

Simulation d'un réacteur à fusion utilisant un nuage d'électrons confinés dans une bouteille magnétique

Copyright © 2019

Patrick Lindecker

Maisons-Alfort (France)

27 août 2019

Révision A

SOMMAIRE

	Page
1. But, présentation et notations utilisées	2
2. Définition de quelques termes utilisés	3
3. Simulateur	4
4. Injection des électrons	4
5. Principe de fonctionnement du réacteur	8
6. Pression du gaz	10
7. Rayonnement	11
8. Résultats de la simulation pour les fusions D+/T+ à la pression de gaz de 40000 pPa et conclusion	11
9. Références	14

1. But, présentation et notations utilisées

Le but de cette présentation est de décrire un réacteur à fusion basé sur une bouteille magnétique utilisant un confinement magnétique pour les électrons et un confinement électrostatique pour les ions.

Il produit des fusions nucléaires avec une efficacité, malheureusement, extrêmement faible, celle-ci étant définie par : « Energie cinétique des produits de fusion / Energie électrique consommée ».

Cette présentation s'appuie sur le programme de simulation particulaire Multiplasma version 1.10 (non public) développé par l'auteur et utilisé pour la simulation d'un tel réacteur.

Le réacteur étudié suppose l'utilisation d'un combustible Deutérium/Tritium.

Les problèmes de régénération de tritium, de gestion des neutrons vis-à-vis des matériaux et de radioprotection ne sont pas abordés. On s'attache ici uniquement à l'aspect proprement fusion.

Notations

- le produit simple est noté « * » ou « x » ou « . » ou n'est pas noté s'il n'y a pas d'ambiguïté,
- les puissances de 10 sont notées Ex ou 10^x (par exemple 10^{-7} ou E-7),
- les autres puissances sont notées ^ (par exemple x^2 pour x^2),
- la racine carrée de x est aussi notée SQRT(x)
- "§" pour « chapitre ».
- « m » pour la masse d'un électron (9,11E-31 kg)
- « q » (1,60E-19 C, en valeur absolue) pour la charge d'un ion (D+ ou T+) ou d'un électron (= -q en fait)
- « V » pour la vitesse

On utilise les unités SI ou des multiples.

Dans cet article, on supposera que « 1 pixel = 1 mm » (valeur par défaut, mais pouvant être modifié entre 0,1 et 10 mm). Donc, par la suite, on parlera indifféremment de « mm » ou de « pixel ».

2. 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).
Quelques réactions de fusion 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.

3. Simulateur

Ce logiciel développé par l'auteur s'appelle Multiplasma. Il est actuellement (août 2019) à la version 1.10, mais n'est pas public. Il s'agit d'un simulateur particulaire 3D, sous Windows (W32), permettant de simuler les trajectoires des particules (électrons et ions) et un certain nombre d'interactions entre particules (mais pas toutes, uniquement les principales).

A noter que la version Multiplasma 1.6 est proposé au téléchargement en « gratuit » (« freeware »), depuis la page WEB:

http://f6cte.free.fr/multiplasma_francais.htm

Cependant la version 1.6 ne gère pas les appareils magnétiques.

4. Injection des électrons

But de l'injection des électrons

Il s'agit de créer un potentiel très négatif (on vise -50 KV minimum) induit par les charges électroniques injectées au centre du dispositif.

Ce potentiel de -50 KV permettra de communiquer aux ions une énergie moyenne de 10 KeV environ. Lors de collisions frontales D+/T+ au centre du dispositif, on atteindra donc une valeur de plus de 30 KeV au niveau du centre de masse, valeur à laquelle correspond une section efficace de fusion correcte pour les collisions Deutérium/Tritium.

Ce nuage électronique doit avoir une forme axisymétrique (l'axe de la bouteille magnétique étant dirigé suivant Y) et symétrique par rapport au plan central (Y=0) de façon à que le potentiel soit maximale (en valeur absolue) au centre exact du dispositif, c'est-à-dire sur l'axe et juste entre les solénoïdes (rayon=0 et Y=0). De cette manière, les ions seront dans un puits de potentiel et tous attirés vers le centre de l'appareil (en théorie).

