

La Z Machine : Plus de deux milliards de degrés !

L'article de Malcolm Haines

[Paru le 24 février 2006 dans Physical Review Letters](#)

25 juin 2006

Analyse de Jean-Pierre Petit, physicien des plasmas et spécialiste en MHD
jppetit1937@yahoo.fr

Pour les non-scientifiques :

Les lecteurs demandent si ces températures ioniques dépassant les deux milliards de degrés ont effectivement été mesurées. La réponse est oui. Un phénomène déconcertant avait cependant été constaté dès 1998 dans les expériences de compression de plasma menées avec Z-machine. Ces expériences avaient porté sur des montages variés. Dans l'un par exemple, quand la "cage à serin" implosait on envoyait un "gas puff", une "bouffée de gaz" juste au centre, qui se trouvait alors comprimée. L'émission de rayons X permettait d'obtenir une mesure de la température électronique. Un plasma est un mélange "de deux espèces" : les ions, lourds et les électrons, légers. Dans un "plasma de fer", dans du "fer ionisé" les noyaux de fer sont 50.000 fois plus lourds que les électrons (les noyaux sont constitués de "nucléons" de masses très voisines : les protons et les neutrons. Un électron est 1850 fois plus léger qu'un proton).

Un tube au néon contient également "ces deux espèces", les électrons et les ions de néon (même si ceux-ci dans ce cas n'ont pas été complètement déshabillés de leur "cortège électronique"). Quand le tube est en fonctionnement il contient un mélange "bitempérature" où le gaz constitué par les atomes, les ions de néon reste froid. (vous pouvez toucher le tube avec la main), mais où le "gaz d'électrons" est beaucoup plus chaud, porté à 10.000°. Pourquoi ne sentez-vous pas cette chaleur à la main ? Parce que les électrons, les pauvres, sont trop chichoux pour vous communiquer de l'énergie, de la chaleur. Par contre ils ont assez d'énergie pour exciter, par collisions, l'enduit fluorescent qui tapisse l'intérieur du tube. C'est la raison pour laquelle on les appelle des *tubes fluorescents*. La fluorescence est la capacité d'absorber du rayonnement et de le réémettre dans une autre fréquence. Ainsi la fluorescéine absorbe le rayonnement solaire et réémet dans le vert. Les chemises en nylon peuvent absorber du rayonnement ultra violet et réémettre dans le visible (c'est la "lumière noire" des boîtes de nuit branchées) etc. Cet enduit blanc du tube au néon est bombardé par des électrons qui ont des énergies correspondant à la gamme de UV, mais en percutant les substances constituant l'enduit ils provoquent une réémission dans le visible. Cet enduit est composé de telle façon que lors de la réémission sa lumière soit la plus proche possible de la lumière visible. Mais ça n'est pas tout à fait le cas. C'est la raison pour laquelle la lumière des néons vous semble si "bizarre".

Ce qu'il faut retenir c'est qu'il peut exister des milieux "bitempérature". La raison de cette situation est que le champ électrique régnant dans le tube, lié à la mise en tension des électrodes communique prioritairement de l'énergie aux électrons, qui la rétrocèdent aux ions par collisions avec ceux-ci. Mais comme le transfert d'énergie entre gaz d'électrons et gaz d'ion est peu efficace on peut avoir un écart de température très important. Ceci est dû en particulier au fait que le milieu est raréfié. Si le tube fuit et que la pression s'accroît cette "situation hors d'équilibre" disparaît aussitôt. Fortement couplé aux ions, le gaz d'électrons se refroidit très rapidement. Alors ces électrons, moins "agités" (la température absolue dans un gaz correspond au mouvement d'agitation thermique) retournent sagement sur les atomes qui se désionisent, redeviennent neutres.

L'expérience de la Z-machine a conduit à une situation très curieuse. Il y a deux espèces en présence :

- Le gaz d'électrons
- Le gaz d'ions (dans l'inox, essentiellement des noyaux de fer, chargés positivement)

Quand les gens, depuis 1998, essayaient de rendre compte de leurs mesures ils n'avaient accès qu'à la température électronique, en effectuant des mesures sur les rayons X émis. Pourquoi le gaz d'électrons est-il dans ces expériences la principale source de ce rayonnement ? Parce qu'autour du plasma se trouve un champ magnétique très élevé. Quand les électrons, lancés à 40.000 km/s pénètrent dans cette région où règne ce champ magnétique intense ceci les fait spiraler. Alors ils "crient", ils émettent un "rayonnement de freinage". C'est en effectuant des mesures sur ces rayons X émis que les expérimentateurs ont mesuré la température de ce gaz d'électrons : 35 millions de degrés dans les expériences dont on rend compte dans le présent papier.

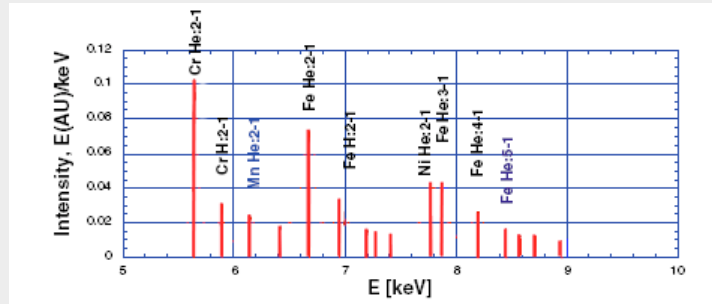
Mais à l'aide de formules (la "formule de Bennett"), s'ils tentaient d'évaluer la température que devaient avoir les ions fer pour contrebalancer l'énorme "pression magnétique", extérieure au plasma il leur fallait admettre que celle-ci devait avoir une valeur considérablement plus élevée. Dès 1998, quelles que soit les expériences faites cet écart des deux températures s'imposait comme une évidence. Il fallait ces fortes valeurs pour que le plasma ne soit pas instantanément écrasé par la pression magnétique. On voit que ceci suggérait un état hors d'équilibre (à l'équilibre thermodynamique toutes les températures des espèces composant un mélange gazeux sont égales) une situation bitempérature inverse de celle du tube au néon, où cette fois c'était le gaz d'ions qui se trouvait être plus chaud que

le gaz d'électrons.

Pour tirer cela au clair les gens de la Z machine ont voulu effectuer des mesures. Primo ils ont mesuré le diamètre du cordon de plasma qui se formait en fin de compression. Ils ont même pu tracer une courbe avec sept points de mesure, donnant l'évolution de ce diamètre dans le temps. Une valeur minimale était atteinte, de 1,5 à 2 mm, puis ce cordon se mettait à se dilater.

Ils ont ensuite tenu absolument à obtenir des mesures de températures liés aux ions fer, et pour cela ils ont utilisé la classique méthode de l'évaluation de l'élargissement des raies spectrales. Les noyaux (comme les atomes, les molécules) émettent du rayonnement selon un certain spectre qui présente des raies caractéristiques.

Si le milieu est relativement froid ces raies sont minces.



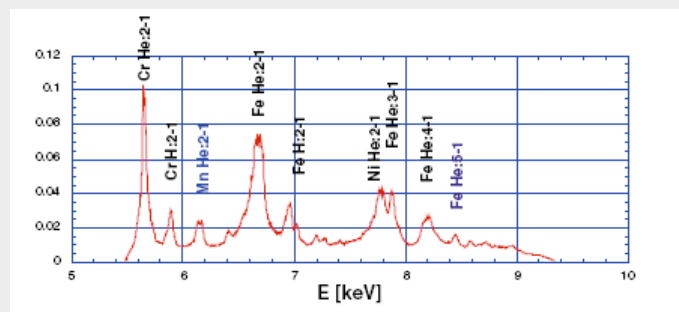
Spectre d'émission de l'acier inoxydable "relativement froid", porté à une température de 100.000° K
On identifie les raies du chrome (les premières, à gauche) puis celles du manganèse, du fer et du nickel.
Dans cet acier inox le carbone représente 0,15 % du mélange et ses raies ne sont pas visibles.

Ces raies correspondent à des excitations électroniques. Autour d'un noyau orbitent des électrons, sur des orbites bien précises, pour des raisons liées à la mécanique quantique (la quantification des orbites). Un apport d'énergie d'origine quelconque peut provoquer une "transition", c'est à dire un changement d'orbite d'un des électrons. Ce changement se fait toujours dans le sens de la migration des électrons vers une orbite plus distante, qui représente plus d'énergie. Il n'y a pas besoin de faire de savants calculs pour évoquer cette idée. Vous savez très bien que pour mettre des charges de masse M sur orbite, plus cette orbite est haute plus il faut une fusée puissante. L'apport d'énergie met donc l'électron sur une orbite "plus haut", plus distante du noyau. Il n'y reste pas longtemps (il existe une durée de vie de ces états excités) et ne tarde pas à retomber en quelques nanosecondes sur une orbite plus proche du noyau. Ce faisant il perd de l'énergie qui est émise sous forme d'un photon dont l'énergie est égale à la différence d'énergie des deux niveaux d'orbitation. D'où ce spectre en "raies".

