au départ.

Problème des collisions sur l'électrode centrale et solution

Du fait du phénomène de thermalisation, le point de rebroussement des ions circulant dans le réacteur (c'est à dire là où leur vitesse devient nul et où ils font demi-tour), va avoir tendance à s'éloigner du centre jusqu'à collision avec une électrode terminale. Du point de bilan énergétique, la perte est faible car les ions ont une vitesse faible au moment de la collision.

De la même façon, du fait de la thermalisation, certains ions n'auront plus assez d'énergie cinétique et vont finir par percuter l'électrode centrale. Du point de vue du bilan énergétique, la perte est élevée car ces ions ont une vitesse très élevée au moment de la collision. On doit donc éviter de percuter l'électrode centrale par les ions.

Expérimentalement, il a été constaté que pour éviter des collisions avec l'électrode centrale, la densité de courant doit être limitée à environ $1/6^{\text{ème}}$ de la densité du courant maximum obtenue pour une charge confinée pendant au moins 100 ns. Dans ce cas, les ions percutent toujours les électrodes terminales.

Concentration du jet d'ions

Plutôt que d'envoyer les ions de la même manière que celle correspondant à l'envoi des électrons par une cathode chauffée, on peut prendre l'hypothèse que tous les ions sont envoyés à la même vitesse et longitudinalement suivant l'axe z (donc selon une seule direction et une seule vitesse) à partir d'une section très petite. Le faisceau d'ions va être très concentré (dans un cylindre de quelques microns de diamètre, en fonction de l'intensité) et les fusions vont donc être nettement plus nombreuses, au moins au début. Cette solution a été adoptée et implantée sur Multiplasma.

Si nous appliquons l'injection linéaire en limitant la densité de courant à environ $1/6^{\text{ème}}$ de la densité de courant maximum, pour une charge confinée pendant au moins 100 ns, alors le volume de confinement reste en forme de cylindre (c'est-à-dire un « trait rouge » sur la vue en coupe du réacteur) de rayon moyen inférieur à 0,05 mm, donc en conséquence:

- d'une part, on évite les collisions avec l'électrode centrale,
- et d'autre part, on maximalise le nombre de fusions.

Symétrisation du jet d'ions

Si l'on concentre le jet d'ions, comme cette concentration ne peut être maintenue, il pourrait être intéressant d'injecter les ions symétriquement par rapport au centre. Ainsi, les premières fusions se feront alors plus rapidement, après un faible parcours. Ceci n'a d'intérêt que si l'injection est linéaire. Cette solution a été adoptée et implantée sur Multiplasma.

Contrôle du réacteur par la tension (pour l'injection et la récupération des ions) et schéma de principe du réacteur

Si la vitesse de collision des ions sur les électrodes terminales pouvait être contrôlée, l'énergie perdue pourrait être rendue négligeable (idéalement nulle). Dans ce cas, on obtiendrait la meilleure efficacité possible.

Ce contrôle est possible simplement en augmentant ou en diminuant la tension, en suivant une rampe. Ceci a été vérifié en simulation. Expérimentalement, on trouve que pour une augmentation de tension il y a une contraction le long de l'axe Z du cylindre de confinement et inversement pour une diminution de tension. Ces évolutions dépendent du modèle choisi.

Maintenant que le contrôle de la position des points de rebroussement des ions est possible, on peut, par contrôle de la tension (via un programme fixé à l'avance), faire en sorte que les ions collisionnent avec les électrodes terminales à très faible vitesse. Nous ne sommes donc plus limités par la densité de courant. La seule limitation est d'avoir un volume de confinement en forme de cylindre (voir la page précédente).

En outre, ce contrôle peut être utilisé pour l'introduction des ions dans le réacteur :

- les électrodes terminales sont percées à leur centre d'un petit orifice circulaire de, par exemple, 0,2 mm de diamètre,
- la tension sur les électrodes est inversée, c'est-à-dire que toutes les électrodes sont à 0 V sauf l'électrode centrale qui est à une tension négative (-U).

Dès que l'électrode centrale est sous tension (légèrement sous sa tension nominale), il suffira d'injecter une charge d'ions, symétriquement à travers les deux orifices des électrodes terminales et, simultanément, d'augmenter doucement (suivant une rampe) la tension sur l'électrode centrale jusqu'à sa valeur nominale.

Du fait de l'augmentation de tension, le volume de confinement va se contracter et laisser un certain espace entre les positions de rebroussement des ions et les électrodes terminales. L'introduction de la charge est terminée et les fusions commencent.