Tension accélératrice des électrons permettant d'atteindre -50 KV

Comme indiqué précédemment, l'objectif est d'atteindre au minimum -50 KV. Le nuage d'électrons aura grossièrement une forme de cylindre. En assimilant cette forme à une sphère, on peut montrer que le rapport de la tension (« potentiel » en fait) induite à la surface de la « sphère » (donc au niveau de l'injecteur) et la tension maximum au centre du nuage d'électrons est égale à 2/3 (voir, à ce sujet, le lien en référence [4]). Donc au minimum, la tension accélératrice des électrons doit être égale au 2/3 de la tension induite visée. Mais pour que les électrons ne soient pas trop freinés à la sortie de l'injecteur par la charge d'espace, on choisira une tension accélératrice supérieure à la valeur absolue de la tension induite visée, soit +100 KV ici.

Nota 1 : au fur et à mesure de la formation de la charge d'espace, les trajectoires initiales des électrons vont être affectées, certains électrons étant freinés. Ils vont donc tourner sur des cercles de plus en plus petits et auront donc une plus grande tendance à s'échapper axialement.

Nota 2 : expérimentalement, le rapport de tension est d'environ la moitié du potentiel au centre du dispositif (plutôt que 2/3).

Courant minimum permettant d'atteindre -50 KV

Ce qui apparaît clairement dans les nombreux tests faits par l'auteur est que si le taux de perte des électrons est faible au départ, il augmente ensuite lentement au fur et à mesure que le nuage d'électrons s'établit.

Au pire, le taux de perte pourrait être tel que les nouveaux électrons injectés ne pourraient pas compenser les électrons perdus sur l'injecteur, et ceux s'échappant radialement et axialement. On constate donc que si le courant n'est pas suffisant, on n'est pas certain d'atteindre -50 KV, la tension induite par la charge d'espace ayant tendance à augmenter de plus en plus lentement, voire à se stabiliser pour, ensuite, diminuer lentement.

Quelques (longs) tests montrent qu'un courant minimum de 350 mA est nécessaire pour atteindre -50 KV.

Par contre, à 1 A on atteint facilement -50 kV. On considèrera donc 1 A pour avoir de la marge et pour diminuer la durée de simulation. A noter que tout courant supérieur à 1A permettra nécessairement d'atteindre -50 kV voire beaucoup plus, mais l'injecteur devrait alors avoir un diamètre supérieur à 1 mm et donc entraîner plus de pertes par collisions avec celui-ci.

Description de l'injecteur

Il doit être le plus fin possible pour limiter, au maximum, les collisions avec les électrons mais il ne doit pas être trop fin pour pouvoir transporter le courant de 1 A requis plus haut.

Celui-ci est composé de l'orifice d'injection qui peut-être vu comme un disque d'un diamètre de 1 mm. Il est précédé d'un tube de 1mm de diamètre et de 20 mm de longueur, suffisante pour que l'extrémité d'admission de ce tube ne soit pas percuté par les électrons. On peut donc y connecter la ligne de focalisation du canon à électrons (non décrit, mais devant permettre de créer un faisceau de 1 A sous 100 KV).

L'auteur a fait l'hypothèse qu'il était possible de passer un courant de 1 A (maximum) au travers d'un tube de 1 mm de diamètre intérieur (l'épaisseur du blindage magnétique du tube étant négligé). D'une part, 1 A est l'intensité maximum des systèmes de soudage par faisceau d'électrons et pour ceux-ci, on admet des brillances de $0,5 \text{ E}10 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$ et plus, surtout pour les cathodes à base de LaB6. Avec cette hypothèse de $0,5 \text{ E}10 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$, on obtient un produit « rayon maximum du faisceau x angle de divergence maximum » de 4,5 mm.mrad, suffisant pour passer le faisceau de 1A. A noter que l'on situera le « cross-over » du faisceau vers le milieu du tube (sans impact sur la simulation). La sortie du tube sera considérée comme étant une surface circulaire de diamètre égal à 1 mm, émettant les électrons sous un angle maximum de 20 mrad.

Principe de l'injection

Pour obtenir une tension induite qui soit maximale au centre du dispositif, il faut faire en sorte que toutes les trajectoires des électrons passent par l'axe du dispositif, ce qui augmentera la probabilité de présence d'électrons dans cette zone et donc son poids relatif dans la charge d'espace.