Un atome comme le fer possède 26 électrons. Tous sont capables d'effectuer des changements d'orbites, de redescendre, pas forcément sur leur orbite initiale. D'où un spectre composé d'une multitude de raies. Certaines sont plus hautes que d'autres. A quoi correspond cette "hauteur des raies" ? A la puissance émise selon cette fréquence. Une raie mesure la contribution d'une transition particulière certaines transitions sont plus probables que d'autres. Ce sont ces transitions les plus probables, donc fréquentes qui donneront l'essentiel du rayonnement. En jetant un oeil sur le schéma ci-dessus on voit que pour de l'inox dont la température serait entre 58.000 (5 électrons-volts) et 116.000° K (10 électrons-volts) l'émission la plus forte provient d'une raie du chrome. La raie du manganèse est "plus modeste". A ces températures les atomes sont déjà très déshabillés de leurs électrons. Mais il en reste. Combien ? Je n'ai pas sous la main de bouquin pour pouvoir vous répondre. Le déshabillage est progressif. Je ne sais pas pas à quelle température il faudra porter du fer ou du chrome pour obtenir le déshabillage complet, que le dernier électron soit arraché. Ça se calcule d'ailleurs. C'est l'énergie qu'il faut fournir pour arracher ce dernier électron à un noyau doté de 26 charges positives.

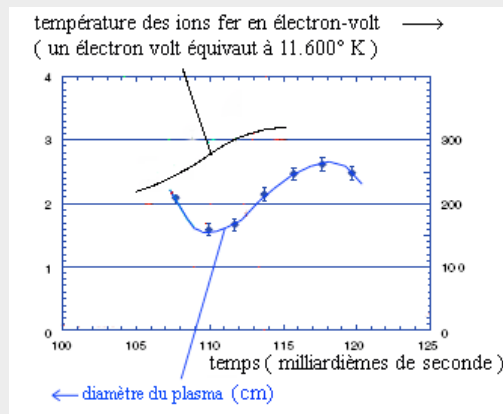
Ce qui a été mesuré dans les manips de Sandia se réfère à un spectre d'excitation-déexcitation des électrons qui sont restés autour des noyaux.

L'élargissement des raies est lié à l'effet Doppler-Fizeau.



Spectre de ce même matériau, porté à des milliards de degrés. L'effet Doppler a entraîné un élargissement des raies

La fréquence correspondant à un saut orbital donné (à une raie) sera plus élevée si l'atome s'approche de l'observateur et plus basse s'il s'en éloigne (c'est alors du "redshift"). Ainsi l'agitation thermique *élargit les raies*. Les mesures, fiables, ont été effectuées et ont confirmé ces fortes valeurs de la température ionique, qui se chiffrent en milliards de degrés (**entre 2,66 et 3,7 milliards de degrés !**).



Résultats de mai 2005 sur la Z-machine de Sandia.
En noir, la montée de la température ionique. En bleu le diamètre du plasma.
En abscisse : le temps en nanosecondes
(une nano seconde représente un milliardième de seconde)

Ce saut en température n'est pas un événement parmi d'autres. C'est une grande découverte scientifique et il est très probable qu'elle aura sur notre société planétaire des conséquences considérables.

Les ions arrivent ainsi à être cent fois plus chauds que les électrons. Jusqu'ici c'était la seule explication possible, mais cette fois cela a pu être mesuré, dans des expériences totalement reproductibles. Qui plus est cette température ionique croît dans le temps. Enfin l'énergie émise par le gaz d'électrons, sous forme de rayonnement X s'est avéré être 3 à 4 fois supérieure à l'énergie cinétique que possédaient les tiges d'acier inox du "liner à fils" quand elles se sont trouvées rassemblées sur l'axe.

Haines et ses collaborateurs ont tenté dans le papier qui suit d'élucider ce mystère. D'où pouvait provenir cette énergie ?

Quand on met en marche la Z-machine l'énergie se distribue sous plusieurs formes différentes. Il y a l'énergie thermique du plasma, qui correspond à la somme des énergies cinétiques de ses composants (principalement l'énergie cinétique des ions fer). Mais il y a aussi une autre énergie, plus difficile à comprendre : l'énergie magnétique qui se trouve distribuée dans tout l'espace entourant le fin cordon de plasma formé sur l'axe. Haines a donc suggéré que des "instabilités MHD" puissent naître qui permettraient au plasma de récupérer une partie de cette énergie. Comme il en convient dans l'article, cette théorie est très embryonnaire et n'a donné lieu à aucune "simulation". La conclusion est simplement "qu'il n'est pas impossible que cet échauffement soit dû à ce phénomène". Il montre au passage le faible couplage collisionnel entre les électrons et les ions, qui explique le retard de l'émission des rayons X, dans le temps. Le phénomène échauffe d'abord les ions, qui retransmettent une partie de cette énergie au gaz d'électrons, lequel devient alors émissif (par rayonnement de freinage). Ceci étant les mesures (quatre points) montrent que le gaz d'ions fer continue de s'échauffer. Le maximum de température n'est visiblement pas atteint. Pourtant la température (mesurée) des ions fer atteint 3,7 milliards de degrés ! trente sept fois la température qu'Iter ne pourra jamais dépasser : 100 millions de degrés.

Deeney a dit que face à un tel résultat il avait refait n fois l'expérience et les mesures, pour être bien sûr. On notera que dans le titre de l'article il est écrit : "plus de deux milliards de degrés". Logiquement les chercheurs auraient du mentionner la valeur maximale, de 3,7 milliards de degrés. Appelons cela un mouvement de... timidité, face à l'énormité du résultat obtenu.

Il faut se rappeler qu'avec 500 millions de degrés on peut faire fusionner du Lithium et de l'hydrogène, en obtenant de l'hélium et pas de neutrons. Avec un milliard on a une seconde "fusion propre", toujours sans radioactivité ni déchets (seulement de l'hélium) : celle du Bore et de l'hydrogène. Que peut-on faire avec 3,7 milliards de degrés, voire plus ? Si la température des ions continue de croître il est logique de penser que des températures ioniques encore supérieures pourraient être atteintes.

Une remarque. Dans ces expériences l'intensité du courant électrique que débite la Z-machine (de 18 à 20 millions d'ampères) ne peut se maintenir indéfiniment. C'est une décharge : cette intensité croît dans le temps, passe par un maximum, puis décroît. Dans la Z-machine le pulse dure 100 milliardièmes de seconde. Autre aspect : si Haines a raison, l'environnement magnétique du cordon de plasma contient une très importante énergie. Donc si on maintient le courant ce champ magnétique va continuer de "nourrir" le plasma en faisant monter la température ionique. Ainsi ces 3,7 milliards de degrés ne constituent pas un plafond et personne n'est à même de dire quelle température on pourrait atteindre avec ce dispositif.

La première retombée de telles expériences pourrait être la "fusion pure non-polluante", avec un mélange de lithium et d'hydrogène (le lithium, présent dans l'eau de mer et dans les saumures se trouve dans toutes les régions du monde. Actuellement son prix est de 59 dollars le kilo, taxes comprises). C'est l'Age d'Or du point de vue de l'énergie (avec en prime la bombe H à fusion pure, pas chère, pour tous). Si tout cela se confirmait, aucun pays au monde ne pourrait se prévaloir "de détenir les réserves de lithium de la planète". Comme le lithium est présent dans l'eau de mer ces réserves planétaires sont a priori illimitées.

Comme la température dans une supernova est de dix milliards de degrés et que celle-ci, par des réactions de fusion, parvient à créer tous les atomes de la table de Mendeleiev (et leurs isotopes radioactifs à durées de vies plus ou moins importantes) si une Z-machine "gonflée" parvient un jour à réaliser 10 milliards de degrés on aura réalisé en laboratoire les plus fortes températures que la Nature soit capable de réaliser dans le cosmos. Ce bond en avant représente donc un changement drastique en matière de physique nucléaire et de notre physique en général.

Jusqu'ici on s'était contenté de "braises". Ce pas représente vraiment l'invention du feu nucléaire.

