

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

Copyright © 2018

Patrick Lindecker

Maisons-Alfort (France)

22 juillet 2018

Révision B

SOMMAIRE

Page

| | |
|--|----|
| 1. But, présentation et notations utilisées | 3 |
| 2. Description du réacteur LKR1 | 4 |
| 3. Simulation des fusions $D^+ \leftrightarrow D^+$ | 6 |
| 4. Simulation des fusions $D_2^+ \leftrightarrow D_2^+$ | 13 |
| 5. Simulation des fusions $D^+ \leftrightarrow T^+$ | 16 |
| 6. Simulation des fusions $D_2^+ \leftrightarrow T_2^+$ | 19 |
| 7. Problème du confinement | 22 |
| 8. Eléments de solution | 23 |
| 9. Principes de fonctionnement générale du réacteur | 26 |
| 10. Choix de la meilleure configuration et résultats | 27 |
| 11. Nouvelle solution de réacteur et de cycle de fonctionnement | 30 |
| 12. Exemples de simulation pour les deux premières phases, résultats et commentaires | 35 |
| 13. Conclusion | 37 |
| 14. Références (pour ce document et Multiplasma) | 38 |
| Annexe 1 : Calcul de l'efficacité globale E_g | 41 |

Révision B:

- Remplacement du terme « rendement » par « efficacité » pour éviter une ambiguïté (partout).
- Ajout du système de récupération sur le schéma de principe final (§11.1).
- Source chaude et produits de fusion (§12.5)
- Précisions (§3.1)
- A propos des fusions aneutroniques (§ 12.3)

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 avec une efficacité (énergie cinétique des produits de fusion / énergie électrique consommée) supérieure à 1.

Cette présentation s'appuie sur le logiciel Multiplasma (en français et en anglais) développé par l'auteur. Multiplasma permet la simulation d'un tel réacteur. Il est proposé au téléchargement en « gratuit » (« freeware »):

http://f6cte.free.fr/MULTIPLASMA_setup.exe.

Eventuellement, voir l'article destiné aux utilisateurs:

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

Le premier réacteur étudié, sous le nom de « LKR1 », est un réacteur simple dont le confinement est fait grâce à une seule lentille électrostatique. Il permettra de présenter les différents types de fusion gérés par Multiplasma.

Dans ce qui suit, il est donc présenté la description de ce réacteur puis un résumé de différentes simulations faites sur ce réacteur, qui permettent de hiérarchiser l'intérêt des types de fusion.

Il est ensuite proposé un réacteur un peu amélioré sous le nom de « LKR1m ». Il permettra de présenter quelques améliorations utiles pour la suite, quelques calculs et un début de conception.

Il est finalement présenté une solution aux problèmes décrits antérieurement et, finalement, une proposition de réacteur avec son cycle de fonctionnement.

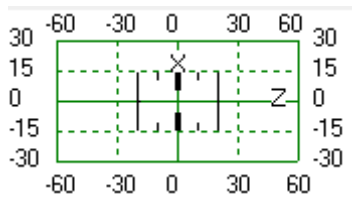
Deux tests finaux permettent de mettre en évidence l'intérêt de cette solution.

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

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).

2. Description du réacteur LKR1



Par la suite, on supposera que « un pixel = 1 mm » (valeur par défaut, mais pouvant être modifié entre 0,1 et 10 mm). Donc, on parlera de mm au lieu de pixel.

Le réacteur LKR1 (inspiré des références [15] et [38]) est composé de 5 électrodes et d'une source d'ions:

- une rondelle centrale de 3 mm d'épaisseur et de diamètres intérieur et extérieur respectivement de 10 et 28 mm. Cette électrode est appelée par la suite « électrode centrale »,
- 2 rondelles disposées symétriquement, de 1 mm d'épaisseur et de diamètres intérieur et extérieur respectivement de 20 et 28 mm, situées à une distance de 10 mm de la rondelle centrale. Ces électrodes sont appelées par la suite « électrodes intermédiaires »,

Nota: l'électrode centrale et ces deux électrodes intermédiaires forment une lentille électrostatique dite de "Einzel", destinée à focaliser le faisceau d'ions.

- 2 disques disposés symétriquement, de 1 mm d'épaisseur et de 28 mm de diamètre, situés à une distance de 20 mm de la rondelle centrale. Ces électrodes sont appelées par la suite « électrodes terminales »,

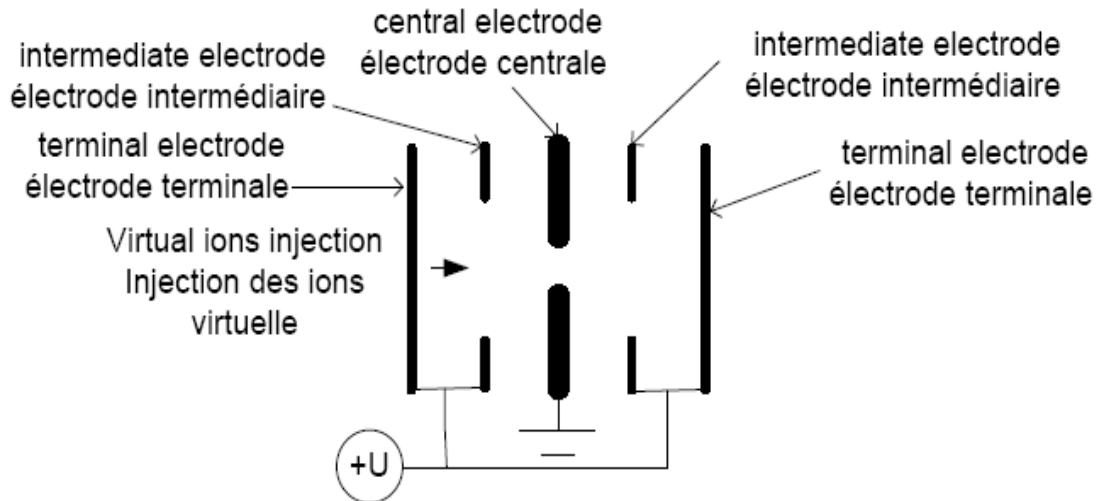
Nota sur le fonctionnement: ces électrodes de potentiel positif par rapport à l'électrode centrale repoussent les ions (de charge positive) vers l'électrode centrale. Les ions se mettent alors à circuler sans fin entre ces 2 électrodes terminales avec une fréquence bien définie, un peu comme dans un 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).

- une source d'ions située à une distance de 15 mm de la rondelle centrale. Elle fait 1 mm^2 vis-à-vis de la densité de courant en A/cm^2 (donc le courant en A vaut ici $1/100^{\text{ème}}$ de la densité de courant). On peut considérer que l'émission des ions se fait, aléatoirement depuis une surface circulaire de rayon 0,5 mm, suivant les lois applicables aux cathodes chaudes. C'est-à-dire que la distribution des vitesses suit une distribution de Maxwell-Boltzmann et les électrons partent de la « cathode » dans n'importe quelle direction (mais à Z croissant), avec:
 - la colatitude calculée suivant la loi en cosinus de Lambert, cosinus mesuré par rapport à la normale à la surface,
 - la longitude calculée suivant une distribution uniforme.

La source d'ions est supposée « virtuelle » (sans influence électrostatique et sans possibilité de collision avec les ions). C'est une hypothèse théorique, pratique mais non réalisable dans la réalité.

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

Preliminar diagram of the reactor Schéma préliminaire du réacteur



3. Simulation des fusions D+ <-> D+

Objectifs en terme d'efficacité

- L'objectif minimum est que l'énergie cinétique des produits de fusion produite par le réacteur soit supérieure à l'énergie électrique consommée (efficacité>1).
- Un objectif plus ambitieux est de produire plus de 3,333 fois plus d'énergie cinétique que d'énergie électrique consommée (efficacité>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).

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

Généralités

Toutes les simulations ont été faites sur 10000 pas de temps pour deux raisons :

- pour limiter le temps de calcul,
- pour pouvoir maintenir le confinement sur ce court laps de temps.

Toutes les simulations ont été faites avec une ancienne version du logiciel (qui est optimiste au niveau de l'efficacité). Même si ce n'est pas la dernière version du programme (et donc pas la plus précise), elle permet, cependant, de hiérarchiser les différents comportements et de voir les problèmes de ce type de réacteur.

La durée d'injection est définie par $Nos \times Tsp$, avec:

- le nombre de pas de temps (Nos) durant lequel les ions sont injectés. Il correspond ici au nombre de paquets d'ions injectés. La durée $Nos \times Tsp$ doit correspondre au temps nécessaire pour qu'un ion fasse un nombre entier d'allers-retours,
- le pas de temps (Tsp) en ps est défini pour avoir plus ou moins le même « déplacement maximum » à chaque test (et donc avoir à peu près la même précision et un temps de calcul raisonnable).

La durée du test est égale à $10000 \text{ pas de temps} \times Tsp$. Elle n'est pas égale pour tous les tests parce que Tsp varie d'un test à l'autre. Ceci rend les résultats des tests sur les tensions entre 1 à 10 MV légèrement pessimistes du fait d'un plus grand pas de temps.

La densité de courant est la valeur maximum possible:

- pour la tension (U),
- pour la durée d'injection ($Nos \times Tsp$).

On peut dire que ces tests donnent pour un ensemble de tensions, la charge électrique maximum (Q) que le réacteur peut confiner durant un temps limité. Pour la charge Q, voir plus loin.

3.1 Résultats de la simulation pour des fusions $D+ \leftrightarrow D+$ 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 jusqu'à 3,845 puis décroît.

Pour ce qui est des limites de E et de P quand U tend soit vers 0 soit vers une très grande valeur :

- quand U tend vers 0, la section efficace de fusion tend vers 0 et donc E et P tendent vers 0,
- quand U tend vers une très grande valeur, l'efficacité tend vers 1, puisque l'énergie électrique perdue et le gain d'énergie lié à la fusion tendront vers la même valeur soit l'énergie cinétique des particules fusionnant. P tend vers une valeur maximum pendant un court instant avant de diminuer avec le temps.

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.

A noter que la puissance P dépend du nombre d'ions dans le réacteur et donc de la charge de ces ions. Cette charge Q est égale à I (le courant en A) x la durée d'injection.

Le courant est égal au produit de la densité de courant Cd (A/cm^2) par la surface d'émission (Se en cm^2).

Cette durée d'injection est égale au produit de la durée du pas de temps (« Tsp ») par le nombre de pas durant lequel a lieu l'émission d'ions (« Nos »).

Donc $Q = K' \times Se \times Cd \times Tsp \times Nos$ (K' est une constante)

Par ailleurs, on sait que le nombre de fusions dépend de l'énergie cinétique des ions dans leur parcours dans le réacteur en fonction de la section efficace de fusion de $D+ \leftrightarrow D+$. Ces deux paramètres (énergie cinétique et section efficace) dépendent de la tension U sur les électrodes (en moyenne). Donc on peut supposer que $P = K'' \times Q \times U^n$ (K'' est une constante). Entre 5 et 20 MV (E étant approximativement constant), on trouve que n vaut environ 1,361.

On trouve finalement : $P = 3,24 E^{-20} \times Se \times Cd \times Tsp \times Nos \times U^{1,361}$ (avec « Ex » pour « 10^x »)

Il s'agit d'une formule approximative pour l'interaction $D+ \leftrightarrow D+$, dans la zone d'efficacité maximum.

Nota 1 : la puissance de fusion P est optimiste car le calcul a été fait en Précision « bonne » et non « Très bonne ».

Nota 2 : ceci ne vaut que pour la faible durée correspondant à 10000 pas de temps ($\ll 1 \mu\text{s}$). Au-delà, on perd le confinement (et donc une partie de l'énergie dépensée pour accélérer les ions).

Note 3: pour aussi limiter le temps de calcul, le pas de temps a été fixé à 6 ps pour les tensions de 30, 35 et 40 MV, ce qui dégrade la précision pour ces tensions.