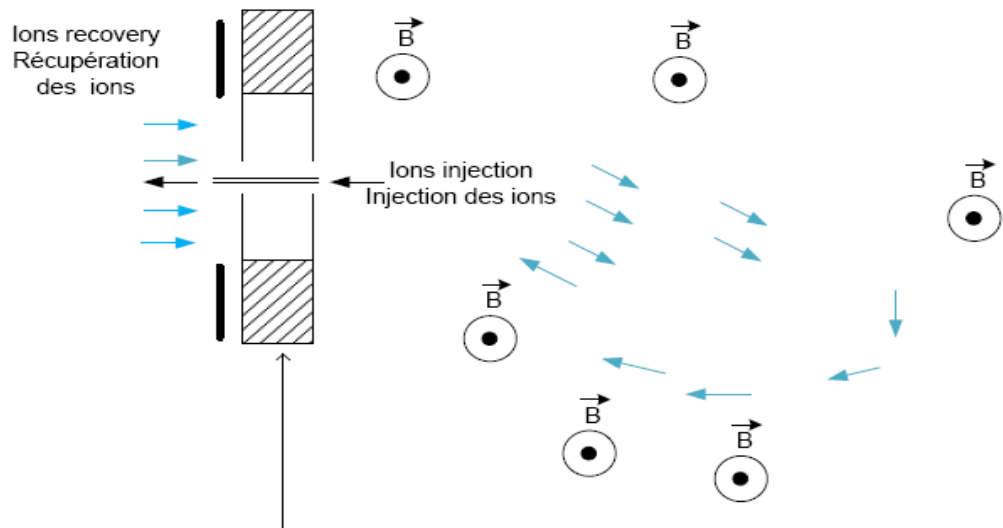
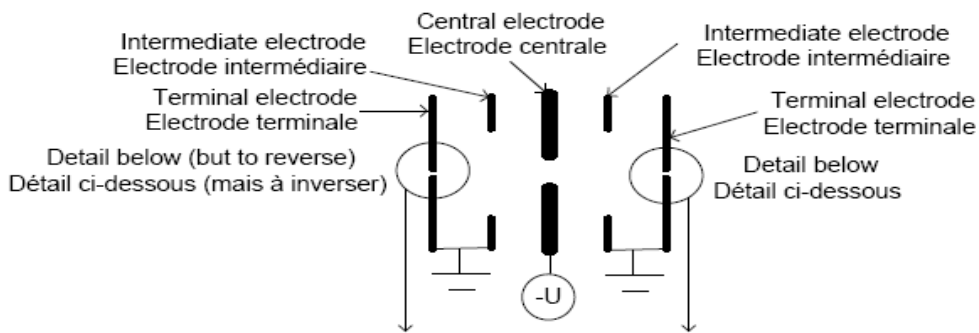
A noter que les orifices dans les électrodes terminales permettront de récupérer les ions non fusionnés à la fin du cycle, plutôt que de les laisser collisionner contre les électrodes terminales.

On donne ci-dessous le schéma de principe de ce réacteur. A noter que les parties « gestion des ions récupérés » et « injection des ions » ne sont pas décrites (hors du champ de ce document).

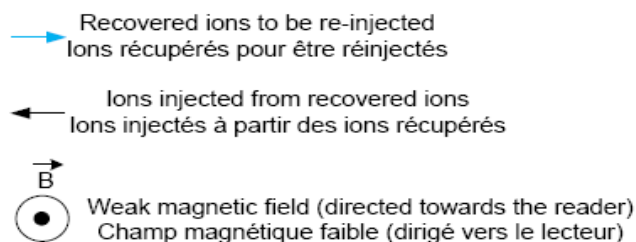
Cependant, de chaque côté extérieur du réacteur, les ions récupérés pourraient être freinés par un système électrostatique, qui transformerait une partie de l'énergie cinétique restante en électricité avec un rendement proche de 0,9 (conversion directe d'énergie). Inversement, ce système peut être utilisé pour injecter les ions.

Pour ce qui est de la récupération des ions, il est proposé qu'un faible champ magnétique courbe le faisceau d'ions, une fois freinés par le système de conversion directe, de façon à les diriger vers la partie injection.

Reactor principle diagram Schéma de principe du réacteur



Electrostatic system for ions injection and recovery (direct energy conversion system)
Système électrostatique pour l'injection et la récupération des ions (système de conversion directe d'énergie)



Problème lié à la variation de tension

En réalité, la puissance passive (P en W) nécessaire pour faire varier la valeur de la très haute tension V d'une capacité C est simplement phénoménale ($P=C.V.dV/dt$), même si l'énergie capacitive (E en J) n'est pas si élevée ($E=1/2.C.V^2$).