Ion Viscous Heating in a Magnetohydrodynamically Unstable Z Pinch at Over 2×10^9 KelvinM. G. Haines,^{1,*} P. D. LePell,² C. A. Coverdale,³ B. Jones,³ C. Deeney,³ and J. P. Apruzese⁴¹*Physics Department, Imperial College, London SW7 2BW, United Kingdom*²*Ktech Corporation, Albuquerque, New Mexico, USA*³*Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA*⁴*Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, District of Columbia, USA*

(Received 13 May 2005; revised manuscript received 17 October 2005; published 23 February 2006)

Pulsed power driven metallic wire-array Z pinches are the most powerful and efficient laboratory x-ray sources. Furthermore, under certain conditions the soft x-ray energy radiated in a 5 ns pulse at stagnation can exceed the estimated kinetic energy of the radial implosion phase by a factor of 3 to 4. A theoretical model is developed here to explain this, allowing the rapid conversion of magnetic energy to a very high ion temperature plasma through the generation of fine scale, fast-growing $m = 0$ interchange MHD instabilities at stagnation. These saturate nonlinearly and provide associated ion viscous heating. Next the ion energy is transferred by equipartition to the electrons and thus to soft x-ray radiation. Recent time-resolved iron spectra at Sandia confirm an ion temperature T_i of over 200 keV (2×10^9 degrees), as predicted by theory. These are believed to be record temperatures for a magnetically confined plasma.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.96.075003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.075003)

PACS numbers: 52.59.Qy, 52.35.-g

There has been some difficulty in understanding how the radiated energy in a wire-array Z pinch implosion could be up to 4 times the kinetic energy [1–4], and also how the plasma pressure could be sufficient to balance the magnetic pressure at stagnation if the ion and electron temperatures were equal. In fact, theoretically the excess magnetic pressure should continue to compress the plasma leading to a radiative collapse. Some theories [5,6] have been devel-

not appear to be significant at the time of the main 5 ns FWHM soft x-ray radiation pulse where mainly long wavelength $m = 0$ modes can be and are observed. There is evidence from other wire-array experiments [8] that not all the mass and perhaps not all the current arrives on axis to the main pinch but resides in the trailing mass arising from axially nonuniform erosion and ablation of the wire cores. However, while we assume that 30% of the initial mass is

Traduisons le titre :

Chauffage visqueux des ions dans un pinch magnétohydrodynamiquement instable, une température de plus de 2×10^9 K

Puis l'abstract :

Des ensembles constitués par des fils métalliques, puissamment concentrés selon l'axe de symétrie du système constituent les sources de rayons X de laboratoire les plus puissantes à ce jour. Mais en outre, dans certaines conditions on peut observer une énergie sous forme de rayons X "mous", émise dans un pulse d'une durée de 5 nanosecondes, au moment où la compression maximale est atteinte (stagnation) **qui correspond à une énergie excédant l'énergie initiale sous forme cinétique, d'un facteur 3 à 4**. Un modèle théorique est développé pour expliquer ce phénomène en suggérant qu'il soit imputable à une conversion rapide d'énergie magnétique, portant les ions à une très forte température, à travers des phénomènes d'instabilités MHD de type $m = 0$, à croissance rapide. Il y a alors saturation non-linéaire et chauffage visqueux du gaz d'ions. Cette énergie d'abord transférée aux ions est ensuite transmise aux électrons par simple équipartition, collisions ions-électrons, et ces derniers émettent alors des rayons X mous. On a récemment obtenu à Sandia des spectres, ces mesures s'étendant dans le temps, qui ont confirmé une température ionique de 200 keV (2×10^9 degrés), en accord avec cette théorie. On obtient alors un record de température pour un plasma confiné magnétiquement.

Haines et ses co-auteurs commencent par rappeler le fond du problème. On n'est pas parvenu à expliquer comment l'énergie dégagée par le plasma pouvait atteindre 3 ou 4 fois l'énergie cinétique "incidente", c'est à dire la somme des $1/2 mV^2$ des atomes de métal lancés les uns contre les autres, en direction de l'axe, au voisinage duquel ils finissent leur course, cette énergie cinétique étant transformée en énergie thermique. Quand on analyse les données, le compte n'y est pas. Il sort plus d'énergie qu'il n'en entre dans ce système et il faut bien qu'elle provienne de quelque part. Haines pense alors à l'énergie magnétique. Qu'en est-il ?

Si on considère un liner constitué de fils (240) et qu'on y fasse passer un courant on peut calculer l'intensité du champ magnétique, azimutal que créent les autres fils. Ce fil subit une force de Laplace $J \times B$. Il est facile d'établir que cette force est la même que celle qui serait due au champ créé par un conducteur linéaire disposé selon l'axe et où on ferait circuler tout le courant (dans la manip de Sandia : 20 millions d'ampères).

C'est aussi ainsi qu'on peut calculer la valeur du champ extérieur, modulo l'hypothèse faite : qu'on peut considérer ce champ comme créé par des fils de longueur infinie, ce qui est loin d'être le cas. Cela donne donc de simples ordres de grandeur. A ce champ magnétique est associée une pression magnétique qu, si elle s'exprime en newtons par mètres carrés correspond aussi à des joules par mètre cube. La pression magnétique est une densité d'énergie volumique. On évalue celle qui serait créée par un conducteur linéaire infini.

$$B = \frac{\mu_o I}{2 \pi r} \quad p_m = \frac{B^2}{2 \mu_o} = \frac{\mu_o I^2}{8 \pi^2 r^2}$$

On peut, au voisinage de la nappe de fils où on peut en première approximation retenir cette façon de calculer le champ calculer l'énergie magnétique localisée entre un cylindre de rayon r et un cylindre de rayon dr

$$dE = \frac{\mu_o \pi I^2 h}{4 \pi^2 r} dr$$

Soit r_{\min} le rayon minimal du plasma. Ça n'a évidemment aucun sens d'intégrer cette expression de cette valeur à l'infini, puisqu'elle n'est valable que pour des conducteurs linéiques dont on peut considérer la longueur comme infinie. Mais, en écrivant :

$$E = \int_{r_{\min}}^{\infty} \frac{\mu_o I^2 h}{4 \pi^2 r} dr = \frac{\mu_o I^2 h}{4 \pi^2} [\text{Log } r]_{r_{\min}}^{\infty}$$

on voit que plus le paquet d'atomes métalliques se trouve rassemblé au voisinage de l'axe du système, plus grande est l'énergie constituée sous forme de pression magnétique au voisinage de l'objet. Haines voit donc là la source d'énergie qui est susceptible d'accroître la température des ions, qui ont déjà converti leur énergie cinétique sous forme d'énergie cinétique d'agitation thermique. Si V est la vitesse radiale des ions au moment de l'impact, de la "stagnation" on peut évaluer cette vitesse d'agitation thermique en faisant simplement :

$$\frac{1}{2} m V^2 = \frac{3}{2} k T \quad \text{avec} \quad k = 1,38 10^{-23} \quad (\text{Constante de Boltzmann})$$

L'usage de cette formule implique que "le gaz d'ions fer" soit "thermalisé", qu'il ait acquis une distribution de vitesse de Maxwell-Boltzmann. Mais comme l'établira plus loin Haines, le temps de relaxation dans cet milieu est très faible.

τ_{ij} , temps de relation dans le milieu ionique : 37 picosecondes (Haines)

Ajoutons que le couplage énergétique avec le gaz d'électrons est aussi faible. En outre l'énergie redistribuée ne peut l'être que sous forme cinétique (énergie d'agitation thermique des ions électrons). Cette formule, très simple, est donc valable. Enfin, dans la mesure où on suppose que le gaz d'ions n'est pas nourri par une autre source d'énergie, et on verra plus loin que c'est le cas.