Nota 4 : dans la réalité il faudrait prendre en compte la pression statique qui s'exerce entre les électrodes. En effet, les charges sur les deux rondelles extérieures et les disques sont à un potentiel très important. Elles sont attirées par l'électrode centrale qui est à 0V. On peut estimer grossièrement cette force d'écrasement en considérant qu'un disque et l'électrode centrale forment un condensateur plan. Il s'exerce alors une pression statique P_s que l'on peut estimer à $P_s = U^2 / 2 \times \epsilon / d^2$ (U : tension entre électrodes, ϵ : permittivité de l'isolant et d la distance entre disque et électrode centrale).

Pour une tension de 20 MV la pression d'écrasement est de l'ordre 4,4 E6 Pa soit 44 bars...

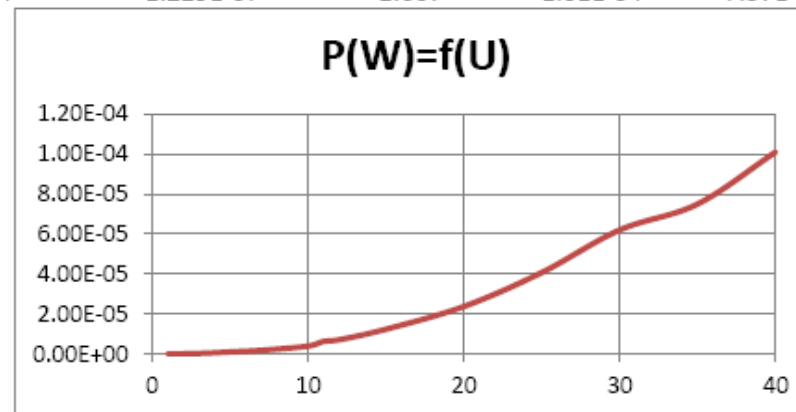
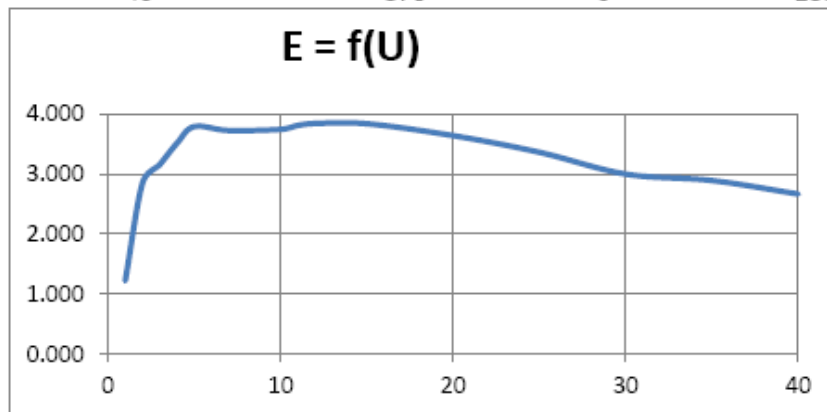
Nota 5: dans ce document et dans le logiciel Multiplasma, on ne tient pas compte du rayonnement de freinage ("Bremsstrahlung"), car une simple application numérique avec la formule de Larmor appliquée aux ions en constante accélération et décélération montre que la puissance radiative reste négligeable dans la gamme de tensions ($U \leq 125$ MV) utilisée, par rapport à la puissance de fusion.

Nota 6: il est à noter que Multiplasma inclut l'énergie cinétique E_k des ions fusionnant dans :

- l'énergie globale de fusion, par exemple :
 $D^+ + T^+ (+E_k) \rightarrow He^{4+} + n (+17.6 \text{ MeV} + E_k)$
- l'énergie électrique consommée.

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

| Voltage on electrodes / Tensions sur les électrodes U (MV) | Current density / Densité de courant Cd (A/cm2) | 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) |
|---|---|---|--|--------------|----------------------------|---|--|
| 1 | 10 | 20 | 791 | 1.582E-09 | 1.216 | 6.31E-09 | -3.30E-09 |
| 2 | 20 | 20 | 562 | 2.248E-09 | 2.848 | 2.37E-08 | -1.21E-09 |
| 3 | 50 | 20 | 925 | 9.250E-09 | 3.159 | 2.05E-07 | -3.39E-09 |
| 4 | 95 | 10 | 1587 | 1.508E-08 | 3.515 | 5.25E-07 | 8.14E-09 |
| 5 | 150 | 10 | 1427 | 2.141E-08 | 3.793 | 9.68E-07 | 3.52E-08 |
| 7 | 205 | 10 | 1214 | 2.489E-08 | 3.728 | 1.77E-06 | 5.62E-08 |
| 10 | 230 | 10 | 1535 | 3.531E-08 | 3.747 | 3.85E-06 | 1.28E-07 |
| 11 | 310 | 6 | 2424 | 4.509E-08 | 3.812 | 6.21E-06 | 2.34E-07 |
| 12 | 320 | 6 | 2327 | 4.468E-08 | 3.845 | 7.05E-06 | 2.81E-07 |
| 15 | 470 | 6 | 2099 | 5.919E-08 | 3.841 | 1.23E-05 | 4.88E-07 |
| 20 | 540 | 6 | 2457 | 7.961E-08 | 3.642 | 2.37E-05 | 6.03E-07 |
| 25 | 620 | 6 | 2798 | 1.041E-07 | 3.364 | 4.07E-05 | 1.11E-07 |
| 30 | 750 | 6 | 2609 | 1.174E-07 | 3.000 | 6.20E-05 | -2.07E-06 |
| 35 | 770 | 6 | 2466 | 1.139E-07 | 2.892 | 7.50E-05 | -3.43E-06 |
| 40 | 870 | 6 | 2354 | 1.229E-07 | 2.667 | 1.01E-04 | -7.57E-06 |



3.2 Résultats de la simulation pour des fusions $D+ \leftrightarrow D+$ 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 540 A/cm^2 , 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.

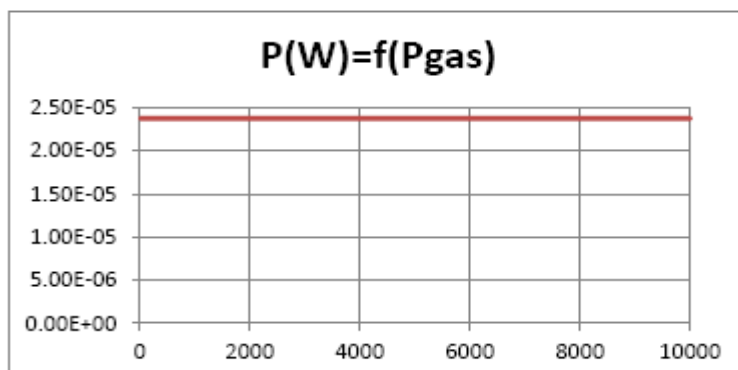
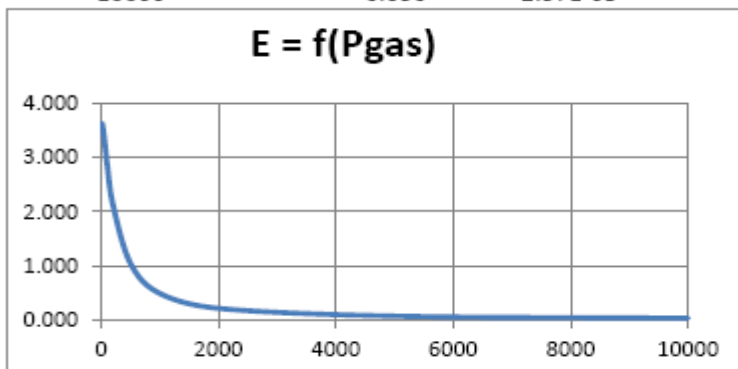
Le tableau suivant résume les résultats obtenus. On voit qu'il faut moins de 50 pPa de gaz pour dépasser l'efficacité minimum de 3,333. La puissance de fusion est stable car elle ne dépend des fusions Ions-Neutre que de manière infime.

Study of E and $P = f(P_{\text{gas}})$, for $D+ \leftrightarrow D+$ / Etude de E et $P = f(P_{\text{gaz}})$, pour $D+ \leftrightarrow D+$

All tests done at 20MV Cd=540 A/cm²

Tous les tests faits à 20 MV Cd=540 A/cm²

| Gas pressure / Pression du gaz P_{gas} (pPa) | Yield / Efficacité E | Fusion power / Puissance de fusion P (W) |
|---|----------------------------|---|
| 10 | 3.642 | 2.37E-05 |
| 20 | 3.589 | 2.37E-05 |
| 50 | 3.341 | 2.37E-05 |
| 100 | 2.850 | 2.37E-05 |
| 200 | 2.108 | 2.37E-05 |
| 500 | 1.033 | 2.37E-05 |
| 1000 | 0.486 | 2.37E-05 |
| 2000 | 0.211 | 2.37E-05 |
| 5000 | 0.068 | 2.37E-05 |
| 10000 | 0.030 | 2.37E-05 |



3.3 Résultats de la simulation pour des fusions D+ <-> D+ à long terme

Le but est d'avoir une configuration qui soit stable dans le temps, sans perte de confinement. Les précédentes simulations ont été réalisées sur une période assez courte (10000 pas de temps) et en précision « Bonne » et non « Très bonne », car les temps de calcul sont longs.

En partant de la « meilleure » solution déterminée précédemment soit une tension de 20 MV et une densité de courant de 540 A/cm^2 , on va laisser aller la simulation jusqu'à la perte du confinement. De plus la simulation sera faite en précision « Très bonne », ce qui va vers une augmentation nette de la prise en compte de la charge d'espace.

Le test a été réalisé sans correction de vitesse. On atteint 14770 pas ($0,0886 \mu\text{s}$), le confinement étant perdu du fait de la collision d'un paquet d'ions avec une des électrodes.

Donc ce réacteur sous cette forme ne permet pas d'atteindre le temps de confinement long nécessaire.

En effet, compte-tenu de la vitesse de perte des ions par fusion (5,79 ions pour la période de confinement de $0,0886 \mu\text{s}$), il faudrait, à ce rythme, pour consommer les $5E11$ ions présents dans le réacteur, environ 7600 sec de confinement...

3.4 Evolution de la puissance produite par fusion en fonction de la taille du réacteur

A titre d'exemple, on supposera, par la suite, que l'utilisateur élargit sa configuration en multipliant chaque dimension (x, y et z) par un facteur R que l'on supposera égal à 10. Donc un pixel vaudra 10 mm

En premier lieu, on peut noter que la limite au confinement est principalement due à la charge d'espace.

Or l'influence de la charge d'espace sur le potentiel induit dépend linéairement des charges (Coulomb) et de l'inverse de la distance entre les charges. Donc pour garder le même effet de charge d'espace, chaque charge doit être multipliée par R, pour compenser le facteur $1/R$ dû à la distance entre charges.

Comme le pas de temps T_{sp} doit être multiplié par R (pour avoir la même évolution de vitesse), il s'ensuit que la densité de courant C_d doit être divisée d'un facteur R^2 pour compenser la multiplication de S_e d'un facteur R^2 (l'intensité est alors conservée). La charge sera R fois plus grande (on rappelle que $Q = K' \times S_e \times C_d \times T_{sp} \times N_{os}$). Dans ce cas, l'effet de charge d'espace sera similaire.

Par ailleurs, on peut montrer que la probabilité de collision et de fusion ainsi que la puissance de fusion P seront divisées par R.

