

Simulation d'un dispositif permettant la fusion nucléaire par confinement électrostatique, avec Multiplasma

Copyright © 2018

Patrick Lindecker

Maisons-Alfort (France)

22 juillet 2018

Révision B

Révision B: remplacement du terme « rendement » par « efficacité » pour éviter une ambiguïté et prise en compte de la fusion aneutronique $H^+ \leftrightarrow B^{11+}$.

1. But

Concevoir votre propre réacteur à fusion nucléaire.

Il s'adresse à des personnes intéressés par la fusion nucléaire, ayant une bonne culture générale en physique (et qui sont patients car les simulations peuvent être longues).

On met de côté le fait que votre projet soit physiquement réalisable ou non.

2. Avertissement

Cette conception sera faite juste pour le plaisir ou par curiosité, parce que même si les calculs faits par Multiplasma sont aussi sérieux que possible, dans la limite des connaissances de l'auteur (qui n'est pas physicien nucléaire mais un ingénieur généraliste), personne ne va évidemment construire votre réacteur nucléaire...

Par ailleurs, aucune vérification par un tiers n'a été faite et le développement du programme ne suit aucune procédure d'assurance qualité (il y a donc probablement pas mal d'erreurs). Il s'agit juste d'un programme personnel mis à la disposition de ceux que cela intéresse.

3. Définition de quelques termes utilisés :

- Deutérium (D ou D2) / Tritium (T ou T2): ce sont des isotopes de l'hydrogène comportant, en plus du proton, soit 1 neutron (le Deutérium) soit 2 neutrons (le Tritium). Comme d'autres éléments, ils sont susceptibles de produire des fusions par collisions. Le Deutérium est relativement abondant, dans l'eau de mer, par exemple. Il constitue 0,01 % de l'hydrogène. Le tritium est présent naturellement à l'état de traces mais est produit (en tant qu'effluent gazeux) par les centrales nucléaires à fission en très faibles quantités.
- Interaction: il s'agit de l'effet produit par deux particules se percutant : ce peut être une excitation, une dissociation ou une radiation (non considérée dans Multiplasma), une collision, une ionisation, une fusion.
- eV: l'eV est une unité de quantité d'énergie utilisée dans le domaine des particules.
1 eV est équivalent à $1,602 \cdot 10^{-19}$ J.
- Fusion: interaction spécifique où deux particules (comme D+) se percutent avec suffisamment d'énergie pour être transformées en d'autres particules avec production d'une certaine quantité d'énergie cinétique (en plus de l'énergie cinétique initiale des particules se percutant). Les réactions de fusion gérées par Multiplasma 1.6 sont données ci-dessous :
 - $D^+ + D^+ \rightarrow T^+ (+1,01 \text{ MeV}) + p^+ (+3,02 \text{ MeV})$ (à 50%)
 - $D^+ + D^+ \rightarrow He3^+ (+0,82 \text{ MeV}) + n (+2,45 \text{ MeV})$ (à 50%)
 - $D^+ + T^+ \rightarrow He4^+ (+3,5 \text{ MeV}) + n (+14,1 \text{ MeV})$
 - $H^+ + B11^+ \rightarrow 3 He4^+ (+ 8,68 \text{ MeV})$ (fusion aneutronique)
- Ions: dans notre cas, il peut s'agir d'un atome (D ou T) ayant perdu son électron. C'est alors un ion atomique (noté D+ ou T+). Il peut aussi s'agir d'un ion moléculaire si la molécule a perdu un électron (D2+ ou T2+). Une molécule (D2) peut être dissocié en atomes (D + D) et/ou ionisée (D+ + D+ ou D2+).
- L'abréviation de "Ions" est "I". L'abréviation de "Neutres" (molécules de gaz) est "N".
- Section efficace: c'est la surface de captation de l'interaction. Plus elle est grande et plus on produit d'interactions. On peut aussi la voir comme une probabilité d'interaction.
- Charge d'espace: chaque ion et chaque électron crée son propre champ électrique auquel sont soumises toutes les autres particules chargées. La charge d'espace est donc égale à la somme de tous ces micro-champs électriques individuels. Au total, les particules de même polarité ont tendance à s'écartier les unes des autres (c'est un des problèmes de ce type de réacteur).

- Durée de confinement: c'est la durée pendant laquelle les ions circulent régulièrement dans le réacteur sans qu'aucun ion ne soit perdu hors du réacteur ni ne percute une électrode. Cette durée de confinement est donc égale à l'intervalle de temps entre l'injection du premier ion et la première perte d'un ion ou plus probablement la première collision d'un ion.