Ceci étant, avec une vitesse de 1000 km/s on obtiendrait effectivement les 2 milliards de degrés. Quand le système en implosion passe-t-il de la configuration "fils distincts" à la configuration "couronne de plasma" ? Le papier ne le dit pas. Avec un liner de 4 cm de rayon et un temps d'implosion de 100 nanosecondes on obtient une vitesse radiale moyenne de 400 km/s, minimale. L'atome de fer pèse 9×10^{-26} kilo mais si c'est la vitesse des ions au moment de l'impact on obtient quand même 348 millions de degrés. Ça n'est qu'une vitesse moyenne. Quand on écrit l'équation différentielle du mouvement on a une accélération spectaculaire en finale. Il faut aussi tenir compte du fait que la décharge n'est pas à intensité constante. I croît au cours du temps. On a :

$$r'' = - \frac{\mu_o [I(\ell)]^2}{2 \pi M r}$$

M représente la masse du liner, au mètre. On voit qu'en fin de décharge et en fin de course l'accélération croît. La vitesse s'envole. Haines écrit :

<p>There has been some difficulty in understanding how the radiated energy in a wire-array Z pinch implosion could be up to 4 times the kinetic energy [1–4], and also how the plasma pressure could be sufficient to balance the magnetic pressure at stagnation if the ion and electron temperatures were equal. In fact, theoretically the excess magnetic pressure should continue to compress the plasma leading to a radiative collapse. Some theories [5,6] have been developed to explain the additional heating, but neither of these have addressed the pressure imbalance.</p>	<p>Une difficulté est apparue pour expliquer comment l'énergie rayonnée par l'implosion d'un système de fils selon leur axe OZ a pu atteindre jusqu'à 4 fois l'énergie cinétique [1, 4] et comment la pression dans le plasma pouvait être suffisante pour équilibrer la pression magnétique au moment de la stagnation, si les températures ioniques et électroniques étaient égales. En fait, théoriquement, l'énorme pression magnétique aurait du continuer de comprimer le plasma en l'amenant à un collapse radial complet. Quelques théories [5, 6] ont été développées pour tenter d'expliquer ce chauffage additionnel, mais aucune n'a pu rendre compte de cet équilibre des pressions.</p>
---	---

Coup d'oeil aux références citées :

- [1] C. Deeney et al., Phys. Rev. E 56, 5945 (1997).
- [2] C. Deeney et al., Phys. Plasmas 6, 3576 (1999).
- [3] J. P. Apruzese et al., Phys. Plasmas 8, 3799 (2001).
- [4] C. A. Coverdale et al., Phys. Rev. Lett. 88, 065001 (2002).
- [5] L. I. Rudakov and R. N. Sudan, Phys. Rep. 283, 253 (1997).
- [6] A. L. Velikovich, J. Davis, J.W. Thornhill, J. L. Giuliani, Jr., L. I. Rudakov, and C. Deeney, Phys. Plasmas 7, 3265 (2000).

La référence [1] remonte à 1997. Donc, dès cette époque ce phénomène inexplicable était déjà constaté. Deeney est le directeur des manips de la Z-machine. Je n'ai pas lu ces articles. Si des gens pouvaient me les envoyer en pdf je pourrais les parcourir et donner des commentaires additionnels.

Sautons directement aux conclusions du papier :

In conclusion, it appears that short wavelength $m = 0$ MHD instabilities at stagnation in low mass implosions provide fast viscous heating of ions to record temperatures of over 200 keV. Such temperatures have been measured, the energy coming from conversion of magnetic energy on a 5 ns time scale. The ions heat the electrons which immediately radiate the energy. Furthermore, the broadened spectral lines arising from the high ion temperature will permit a greater radiative power to occur due to decreased opacities. The proposed mechanism provides a plausible explanation of several phenomena of fundamental importance to Z pinch dynamics including pressure balance at stagnation, the absence of radiative collapse, the significant excess of x-ray radiation

En conclusion il apparaît que des instabilités $m = 0$ de courtes longueurs d'onde se produisant dans les conditions de stagnation, impliquant de faibles quantités de matière, produisent un chauffage visqueux rapide des ions jusqu'à une température record de 200 keV (deux milliards de degrés). Des telles températures ont été mesurées, une conversion d'énergie magnétique en énergie cinétique s'effectuant dans un temps de l'ordre de 5 nanoseconde. De plus le phénomène d'élargissement des raies, liées à la forte température des ions permet une plus grande émission de radiation du à la décroissance de l'opacité. Le mécanisme proposé donne une explication plausible de différents phénomènes d'une importance fondamentale pour l'étude des Z pinch dynamiques, incluant l'équilibre des pressions à la stagnation, l'absence de collapse radial et l'excès significatif de rayonnement X.

L'équation (1) du papier est citée comme étant "la relation de Bennet", qui date de 1934 (évoquée comme étant présentée dans la référence [1]). On peut la rétablir sans trop de problème. Elle exprime simplement que la pression magnétique égale la pression dans le plasma. La pression magnétique est donné plus haut. La pression totale dans le plasma est donnée comme étant la somme des pressions partielles constituant la contribution

- du gaz d'électrons $n_e k T_e$
- et du gaz d'ions $n_i k T_i$

où k est la constante de Boltzmann.

Si Z est le degré d'ionisation

$$n_e = Z n_i$$

Si de plus ces températures absolues sont exprimées en électron-volts et non en degrés Kelvin, avec

$$k T = e V$$

alors la pression dans le plasma s'écrit :

$$n_i e (T_i + Z T_e)$$

On voit apparaître le second membre de la "relation de Bennet". Plus faut on avait établi que :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \quad p_m = \frac{B^2}{2 \mu_0} = \frac{\mu_0 I^2}{8 \pi^2 r^2}$$

r est alors le rayon minimal du cordon de plasma confiné selon l'axe. Bennet fait alors intervenir un nombre d'ions au mètre de liner N_i .

$$\frac{\mu_0 I^2}{8 \pi^2 r^2} = p_i + p_e (\text{pressions partielles}) = n_i k T_i + n_e k T_e = n_i k (T_i + Z T_e)$$

$$\frac{\mu_0 I^2}{\pi} = 8 r^2 n_i e (T_i + Z T_e) \quad \text{si températures en eV}$$

$$n_i = \frac{N_i}{\pi r^2} \quad \text{où } r \text{ est le rayon du plasma}$$

Ce qui donne (Bennet, 1934)

$$\mu_0 I^2 = 8 \pi N_i e (T_i + Z T_e)$$

Cette expression est remarquable parce que le rayon minimal du cordon de plasma n'intervient pas. Pourquoi ?

Quand le cordon de plasma mincit, la pression magnétique s'exerçant sur lui croît comme l'inverse du carré de son rayon. Mais la densité des ions croît également de la même façon. Ceci compense cela. Ce qui est curieux, effectivement, c'est que la forte différence entre les températures ionique et électronique ne dépende pas du rayon final du cordon de plasma, disposé selon l'axe, qui pourrait être aussi petit que l'on veut. On a une équation différentielle qui donne l'évolution du rayon r du plasma en fonction du temps :

$$r'' = - \frac{\mu_o [I(t)]^2}{2 \pi M r}$$

On peut calculer l'allure des courbes (à condition de disposer de la loi de montée du courant $I(t)$, qui est une "entrée" du problème. En principe dans les Z machines cette montée est pratiquement linéaire, sauf erreur). La descente de r s'accroît. Je veux dire que la vitesse d'implosion croît au fur et à mesure que r diminue. Si r devenait nul cette vitesse d'implosion deviendrait infinie. Mais il en écrivant cette équation on a oublié quelque chose : la force de pression qui s'oppose à l'implosion. Il faudrait en tenir compte. Ceci étant le problème est moins simple qu'il n'y apparaît. Cette pression qui s'oppose à l'implosion dépend de la température ionique. Or nous ne pouvons pas la modéliser puisque, selon Haines, sa croissance dépend d'un phénomène que nous ne savons pas prendre en charge : le chauffage du plasma par des micro-instabilités MHD.

Moralité : il faut savoir s'arrêter quand on tente de modéliser et qu'on cesse de prendre en compte tous les paramètres. On a bien la formule :

$$\frac{1}{2} m V^2 = \frac{3}{2} k T \quad \text{avec} \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \quad (\text{Constante de Boltzmann})$$

mais on ne connaît pas la vitesse V des ions en fin d'implosion. Introduire une vitesse moyenne (rayon du liner sur temps d'implosion) n'a guère de sens puisque la vitesse croît en fin d'implosion.

Haines se réfère alors à un essai particulier de la Z-machine, le Z1141 où la masse du liner par mètre était de 450 milligrammes de fils d'acier inox ($4,5 \times 10^{-5}$ k/m), agencés en deux couronnes concentriques, la première, d'un diamètre de 55 mm faisant le double de la masse de l'autre, d'un diamètre de 27,5 mm.

Un peu plus loin Haines se servira d'une valeur de N_i (nombre d'ions au mètre) de $3,41 \times 10^{20}$. La masse d'un atome de fer étant de 9×10^{-26} kilo si je divise $4,5 \times 10^{-5}$ k/m par cette masse j'obtiens 5×10^{20} . Mais il précise qu'au cours de l'implosion 30 % de la masse "est perdue en route". On retrouve donc à peu de choses près son chiffre.