Donc plus on augmente la taille du réacteur et plus on réduit la puissance de fusion fournie (ce qui est paradoxal). Inversement, plus on réduit la taille du réacteur et plus on augmente la puissance de fusion (autrement dit $P \sim 1/R$, toutes choses égales par ailleurs)

On peut le montrer sur une simulation. En réduisant la taille d'un facteur 10, on

trouve pour un des cas vus précédemment (à 10 MV), sur 10000 pas:

- Initialement avec 1 pixel=1 mm, $U=10$ MV, $Cd=230$ A/cm² (donc $I=2.3$ A),
Tsp=10 ps, Nos=1535 pas : $R=3,747$ et $P=3,85E-6$ W
- Maintenant avec 1 pixel=0,1 mm, $U=10$ MV, $Cd=23000$ A/cm² (donc $I=2,3$ A),
Tsp=1 ps, Nos=1535 pas, on trouve : $R=4,285$ et $P=5,661E-5$ W

On voit que le rapport entre les puissances est de 15 au lieu de 10 (sûrement du fait du nombre limité de pas). Il confirme, en tout cas, que plus le réacteur est petit et plus il est puissant.

3.5 Tests de collision accélérée pour des fusions D+ <-> D+ dans un gaz à 10 pPa

On veut savoir comment réagit le confinement si l'on augmente la probabilité de collision. On va tester sur 6000 pas. En partant de la « meilleure » solution déterminée précédemment soit une tension de 20 MV et une densité de courant de 540 A/cm², on va augmenter la probabilité de collision d'un facteur croissant entre 1 à 1E9.

On constate que le confinement se dégrade mais n'est pas perdu à un facteur de 1E9. Cela signifie que la durée probable « t » sans perte de confinement due aux collisions, dans un gaz à une pression de 10 pPa, serait de $t \geq 6 \times 6000 \times 1E9 = 3,6 E13$ ps soit 36 s.

A défaut d'être précis, ce test donne une idée de la durée de confinement dans l'hypothèse où il n'y aurait que le problème des collisions, donc en ignorant l'effet de la charge d'espace.

4. Simulation des fusions D2+ <-> D2+

4.1 Résultats de la simulation pour des fusions D2+ <-> D2+ 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).

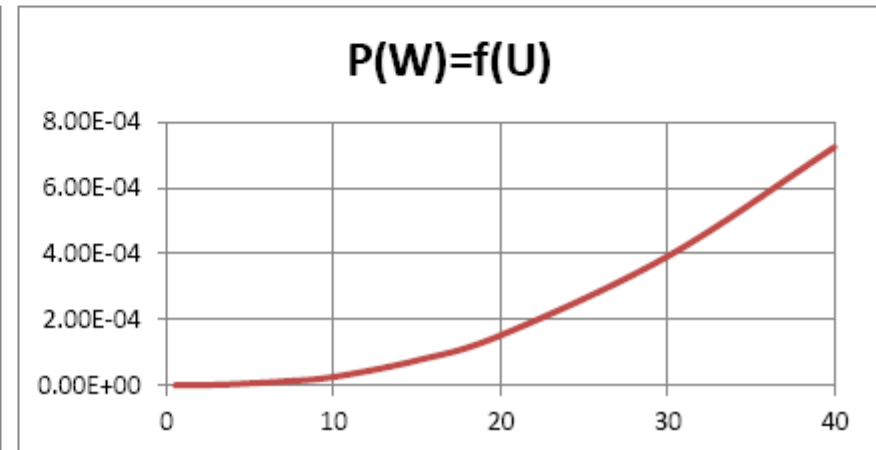
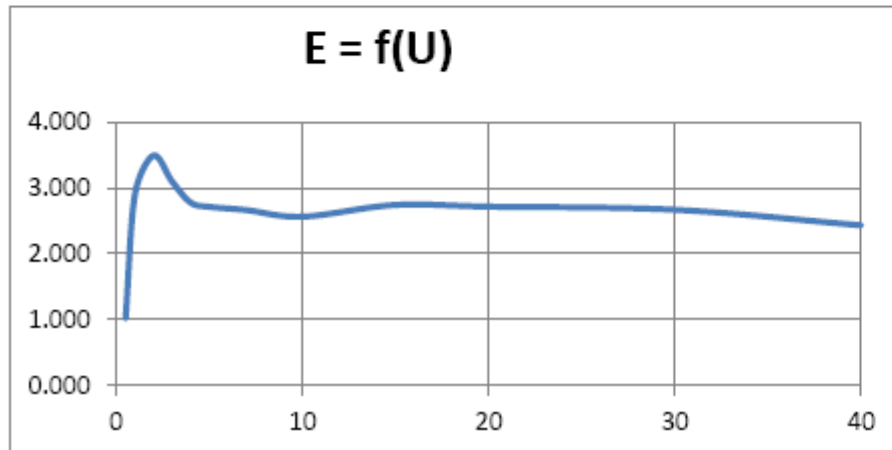
Par rapport aux fusions $D+ <-> D+$, on peut noter que :

- le maximum d'efficacité se trouve à 2 MV et non à 15 MV,
- par contre, pour une même tension on a environ 6 fois plus de puissance de fusion,
- la seule tension pour laquelle la puissance exploitable est positive est 2 MV.

Pour une efficacité supérieure à 3,333, il est évident que les fusions $D+ <-> D+$ sont plus favorables. Mais si l'efficacité minimum était de 2 (au lieu de 3,333), par exemple, toute l'analyse serait différente.

Study of E and P = f(U) for D2+ <-> D2+ at Pgas=10pPa / Etude de E et P = f(U) pour D2+ <-> D2+ à Pgas=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 | 3 | 30 | 1053 | 9.477E-10 | 1.016 | 1.88E-09 | -1.29E-09 |
| 1 | 8 | 20 | 1119 | 1.790E-09 | 2.899 | 1.98E-08 | -8.89E-10 |
| 2 | 25 | 20 | 794 | 3.970E-09 | 3.499 | 1.57E-07 | 2.23E-09 |
| 3 | 40 | 20 | 1308 | 1.046E-08 | 3.102 | 1.01E-06 | -2.27E-08 |
| 4 | 70 | 10 | 2244 | 1.571E-08 | 2.781 | 2.76E-06 | -1.65E-07 |
| 5 | 110 | 10 | 2019 | 2.221E-08 | 2.717 | 5.48E-06 | -3.73E-07 |
| 7 | 160 | 10 | 1718 | 2.749E-08 | 2.667 | 1.13E-05 | -8.44E-07 |
| 10 | 185 | 10 | 2171 | 4.016E-08 | 2.567 | 2.49E-05 | -2.23E-06 |
| 15 | 350 | 6 | 2968 | 6.233E-08 | 2.746 | 7.52E-05 | -4.83E-06 |
| 20 | 440 | 6 | 3474 | 9.171E-08 | 2.720 | 1.52E-04 | -1.02E-05 |
| 30 | 640 | 6 | 3690 | 1.417E-07 | 2.672 | 3.92E-04 | -2.91E-05 |
| 40 | 840 | 6 | 3330 | 1.678E-07 | 2.435 | 7.25E-04 | -8.02E-05 |



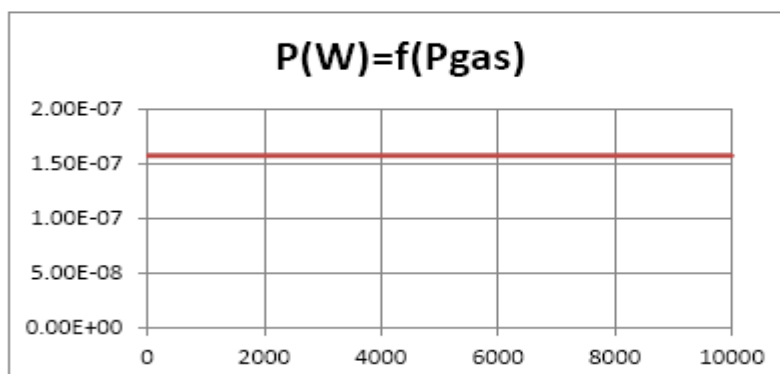
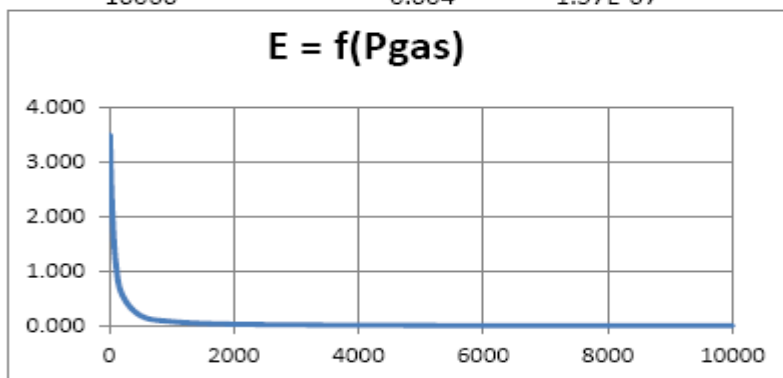
4.2 Résultats de la simulation pour des fusions $D2+ \leftrightarrow D2+$ à différentes pressions de gaz

On va partir de la « meilleure » solution déterminée précédemment soit une tension de 2 MV et une densité de courant de 25 A/cm^2 , 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 rester à 10 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 $D2+ \leftrightarrow D2+$ / Etude de E et P = f(Pgaz), pour $D2+ \leftrightarrow D2+$
All tests done at 2 MV Cd=25 A/cm2
Tous les tests faits à 2 MV Cd=25 A/cm2

| Gas pressure / Pression du gaz Pgas (pPa) | Yield / Efficacité E | Fusion power / Puissance de fusion P (W) |
|---|----------------------------|---|
| 10 | 3.499 | 1.57E-07 |
| 20 | 2.943 | 1.57E-07 |
| 50 | 2.011 | 1.57E-07 |
| 100 | 1.178 | 1.57E-07 |
| 200 | 0.583 | 1.57E-07 |
| 500 | 0.189 | 1.57E-07 |
| 1000 | 0.080 | 1.57E-07 |
| 2000 | 0.032 | 1.57E-07 |
| 5000 | 0.010 | 1.57E-07 |
| 10000 | 0.004 | 1.57E-07 |



5. Simulation des fusions D+ <-> T+

5.1 Résultats de la simulation pour des fusions D+ <-> T+ 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).

Par rapport aux fusions D+ <-> D+, on peut noter que :

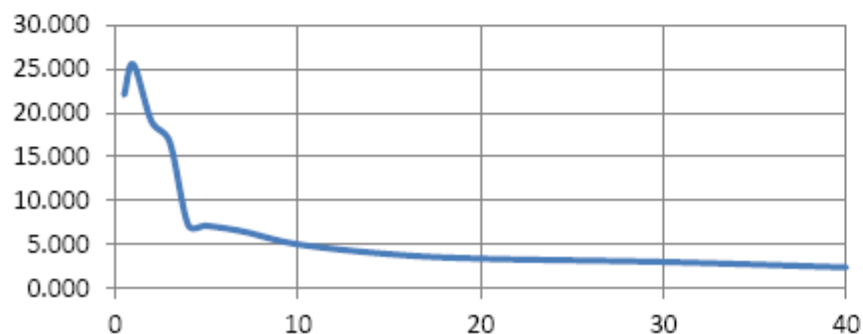
- le maximum d'efficacité est plus de 6 fois plus grand,
- pour une même tension on a environ 25 fois plus de puissance de fusion,
- la tension pour laquelle la puissance exploitable est maximum est de 15 MV.

Il est évident que les fusions D+ <-> T+ sont bien plus « faciles » à obtenir et que de ce fait l'efficacité est très bonne. On rappelle que le principal problème est la grande rareté du Tritium et, en second lieu, l'émission du double de neutrons par rapport à l'interaction D+ <-> D+ (en dehors des effets bien connus sur la santé, le flux de neutrons fragilise les aciers).