Il y a deux façons d'injecter transversalement les électrons:

- soit depuis l'extérieur de la bouteille magnétique (voir, par exemple, pour une source radiale, la référence [2] page 293), mais la trajectoire est instable,
- soit depuis l'intérieur du dispositif en faisant pénétrer le faisceau d'électrons à travers un tube blindé magnétiquement. On peut alors diriger le faisceau de façon précise pour avoir une trajectoire stable.
Le problème est que les électrons sont susceptibles de tourner jusqu'à revenir frapper le tube d'injection.

On choisira la deuxième solution de façon à contrôler les trajectoires au mieux. Du fait de la charge d'espace créée par les électrons, il y a une modification (« thermalisation ») des trajectoires qui fait que l'on est loin de perdre tous les électrons. Par contre, du fait de cette thermalisation un certain nombre d'électrons accélérés s'échappent radialement et encore un plus grand nombre d'électrons freinés s'échappent axialement via le cône de non confinement de la bouteille magnétique (pour le sujet, voir, par exemple, la référence [3]).

Plus précisément, on peut injecter les électrons de trois façons suivantes :

- Soit avec une vitesse purement azimutale (V_θ), de telle façon que l'énergie des électrons soit minimale. On peut montrer que dans le cas théorique où l'on injecterait au niveau du plan central ($Y=0$) du dispositif, perpendiculairement à l'axe (donc sans champ magnétique radial), la position R pour laquelle on atteindrait le centre ($r=0$ et $Y=0$) est telle qu'elle vérifie l'équation $2\pi m/q V_\theta R = \Phi(R, Y=0)$ avec Φ le flux magnétique portant sur une surface de rayon R et de centre $R=0, Y=0$. On se référera aux documents [1] et [2] sur le sujet et la démonstration. Cependant, un électron seul injecté dans le plan central reviendra à la position d'origine et percutera l'injecteur.
- Soit depuis le plan central, avec la vitesse azimutale qui permet d'atteindre l'axe (à l'énergie minimale) à laquelle on ajoute une légère vitesse axiale de façon que les électrons aient un double mouvement azimutal et axial, ce qui leur permet d'effectuer un grand nombre de rotations avant de s'échapper (voir le document [2] pages 294/295 sur le sujet). Mais l'injecteur placé sur le plan central est susceptible d'être fréquemment percuté, lorsque le nombre d'électrons sera important. Et il n'y a pas de solution triviale pour y échapper.
- La méthode choisie par l'auteur est d'injecter les électrons, transversalement dans la bouteille magnétique, avec une vitesse purement azimutale mais depuis une certaine hauteur $Y_1 > 0$ et non pas au niveau du plan central ($Y=0$) du dispositif. La position d'injection par rapport au centre est telle que les électrons passent par l'axe. Le champ radial se chargera de faire descendre les électrons le long du dispositif jusqu'à l'altitude symétrique ($-Y_1$). Ensuite les électrons remonteront le dispositif jusqu'à l'altitude Y_1 et ceci périodiquement. Ainsi, le volume compris entre Y_1 et $-Y_1$ abritera les trajectoires des électrons. On aura, in fine, un nuage d'électrons grossièrement en forme de cylindre. Comme les électrons passent toujours par l'axe, la densité au centre sera un peu plus grande qu'ailleurs dans le nuage et le gradient suivant X et Y au niveau du centre de l'appareil sera un

peu plus grand que si la densité était homogène. Ceci est intéressant pour attirer préférentiellement les ions vers le centre du dispositif.

L'avantage de cette dernière méthode est qu'il y a une solution simple pour réduire le nombre de collisions avec l'injecteur, pendant et/ou après l'injection des électrons. Il s'agit de la compression adiabatique qui consiste à lentement augmenter le champ magnétique (de façon à garder le moment magnétique orbital à peu près constant sur une orbite). Au fur et à mesure que le champ magnétique va augmenter, le rayon des orbites va diminuer et la vitesse des électrons augmenter.