Il indique que les mesures de température électronique effectuées donnent 3 keV au moment de la stagnation, c'est à dire 35 millions de degrés. Il précise que le courant est monté à 18 méga-ampères en 100 nanosecondes. Il estime que 30 % de la matière "a été perdue en route", mais que 70 % est arrivée à bon port. En effet c'est ce qui ressort de toutes ces études avec les liners à fils (thèse de Bavay). Pendant le collapse ces fils "s'évaporent" tels des comètes en train de dégazer. Ils laissent "dans leur sillage" une traînée de plasma, dont la masse peut représenter de 30 à 50 % de la masse des fils.

Avec $N_i = 3,41 \times 10^{20}$ ions au mètre et $Z = 26$ (fer), appliquons la relation de Bennet avec la charge électrique unitaire $e = 1,6 \times 10^{-19}$ (Coulomb)

$$\mu_o = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ MKSA}$$

Calculons ($T_i + Z T_e$) :

$$T_i + Z T_e = \frac{4 \pi 10^{-7} (1,8 \cdot 10^7)^2}{1,6 \cdot 10^{-19} 8 \pi 3,41 \cdot 10^{20}} = 296,920 \text{ eV} = 296 \text{ keV}$$

ce qui correspond à **3,44 milliards de degrés**. Quand le diamètre du cordon de plasma passe par un minimum voir courbe, la mesure de température ionique est de 270 keV, soit 3,12 milliards de degrés. **Compte tenu de la fourchette d'erreur cet accord est tout simplement remarquable.**

Comment évaluer la température ionique dans un montage (J.P.Petit 27 juin 2006)

Reprenons le détail de l'établissement de l'équation différentielle donnant la dynamique d'un élément du liner soumis à la force électromagnétique radiale. Reprenons tout cela. On établit facilement que le champ magnétique créé par un rideau de fils disposés suivant un cylindre est équivalent à celui qui serait créé par un fil unique disposé selon l'axe et à travers lequel passerait tout le courant. Soit :

$$B(r) = \frac{\mu_o I}{2 \pi r}$$

Il y a n fil. Dans chaque fil passe le courant I/n . Celui-ci est soumis à la force de Laplace, par unité de longueur:

$$\frac{I}{\pi n} B = \frac{\mu_o I^2}{2 \pi n r}$$

Appelons M la masse par unité de longueur du liner. Tant que le fil n'est pas vaporisé l'équation différentielle s'obtient en écrivant :

$$\frac{M}{n} \frac{d^2 r}{dt^2} = - \frac{\mu_o I^2}{2 \pi n r} \quad \text{soit} \quad r'' = - \frac{\mu_o I^2}{2 \pi r M}$$

où I dépend du temps, d'ailleurs. Mais c'est une donnée de l'équidif.

Remplaçons maintenant le fil par une vapeur métallique Plus précisément, remplaçons tout le système des fils par un cylindre de plasma, un "pinch". Celui-ci est toujours parcouru par le courant I. Sur la surface nous pouvons calculer le champ B , toujours par la même formule. Mais nous pouvons aussi faire intervenir une force de pression, qui tend à stopper cette implosion. Cette pression est la pression ionique

$$p_i = n_i k T_i$$

Nous n'en sommes pas maîtres puisqu'elle dépend de l'énergie communiquée aux ions d'une manière encore non élucidée, grâce aux instabilités MHD, selon Haines. Nous avons la force de Laplace qui s'exerce sur chaque "fil" ou chaque secteur du plasma qui correspondait au secteur $2\pi/n$ qu'il occupait. La force de pression qui s'exerce sur ce secteur par unité de longueur est :

$$p_i \frac{2\pi r}{n}$$

Je peux obtenir l'équation différentielle du mouvement en écrivant :

$$\frac{M}{n} r'' = -\frac{\mu_0 I^2}{2\pi n r} + n_i k T_i \frac{2\pi r}{n}$$

On a :

$$n_i = \frac{N_i}{\pi r^2}$$

en introduisant dans l'équation :

$$r'' = -\frac{\mu_0 I^2}{2M r} + \frac{2 N_i k T_i}{M r}$$

Comme on ne sait pas donner l'évolution de la température ionique au fil du temps, puisqu'elle dépend de cet apport extérieur d'énergie, on ne peut guère aller plus loin, sauf en cherchant à évaluer la valeur de la température ionique quand l'accélération est nulle, en "stagnation condition", quand l'accélération est nulle, que $r'' = 0$. On obtient alors :

$$T_i = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi N_i k} = \frac{4\pi 10^{-7} (1.810^7)^2}{4\pi \times 3.41 10^{20} \times 1.3810^{-23}} = 6.88 10^9 K$$

On voit que cette température ionique (il s'agit d'un ordre de grandeur dans un calcul grossier), correspondant à une "stagnation condition" dépend du carré de l'intensité électrique totale I et croît quand le nombre d'ions au mètre est réduit. Donc pour une même masse et une même géométrie de liner on aurait intérêt à utiliser des atomes plus lourds soit, comme suggéré par un ancien de la DAM (division des applications militaires) par exemple de l'or, ductile, facile à travailler, quatre fois plus lourd que l'inox. Avec la configuration de la Z-machine de Sandia on pourrait espérer atteindre, avec du fil d'or une température de dix milliards de degrés.

Mais encore faudrait-il que tous les paramètres soient maîtrisés, c'est à dire qu'on sache "pourquoi ça a marché". La vitesse de sublimation du matériau peut jouer un rôle-clé. Plus elle est basse et plus longtemps le liner restera sous forme de fils individualisés, maintenant l'axisymétrie. Si celle de l'or est trop élevée, le remplacement de l'inox par ce matériau pourrait au contraire donner de moins bons résultats. Mais en tout état de cause il faut essayer. Et essayer bien sûr avec des intensités accrues. Qu'est-ce que les Américains obtiendront avec ZR, qui développera 28 millions d'ampères au lieu de 20 ? Logiquement la température ionique devrait alors atteindre des valeurs plus élevées. Peut être cinq milliards de degrés.

Si on se fie à cette expression, qui nous donne la tendance de la manip, la façon dont les paramètres devraient jouer sur la température ionique en fin de compression cela indiquerait qu'avec un montage identique à celui de la Z-machine de Sandia le générateur de Gramat ne permettrait pas de dépasser 50 millions de degrés. Mais d'autres montages peuvent être envisagés. Voir plus loin.

Revenons à la formule de Bennet. Dans la manip de Sandia la température électronique T_e mesurée (d'après l'émission de rayons X) est de 3 keV . Avec $Z = 26$ on a :

$$Z T_e = 78$$

Donc la pression n'est pas due au gaz d'électrons ! Il reste pour équilibrer la pression magnétique (relation de Bennett) la pression des ions. Mais il faudrait que ceux-ci soient à une température de 219 keV soit... 2,54 milliards de degrés ! En effet il faut que :

$$T_i + 78 \text{ (mesuré)} = 296$$

Mais ça n'est pas tout. Antérieurement à ces manips Sandia avait opéré avec des "gas puff" des "bouffées de gaz" envoyées au centre du système et comprimées à l'aide du liner à fil.

However, the same pressure balance discrepancy arises in gas puff Z pinch implosions [9] in which the density and temperature profiles have actually been measured at stagnation, but which also have a hitherto unexplained high measured ion temperature of 36 keV.

Quoi qu'il en soit, le même désaccord concernant l'équilibre des pressions a été retrouvé dans des expériences de Z-pinch menées sur des bouffées de gaz [9] dans lesquelles les profils de densité et de température ont été aussi mesurés en condition d'arrêt mais aussi avec une température des ions de 36 keV (3 millions de degrés) également inexplicquée.

[9] K. L. Wong et al., Phys. Rev. Lett. 80, 2334 (1998).

Là encore, si un lecteur pouvait m'envoyer le pdf de la référence [9]), j'examinerais ça de plus près.

Haines exclue le chauffage résistif, le simple effet Joule vers lequel s'était tourné Yonas. Il indique par exemple que pour chauffer un pinch d'un diamètre de 2 mm à 3 keV (3 millions de degrés seulement) il faut 8 microsecondes !

Il ne voit que le champ magnétique environnant comme source d'énergie possible. Il propose alors d'invoquer un chauffage des ions via des instabilités MHD à très courtes longueurs d'onde, qui soit suivi d'une équipartition, d'un chauffage du gaz d'électrons par collision ions-électrons, et finalement ceci se traduise par une émission d'énergie de ces mêmes électrons (par le classique Bremsstrahlung, ou rayonnement de freinage, c'est à dire par interaction avec le champ magnétique).