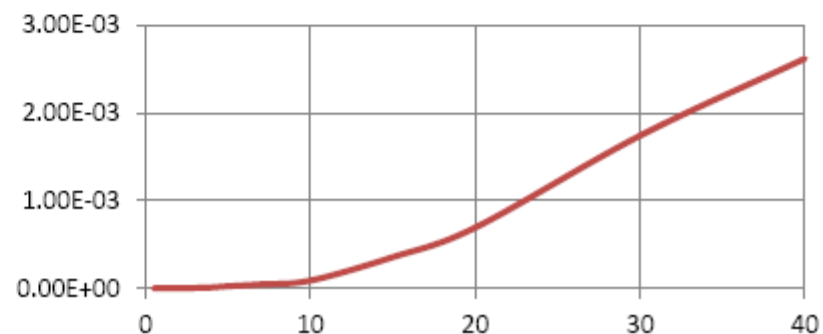
Study of E and P = f(U) for D+ ↔ T+ at Pgas=10pPa / Etude de E et P = f(U) pour D+ ↔ T+ à Pgas=10 pPa

| 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 | 820 | 9.840E-10 | 22.070 | 6.32E-08 | 1.61E-08 |
| 1 | 11 | 20 | 871 | 1.916E-09 | 25.570 | 1.66E-07 | 4.33E-08 |
| 2 | 32 | 20 | 618 | 3.955E-09 | 19.060 | 4.38E-07 | 1.08E-07 |
| 3 | 40 | 20 | 1018 | 8.144E-09 | 16.670 | 2.77E-06 | 6.65E-07 |
| 4 | 80 | 10 | 1747 | 1.398E-08 | 7.280 | 8.58E-06 | 1.40E-06 |
| 5 | 120 | 10 | 1572 | 1.886E-08 | 7.145 | 2.24E-05 | 3.58E-06 |
| 7 | 190 | 10 | 1337 | 2.540E-08 | 6.492 | 4.41E-05 | 6.44E-06 |
| 10 | 200 | 10 | 1690 | 3.380E-08 | 5.031 | 8.68E-05 | 8.79E-06 |
| 15 | 430 | 6 | 2311 | 5.962E-08 | 3.911 | 3.54E-04 | 1.57E-05 |
| 20 | 520 | 6 | 2705 | 8.440E-08 | 3.390 | 6.91E-04 | 3.47E-06 |
| 30 | 750 | 6 | 2873 | 1.293E-07 | 3.016 | 1.74E-03 | -5.49E-05 |
| 40 | 840 | 6 | 2592 | 1.306E-07 | 2.398 | 2.62E-03 | -3.07E-04 |

E = f(U)



P(W)=f(U)



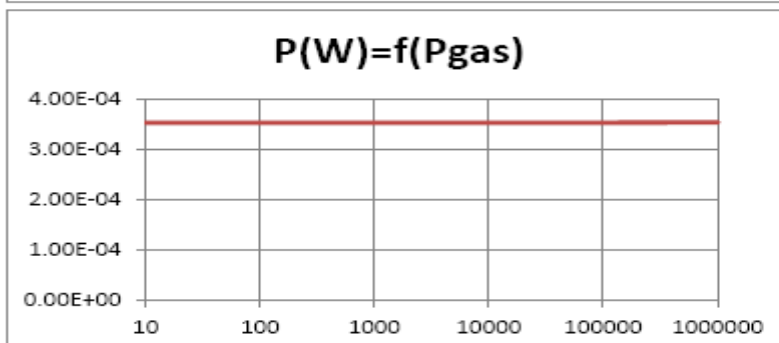
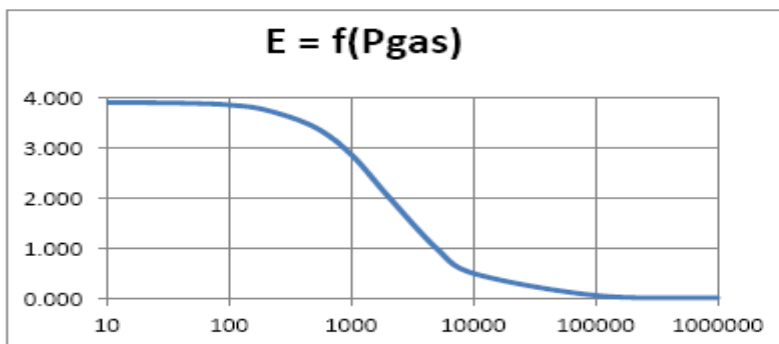
5.2 Résultats de la simulation pour des fusions $D+ \leftrightarrow T+$ à différentes pressions de gaz

On va partir de la « meilleure » solution déterminée précédemment soit une tension de 15 MV et une densité de courant de 430 A/cm^2 , 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 que la perte d'efficacité est beaucoup plus lente que pour les fusions $D+\leftrightarrow D+$ ou $D2+\leftrightarrow D2+$. Jusqu'à 500 pPa et un peu au-delà, on dépasse 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 $P = f(P_{\text{gas}})$, for $D+\leftrightarrow T+$ / Etude de E et $P = f(P_{\text{gaz}})$, pour $D+\leftrightarrow T+$
All tests done at 15 MV $C_d=430 \text{ A/cm}^2$
Tous les tests faits à 15 MV $C_d=430 \text{ A/cm}^2$

| Gas pressure / Pression du gaz P_{gas} (pPa) | Yield / Efficacité E | Fusion power / Puissance de fusion P (W) |
|---|----------------------------|---|
| 10 | 3.911 | 3.54E-04 |
| 20 | 3.908 | 3.54E-04 |
| 50 | 3.894 | 3.54E-04 |
| 100 | 3.862 | 3.54E-04 |
| 200 | 3.760 | 3.54E-04 |
| 500 | 3.421 | 3.54E-04 |
| 1000 | 2.873 | 3.54E-04 |
| 2000 | 2.045 | 3.54E-04 |
| 5000 | 1.004 | 3.54E-04 |
| 10000 | 0.509 | 3.54E-04 |
| 100000 | 0.072 | 3.54E-04 |
| 1000000 | 0.024 | 3.54E-04 |



6. Simulation des fusions D2+ <-> T2+

6.1 Résultats de la simulation pour des fusions D2+ <-> T2+ 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).

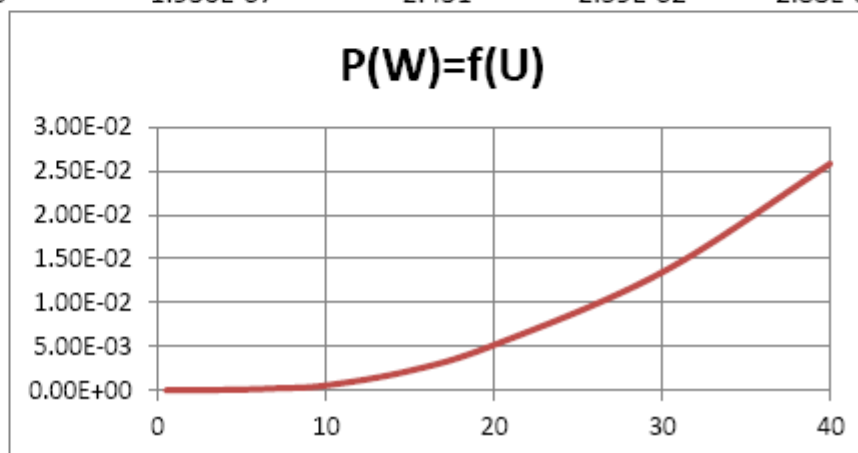
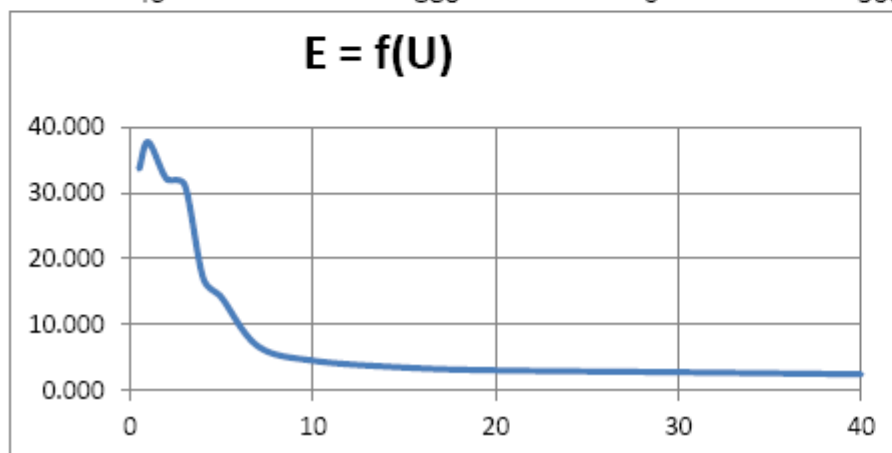
Par rapport aux fusions D+ <-> T+, on peut noter que :

- le maximum d'efficacité est plus grand jusqu'à 7 MV mais plus petit à partir de 10 MV,
- pour une même tension on a beaucoup plus de puissance de fusion, entre 3 et 10 fois plus,
- la tension pour laquelle la puissance exploitable est maximum est de 10 MV.

Cette fusion est celle qui fournit la plus forte puissance exploitable pour une efficacité correcte. Le problème de cette fusion est le même que celui de la fusion D+<->T+ (voir plus haut)

Study of E and P = f(U) for D2+ <-> T2+ at Pgas=10pPa / Etude de E et P = f(U) pour D2+ <-> T2+ à Pgas=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 | 1160 | 1.392E-09 | 33.710 | 1.86E-07 | 5.03E-08 |
| 1 | 10 | 20 | 1232 | 2.464E-09 | 37.780 | 6.76E-07 | 1.85E-07 |
| 2 | 25 | 20 | 874 | 4.370E-09 | 32.190 | 3.32E-06 | 8.93E-07 |
| 3 | 40 | 20 | 1440 | 1.152E-08 | 31.210 | 1.56E-05 | 4.18E-06 |
| 4 | 60 | 10 | 2471 | 1.483E-08 | 17.130 | 3.45E-05 | 8.33E-06 |
| 5 | 80 | 10 | 2223 | 1.778E-08 | 14.140 | 6.23E-05 | 1.43E-05 |
| 7 | 155 | 10 | 1891 | 2.931E-08 | 6.711 | 2.01E-04 | 3.03E-05 |
| 10 | 170 | 10 | 2390 | 4.063E-08 | 4.510 | 5.30E-04 | 4.14E-05 |
| 15 | 350 | 6 | 3267 | 6.861E-08 | 3.463 | 2.21E-03 | 2.48E-05 |
| 20 | 480 | 6 | 3825 | 1.102E-07 | 3.029 | 5.15E-03 | -1.55E-04 |
| 30 | 690 | 6 | 4063 | 1.682E-07 | 2.747 | 1.35E-02 | -8.61E-04 |
| 40 | 880 | 6 | 3666 | 1.936E-07 | 2.431 | 2.59E-02 | -2.88E-03 |



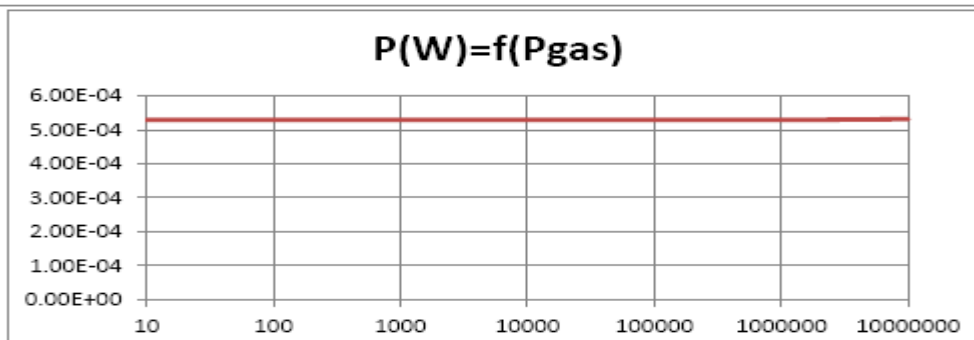
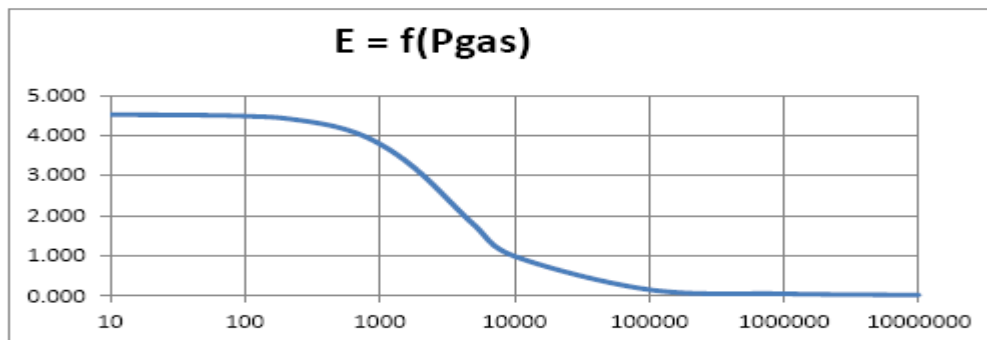
6.2 Résultats de la simulation pour des fusions D2+ <-> T2+ à différentes pressions de gaz