En effet, en supposant que B_0 , V_0 et U_{i0} soient, respectivement, les valeurs de départ du champ magnétique, de la vitesse azimutale et de la tension induite au centre du dispositif, donnant un rayon de Larmor initial $R_{l0} = m \cdot V_0 / (q \cdot B_0)$, on peut montrer que, pour B quelconque (et pour une charge d'espace négligeable):

- La vitesse azimutale $V = V_0 \cdot \sqrt{B/B_0}$. En fait, ceci ne vaut qu'en absence de correction relativiste.
Nota : dans le programme, les électrons sont soumis à la correction relativiste mais pas les ions dont la vitesse est faible.
- Le rayon de Larmor vaut : $R_l = R_{l0} \cdot \sqrt{B_0/B}$.
- La tension induite vaut $U_i = U_{i0} \cdot \sqrt{B/B_0}$ (du fait de la contraction du volume du nuage d'électrons).

Donc quand B augmente, la vitesse et la tension induite augmentent, le rayon de rotation (de Larmor) diminue ainsi que la hauteur du nuage d'électrons du fait de l'augmentation corrélative du champ radial (et donc de la force axiale sur les électrons).

Du fait de cette contraction du nuage d'électrons, l'injecteur va se trouver dégagé et donc le nombre de percussions de l'injecteur va diminuer.

A noter tout de même qu'à partir du moment où l'on arrête l'émission continue d'électrons, on peut compenser en injectant autant d'électrons que d'électrons perdus, de façon à maintenir constant le nombre d'électrons en circulation au moment où on arrête l'émission continue d'électrons. Ainsi on maintient le nombre d'électrons du nuage bien que les trajectoires ne soient plus idéales car elles ne passent plus par l'axe, du fait de l'augmentation de champ magnétique. Pour forcer les électrons à passer par l'axe, on pourrait augmenter corrélativement la vitesse d'injection des électrons (en tenant aussi compte de la charge d'espace) mais cela compliquerait le système. Cette nécessaire compensation et la charge d'espace entraînent que la compression adiabatique est loin d'être parfaite, mais elle réduit significativement le nombre de collisions sur l'injecteur.

In fine, on ne compensera pas le nombre d'électrons durant le test.

5. Principe de fonctionnement du réacteur

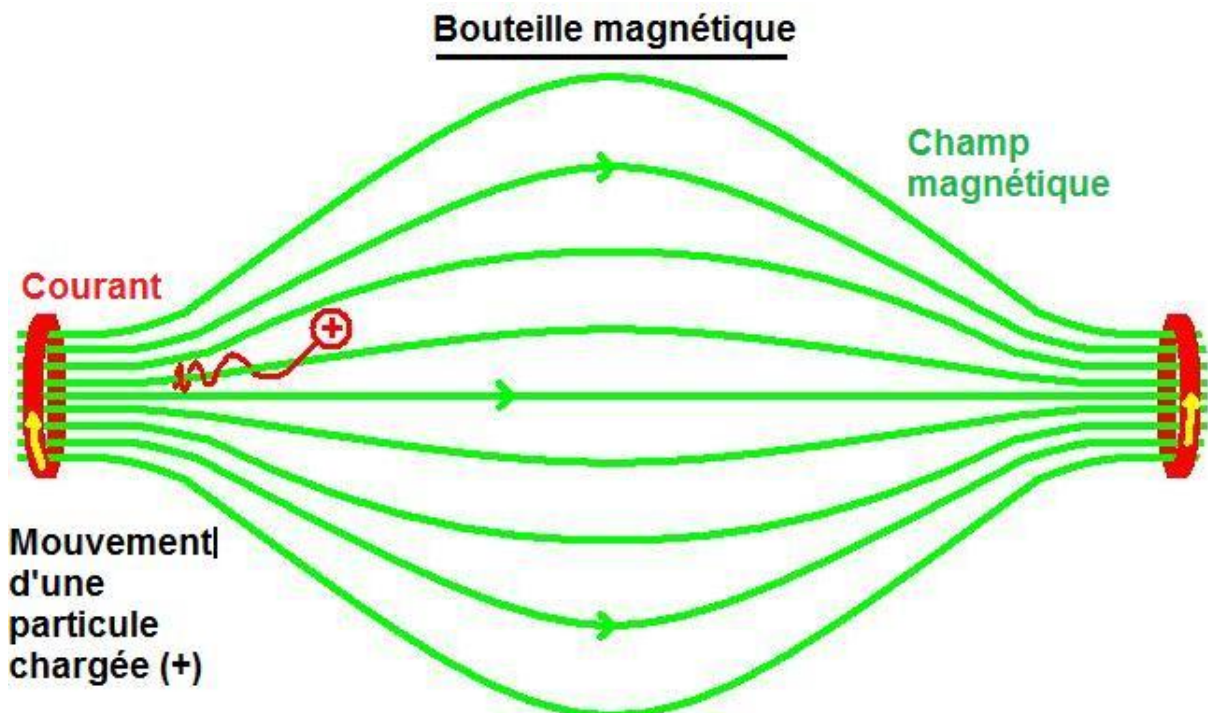
Le principe de base est le « Fusor » (voir la description sous Wikipédia) pour lequel on crée au centre de l'appareil sphérique, grâce une grille sphérique polarisée négativement, un potentiel négatif qui permet de faire circuler les ions et, avec une certaine probabilité, de les faire fusionner. Mais ici, la grille sphérique est remplacée par un nuage d'électrons, qui formant une charge d'espace, induit en son centre un potentiel négatif, comme sur le Polywell (voir la description sous Wikipédia, mais en anglais). L'avantage est que le nuage d'électrons est beaucoup plus transparent que la grille sphérique.