4. Principe de base de ce type de réacteur à fusion

Le principe de base est le suivant : un champ électrostatique oblige des ions Deutérium et/ou Tritium à circuler dans un piège électrostatique. Le milieu dans lequel les ions évoluent est un gaz à très basse pression, le Deutérium (D2). En circulant les ions subissent des interactions avec les molécules de gaz et avec les autres ions. La plupart des interactions sont nuisibles au confinement (collisions, ionisation, échange de charge et, par extension, la charge d'espace) mais inévitables. Les seules interactions intéressantes sont celles relatives à la fusion (entre ions ou entre ions et molécules), mais elles sont rares.

Nota : le gaz D2 est, en fait, juste une gêne car les fusions sont principalement produites par des collisions entre les ions et non par des collisions des ions avec les molécules D2. Cependant ce gaz doit être pris en compte car on ne peut l'éviter. En effet, une pression de gaz de 0 Pascal (vide absolu) n'est pas réalisable.

5. Objectifs éventuels de l'utilisateur

- L'objectif minimum est que l'énergie cinétique des produits de fusion produite par le réacteur soit supérieure à l'énergie électrique consommée (efficacité de fusion > 1).
- Un objectif plus ambitieux est de produire plus de 3,333 fois plus d'énergie cinétique que d'énergie électrique consommée (efficacité de fusion > 3,333), de façon à permettre une hypothétique exploitation de l'énergie produite, en supposant que le rendement thermodynamique permettant de transformer cette énergie cinétique en électricité soit de 0,3 (valeur standard pessimiste).
- Les critères pour évaluer les performances de votre réacteur sont décrits ci-dessous. Le calcul final doit être fait en précision "Très bonne". Les conditions suivantes doivent être vérifiées (pour garder une bonne précision, pour être sûr que le confinement fonctionne correctement et pour pouvoir comparer):
 - Tous les rayons moyens de section efficace (à droite des indications « I-N, « I-I » ou « s0 ») doivent être inférieurs ou égaux à 0,1 pixel.
 - Le "Déplacement maximum » doit être inférieur ou égal à 0,2 pixel.
 - L'échelle (taille du pixel) est égale à 1 mm/pixel (valeur par défaut).

- Les dimensions sont telles que le volume du réacteur tient dans la fenêtre d'affichage « /125 ».
- Le nombre d'échanges de charge « I-N Echange charge » est au minimum de 1 (pour montrer que cela a été pris en compte), ou « x S échange de charge » est au minimum à 1E10.
- Le nombre de fusions (« I-I Fusion ») est au minimum de 100 (pour être représentatif).
- « x S collision (avec effet conservé) » est mis à 1.

Les critères d'évaluation sont:

- La pression du gaz, qui doit être la plus haute possible (au minimum égale à 10 pPa).
- Le type de fusion: $D+ \leftrightarrow D+$, $D2+ \leftrightarrow D2+$, $D+ \leftrightarrow T+$ ou $D2+ \leftrightarrow T2+$, listés depuis le plus difficile au plus facile (a priori, choisir $D2+ \leftrightarrow T2+$).
- L'efficacité de fusion (« E ») lue sur l'étiquette “ **Rapport E. Fus. / E. Élec.** ” (Rapport entre l'énergie cinétique totale portée par les particules issues de la fusion et l'énergie électrique consommée), doit être le plus haut possible.
- L'énergie de fusion (« Ef ») lue sur l'étiquette “**Energie de fusion (J)**” doit être la plus grande possible.
- L'objectif est d'avoir l'**énergie exploitable** (« Ee ») la plus grande possible avec $Ee = Ef \times ((E - 3,333)/E)$.

Nota 1 : pour ces sujets (et d'autres), voir les documents :

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

Nota 2 : votre configuration est stockée dans le fichier CONF_PLASMA.SER et peut être stockée et gérée dans le sous-répertoire CONFIGURATIONS (voir le manuel pour les détails).

Nota 3 : merci de pas informer l'auteur de vos résultats (il n'y a pas de record à battre...).