Ce qui suit évoque la nature de ces instabilités MHD évoquées. On débouche sur une équation de l'énergie qui s'écrit :

$$\rho \frac{c_A^2}{a} (c_A^2 + c_s^2) = \frac{3}{2} k (T_i - T_e) n_e v_{eq}$$

k est la constante de Boltzmann et v_{eq} la fréquence de collision. C_A est la vitesse de Halfven, C_s la vitesse du son, a est le diamètre minimal du plasma. Mais Haines écrit cette équation autrement en mettant les températures en électron-volts et en remplaçant cette fréquence de collision par son inverse, le temps de libre parcours moyen τ_{eq} .

$$\rho \frac{c_A^2}{a} (c_A^2 + c_s^2) = \frac{3}{2} e (T_i - T_e) n_e \frac{1}{\tau_{eq}}$$

Par rapport aux plasmas hors d'équilibre comme par exemple celui du tube au néon de votre cuisine vous noterez que c'est cette fois la température ionique qui est plus élevée que celle des électrons (alors que dans le tube c'est l'inverse : gaz d'électrons chaud, néon froid). Ci-après l'équation pour un milieu hors d'équilibre comme un simple tube au néon.

$$\frac{J^2}{\sigma} = \frac{3}{2} \frac{2 m_e}{m_i} e (T_e - T_i) n_e \frac{1}{\tau_{eq}}$$

Le premier membre représente le chauffage du gaz d'électrons par effet Joule. J est le vecteur densité de courant et σ la conductivité électrique. Le terme de droite, de la précédente équation se lit de la façon suivante. On a au dénominateur le temps de libre parcours de l'électron dans le néon, dont l'inverse est une fréquence de collision. Quand des électrons transfèrent de l'énergie à des ions ils le font avec peine et un coefficient, le rapport des masses, apparaît dans l'équation.

$$\frac{2 m_e}{m_i}$$

Mais quand un ion tape sur un électron le rendement de transfert d'énergie est l'unité. Donc ce coefficient de rapport de masse disparaît, ou plutôt il vaut... l'unité. Haines produit alors la formule classique du calcul de la fréquence de collision électron-ion. On est en "régime coulombien". On trouve dans l'expression la section efficace de collision électron-ion. Ceux qui connaissent la théorie cinétique des gaz reconnaîtront cette expression classique.

$$\frac{1}{\tau_{eq}} = \frac{8\sqrt{2\pi m_e} e^{5/2}}{3m_i (4\pi\epsilon_0)^2} \frac{Z^2 n_i \ln \Lambda_{ei}}{T_e^{3/2}}$$

La partie qui concerne la naissance d'instabilités MHD reste assez sommaire, en particulier parce que le paramètre de Hall des ions est supérieur à l'unité.

$$\text{paramètre de Hall des ions : } \beta_i = \frac{Z e B}{m_i v_{\parallel}} = \Omega_i \tau_{ii}$$

Ce qui intervient dans ce paramètre est la fréquence de collisions ion-ion.

Yonas m'a écrit que "la théorie de Haines explique bien cet état hors d'équilibre" mais je ne suis qu'à moitié convaincu. Disons que "l'explication" de Haines reste très embryonnaire et se résume à une vingtaine de lignes. Il suppose que ces instabilités affectent les ions et provoquent au sein de ce milieu un chauffage visqueux.

Le lecteur se demande sans doute à quoi ressemblent ces instabilités et comment elles apparaissent. La dissipation par effet Joule est, par unité de volume :

$$\frac{J^2}{\sigma}$$

Les instabilités envisagées créent une turbulence de la densité de courant. Les lignes de courant se resserrent, s'épanouissent, se resserrent de nouveau, selon des longueurs d'ondes qu'Haines chiffre en microns ou dizaines de microns. Ce sont des micro-instabilités. Si localement la densité de courant croît, cela s'accompagne d'un renforcement du champ magnétique, en vice-versa. Il s'agit donc d'une turbulence électromagnétique, typique des pinch. On trouve par exemple ces turbulences dans... la foudre. Un éclair, ça ne dure pas longtemps, mais les photos qu'on peut prendre d'un éclair en train de se dissiper montre des gouttelettes de plasma, à la queue leu leu. Dans ce cas le gaz (l'air) n'est pas totalement ionisé. Quand le pincement de la décharge se produit la densité de courant augmente, la température électronique aussi. La décharge de la foudre est un arc électrique. Les mécanismes qui s'y déroulent sont complexes. L'accroissement de l'intensité du courant électrique provoque un accroissement du dégagement de chaleur par effet Joule. le filament de plasma se dilate, etc...

Les micro-instabilités suggérées par Haines sont des "cousines" de ces instabilités-là. Il se produit des micro-pincements. La valeur locale de la densité de courant s'accroît, dont subséquemment la valeur du champ magnétique et de la pression magnétique aux alentours. Cet accroissement tend à accentuer le pincement. C'est le fondement de l'auto-instabilité du plasma, de cette turbulence électromagnétique. Il peut alors se passer alors... des tas de choses que seul le calcul permettrait de théoriser, que Haines n'a pas fait. le moins qu'on puisse dire est que le milieu est complexe. Supposons, avant que les instabilités ne se mettent à chauffer les ions du plasma que les deux température, électronique et ionique sont égales, par exemple à 20 millions de degrés. Un pincement se produit. Cela se traduit par un accroissement de la température électronique. Cela crée-t-il de nouvelles évasions d'électrons. Cela dépend du "temps caractéristique d'ionisation". Là encore, données, calcul. Mais, à la différence de l'instabilité de Vélikhov cette instabilité affecte le gaz d'ions, par "viscosité". Physiquement ces pinches "secouent" les ions radialement.

Je précise que dans ces plasmas le courant électrique est un courant électronique et n'est pas dû à un courant d'ions. Ce plasma est relié à des électrodes métalliques. Quand le pincement se produit il y a renforcement du champ magnétique et de la force de Laplace, qui est subie au premier chef par les électrons, qui transmettent cette *impulsion* aux ions par collisions. Cette striction de l'écheveau de lignes de courant électronique crée un champ électrique radial qui agit sur les ions en les tirant à leur tour. Dans cette instabilité on a un phénomène de micro-turbulence qui affecte le gaz d'électrons, lequel transmet à son tour ces "secousses" au gaz d'ions. Le temps caractéristique de thermalisation dans le gaz d'ions est très faible (37 picosecondes).

Il écrit alors l'équation de l'énergie, concernant le gaz d'ions en faisant figurer dans le premier membre l'apport lié au chauffage visqueux par les instabilités;

$$\rho \frac{c_A^2}{\alpha} (c_A^2 + c_s^2) = \frac{3}{2} \theta (T_i - T_e) n_e \frac{1}{\tau_{eq}}$$

Le temps caractéristique qui figure au dénominateur du second membre est un temps de libre parcours moyens des ions sous l'effet de collision avec les électrons. C'est donc "le temps d'équipartition", temps caractéristique d'égalisation des deux température, ionique et électronique. Haines le chiffre à "approximativement 5 ns".

Notons que ce temps d'équipartition fait intervenir le rapport (m_i / m_e). Plus il est long et moins le gaz d'ions et le gaz d'électrons seront couplés. Pour des ions fer ce rapport vaut :

$$\text{masse ion fer} \frac{\text{masse proton}}{\text{masse électron}} = 55.8 \frac{1.67 \cdot 10^{-27}}{0.9 \cdot 10^{-30}} = 55.8 \cdot 1850 = 103.000$$

On pouvait évidemment se poser la question de savoir si, pendant ce processus on pouvait considérer la fonction de distribution des vitesses dans le milieu des ions comme maxwellienne. Haines justifie ceci en produisant la valeur du temps de relaxation de thermalisation τ_{ii} dans ce milieu qu'il chiffre à 37 picosecondes. Comme ce temps est faible devant le temps d'équipartition Haines en déduit que le gaz d'ions est thermalisé, maxwellien. Il exploite alors la formule ci-dessus avec les valeurs qu'il choisit ce qui l'amène à des longueurs d'ondes de ces micro-instabilités MHD allant d'un centième à un dixième de millimètre.

$$(T_i - T_e) = 2.1 \times 10^{36} \frac{a I^3 T_e^{3/2} A^{1/2}}{Z^3 N_i^{5/2} \ell n \Lambda_{ei}} \quad (5)$$

Dans cette expression A est la masse atomique du fer (55.8) , a le diamètre minimal du pinch, I l'intensité électrique qui passe dans le cordon de plasma (on ne parle plus de liner à fils : ceux-ci se sont transformés en plasma).

La phrase clé est :

Thus for stagnated Z pinches where τ_{eq} is significantly longer than a / c_A the ion temperature will greatly exceed the electron temperature.