A la différence du Fusor et du Polywell, on privilégie une seule direction, celle de l'axe de la bouteille magnétique.

A la différence du Polywell, on utilise ici une simple bouteille magnétique et non une structure magnétique « 3D », à 6 solénoïdes, appelée « Magrid », où les champs des 2 solénoïdes dans chacune des trois directions sont en opposition (voir « Biconic cusp » sur Wikipédia).

A noter que dans une bouteille magnétique, les champs magnétiques des 2 solénoïdes vont dans le même sens.

Le réacteur est donc construit autour d'une bouteille magnétique (voir « Piège à miroirs magnétiques » sur Wikipédia » et « Magnetic mirror » sur Wikipédia en anglais). Ci-dessous, on trouvera un schéma de bouteille magnétique (de WikiHelper2134, image dans le domaine public) :



Commentaire sur l'image (de WikiHelper2134) (traduction) : cette image montre les lignes de champ magnétique (en 2D) à l'intérieur d'une bouteille magnétique. Chaque extrémité comporte un champ magnétique dense sur lequel les particules chargées peuvent être réfléchies. Les particules qui s'enroulent autour de ces lignes de champ magnétique, sont réfléchies et piégées. Elles peuvent s'échapper sous certains angles par rapport au champ magnétique.

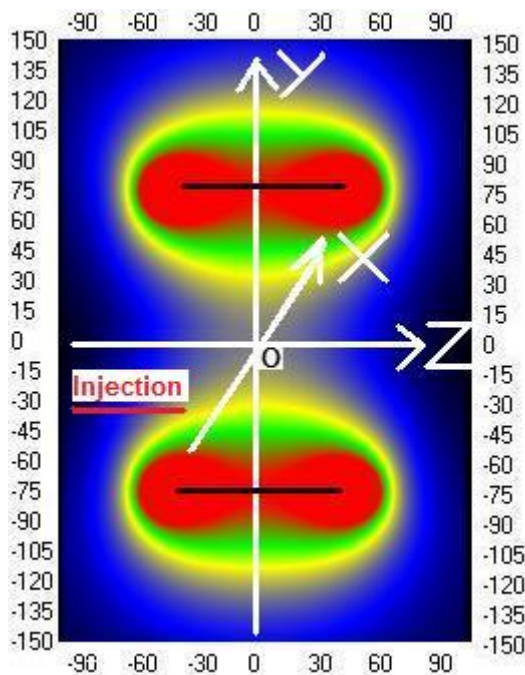
Pour une étude de ces bouteilles magnétiques, on se référera au livre en référence [3].

Pour des éléments historiques sur leur utilisation dans le domaine de la fusion, on se référera au livre en référence [6].

Le diamètre des solénoïdes est de 50 mm. La distance entre les 2 solénoïdes est de 75 mm. La valeur du champ magnétique initial au centre des solénoïdes est de 224 mT et de $224/3,02=74$ mT au centre de la bouteille. Il n'y a pas de solénoïdes intermédiaires car un champ constant au milieu de la bouteille n'est pas strictement nécessaire. A noter que cette ajout serait certainement intéressant (en allongeant la hauteur du plasma) mais il n'a pas été étudié par l'auteur.