6. Paramètres principaux à contrôler

- La géométrie du piège. En fonction de sa géométrie, les isopotentiels peuvent être modifiés et, en conséquence, le champ électrique va varier. Celui-ci doit forcer les ions à rester à l'intérieur du piège (« confinement »). Le confinement doit être capable de contrôler la plus grande charge électrique possible.
- Le type de fusion utilisé. On peut partir sur des fusions D+/D+ qui ont une faible section efficace de fusion mais émettent moins de neutrons que les fusions D+/T+ (de plus le Deutérium est bien plus abondant que le Tritium). On peut ensuite essayer les fusions D2+/T2+. La section efficace est élevée pour des tensions relativement faibles, donc la production d'énergie est plus facile que pour les fusions D+/D+.
- La tension sur les électrodes. Plus la tension est élevée et plus le confinement est efficace et plus il y a de fusions. Mais dans la réalité, il est très difficile de dépasser 1 MV.
- La pression du gaz : plus elle est élevée et plus elle réduit la possibilité d'avoir une efficacité supérieure à 1. Cependant on doit bien considérer une certaine pression. Il faut avoir en tête quelques valeurs (non garanties...):
 - 10 pPa est la valeur minimum de pression obtenue en laboratoire. C'est aussi la pression que l'on a à 10000 km d'altitude,
 - 1000 pPa est le minimum obtenu industriellement,
 - 10000 pPa est le vide obtenu dans les accélérateurs de particules. C'est aussi la pression que l'on a à 1000 km d'altitude,
 - 10 µPa est le vide que l'on obtient relativement facilement avec une pompe turbo-moléculaire. C'est aussi la pression que l'on a à 400 km d'altitude.
- Les électrons ou les ions sont supposées éjectées par une « cathode », qui n'a un sens strict que pour des électrons, et qui doit être interprété comme un canon à électrons ou un canon à ions. Cependant les lois d'émission des particules suivent celles que l'on aurait pour des électrons s'échappant d'une cathode chauffée (tant en vitesse qu'en direction). Donc, on doit fournir une température ou une vitesse moyenne initiale aux particules. Ce paramètre n'est pas très important, jusqu'à un certain point.
On peut aussi spécifier une injection linéaire et/ou symétrique (voir le manuel pour les détails).

La cathode est supposée fournir un certain courant qui dépend de la surface de la cathode. On devra donc fournir une certaine densité de courant (A/cm²). Cette densité sera traduite en courant en fonction de la surface de la cathode. Le courant est très important. Plus il est élevé, plus le nombre de fusions sera élevé mais plus il sera difficile de confiner ce courant. On doit chercher à avoir la charge électrique maximum pouvant être confinée. Cette charge dépend du courant et du temps d'injection des ions ($Q=I \times t$).

- La précision est importante, parce que le temps de calcul peut être très long. Pour dégrossir le problème, préférez la précision « Médiocre ». Pour le calcul final, préférez la précision « Très bonne ». A noter que même en précision « Très bonne », le résultat a une variabilité très large, du fait de la complexité des calculs.

7. Conseils pour la simulation :

- Il faut surveiller le paramètre « Déplacement maximum » qui doit être inférieur à 0,2 si l'on veut une bonne précision. C'est le « Pas de temps (ps) » qui va régler ce paramètre.
- Il est mieux d'envoyer une salve de paquets d'ions plutôt qu'une émission ininterrompue, pour limiter le temps de calcul. Pour ce qui concerne le nombre de paquets d'ions à envoyer (« Limite (paquets) »), essayez d'envoyer suffisamment de paquets (au moins 1000) pour avoir le maximum d'ions le long du piège, dans toutes les positions. Le pire est d'avoir un groupe de paquets d'ions circulant ensemble le long du piège car, dans ce cas, il n'y aura alors aucune collision frontale entre ions. Utilisez la fonction « Dernière position » pour observer les particules et la fonction de calibration (panneau « Correction de la vitesse ») pour déterminer le nombre de pixels parcouru par un ion durant un cycle (voir le manuel pour les détails).
- Une amplification/réduction des phénomènes doit être effectuée pour limiter le temps de calcul (en effet les interactions sont des phénomènes rares). Pour cela on utilisera les multiplicateurs « x S fusion », « x S échange de charge » et « x S collision (avec effet conservé) ». Pour les deux premiers multiplicateurs, on réduit les effets du même facteur de multiplication, de façon à conserver l'effet global stable quel que soit le temps de simulation. Par contre, il n'est pas possible de réduire les effets pour le troisième multiplicateur (car on ne peut réduire une collision: ou elle a lieu ou elle n'a pas lieu). Pour ce dernier cas, il faut le considérer comme un accélérateur de phénomène. On peut, par exemple, simuler sur une petite durée tout ce qui peut se passer sur une période bien plus grande. Il faudra s'assurer que malgré l'accélération des collisions, le confinement est capable de ramener les ions.
- Tous les rayons moyens de section efficace (à droite des indications « I-N, « I-I » ou « s0 ») doivent être inférieurs à 0,1 pixel pour garder un sens physique.
- En fonctionnement normal, on doit être en émission continue : les ions sont envoyés les uns après les autres jusqu'à ce que la limite en paquets d'ions soit atteinte.
- Egalement en fonctionnement normal, la charge d'espace doit être en service. Cependant, elle nécessite une grosse charge CPU (particulièrement avec l'option de précision « Très bonne »). Donc on peut choisir d'éviter la charge d'espace pour les tests préliminaires, ou de la limiter en se mettant en précision « Médiocre ».