Les seules solutions sont que la variation de tension soit la plus petite possible, ou que la durée de variation soit relativement longue.

Cycle de fonctionnement

Il est composé de 3 phases, comme décrit précisément en référence [1] §11.2:

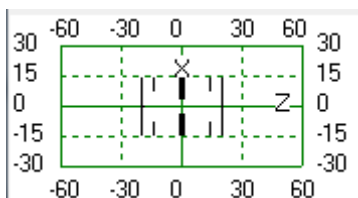
- Première phase : injection des ions.
Au niveau de la face interne des électrodes terminales gauche et droite, les deux sources d'ions commence à débiter dans le dispositif. On injecte suivant l'axe Z un certain nombre d'ions (mélange d'ions à 50% H+ et 50% B11+) correspondant à une certaine charge électrique et, parallèlement, on augmente lentement la tension.
- Seconde phase (à partir de la fin de l'augmentation de tension) : circulation stabilisée des ions et fusions.
- Troisième phase : récupération des ions en circulation, à travers l'orifice des deux électrodes terminales.

La durée de cycle est très courte : 1 μ s ou moins.

Amélioration du modèle LKR1

Le modèle de réacteur LKR1 n'est pas adapté au fonctionnement décrit précédemment. On déterminera un meilleur modèle quant à la possibilité de confiner le plasma de la manière la plus concentrée le long de l'axe de l'appareil, à partir d'un point d'injection situé au niveau de la face interne des électrodes terminales gauche et droite.

Ce nouveau modèle, correct jusqu'à 200A/cm² environ, est appelé « LKR1m3 » (avec « m » pour « modifié »).



Détermination de l'efficacité globale du réacteur pour tout le cycle de fonctionnement (E_g)

En tenant compte du cycle complet et donc de l'énergie (cinétique) perdue E_{pc} (compensée électriquement), il s'ensuit que l'efficacité globale E_g est égale à :

$E_g = E_f / (E_f/E + E_{pc})$ avec:

- E_g : efficacité globale du cycle de fonctionnement, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie fournie par les produits de fusion et l'énergie électrique consommée, pour l'ensemble du cycle.
- E_f : énergie (J) produite par les produits de fusion.
C'est une information fournie par le programme Multiplasma.
- E : efficacité du processus de fusion, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie fournie par les produits de fusion et l'énergie électrique consommée durant les deux premières phases du cycle.
C'est une information fournie par le programme Multiplasma.
- E_{pc} : perte d'énergie (J) par collision des ions sur les électrodes terminales ou lors de la récupération des ions, à partir de la perte du confinement (en fin de cycle).
C'est une information estimée.

5. Simulation des deux premières phases, résultats et commentaires

Bien que les possibilités de configuration pour les deux premières phases soient nombreuses, ci-dessous, il est proposé trois exemples permettant d'avoir une variété de cas.

Conditions de la simulation :

- Le modèle utilisé est le « LKR1m3 ».
- La tension visée est $-U = -20$ MV (1^{er} cas), -40 MV (2^{ème} cas) ou -50 MV (3^{ème} cas) sur l'électrode centrale, avec une position de rebroussement maximum des ions entre 19 mm et 19,5 mm (19,5 mm étant la position de collision ou de récupération).
- La densité de courant C_d est celle qui permet d'avoir la plus grande énergie de fusion E_f pour la tension choisie $-U$, indépendamment de l'efficacité. On rappelle que le courant dans le réacteur sera 100 fois plus faible (par exemple 2 A pour 200 A/cm²).
- Le pas de temps est de 3 ps pour les 3 tensions.
- Le nombre de paquets d'ions est de 3432 à -20 MV, 2665 à -40 MV et 2350 à -50 MV.
- La tension initiale est de 90 % de la tension nominale et la tension est augmentée linéairement jusqu'à 100 % de la tension nominale en 6 ns (2000 pas de temps).
- L'injection est faite symétriquement depuis la face interne des électrodes terminales gauche et droite, en mode linéaire. Le rayon d'injection est de 7 microns à -20 et -40 MV et 3 microns à -50 MV.
- On simule durant 3500 pas de temps soit 10,5 ns.