Le champ magnétique de cette bouteille magnétique a la forme indiquée sur la figure suivante, avec le rouge pour le champ maximum autour des solénoïdes et le noir pour le champ magnétique minimum. On a également indiqué le repère direct utilisé, les solénoïdes par deux traits noirs et le tube d'injection des électrons par un trait rouge.

Dans l'exemple ci-dessous, le bout du tube permettant l'injection des électrons est à 30 mm du centre et à une hauteur (suivant Y) de 15 mm, donc aux coordonnées $X=-30$, $Y=15$, $Z=0$. Le tube de 20 mm est parallèle à l'axe Z (entre $Z=-21$ et $Z=-1$ à $X=-30$ et $Y=15$ constants).



Fonctionnement

Le pas de temps choisi pour la simulation est de 60 ps, ce qui correspond à une précision très médiocre mais acceptable.

Jusqu'à $t=120$ ns :

- On injecte des électrons en émission continue, depuis $Y=15$ mm, pour obtenir une tension induite de plus de -50 KV au centre de l'appareil.
- On augmente le champ magnétique (compression adiabatique) à un rythme de $x1,00072/pas$ (pour atteindre 945 mT à $t=120$ ns). Le nuage d'électrons va se contracter et la tension induite légèrement augmenter.
- On injecte symétriquement des ions (une paire D+/T+ par pas). L'ion D+ sera injecté sur l'axe, au point $Y=+20$, $X=Z=0$ tandis que l'ion T+ sera injecté symétriquement depuis le point $Y=-20$, $X=Z=0$. Les ions sont initialement accélérés à 1 kV. L'intensité des ions (1 mA) est bien plus faible que celle des électrons (1 A) et ne modifiera que très faiblement le potentiel induit par les électrons.

A $t=120$ ns, on arrête l'émission continue d'électrons et l'augmentation du champ magnétique. A noter qu'à ce moment, l'injecteur est suffisamment dégagé, On laisse en service l'injection des ions.

La densité des ions va lentement augmenter et les ions vont commencer à fusionner. A noter que les ions, du fait de leur masse comparée à celle des électrons, sont très peu sensibles au champ magnétique.

A $t=600$ ns, on arrête la simulation.

6. Pression du gaz

La pression du gaz (D2) doit être la plus faible possible. C'est juste une gêne puisque les fusions visées sont uniquement celles entre les noyaux des ions, mais aucunement celles entre noyau d'un ion et noyau d'un neutre.

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 μ Pa 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.

On a supposé, par défaut, une pression de 40000 pPa qu'il est possible d'obtenir (mais difficilement).

7. Rayonnement

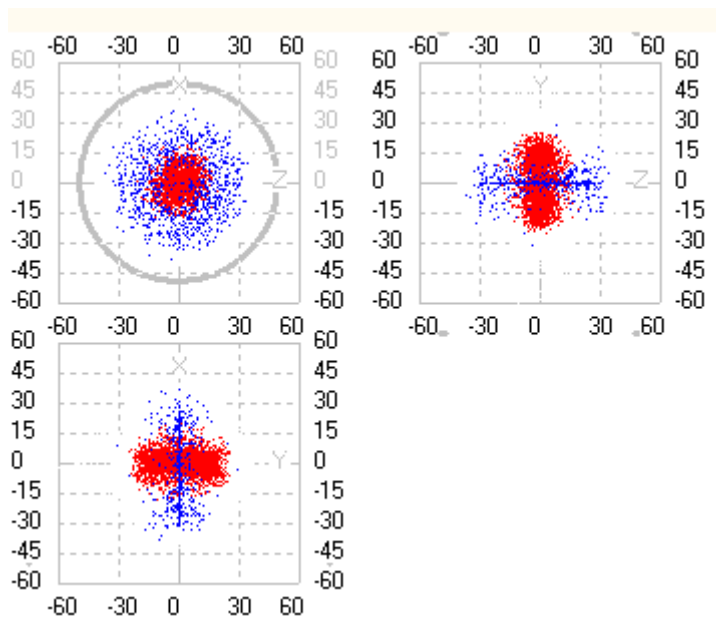
Les interactions (par excitation) produisant un rayonnement ne sont prises en compte par le programme.