8. Modèles de réacteur proposés

On trouvera, par défaut, le réacteur proposé par l'auteur. Il est fourni dans une configuration en précision « médiocre », pour limiter le temps de calcul. Celui-ci est également stocké dans le sous-répertoire « CONFIGURATIONS » sous le nom de « LKR1 » (réacteur simple dont le confinement est fait grâce à une seule lentille électrostatique), avec LKR1m, LKR1m2 et LKR1m3 qui dérivent de LKR1. L'étude de ces réacteurs est faite dans les documents suivants :

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

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

Sont également stockés :

- un modèle Fusor sous le nom de « FUSOR ». Ce modèle est donné pour information. Le Fusor produit assurément des fusions mais son efficacité est très faible.
- une sorte de piège de Penning sous le nom de « PSEUDO_PENNING_TRAP » destinée à comprendre les différents effets dans un plasma (voir plus loin l'étude ce modèle),
- un piège sous le nom de « TEST_CORRECTION_AND_FREQUENCY » pour montrer comment faire un test de correction de vitesse et de fréquence d'oscillation (voir plus loin le test de ce modèle).

On peut charger une de ces configurations en cliquant sur le bouton « **Charge Conf.** ».

Nota : vous pouvez sauvegarder votre propre configuration dans le sous-répertoire « CONFIGURATIONS » en cliquant sur le bouton « **Sauve Paramètres** » puis en nommant votre configuration.

9. Que faire au premier lancement

Il est proposé, en base, le réacteur de l'auteur « LKR1 ». Les instructions de base à faire sont les suivantes:

- D'abord démarrer «**Multiplasma**». Un jeu de paramètres par défaut est proposé. Ne le changer pas.
- A ce niveau, vous pouvez cliquer sur le menu <**Aide**> puis encore sur «**Aide**». Le manuel apparaîtra. Vous pouvez tester une recherche sur un mot ou imprimer le manuel.
- Cliquez sur le bouton «**Graphe**» puis sur le bouton «**Marche**».
- Observez, en premier lieu, la préparation du calcul. Une fois terminée, le calcul démarre. Observez :
 - la circulation des ions sur le graphe,

- l'efficacité du réacteur sur l'étiquette "**Rapport E. Fus. / E. Élec.**" (Rapport entre l'énergie cinétique totale portée par les particules issues de la fusion et l'énergie électrique consommée),
- l'énergie fournie sur l'étiquette "**Energie de fusion (J)**".
- Une fois la simulation terminée (le bouton « **Arrêt** » est poussé), vous pouvez faire une copie d'écran avec le bouton « **Disquette** », l'image étant stockée dans le sous-répertoire « SCREEN ».
- Cliquez sur le bouton "**Quitte**" puis encore sur "**Quitte**" pour abandonner le programme.

Ensuite

- Etudiez le manuel et le modèle de réacteur donné par défaut.
- Changer un seul paramètre (géométrique, par exemple) et observez l'effet de votre modification.

10. Pour en savoir plus avec la configuration « PSEUDO PENNING TRAP »

Cliquez sur le bouton « **Charge Conf** » pour charger la configuration « PSEUDO_PENNING_TRAP » (une sorte de piège de Penning), destinée à comprendre les différents effets dans un plasma. Les particules émises sont, ici, des électrons et non des ions.