Ainsi, pour des Z pinches en condition d'arrêt, si le temps d'équipartition τ_{eq} est significativement plus long que le rapport a / c_A du diamètre du pinch à la vitesse d'Alfvén la température ionique pourra être notablement plus grande que la température électronique

Revenant à l'expérience prise comme référence Haines adopte pour le diamètre du cordon de plasma la valeur de 3.6 mm. Avec ces valeurs il obtient "un résultat qui est consistant avec la valeur de 219 keV pour la température ionique (2.5 milliards de degrés Kelvin). Il rappelle que dans la manip Saturn (référence 3) ce même rapport d'un facteur 3 à 4 avait été trouvé pour le rapport entre l'énergie thermique des ions et l'énergie cinétique du pinch, mais qu'alors des mesures de températures ioniques n'avaient pas été effectuées. Toute la différence est qu'aujourd'hui les expérimentateurs disposent de telles mesures, qui vont être détaillées plus loin.

Ceci étant :

Indeed, without this artificial fix no codes have been able to model these large array diameter experiments. 2D and 3D simulations of wire-array implosions in general [9] require, as input parameters, the wavelength and initial amplitude of modes and a value of the resistivity of the "vacuum," defined as where the plasma density falls below a given value. In addition, no simulation currently includes ion viscosity (let alone the full stress tensor) or a fine enough mesh to model the short wavelength instabilities proposed here. Often an ad hoc procedure is used to prevent radiative collapse.

En vérité, sans cette façon quelque peu artificielle de définir les paramètres les programmes d'ordinateur n'ont pas été en mesure de modéliser ces expériences portant sur des dispositifs d'aussi larges diamètres. Des simulations 2D ou 3D d'impositions de liners à fils nécessitent, comme paramètres d'entrée, de connaître la longueur d'onde et l'amplitude initiale des modes des instabilités et la valeur de la résistivité du "vide" définie en considérant les endroits où la densité du plasma tombe en dessous d'une valeur donnée. De plus on ne dispose pas de simulations incluant la viscosité ionique (et encore moins quand on veut tenir compte du caractère tensoriel des paramètres ioniques, état lié à la forte valeur du paramètre de Hall dans le gaz d'ions) ainsi que d'une concordance suffisante pour modéliser le système d'instabilités à courtes longueurs d'ondes proposé ici. Souvent une procédure ad hoc est utilisée pour éviter le collapse radial du plasma.

propos qui relativisent cette explication du chauffage ionique par interaction avec le champ magnétique ambiant.

Des mesures de température ionique par élargissement des raies, du à l'effet Doppler ont été effectués, de plus au cours du temps et utilisant un spectromètre à cristal de LiF situé à 6.64 mètres du pinch. Voir le papier pour les précisions techniques concernant ce spectro. Ci-après le spectre d'émission :

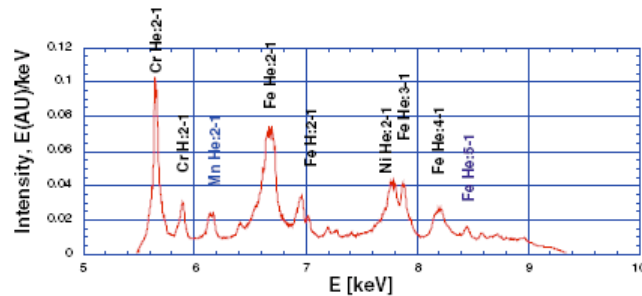


FIG. 1 (color). K-shell emission lines from the stainless-steel plasma of Z1141. In addition to the dominating Cr and Fe lines, Mn and Ni are apparent. Ion temperatures were obtained from emission lines with reduced opacity: Fe He- δ at 8.49 keV and Mn He- α at 6.18 keV.

On retrouve dans cet acier inox utilisé dans cet essai Z1141, outre les raies du chrome et du fer qui dominent, celles du Manganèse et du Nickel. On a basé l'évaluation de la température en prenant, pour le fer la raie à 8.49 keV et pour le manganèse celle à 6.18 keV. Les mesures sur ces raies, quoique plus faibles sont moins susceptible d'être grevée par l'opacité.

Par la suite le papier justifie la fiabilité de ces mesures de température, l'écart était évalué à 35 keV. Ci-après l'évolution des température, de la puissance rayonnée et du diamètre du pinch dans le temps.

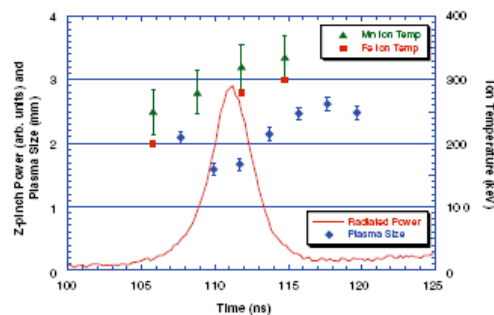


FIG. 3 (color). Measurements of ion temperature, plasma size, and radiated power as a function of time. The plasma size reached a minimum 1 to 2 ns before the x-ray output peaked, and enlarged from this time up to 2.5 mm. The ion temperature rose from 230 to 320 keV. The calculated 0D kinetic energy was reached 7 ns after the peak output. After this time 500 kJ was emitted by the plasma.

On remarquera que les barres d'erreur associées aux (trois) mesures de températures des ions fer ne sont pas figurées sur le graphique. Or dans le papier on lit :

An error of 35 keV is assigned to the temperature measurements based on uncertainty in measuring linewidths.

Une erreur systématique de 35 keV est associée aux mesures de température température, due à l'incertitude concernant l'évaluation des élargissements de raies.

Les auteurs ont simplement oublié de les faire figurer. Il ne faut pas oublier qu'ils sont six.. Soit un seul se charge de la rédaction et les autres cosignent, soit chacun y va de son petit bout, l'article ayant alors un petit côté patchwork. Au lecteur de décider. On va donc rajouter ces barres d'erreur.

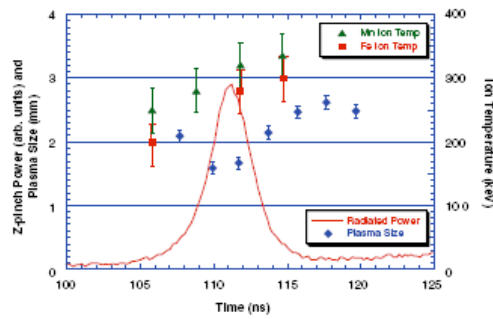


FIG. 3 (color). Measurements of ion temperature, plasma size, and radiated power as a function of time. The plasma size reached a minimum 1 to 2 ns before the x-ray output peaked, and enlarged from this time up to 2.5 mm. The ion temperature rose from 230 to 320 keV. The calculated 0D kinetic energy was reached 7 ns after the peak output. After this time 500 kJ was emitted by the plasma.

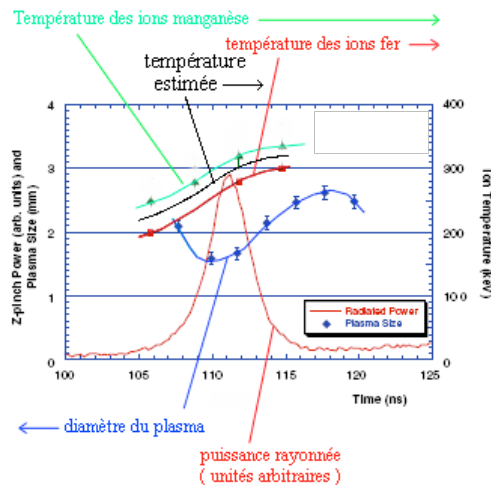
On voit que les points de mesure des ions fer se trouvent dans la barre d'erreur de ceux des ions manganèse, et vice-versa. Dans la graphique la mesure de température des ions fer croît de 200 à 300 keV, mais comme ces mesure se mêlent, n'envisageant pas d'écart de température (de 35 keV) entre les populations d'ion fer et d'ions manganèse (sans doute à juste titre) les auteurs donnent des valeurs intermédiaire allant de 230 keV (2,66 milliards de degrés Kelvin) à 320 keV (3,7 milliards de degrés). On est bien "over 2×10^9 Kelvin", "au delà de deux milliards de degrés" et pas qu'un peu puisque la valeur maximale atteint 3,7 milliards de degrés. De plus, vue l'allure de la courbe il ne serait pas impossible qu'une valeur supérieure puisse être mesurée, si en refaisant cet essai à l'identique on avait positionné les quatre images disponibles 5 ns plus tard. Et si cette montée en température, liée à cet échauffement des ions que Haines essaye de justifier s'était maintenue ça n'est pas 2 milliards de degrés qu'on pourrait envisager, mais.... quatre (on rappelle que dans les supernovae la température monte à dix milliards de degrés).