Par ailleurs, ces simulations ignorent le Bremsstrahlung (rayonnement de freinage) et le rayonnement synchrotron. La puissance relative de ces rayonnements est négligeable pour la fusion D+/T+ (voir, à ce sujet, le document en référence [5] pages 42 et 43).

8. Résultats de la simulation pour des fusions D+/T+ à la pression de gaz de 40000 pPa et conclusion

Après de nombreuses expérimentations, l'auteur a déterminé une configuration jugée correcte et fait un test sur celle-ci.

La copie d'écran suivante indique ce que l'on a au niveau des faisceaux d'ions (en rouge) et d'électrons (en bleu) à l'arrêt de la simulation. Les électrons sont relativement concentrés sur un disque au centre de l'appareil (à Y=0). Les ions sont peu confinés radialement.



L'efficacité est très faible, autour de $7E-9$, due au faible nombre de fusions et à la perte non négligeable d'électrons, principalement due aux collisions sur l'injecteur.

Le confinement des ions n'est pas très bon car le gradient radial n'est pas suffisant (<1000 V/mm), ce qui explique le faible nombre de fusions.

A noter que le calcul utilise un pas de temps (60 ps) beaucoup trop grand pour la simulation des électrons (mais bien pour la simulation des ions), ce qui dégrade la

précision du calcul et le rend très pessimiste. Mais on ne peut pas faire autrement, pour ne pas dépasser une journée de simulation.

Même avec une telle dégradation du calcul, on peut conclure qu'une telle voie ne permet pas d'atteindre une efficacité de 1.

Les différents paramètres et résultats utilisés dans cette simulation ne peuvent être donnés car il y en a trop. De plus, ils ne sont pas très importants car le but ici est juste de donner une idée sur cette possibilité de fusion.

Mais, pour information, il est affiché, en page suivante, une copie d'écran de la fenêtre principale.

Fenêtre "Graphe"

Paramètres de la simulation d'émission des particules

Pas de temps (ps): 1 | 2 | 3 | 6 | 10 | 20 | 30 | 60 | 100 | 150 | 200 | 300 | 600 | 1000 | 3000

Affichage des particules: Electrons (bleu) | Ions (rouge) | Neutres (vert) | Tous

Affichage de la position des particules: Aucun | Tous | Sur une couche de 5 pixels | Sur le plan | Dernière position

Emission continue | Charge d'espace

Limite (en paquets d'électrons émis et donc en pas): En 2000 | Avec maintien à limite 0 | Augmentation linéaire de M+Q x1

Limite (pas): En 4300 | En 10000 | x100 | x500

Augmentation du champ magnétique par K/pas: En K=1.00072 | B en mT: 945 | Depuis le pas: 0 | Jusqu'à: 2000

Limites (en pas) d'injection des ions: Départ 0 | Arrêt 2700 | Charge d'espace 1/1 | 1/2 | 1/5 | 1/10

x S collision (et x effet): 0 | 1 | 10 | 100 | 1E3 | 1E4 | 1E5 | 1E6 | 1E7

x S échange de charge: 1 | 1E2 | 1E4 | 1E6 | 1E8 | 1E10 | 1E11 | 1E12

Nombre de sous-pas (pour électrons): 6 | Cinématique seule

x S fusion: 1 | 1E2 | 1E3 | 1E4 | 1E5 | 1E6 | 1E7 | 1E8 | 1E9 | 1E10 | 1E11 | 1E12

Nombre de sites d'émission sur la cathode: 1 / Surface de la cathode: 1 pixel² | Courant cathode: 1000.000 mA | Courant ions: 1 mA x 2

Simulation

Marche | Pause | **Arrêt**

Paquets d'électrons primaires/ions/électrons secondaires créés ou émis: 2000 | 3998 | 0

Nombre de paquets en déplacement (max: 50000): 5423 | N=9983 | n=201

Paquets d'électrons en déplacement: 1425 | Paquets d'ions et neutres en déplacement: 3998/0 | Paquets de neutres créés par E.C.: 0

Paquets d'électrons sortis du cadre: 11 | Paquets d'ions et de neutres sortis du cadre: 0/0 | Paquets d'ions créés par ionisation: 0 | Paquets d'électrons créés: 0