- Cliquez sur le bouton "**Graphe**" puis sur le bouton "**Marche**".
Il peut être observé, à la fin du calcul (sur 6000 pas), que les électrons sont confinés (pas de perte d'électrons).
Il n'y a pas de collisions avec le gaz (voir les champs « EI-N Elastique », « EI-N Excitation » et « EI-N Ionisation » à 0).
- Cliquez sur le bouton « **Charge d'espace** » et relancer en cliquant sur le bouton "**Marche**".
Il peut être observé, durant la simulation, que les électrons s'écartent les uns des autres (du fait de la charge d'espace) et que, rapidement, on perd les électrons et le confinement.
- Cliquez sur le bouton "**Quitte**" pour revenir à la fenêtre de Configuration.
Ajoutez un champ magnétique de 0,1 Tesla : cliquez sur le bouton « **Champ B** » puis réglez le champ magnétique à 10 cT.
Cliquez sur le bouton "**Graphe**" puis sur le bouton "**Marche**".
Il peut être observé, durant la simulation, que les électrons sont confinés sur le plan XY par le champ magnétique, mais le confinement n'est pas assuré suivant l'axe Z (on perd les électrons longitudinalement).
- Cliquez sur le bouton "**Quitte**" pour revenir à la fenêtre de Configuration.
Réduisez la densité de courant à 1 μA et supprimez le champ magnétique en dé cliquant le bouton « **Champ B** ».

Cliquez sur le bouton "**Graphe**" puis sur le bouton "**Marche**".

Il peut être observé que les électrons restent confinés, ceci parce que la charge d'espace est maintenant très faible, le nombre d'électrons par paquet ayant été réduit d'un facteur 100000.

- Cliquez sur le bouton "**Quitte**" pour revenir à la fenêtre de Configuration. Augmenter la pression du gaz, d'un facteur 1000000, en cliquant sur le bouton « **µPa** » (au lieu de « **pPa** »). Cliquez sur le bouton "**Graphe**" puis sur le bouton "**Marche**". Il peut être observé que les électrons ne sont plus confinés et qu'il y a de nombreuses collisions (voir les champs « EI-N Elastique », « EI-N Excitation » et « EI-N Ionisation »). Beaucoup de collisions sont ionisantes (il apparaît de nombreux ions (lents) en bleu). Notez que les électrons sont en moyenne ralentis par ces collisions.
- Cliquez sur le bouton "**Quitte**" puis encore sur "**Quitte**" pour abandonner le programme.

11. Utilisation de la configuration « TEST CORRECTION AND FREQUENCY »

Cliquez sur le bouton « **Charge Conf** » pour charger la configuration « TEST_CORRECTION_AND_FREQUENCY ». C'est un exemple destiné à déterminer une correction de vitesse et la fréquence d'oscillation d'une particule dans un piège (voir le manuel pour plus de précisions).

Cliquez sur le bouton "**Graphe**" puis sur le bouton "**Marche**".

Il peut être observé, sous la barre verte, l'évolution des données relatives à la correction de vitesse et à la fréquence d'oscillation. Une fois la correction déterminée, on lit « N=255/255 » suivi des différentes informations trouvées :

- Fréquence d'oscillation : 12061,8 KHz,
- Nombre de pas de temps parcourus par cycle : 829,06. C'est une donnée importante pour dimensionner le nombre de paquets à envoyer (un par un), car ce nombre de pas (ou un multiple) permet d'avoir la meilleure répartition des particules dans le piège.
- La correction proposée : -0,1 ppm (il s'agit d'un faible correction).

Nota : la correction de vitesse est liée au fait que le calcul introduit une très faible erreur numérique qui s'accumule avec le temps. On peut, éventuellement, utiliser cette correction sur des calculs à long terme (disons supérieur à 10000 pas), mais de manière générale, il vaut mieux éviter d'utiliser cette fonction qui est aussi une source d'erreurs.

A noter que l'amplitude relative de l'erreur dépend de la distance parcourue durant un pas (cf. paramètre « Déplacement maximum »). Plus cette distance est grande et plus l'erreur augmente. On peut donc diminuer cette erreur en diminuant le pas de temps et donc la distance par pas, mais en allongeant la durée de calcul. Par contre, on ne peut pas annuler l'erreur (on peut juste la corriger).

12. Limitation

Cette version "graticiel» est destinée à un usage non commercial uniquement.

13. Questions techniques et propositions d'amélioration

L'auteur ne répond à aucune question technique (pas de réponse individuelle sur des questions techniques à propos de Multiplasma ou de la fusion) et ne prend en compte aucune proposition d'amélioration ou d'ajout (car aucune nouvelle version n'est prévue à ce jour). **Le programme est à utiliser, tel qu'il est.**

Les questions relatives à la fusion peuvent être, éventuellement, posées, en anglais, sur un des forums du groupe de discussion fusor.net (<http://www.fusor.net/board/>). Vous pouvez aussi rechercher des réponses sur Internet (mots clés: « Fusion », « Fusor », « Piège à ions linéaire », « Confinement électrostatique » « lentille électrostatique »...), dans les livres ou dans les articles scientifiques.