On va partir de la « meilleure » solution déterminée précédemment soit une tension de 10 MV et une densité de courant de 170 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 que jusqu'à 1000 pPa, on dépasse 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 D2+<->T2+ / Etude de E et P = f(Pgaz), pour D2+<->T2+
All tests done at 10 MV Cd=170 A/cm2
Tous les tests faits à 10 MV Cd=170 A/cm2

| Gas pressure / Pression du gaz Pgas (pPa) | Yield / Efficacité E | Fusion power / Puissance de fusion P (W) |
|---|----------------------------|---|
| 10 | 4.510 | 5.30E-04 |
| 20 | 4.508 | 5.30E-04 |
| 50 | 4.498 | 5.30E-04 |
| 100 | 4.476 | 5.30E-04 |
| 200 | 4.418 | 5.30E-04 |
| 500 | 4.189 | 5.30E-04 |
| 1000 | 3.782 | 5.30E-04 |
| 2000 | 3.061 | 5.30E-04 |
| 5000 | 1.770 | 5.30E-04 |
| 10000 | 0.986 | 5.30E-04 |
| 100000 | 0.153 | 5.30E-04 |
| 1000000 | 0.051 | 5.30E-04 |
| 10000000 | 0.019 | 5.32E-04 |



7. 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). C'est-à-dire qu'au lieu d'avoir tous les ions à la même énergie totale (potentielle+cinétique), du fait des échanges d'énergie entre ions, on finit par avoir une distribution des énergies totales autour de l'énergie totale initiale. La thermalisation de l'énergie ne se stabilise pas. Elle augmente avec le temps et dépend, évidemment, de la charge électrique totale. Comme elle dépend de la densité des ions dans le faisceau d'ions, elle dépend donc du champ électrique imposé par le dispositif : plus le champ est intense, plus le faisceau est concentré et plus la charge d'espace est intense (les ions étant de plus en plus proches).

Ceci a pour effet de ralentir certains ions et d'en accélérer d'autres. Ceux qui ralentissent vont percuter l'électrode centrale et les autres vont percuter les deux électrodes terminales (« disques ») ou s'échapper. On voit ce phénomène grâce aux indications affichées tous les 2000 pas, dans l'éditeur :

- « Var » (Variabilité de l'énergie),
- « dmax » (distance maximum par rapport au centre)

« Var » et « dmax » augmentent régulièrement.

Le paramètre principal à suivre est dmax. Pour une faible intensité (disons de moins de $1/6^{\text{ème}}$ du maximum, pour une charge confinée pendant au moins 100 ns), dmax s'accroît linéairement avec le temps et les ions ne percutent pas l'électrode centrale mais une des deux électrodes terminales. Il est donc facile de déterminer grossièrement la durée probable de confinement en observant l'évolution de dmax. Par exemple, si après 10000 pas de temps, dmax a augmenté de 1 mm et si la distance maximum avant collision est de 5 mm, la durée probable de confinement sera d'environ 50000 pas.

On peut essayer de limiter la thermalisation mais on ne peut pas l'éviter. Il n'y a pas de solution à long terme à ce problème.

Nota 1 : 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.

Nota 2 : la perte d'énergie liée aux collisions élastiques entre ions et neutres n'est pas une « thermalisation » car il s'agit d'une perte, pas d'un échange. Globalement, dans une « thermalisation » la somme des énergies totales des ions est constante, ce qui n'est plus le cas quand une collision élastique ion-neutre a lieu.

Nouveau but à atteindre : par la suite, pour éviter une trop grande difficulté, on cherchera seulement à avoir une efficacité supérieure à 1, indépendamment de la puissance exploitable.

8. Éléments de solution

8.1. Notas préliminaires

Dans tous cas, il est important que le facteur multiplicatif de fusion soit le plus petit possible du fait d'un gros biais introduit par une section efficace trop grande (dans ce cas, la probabilité de fusion dépend de la section mais aussi du volume de la sphère). Le plus petit est celui qui permet d'obtenir au moins 100 fusions pour être représentatif mais reste au-dessous de 1000 fusions.

Par ailleurs, plus le nombre de paquets d'ions est grand et plus le calcul est précis mais plus le temps de simulation devient long. La limite est, suivant le PC, d'environ 10000 paquets, au-delà duquel les calculs prennent beaucoup trop de temps. 2000 paquets est un bon compromis pour les calculs courants et environ 5000 pour le calcul final.

8.2 Limitation de la charge d'espace et des collisions coulombiennes et augmentation du temps de confinement par réduction de la charge électrique stockée

Si l'on baisse la charge électrique stockée dans l'appareil (en baissant la densité de courant ou le nombre de paquets d'ions injectés), l'effet de thermalisation due à la charge d'espace et aux collisions coulombiennes va effectivement baisser mais, d'un autre côté, on va aussi baisser, avec à peu près le même facteur, la puissance de fusion produite (et donc la vitesse de consommation des ions par fusions).

Mais comme le but, ici, n'est pas de fournir la puissance de fusion maximum, on considèrera une charge électrique très faible, ce qui permettra une très longue durée de confinement. En effet, expérimentalement, on note que ce temps est grossièrement inversement proportionnel à la charge électrique stockée dans l'appareil (toutes choses égales par ailleurs).

Donc pour augmenter le temps de confinement, il suffit donc de réduire la charge électrique stockée dans l'appareil.

A propos de la réduction de la charge électrique stockée jusqu'à une valeur très faible

Quand la charge électrique est très faible, il survient un problème de précision de calcul à cause de l'expansion « naturelle » du point de rebroussement des ions du fait d'erreurs numériques. En effet, le calcul introduit une très faible erreur numérique qui s'accumule avec le temps. Si l'on souhaite être précis, alors il faut corriger la vitesse. Cette correction n'est pas une panacée parce qu'elle ne résout pas vraiment le problème, elle le transfère (de manière générale, il vaut mieux éviter d'utiliser cette fonction qui est aussi une source d'erreurs). La seule solution serait d'utiliser un pas de temps très petit (compensé par une énorme augmentation du temps de calcul), voir ci-dessous.

L'amplitude relative de l'erreur dépend de la distance parcourue durant un pas de temps (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 de temps, mais en allongeant la durée de calcul. Par contre, on ne peut pas annuler l'erreur (on peut juste la corriger).

L'autre solution est de déterminer l'augmentation de "dmax" (distance maximum du point de rebroussement des ions par rapport au centre) du fait de l'erreur de calcul seule, dans une configuration sans charge d'espace, collisions, échange de charge et fusions et sur un nombre de pas de simulation donné. Puis on soustraira ce « dmax » de l'augmentation de "dmax" obtenue en configuration réelle avec le même nombre de pas de simulation. A partir de cette augmentation de "dmax" calculée, il sera déterminé le temps de confinement probable (quand "dmax" atteint les électrodes terminales).

Dans tous les cas, avec un simple PC, il n'est pas possible de complètement simuler le cycle depuis l'injection des ions jusqu'à la perte de tous les ions injectés. Plutôt qu'une simulation complète, des éléments de simulation et quelques calculs manuels (faits à partir de lois expérimentales) vont permettre de reconstituer tout le cycle.

8.3 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. Ensuite la charge d'espace et les collisions coulombiennes vont faire s'écarter les ions les uns des autres et la densité locale d'ions baissera lentement. En conséquence, le rythme des fusions baissera également.

Multiplasma donne cette possibilité (bouton "Injection linéaire") mais seulement dans le cas d'une cathode en forme de point (injection d'ions paquet par paquet).

Après expérimentation cette solution est adoptée (le gain sur le nombre de fusions étant très supérieur à 10) .

8.4 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 rapidement, après un faible parcours. Ceci n'a d'intérêt que si l'injection est linéaire car la probabilité de fusion est bien plus grande.

Après expérimentation, il s'avère que cette solution n'apporte, en moyenne, qu'un très léger gain. Elle ne sera prise en compte que plus tard (§11).

8.5 Amélioration du modèle LKR1 (pour les faibles courants)

A ce niveau, on peut douter que le modèle de réacteur LKR1, qui est très simple, soit le meilleur modèle quant aux possibilités :

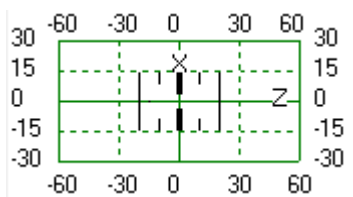
- de confiner le plasma de la manière la plus concentrée le long de l'axe de l'appareil,
- de confiner le plasma le plus longtemps possible.

Cependant, pour les raisons suivantes, l'auteur ne va pas chercher, de manière exhaustive, à déterminer un meilleur modèle :

- il serait nécessaire de disposer de très grandes capacités de calcul (car c'est un problème multi-variables), ce dont ne dispose pas l'auteur,
- il serait nécessaire de modéliser de nouvelles formes d'électrode plus complexes que les formes simples proposées dans le programme, ce qui est parfaitement possible mais nécessiterait beaucoup de temps, ce dont ne dispose, non plus, l'auteur.

Donc, finalement, on en restera au modèle LKR1.

Cependant, après quelques tests sur les diamètres, on a trouvé un modèle LKR1 modifié (3 mm de moins sur les diamètres intérieurs des électrodes intermédiaires et centrale) donnant plus de fusions aux faibles courants. Il est dénommé "LKR1m" (avec "m" pour "modifié").



Comme le modèle « LKR1 », il se trouve dans le sous-répertoire « CONFIGURATIONS » du programme MULTIPLASMA.

9. Principes de fonctionnement préliminaires du réacteur

On donne, ci-après, les principes (théoriques) de fonctionnement de ce réacteur, depuis l'injection des ions jusqu'à la perte de tous ces ions.

Injection des ions dans le dispositif

La source d'ions peut être supposée virtuelle dans le programme. Dans la réalité, la source d'ions serait à terme percutée par les ions lors de leur retour. A ce niveau du document, il n'y a pas de solution proposée. Une solution à l'injection sera donnée plus loin, au §11.

Fonctionnement du réacteur et début de la perte du confinement

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.

Perte de tous les ions

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

Toutes ces pertes d'ions n'occasionneront que de faibles pertes d'énergie car la vitesse en bout de course est très faible. Cependant même ces très faibles pertes peuvent être très supérieures à l'énergie dégagée par les produits de fusion. L'énergie perdue E_{pc} dépend de vitesse de dérive des points de rebroussement et peut être déterminée expérimentalement.

10. Choix de la meilleure configuration et résultats

10.1 Préliminaires

Par la suite, on choisira la fusion $D2+ \leftrightarrow T2+$ qui fournit la plus forte puissance exploitable pour une efficacité correcte.

Sur la base des principes de fonctionnement précédents, on souhaite avoir le meilleur rapport entre l'énergie fournie par les produits de fusion et l'énergie électrique consommée.