Paquets d'électrons perdus sur élec.: 564 | Paquets d'ions et neutres perdus sur électrodes: 0/0 | Nombre de noyaux fusionnés: 144.473938 | Paquets d'ions/neutres fusionnés: 0

Exportation coupe Numéro: 10000 | Passé: 78194 s | Simulé: 600.000 ns

Fin de la simulation par atteinte de la limite spécifiée

Données physiques

Vitesse maximum (km/s) (ions)	2421.2	EI-N Elastique	3.7E-0007 / 0
V. moyenne suivant x (kms/s) (ions)	218.1	EI-N Excitation	5.3E-0006 / 0
V. moyenne suivant y (kms/s) (ions)	921.0	EI-N Ionisation	5.3E-0006 / 0
V. moyenne suivant z (kms/s) (ions)	205.8	N-N Elastique	1.0E-0005 / 0
Dépl. max. élect./ions (<0,5)	2.885 / 0.145	N-N Ionisation	0 / 0
Qualité du calcul(%)=f(déplacement)	69.91	N-N loss electron	0 / 0
Energie moy. (KeV) EI/ions	616.064 / 10.561	I-N Elastique	1.0E-0005 / 0
d. min/max	0.19 / 32.05	I-N Echange charge	1.1E-0001 / 78170
		I-N Ionisation	1.5E-0006 / 0
		I Coulomb.	2.6E-0002/14520 s0= 2.5E-0003
		I-N-I Fusion	4.1E-0003/1929 Sig-v 3.8E-0023
		I-N-N Fusi.	6.8E-0006/0 Sig-v 2.2E-0024
		Puissance électrique (W)	4.679E+0004
		Energie électrique (J)	2.807E-0002
		Hc: 0.0% Ei>0: 0.0% Ei=0:100.0%	
		Fu: 0.0% Ce: 0.0% Co: 0.0%	
		Puissance de fusion (W)	3.389E-0004
		Energie de fusion (J)	2.034E-0010
		Rapport E. fus./E. élec.	7.244E-0009

Pas=9500 Pf(W)= 0.00001 R=0.01990
DeltaN ions=0 E(KeV)/ion= 0.000

10 dmin/dmax= 0.00/ 41.72 Ep.= 35.60
Fus./Noy=1929/ 144.474

Pas=10000 Pf(W)= 0.00002 R=0.04580
DeltaN ions=0 E(KeV)/ion= 0.000

Fusionnés: 0 (0.000%)

20034 V Perite=17.30 % t=60002 s Grad X=+1302 V/mm
Pas=9000 Vol.=96638.98 mm3 Cha.=9.28E-0008 C Umax=75399 V Uk=-25455 V Perite=22.65 % t=69159 s Grad X=+868 V/mm
Pas=10000 Vol.=102943.87 mm3 Cha.=8.55E-0008 C Umax=73163 V Uk=-23606 V Perite=28.75 % t=78184 s Grad X=+988 V/mm

Nombre de paquets d'électrons émis ou reçus par chaque électrode

Nombre de paquets d'électrons	Hors du cadre: 11 (0.550%)
Nombre de paquets d'ions (+ neutres)	Vers l'anode 2: 516 (25.800%)
Emis+créés: 2000 (100%)	
Vers la cathode: 48 (2.400%)	
En déplacement: 1425 (71.250%)	

9. Références

[1] « Etude de la capture temporaire d'un faisceau d'électrons dans une configuration magnétique à miroirs » par Jean Jacques Gourden
Rapport CEA-R-3568 / EUR-3870 f

[2] « Etude des trajectoires d'ions dans une configuration magnétique à miroirs – Première partie. Possibilité de capture temporaire par une configuration magnétique d'une particule chargée provenant de l'extérieur » par C. Gourdon
J. Phys. Radium, 1962, 23 (5), pp.291-296. <10.1051/jphys-rad:019620023005029100>. <jpa-00236628>

[3] « Plasmas collisionnels » de Michel Moisan et Jacques Pelletier

[4] Cours d'électrostatique - http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/physique-electrecite1/html/tome%201/chap2/III_4.htm

[5] "A general critique of inertial-electrostatic confinement fusion systems » de Todd H. Rider

[6] "Project Sherwood – The U.S. program in controlled fusion » de Amasa S. Bishop

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