Résultat de la simulation :

Les résultats principaux sont fournis sous forme d'un tableau :

Tension $-U$ (MV)	Densité de courant C_d (A/cm ²)	Efficacité de fusion E	Energie de fusion E_f (J)	Position de rebroussement maximum des ions (mm)	Rayon moyen de confinement (mm)
-20	50	3,486	1,399 E-10	19,237	0,01962
-40	180	2,155	2,589 E-9	19,360	0,02554
-50	205	2,034	8,112 E-9	19,384	0,02756

Exemple de calcul de l'efficacité globale à -20 MV

Si nous supposons que $E_{pc}=E_f/10=1,399 \text{ E-11 J}$, alors l'efficacité globale sera égale à : $E_g=E_f/((E_f/E)+E_{pc})= 2,58$.

Si $E_{pc}=E_f/100=1,399 \text{ E-12 J}$, alors $E_g=3,37$.

Calcul de la puissance de fusion moyenne sur le cycle

Si nous supposons que la récupération dure 9,5 ns, alors le cycle durera

$10,5+9,5=20 \text{ ns}$ donc la puissance de fusion moyenne sur le cycle P_{fm} sera égale à:

- à 20 MV: $P_{fm} = 1,399 \text{ E-10} / 20 \text{ E-9} = 7,00 \text{ E-3 W}$
- à 40 MV: $P_{fm} = 2,589 \text{ E-9} / 20 \text{ E-9} = 0,129 \text{ W}$
- à 50 MV: $P_{fm} = 8,112 \text{ E-9} / 20 \text{ E-9} = 0,406 \text{ W}$

Commentaires

- On voit qu'apparemment entre $U=20$ et $U=50 \text{ MV}$, la puissance de fusion P_{fm} croît très rapidement avec la tension selon la formule approximative suivante: $P_{fm} \text{ (W)} = (U/20)^{4,4} \times 0,007$, ce qui donnerait à $U=100 \text{ MV}$ une puissance de fusion probable de $P_{fm}=8,3 \text{ W}$.
- On voit clairement que l'efficacité est maximale à $U=20 \text{ MV}$ et décroît lentement avec la tension, ce qui confirme les résultats du §3. Il y a donc un compromis à faire entre puissance et efficacité.
- Pour encore plus de puissance et/ou d'efficacité de fusion, il faudrait changer de modèle (un autre que LKR1m3), à déterminer, l'auteur n'ayant testé qu'une faible fraction de toutes les possibilités.
- Les trois configurations de test sont stockées dans les fichiers LKR1m3_H_B11_20_MV.SER, LKR1m3_H_B11_40_MV.SER and LKR1m3_H_B11_50_MV.SER du sous-répertoire « CONFIGURATIONS » du programme MULTIPLASMA.

6. Conclusion

La fusion aneutronique $H+ \leftrightarrow B11+$ dans un réacteur de type LKR1m3, contrôlé en tension (cf. §4 et 5) permet d'atteindre une efficacité de fusion supérieure à 1 et plutôt entre 2 et 4 suivant la tension (cf. §3 et 5).

Au §3, on a déterminé que la valeur idéale pour la tension est celle pour laquelle la puissance exploitable est maximum, soit 20 MV. On a également constaté que l'efficacité reste supérieure à 3,333 tant que la pression de gaz reste inférieure ou égale à 20 pPa.

Par ailleurs, faute de données dans la littérature scientifique à la connaissance de l'auteur, il a été fait un certain nombre d'hypothèses (cf. §2), qui ajoute de l'incertitude à la faisabilité technique d'un tel réacteur.

Cependant, il y a une grande latitude d'amélioration de ce réacteur, grâce à des simulations Multiplasma ou, éventuellement, des expérimentations.

L'amélioration la plus intéressante serait de trouver une façon de convertir l'énergie cinétique des noyaux He4 en électricité avec un système de conversion directe de l'énergie (voir §2.4).

Mise en parallèle de réacteurs

Ce qui a été décrit correspond à un seul réacteur de faibles dimensions (quelques cm), pour un faisceau d'ions de moins de 1/10ème de mm de diamètre.

Dans une application pratique éventuelle, ce sont des milliers de dispositifs qui devraient être mis en parallèle. Un objectif d'un réacteur par cm^2 et donc de 10000 réacteurs au m^2 pourrait être visé

7. Références

Préliminaire : pour une liste complète des références, se référer au §14 de la référence [1], ci-dessous.

[1] « Proposition d'un nouveau type de réacteur à confinement électrostatique capable de produire des fusions nucléaires avec une efficacité supérieure à 1 » de Patrick Lindecker :

http://f6cte.free.fr/Proposition_d_un_nouveau_type_de_reacteur_a_fusion.pdf

[2] Page Internet « Fusion » de l'auteur: http://f6cte.free.fr/multiplasma_francais.htm