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 égal à :

$E_g = (F_p * D_f) / ((F_p * D_f) / E + E_{pc})$ avec :

- E_g : efficacité globale du cycle de fonctionnement
- F_p : puissance de fusion en W
- D_f : durée de confinement probable en s
- E : efficacité de fusion probable
- E_{pc} : perte d'énergie électrique par collision des ions sur les électrodes terminales à partir de la perte du confinement (en fin de cycle)

Il faut donc :

- maximiser le rapport entre le nombre d'ions fusionnés durant la durée de confinement et le nombre d'ions présent à la fin de l'injection des ions,
- avoir la vitesse de dérive des deux points de rebroussement la plus faible possible.

Nota relatif au « refroidissement résistif » :

Dans ce document, on a négligé l'effet dû au « refroidissement résistif » (ou « cooling » résistif) lié aux charges induisant un courant sur les électrodes. En effet, il est supposé qu'il y a autant de charges allant vers l'électrode centrale que de charges partant de l'électrode centrale (et ceci est vrai pour toutes les électrodes). Donc le courant global induit à travers chaque électrode est nul.

Notas relatifs à la prise en compte de l'énergie dans ce document

Dans ce document, on considère implicitement le premier principe de la thermodynamique. En l'occurrence, la puissance électrique active perdue est celle qui compense les pertes d'énergie cinétique, que ce soit des ions qui s'échappent du réacteur (y compris du fait des fusions) ou des collisions avec les électrodes.

On peut, grâce au confinement, réduire les ions perdus aux seuls ions qui fusionnent.

On peut réduire au minimum l'énergie cinétique perdue lors des collisions en faisant en sorte que les ions collisionnent uniquement les électrodes terminales, et à très basse vitesse (idéalement à vitesse nulle).

L'énergie électrique passive nécessaire au chargement des électrodes (qui forment une capacité) n'est pas considérée car elle est récupérable lors de la décharge des électrodes.

Les pertes ohmiques sont négligées. Cependant, cette hypothèse oblige à viser une puissance relativement importante, sans quoi, mêmes très faibles, les pertes ohmiques risquent d'être supérieures à la puissance produite.

L'énergie électrique consommée du fait des ions qui circulent sans collisions est nulle car les courants induits sur les électrodes positives par ces ions en déplacement se compensent.

10.2 Premier test

Comme il n'est pas possible de calculer sur de longues durées de simulation et comme on ne peut pas tester toutes les possibilités de manière exhaustive, il a été créé un modèle basé sur un mélange de lois théoriques et expérimentales. Il prend uniquement en compte les fusions créées de manière progressive dans le « cylindre de confinement » le long de l'axe Z, dont le rayon se stabilise (à peu près) une fois l'injection faite puis croît lentement.

En fait, au fur et à mesure, du fait des collisions coulombiennes, le rayon moyen de confinement augmente ce qui fait diminuer le rythme des fusions, jusqu'à une valeur très faible à la fin de la période de confinement.

L'auteur a donc fait l'hypothèse qu'une fois le rayon « stabilisé », il augmentera en moyenne d'un facteur 1,5 sur la durée de confinement.

Ce modèle ignore les fusions créées avant stabilisation, donc pendant l'injection et un peu après.

Ce modèle n'est pas décrit car ce serait trop long. Il est donné en Annexe 1 (procédure en langage Pascal).

Résultat :

L'efficacité globale E_g maximum trouvé est égal à 1,45 pour la configuration : $U=124,4$ MV et $Cd=2152$ $\mu A/cm^2$. Mais la puissance de fusion F_p est infime: $1 E-8$ W, ce qui n'est pas très satisfaisant.

Conclusion de ce test

Même si l'efficacité globale est supérieure à 1, la puissance délivrée est beaucoup trop faible.

10.3 Second test

On va ignorer les fusions créées régulièrement dans le « cylindre de confinement » et prendre uniquement en compte les fusions créées pendant l'injection et un peu après. Ce qui signifie que la durée de confinement D_f n'a plus à être la plus grande possible. Au contraire elle sera la plus courte possible pour réduire le temps du cycle. Ici on va chercher à maximiser le nombre de fusions créées au départ.

Nota : on pourrait penser à diminuer la taille de la surface d'émission des ions en injection linéaire. Par exemple, le rayon de cette surface pourrait passer de 1 micron à 0,01 micron voire moins, de façon à concentrer le jet d'ion au maximum. Cependant, la précision du logiciel n'est pas suffisante pour gérer d'aussi petites dimensions : les résultats deviennent chaotiques et ne sont plus fiables.

Comme on ne cherche plus à fusionner dans la durée, on peut ici tester un certain nombre de possibilités, puis appliquer une partie de la procédure en Annexe 1 pour déterminer l'efficacité globale maximum E_g .

Ici E_g est défini de la façon suivante :

$$E_g = E_f / ((E_f/E) + E_{pc}) \text{ et } E_f = N_s * E_{pf}, \text{ avec:}$$

- E_g : efficacité globale du cycle de fonctionnement
- E_f : énergie de fusion produite (J). A noter que E_f inclue l'énergie cinétique moyenne des produits de fusion.
- N_s : nombre de fusions produites au départ
- E_{pf} : énergie moyenne par fusion en J
- E : efficacité de fusion probable
- E_{pc} : perte d'énergie électrique (J) par collision des ions sur les électrodes terminales à partir de la perte du confinement (en fin de cycle)

Résultat :

L'efficacité globale E_g maximum trouvée est égale à 0,069 ($\ll 1$...) pour la configuration $U=25$ MV et $C_d=18000$ $\mu A/cm^2$ (produisant une seule fusion au départ).

La puissance de fusion F_p est de : $3,8 \text{ E-}8$ W.

Conclusion de ce test

L'efficacité globale est très inférieure à 1 et la puissance délivrée est aussi très faible.

11. Nouvelle solution de réacteur et de cycle de fonctionnement

11.1 Solution proposée et principe du réacteur

Comme indiqué au §10 (second test), $E_g = (N_s * E_{pf}) / ((N_s * E_{pf}) / E) + E_{pc}$ avec, en particulier, E_{pc} la perte d'énergie électrique par collision des ions sur les électrodes terminales en fin de cycle. E_{pc} dépend de la vitesse des ions lors de la collision. Plus la vitesse de collision est faible et plus E_{pc} est faible et donc plus E_g est grand. Par ailleurs, en Annexe 1, on voit que E_{pc} dépend de la tension et de la densité de courant et, en conséquence, c'est une donnée qui peut être minimisée en réglant au mieux ces paramètres. Cependant, on est rapidement limité dans ce réglage par N_s qui dépend des mêmes paramètres.

Maintenant si la vitesse de collision pouvait être contrôlée, E_{pc} pourrait être rendue négligeable. Dans ce cas, E_g serait égal à E , ce qui donnerait 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 et peut être expliqué de la façon suivante:

Supposons que le champ électrique (E) soit constant le long de l'axe Z , ce qui signifierait que le potentiel est proportionnel à la distance par rapport à l'électrode centrale. Appelons " d_{max} " la distance le long de Z entre l'électrode centrale et le point de rebroussement le plus distant (Pr) parmi tous les ions, et " L " la distance séparant l'électrode centrale des électrodes terminales.

Juste avant de modifier la tension U , l'énergie totale E_t de l'ion situé au point de rebroussement Pr est égale à $E_t = q * U * d_{max} / L$.

Supposons que l'ion soit juste au centre du dispositif (donc avec sa vitesse maximum) quand la tension est directement commutée de U à $U + \Delta U$. Cet ion va garder son énergie totale et atteindra son nouveau point de rebroussement situé à d'_{max} tel que : $E_t = q * (U + \Delta U) * d'_{max} / L$.
Donc $d'_{max} = d_{max} * U / (U + \Delta U)$ et $d'_{max} < d_{max}$.

Cependant, ce cas est le plus pénalisant. Pour une rampe de tension, on obtient : $d'_{max} = d_{max} * U / (U + \Delta U) * 0,5$, avec une dispersion autour de cette valeur. On a donc une contraction du faisceau d'ions sur une rampe (positive) de tension.

Expérimentalement par simulation, on trouve que pour une augmentation de tension il y a une contraction le long de Z du cylindre de confinement et inversement pour une diminution de tension. Ces évolutions dépendent du modèle choisi.

Par exemple, avec $L = 19,5$ mm, $d_{max} = 14,5$ mm et le modèle "LKR1m" :

- pour une augmentation relative de tension de 1 % (suivant une rampe de 12000 ps), d_{max} diminue d'environ 0,058 mm,
- pour une diminution relative de tension de 1 % (suivant une rampe de 12000 ps), d_{max} augmente d'environ 0,091 mm,

Pour un modèle donné, la relation entre la variation relative de tension et la variation de d_{max} ne dépend ni de la tension ni de la densité de courant. Par ailleurs, le rayon de confinement augmente légèrement avec l'augmentation de la tension.

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 (c'est-à-dire un « trait rouge » sur la vue en coupe du réacteur) de rayon moyen inférieur à 0,05 mm, ceci pour éviter des collisions avec l'électrode centrale. La densité de courant doit donc être limitée à environ $1/6^{\text{ème}}$ de la densité de courant maximum, pour une charge confinée pendant au moins 100 ns.

En outre, la variation de tension peut être utilisée pour l'introduction des ions dans le réacteur

En effet, supposons que :

- les électrodes terminales soient 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 $-U$. A noter que pour la circulation des ions, cette configuration de tensions est strictement équivalente à la précédente,

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.

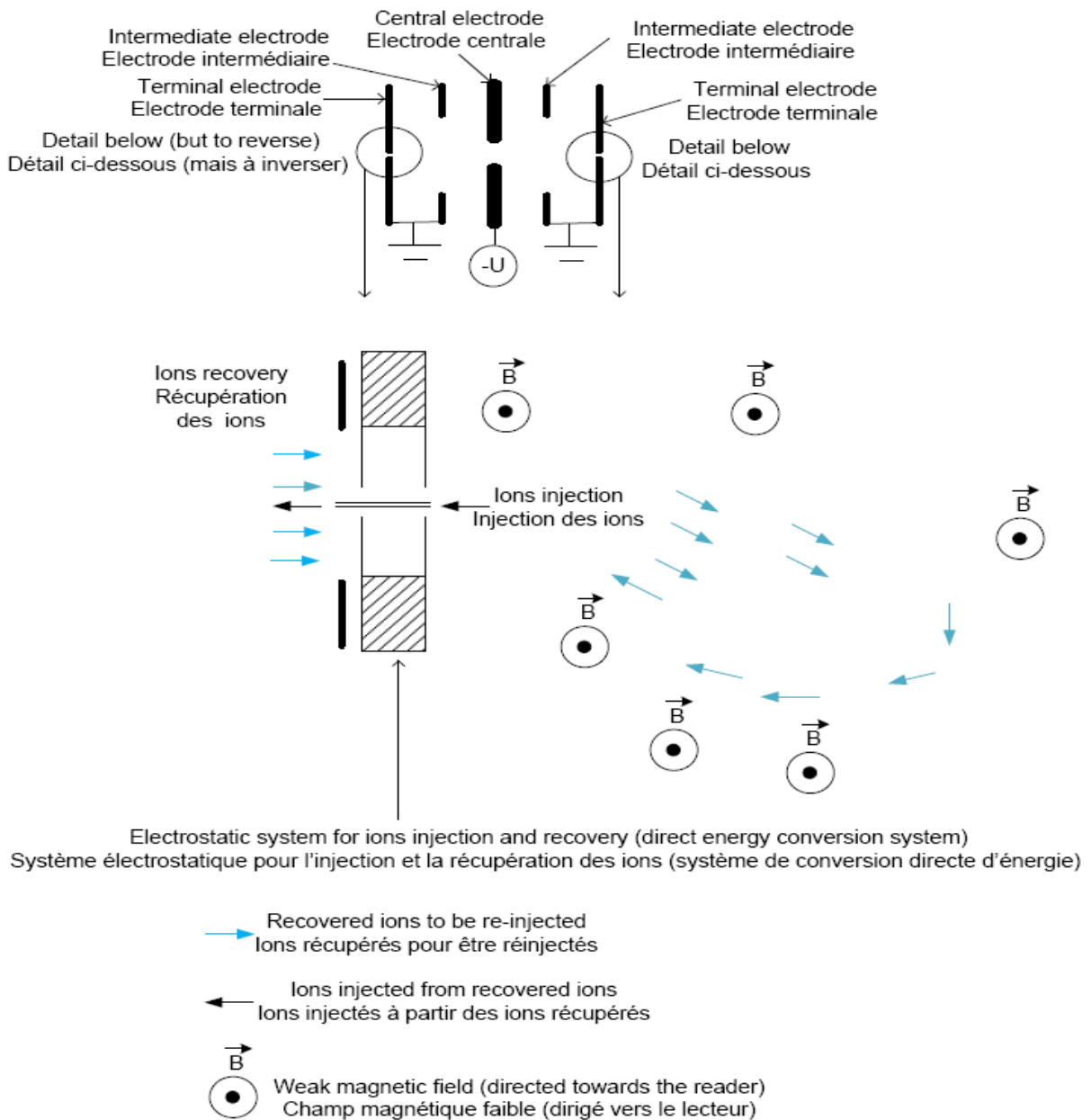
A noter que les orifices dans les électrodes terminales permettront de récupérer les ions non fusionnés à la fin du cycle, plutôt que de les laisser collisionner contre les électrodes terminales. Ceci n'enlève pas le besoin que les ions soient récupérés à travers l'orifice à la plus faible vitesse possible car, dans tous les cas, la perte de l'énergie résiduelle des ions se fera par une production de chaleur, non récupérable.

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 pourrait 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



11.2 Cycle de fonctionnement

Il est composé de 3 phases, comme décrit ci-dessous :

Première phase (injection des ions)

A $t=0$, toutes les électrodes sont à 0 V, sauf l'électrode centrale à $-(U-\Delta U)$:

- 1) Au niveau de la face interne des électrodes terminales gauche et droite (à $Z=\pm 19,5$ mm et $X=Y=0$), les deux sources d'ions commencent à débiter dans le dispositif. On injecte suivant l'axe Z un certain nombre d'ions (mélange d'ions $D2+$ et $T2+$, par exemple) correspondant à une certaine charge électrique.
- 2) Pendant ce temps on fait monter lentement la tension de l'électrode centrale jusqu'à la tension visée. Sous la tension montante, les ions vont avoir tendance à s'éloigner des électrodes terminales.
- 3) Une fois l'injection terminée, on continue d'augmenter la tension, en fonction de l'espace souhaité entre les points de rebroussement des ions et les électrodes terminales.
- 4) Après la montée de tension et après stabilisation, la position des points de rebroussement sera à la distance nominale des électrodes terminales.

Seconde phase (fusions)

Une fois l'injection des ions faite et la tension à sa valeur nominale, les ions commencent à circuler régulièrement, en fusionnant pour un nombre limité d'entre eux. On attendra un certain temps jusqu'à ce que la fréquence de fusions soit faible (moins de 100 ns). A ce moment il sera considéré qu'il est inutile (relativement au critère de l'énergie produite par unité de temps) d'attendre plus de fusions. Le début de la récupération des ions va commencer.

Troisième phase (récupération des ions)

Dans un premier temps, la tension sera lentement augmentée pour réduire l'évolution de "dmax" (distance entre les points de rebroussement et les électrodes terminales) à une valeur très faible. Les ions à une très faible vitesse seront récupérés à travers les orifices des électrodes terminales. Une fois les premiers ions récupérés, il faudra stabiliser la tension pour récupérer la plupart des ions. Eventuellement, pour accélérer la récupération des derniers ions, on fera décroître lentement la tension. On devra déterminer le meilleur programme de réglage de la tension, dans le but de récupérer tous les ions non fusionnés avec le moins de perte d'énergie possible. Mais ceci est hors du champ de ce document.

En première hypothèse, nous pourrions considérer une durée de cycle (T_c) de 1 μs ($1E-6$ s) ou moins. Donc plus d'un million de cycles pourraient être réalisés en une seconde.

Si, durant chaque cycle, il est produit une énergie de fusion E_f (en J), alors la puissance de fusion P_f (en W) sera égale à E_f/T_c , pour une puissance électrique fournie égale à $E_f/(E_g \cdot T_c)$ (avec E_g l'efficacité globale).

11.3 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 :

- dans le premier cas, les ions injectés circuleront, durant la seconde phase, très près des électrodes terminales et le cycle sera plus court. A noter que le modèle LKR1m fonctionnera très mal dans cette configuration car il est conçu pour une injection à 15 mm (14,5 mm en fait) de l'électrode centrale. Pour adapter le dispositif à une injection à 19,5 mm (au niveau de la face interne des électrodes terminales), les deux électrodes intermédiaires doivent être plus séparées de l'électrode centrale. Par exemple, si les électrodes intermédiaires sont à une distance autour de 14 mm de l'électrode centrale avec un diamètre intérieur de 15 mm et un rayon d'injection de 50 μm , le résultat à 200 A/cm² et injection à 19,5 mm n'est pas mauvais (mais pas aussi bon que le modèle LKR1m avec injection à 14,5 mm). Ce modèle, correct jusqu'à 200A/cm², est appelé « LKR1m3 ». Il sera utilisé au prochain chapitre.
- dans le second cas, le cycle sera plus long et donc la puissance délivrée plus faible.

12. Exemples de simulation pour les deux premières phases, résultats et commentaires

Bien que les possibilités de configuration pour les deux premières phases soient maintenant nombreuses, ci-dessous, il est proposé deux exemples.

12.1 Premier exemple avec la fusion D2+ <-> T2+

La tension visée est $-U=-40$ MV sur l'électrode centrale, avec une position de rebroussement des ions entre 19 mm et 19,5 mm (19,5 mm étant la position de collision ou de récupération). La densité de courant est de 200 A/cm² (soit un courant de 2 A dans le réacteur). Le modèle utilisé est le « LKR1m3 ». Le pas de temps est de 3 ps et le nombre de paquets d'ions est de 1466.

La tension initiale est de $-U=-36$ MV (90 % de la tension nominale) et la tension est augmentée linéairement jusqu'à $-U=40$ MV en 3 ns (1000 pas de temps). L'injection est faite en mode linéaire (rayon d'injection de 40 microns) et symétrique. On injecte les ions durant les premiers $1466 \times 3/2 = 2199$ ps soit 2,2 ns. On constate à 12 ns que la position de rebroussement des ions est à 19,370 mm (mais après être passée par un maximum de 19,398 mm), soit la position visée.

On simule durant 4000 pas de temps soit 12 ns. L'énergie de fusion E_f obtenue est de : 2,076 E-9 J, pour une efficacité $E=4,80$.

Nota 1: cette configuration est stockée dans le fichier LKR1m3_D2_T2.SER du sous-répertoire « CONFIGURATIONS » du programme MULTIPLASMA.

Nota 2: si nous supposons que la récupération dure 8 ns et que $E_{pc}=E_f/10=2,076$ E-10 J, alors l'efficacité globale sera $E_g=E_f/(E_f/E)+E_{pc})=3,24$.

Le cycle durera $12+8=20$ ns donc la puissance de fusion P_f sera égal à :
 $P_f = 2,076 \text{ E-9} / 20 \text{ E-9} = 0,1 \text{ W}$.

Nota 3: dans l'exemple, 90% de la tension nominale a été pris comme tension initiale. Cependant rien n'empêche de choisir 99% ou 99,99 %, la seule condition étant qu'aucun ion ne collisionne durant la durée prévue pour les fusions (ici 12 ns). Dans ce cas, le réacteur sera contrôlé par de légères fluctuations de la tension ce qui sera plus facile à mettre en œuvre.

Nota 4: pour plus de puissance, il serait nécessaire d'augmenter la tension (par exemple à 125 MV) pour pouvoir augmenter le courant. Pour augmenter encore plus le courant (en restant avec un faisceau d'ions en forme de cylindre), il faudrait changer de modèle (un autre que LKR1m3), à déterminer.

Probablement, réduire le diamètre intérieur des électrodes intermédiaires serait une bonne option. En effet, pour un fonctionnement au-delà de 200 A à 40 MV, il faut avoir une configuration plus puissante au niveau du confinement radial. Pour cela, les électrodes intermédiaires doivent être plus proches de l'axe. Dans le cas d'une injection à 15 mm, la configuration « LKR1m2 » est plus adaptée (modèle à déterminer, dans le cas d'une injection à 19,5 mm).

Cette configuration est stockée dans le fichier LKR1m2.SER du sous-répertoire « CONFIGURATIONS » du programme MULTIPLASMA.

Nota 5: les efficacités semblent, en moyenne, pour une injection à 19 mm, plus hautes que celles obtenues pour une injection à 15 mm (à confirmer).

12.2 Deuxième exemple avec la fusion D2+ <-> D2+

Les conditions de simulation sont exactement les mêmes que pour le premier exemple sauf qu'ici la fusion est du type D2+ <-> D2+.

On constate à 12 ns que la position de rebroussement des ions est à 19,390 mm, soit la position visée.

On simule durant 4000 pas de temps soit 12 ns. L'énergie de fusion E_f obtenue est de : 1,95 E-10 J, pour une efficacité $E=2,04$

On constate que les résultats sont nettement moins bons qu'avec la fusion D2+ <-> T2+, mais on le savait déjà (cf. §4 et 6).

Nota: cette configuration est stockée dans le fichier LKR1m3_D2_D2.SER du sous-répertoire « CONFIGURATIONS » du programme MULTIPLASMA.

12.3 A propos des fusions aneutroniques

La fusion aneutronique $p + B11$ a été intégrée à Multiplasma 1.6. Cette fusion fait l'objet d'un article spécifique, disponible à :

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

Comme la courbe de section efficace de cette fusion est globalement située entre la courbe D+T (la meilleure) et la courbe D+D (la pire), les résultats sont situés entre les 2 et sont prometteurs.

12.4 Estimation de la précision du calcul

La précision du calcul du simulateur Multiplasma est difficile à estimer. La plupart des calculs sont fait en simple précision (et très peu en double précision) pour éviter des temps de calcul prohibitifs. La contrepartie est que des calculs très fins pourraient être complètement faux.

En gros, il serait sage d'estimer que, dans l'absolu, les valeurs « vrais » pourraient être entre 10 fois plus petites et 10 fois plus grandes que les résultats donnés par le simulateur.

Cependant, on peut comparer des configurations, sans trop d'erreur relative (comme fait aux §3 à 6).

12.5 Source chaude et produits de fusion

On considère implicitement que les produits de fusion percutent les électrodes. L'énergie cinétique de ces produits de fusion est transformée en chaleur, ce qui constitue la source chaude du cycle thermodynamique.

Nota : les produits de fusion chargés qui percutent les électrodes à 0 V, en remontant le potentiel électrique, produisent de l'électricité (induite).

13. Conclusion

La fusion la plus efficace est la fusion $D2+ \leftrightarrow T2+$, aussi bien en efficacité qu'en énergie fournie.

De plus, cette fusion permet de fonctionner jusqu'à une pression de gaz relativement élevée.

Malgré le problème du confinement dû à la thermalisation des ions par la charge d'espace et les collisions coulombiennes, on a pu trouver une solution théorique en utilisant le contrôle du réacteur par la tension, ceci permettant:

- en fusion $D2+ \leftrightarrow T2+$, d'obtenir une efficacité de fusion de 4,8,
- en fusion $D2+ \leftrightarrow D2+$, d'obtenir une efficacité de fusion de 2,0.

Il y a une grande latitude d'amélioration sur le dernier modèle utilisé (« LKR1m3 »), dans le but d'obtenir une meilleure efficacité et une puissance plus importante, car seul un très petit sous-ensemble des possibilités a été testé par l'auteur.

14. Références (pour ce document et Multiplasma)

- [1] "Théorie cinétique - Gaz et Plasmas" de Bruno Chéron
- [2] « Atlas de la physique atomique et nucléaire » de Bernhard Bröcker
- [3] " Une introduction à la fusion thermonucléaire contrôlée" de Jean-Louis Bobin
- [4] « Plasmas collisionnels » de Michel Moisan et Jacques Pelletier
- [5] « Physique des plasmas » de Jean-Marcel Rax
- [6] « Physique des tokamaks » de Jean-Marcel Rax
- [7] « Plasma physics for nuclear fusion » de Miyamoto
- [8] « Inertial electrostatic confinement (IEC) fusion » de George H. Miley – S.Krupakar Murali
- [9] « Piéger et observer un seul atome » de Claude Cohen-Tannoudji
- [10] "Cours d'Electrostatique-Electrocinétique " de Jonathan Ferreira
- [11] "A general critique of inertial-electrostatic confinement fusion systems » de Todd H. Rider
- [12] " Fundamental limitations on plasma fusion systems not in thermodynamic equilibrium » de Todd Harrison Rider
- [13] "Apparatus for generating fusion reactions » de Robert L. Hirsch and Gene A Meeks, Fort Wayne, Ind.
- [14] "The mathematical theory of electricity and magnetism " de Jeans
- [15] "An electrostatic autoresonant ion trap mass spectrometer » de A. V. Ermakov et B.J. Hinch
- [16] "Vacuum tubes " de Karl R. Spangenberg
- [17] "How Vacuum Tubes really work " de John Harper:
<http://www.john-a-harper.com/tubes201/>
- [18] "Projet expérimental de Physique Statistique - Emission Thermoélectronique" de l'Université Paris-Sud Orsay
- [19] " Tips for inertial electrostatic confinement fusion investigators » de Tom Ligon
- [20] "Diane's Fusor page » de Diane Neisius
- [21] " Fred's fusor theory » sur <http://fusor.eu/theory.html>

- [22] " Physics of nonneutral plasmas » de Ronald C Davidson
- [23] « Multiparticle trajectory simulation for ion trap mass spectrometers » de Neeraj Kumar Verma
- [24] « Accélérateurs de particules : principes et limitations » de Johann Collot
- [25] « Fusion cross sections and reactivities » de George H. Miley, Harry Towner et Nedad Ivich
- [26] « Mesure des sections efficaces d'échange de charge et de dissociation des ions H_2^+ dans une large gamme d'énergie (25 – 250 keV) » de Joseph Guidini
- [27] « Hydrogen properties for fusion energy » de P. Clark Souers
- [28] « Dynamique d'ions multichargés dans un piège électrostatique » de Alexandre Vallette
- [29] « Cooling methods in ion traps » de Wayne M. Itano, J.C. Bergquist, J.J Bollinger, D.J. Wineland
- [30] Wikipedia (beaucoup d'articles)
- [31] Site Internet Cloudylabs (beaucoup d'articles) : <http://www.cloudylabs.fr>
- [32] « Focalisation des particules de grande énergie par des lentilles à grille – I. La convergence des lentilles à grille » de Michel Yves Bernard
- [33] « Thermodynamique technique » de V. Kirillin, V. Sytchev, A. Sheindlin
- [34] « Interaction faisceau-matière vide » de J. Arianer et C. Prévost
- [35] Site Internet NIST: <http://physics.nist.gov>
- [35] « Notions d'optique électronique » de Jacky Ruste
- [36] « Trajectoires électroniques paraxiales dans les lentilles électrostatiques » de Charles Fert
- [37] « Etude théorique et expérimentale de la focalisation des ions afin d'améliorer la brillance du faisceau ionique par suppression des causes d'aberrations » de Jean Faure
- [38] « Sur une nouvelle méthode de focalisation des faisceaux d'ions rapides. Application à la spectrographie de masse » de Louis Cartan
- [39] « Optique et guidage des faisceaux » de Jean-Marie de Conto
- [40] « Ion optics with electrostatic lenses » de F. Hinterberger

- [41] « Le pouvoir séparateur théorique de l'objectif à immersion électrostatique » de Albert Septier
- [42] « Etude de canons à électrons de faible énergie » de A. Mosser et Ch. Burggraf
- [43] « Modélisation et caractérisation du faisceau d'électrons dans les canons de tubes cathodiques de téléviseurs » de Olivier Doyen
- [44] « Cours d'optique géométrique matricielle, introduction aux phénomènes d'interférences et de diffraction » de Yann Vaills
- [45] Thèse « Calcul de la courbe de Pashen et la tension de claquage pour les décharges à gaz rare » de Ghaleb Fatiha
- [46] Thèse « Etude du transfert d'énergie entre un arc de court-circuit et son environnement : application à l' « Arc tracking » de Hadi El Bayda
- [47] Thèse « Génération, modélisation et détection des défauts d'arc électrique : application aux systèmes embarqués aéronautiques » de Jonathan Andrea
- [48] "Cours de Magnétostatique" de Jonathan Ferreira
- [49] "Currents to conductors induced by a moving point charge" de W. Shockley
- [50] Forum Internet Fusor (beaucoup d'articles et de messages):
<http://www.fusor.net/>
- [51] Site Interne SEM Fusor (lecture intéressante) <http://www.sem-fusor.com/>
- [52] « Le vide dans les accélérateurs » de P. Doléjiéviez
- [53] « Oerlikon Leybold vacuum - Fundamentals of vacuum technology » du Dr Walter Umrath
- [54] « Techniques mathématiques de la physique » de Jacques Renault
- Et beaucoup d'autres (merci aux auteurs)...

ANNEXE 1**Calcul de l'efficacité globale Eg**

```
procedure Eg_Fp_Calculation(U,Cd:DOUBLE;VAR Eg:DOUBLE;VAR Fp:DOUBLE;VAR Df:DOUBLE;VAR Nfs:DOUBLE;VAR USELESS:BOOLEAN);
```

```
{Calculation for the D2-T2 fusion (1 to 125 MV) / Calcul pour la fusion D2-T2 (1 à 125 MV)}
```

```
{Input data / Données d'entrée}
```

```
{U: Voltage on electrodes in MV / Tension sur les électrodes en MV
```

```
Cd: Current density in A/cm2 (on a section of 1 mm2) / Densité de courant en A/cm2 (sur une surface de 1 mm2)}
```

```
{Output data / Données de sortie}
```

```
{Eg: Global efficiency of the working cycle / Efficacité globale du cycle de fonctionnement
```

```
Fp: Fusion power in W / Puissance de fusion en W
```

```
Df: Probable confinement time in s / Durée de confinement probable en s
```

```
Nfs: Number of fusions per second in the reactor / Nombre de fusions par seconde dans le réacteur
```

USELESS: during the confinement time, at least one fusion must occur, otherwise it is useless

pendant la durée de confinement au moins une fusion doit avoir lieu sinon c'est inutile}

{Constant data / Données constantes}

CONST Sigma_V:DOUBLE=1E-12;{Mean Sigma_V in mm³/s for D2+<->T2+ fusion/ Sigma_V moyen en mm³/s pour la fusion D2+<->T2+ }

CONST Li:DOUBLE=29;{Minimum confinement length at injection time in mm / longueur de confinement minimum lors de l'injection en mm}

CONST Le:DOUBLE=39;{Maximum confinement length (between terminal electrodes) in mm / longueur de confinement maximum (entre électrodes terminales) en mm}

{Intermediate variables / Variables intermédiaires}

VAR Lm:DOUBLE;{Mean confinement length in mm / longueur de confinement moyenne en mm}

VAR Sm:DOUBLE;{Mean speed of an ion (m/s) / Vitesse moyenne d'un ion m/s}

VAR Tre:DOUBLE;{Maximum round trip time (between terminal electrodes) (s) / durée maximum d'un aller-retour entre les électrodes terminales (s)}

VAR Tri:DOUBLE;{injection time over a round trip (s) / durée d'injection sur un aller-retour (s)}

VAR Q:DOUBLE;{Electric charge in Coulomb / Charge électrique en Coulomb}

VAR Ni:DOUBLE;{Number of ions in the reactor / Nombre d'ions dans le réacteur}

VAR Rc_mean:DOUBLE;{mean confinement radius in mm / rayon de confinement moyen en mm}

VAR Epf:DOUBLE;{Mean energy per fusion in MeV / Energie moyenne par fusion en MeV}

VAR Ef:DOUBLE;{Produced fusion energy (J) / Energie de fusion produite (J)}

VAR E:DOUBLE;{Probable fusion efficiency / Efficacité de fusion probable}

{Epc: Lost electric energy by collision of ions on terminal electrodes from the confinement loss (end of cycle) /

Perte d'énergie électrique par collision des ions sur les électrodes terminales à partir de la perte du confinement (fin de cycle)}

VAR Epc:DOUBLE;

VAR Ec_max:DOUBLE;{Maximum kinetic energy for a ion (J) / Energy cinétique maximum pour un ion}

VAR R:DOUBLE;{Ratio of the energy loss at the confinement loss compared to Ec_max / Ratio de la perte d'énergie à la perte de confinement comparée à Ec_max}

BEGIN

{Lm / Tre /Tri}

Lm:=(Li+Le)/2;

Sm:=3093*SQRT(U*1E6);

Tre:=2*Le*1E-3/Sm;

Sm:=3093*SQRT(Li*U*1E6/Le);

Tri:=2*Li*1E-3/Sm;

// WRITELN('Tri ',Tri:12,' ','Tre ',Tre:12);

```
{Rc_mean, experimental}
```

```
IF Cd<0.6 THEN Rc_mean:=0.01972/Power(U,0.77)*Power((Cd/0.006),0.29) ELSE
```

```
IF Cd<6 THEN Rc_mean:=0.08632/U*Power((Cd/0.6),0.29) ELSE
```

```
rc_mean:=1.085/Power(U,1.3)*Power((Cd/6),0.29);
```

```
Rc_mean:=Rc_mean*1.5;{expansion}
```

```
// WRITELN('Rc_mean ',Rc_mean:12);
```

```
{Nfs}
```

```
Q:=Cd/100*Tri;{1/100: cm2 --> mm2}
```

```
Ni:=Q/1.60219E-19;{1.60219E-19: charge of one ion in Coulomb}
```

```
Nfs:=SQR(Ni)*Sigma_V/(2*Pi*SQR(rc_mean)*Lm);
```

```
// WRITELN('Ni ',Ni:12); WRITELN('Nfs ',Nfs:12);
```

```
{Fp}
```

```
Epf:=17.08+0.31*U;{MeV, experimental}
```

```
Fp:=Nfs*(Epf*1E6*1.60219E-19);{1.60219E-19: eV --> J}
```

```
// WRITELN('Epf ',Epf:12); WRITELN('Fp ',Fp:12);
```

```
{Df, mainly experimental + Ef + USELESS}
```

```
Df:=2E-7*(Le-Li)*Power(U,0.39)*Power(Cd,-0.69);
```

```
Ef:=Fp*Df;
```

```
IF Nfs*Df>1 THEN USELESS:=FALSE ELSE USELESS:=TRUE;
```

```
// WRITELN('Df ',Df:12,' Ef ',Ef:12);
```

```
{Epc, mainly experimental}
```

```
R:=2.295*Power((U/5),-0.39)*Power((Cd/6),0.69)*Tre*1E6/Le;
```

```
Ec_max:=1.60219E-19*(U*1E6);{qU is an overestimate / qU est un majorant}
```

```
Epc:=R*Ec_max*Ni;
```

```
// WRITELN('R ',R:12,' Ec_max ',Ec_max:12,' Epc ',Epc:12);
```

46

{Eg}

E:=47.19/U+1.29;{experimental}

Eg:=Ef/((Ef/E)+Epc);

// WRITELN('E ',E:12); WRITELN('Eg ',Eg:12);

end;