En toute logique, étant donnée la fiabilité des mesures de température les auteurs auraient du titrer "Une température de 3,7 milliards de degrés a été atteint", en indiquant "la valeur record", mais il se sont contentés de dire "au delà de deux milliards de degrés". Pourquoi cette... timidité ? Par ailleurs, remarquons que :

- Avec 500 millions de degrés, bingo pour la fusion (non polluante) lithium-hydrogène
- Avec un milliard de degrés, bingo pour la fusion (non-polluante) bore-hydrogène
- Avec quatre milliards, quoi ? (aux spécialistes du nucléaire de me répondre)
- Si un jour on atteint dix milliards, alors ce sont toutes les réactions de synthèse nucléaires conduisant aux atomes de la table de Mendeleïv qui deviennent possible. C'est à dire tout l'éventail de la Genèse.

Appelez-moi Dieu....

Le même graphique, en traçant les évolutions dans le temps, en noir la courbe moyenne, retenue dans le papier. .



On voit que le diamètre du plasma passe par un minima juste avant $t = 110$ ns. On a une émission de rayons X sur une durée d'environ 5 ns. Notez les valeurs maximales de températures enregistrées. 300 keV (3.48 milliards de degrés) pour les ions fer et 340 keV (3.94 milliards de degrés) pour les ions manganèse.

NB : La formule de Bennet :

$$\mu_0 I^2 = 8 \pi N_i (T_i + Z T_e)$$

donne (voir plus haut) 2,5 milliards de degrés pour le fer. Ce calcul se réfère à l'essai Z1141 (18 millions d'Ampères. Liner de 450 mg) de même que la figure 1. Mais les analyses et données présentées dans cet article se réfèrent à trois essais (Z1141, Z1137 et Z 1386).

Mon commentaire :

Revenez au titre du papier de Haines : "**over 2×10^9 Kelvin**", ce qui signifie "**au delà de deux milliards de degrés**". Alors que dans les années précédentes ces systèmes sont montés à un million et demi, deux millions de degrés et plus, soudain la machine s'emballa. Les lecteurs pourraient s'étonner de l'absence d'une émission de la part du carbone. Mais (wikipedia) l'acier inoxydable austénitique en contient fort peu (moins de 0,15 %). Voir encadré.

L'acier, selon Wikipedia :

Steel is a metal alloy whose major component is iron, *with carbon being the primary alloying material*. Carbon acts as a hardening agent, preventing iron atoms, which are naturally arranged in a crystal lattice, from sliding past one another (dislocation). Varying the amount of carbon and its distribution in the alloy controls qualities such as the hardness, elasticity, ductility, and tensile strength of the resulting steel. Steel with increased carbon content can be made harder and stronger than iron, but is also more brittle (fragile). *One classical definition is that steels are iron-carbon alloys with up to 2.1 percent carbon by weight*; alloys with higher carbon content than this are known as cast iron (fonte). Steel is also to be distinguished from wrought iron (fer forgé) *with little or no carbon*. It is common today to talk about 'the iron and steel industry' as if it were a single thing; it is today, but historically they were separate products.

L'acier, selon Wikipedia : (protégé par une couche superficielle d'oxyde de chrome, invisible)

In metallurgy, *stainless steel is defined as a ferrous alloy with a minimum of 10.5% chromium content* (un acier est dit inoxydable s'il contient un minimum de 10.5 % de chrome).

Les aciers austénitiques (une structure cristalline particulière) représentent 70 % de la production. Ils contiennent un maximum de 0.15 % de carbone (...), un minimum de 16 % de chrome et suffisamment de nickel et (ou) de manganèse pour maintenir la structure austénitique à toutes les températures, depuis les très basses températures, cryogéniques jusqu'au point de fusion de l'alliage

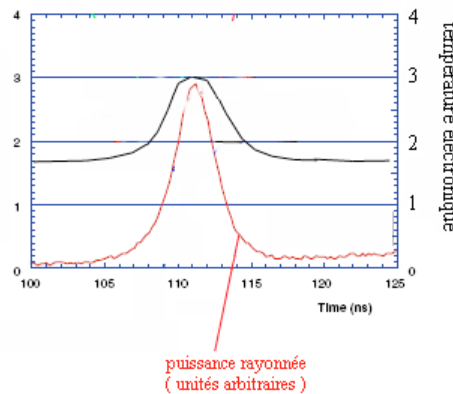
On a fait figurer les deux courbes de températures pour le gaz d'ions fer et le gaz d'ions manganèse, qui semblent différentes. Mais d'une part la fourchette d'erreur indiquée pour le manganèse fait qu'on peut considérer que ces deux températures peuvent être en fait très voisines. D'autre part l'ion manganèse, s'il a pratiquement la même charge que l'ion fer (25 contre 26) est deux fois plus léger (30 contre 58). Il n'est donc pas impossible que, soumis à une instabilité MHD ces deux gaz, intimement liés, présentent entre eux un (léger : 12 %) effet d'hors équilibre et possèdent des températures différentes.

Haines : le diamètre du plasma atteint sa valeur minimale de 1.5 mm 2 nanosecondes avant le maximum d'émission de rayons X. Il estime qu'au moment où ce maximum est atteint la densité et "l'équipartition" doivent être maximales (j'aurais tendance à lire la "tendance" vers l'équipartition)

Essayons de faire "parler" ces différentes courbes. Que se passe-t-il ?

On a quatre points de mesure de température. L'un est éliminé, pour le fer, le 2°, à cause d'un problème de mesure. Ce nombre faible correspond à tout ce que peut capter le système d'enregistrement. C'est déjà extraordinaire, non seulement de disposer de mesures de températures, mais d'avoir aussi une idée de leur évolution dans le temps. Ceci dit on n'a pas accès aux valeurs antérieurement à $t = 105$ ns et postérieurement à $t = 115$ ns.

Le texte dit qu'au moment de "l'arrêt" (stagnation) du plasma la température électronique a atteint 3 keV c'est à dire 35 millions de degrés. Ce qui signifie qu'au moment où cette température est maximale elle ne montera pas plus qu'au centième de la valeur atteinte par la température ionique maximale. Comme la puissance émise grimpe en un fort "pulse" il faut supposer qu'avant $t = 105$ ns elle était bien inférieure. On a l'impression que cette température s'effondre, d'un facteur 9, vers 115 ns. Mais la loi de Stefan indique que la puissance rayonnée varie comme la puissance quatrième de la température. Donc la diminution est en fait dans le rapport de la racine quatrième de 9, c'est à dire 1,73. . Ce qui amène T_e à 3 à 1,68 keV. Je trace la courbe, à peu près :



En noir la variation de température électronique. En rouge la variation de puissance rayonnée (loi de Stefan-Boltzmann)

Or à $t = 105$ ns les ions sont déjà chauds (T de l'ordre de 200 keV). Donc ce mécanisme de chauffage, à élucider, intervient *avant* l'arrêt l'état de rayon est minimal du plasma, qui se situe à $t = 110$ ns.

Schématiquement : le plasma implose. Sans ce phénomène d'apport additionnel d'énergie, à élucider, mais que Haines pense provenir d'une conversion d'énergie magnétique en chaleur ce plasma imploserait complètement, si la température des ions était égale à celle des électrons (moins de vingt millions de degrés avant $t = 105$ secondes).

Mais les ions sont nourris par cet apport. La température des ions s'accroît. Le couplage entre le gaz d'ions et le gaz d'électrons s'effectue dans "le temps caractéristique d'équipartition" τ_{eq} que Haine a chiffré à 5 ns. Le temps de montée de la température électronique correspond donc à ce chiffre (de 107 à 112 ns).

Haines dit que ce phénomène de chauffage du gaz d'ions suffit à contrebalancer la pression magnétique et que les "conditions d'arrêt" sont réellement atteintes car la vitesse caractéristique avec laquelle le rayon du plasma varie est seulement 15 % de la vitesse thermique des ions. On peut évaluer la vitesse d'agitation thermique des ions fer entre les valeurs minimal et maximale de la température mesurée.

$$\langle V_i \rangle = \sqrt{\frac{3kT_i}{m_i}} \quad m_{Fe} = 55.8 \times 1.67 e^{-27} = 9.68 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

$$k = 1.38 e^{-23} \quad \langle V_i \rangle = 70433 \sqrt{T_i (keV)}$$

- Pour la température minimale, 230 keV ou 2,66 milliards de degrés : $\langle V_i \rangle = 1066 \text{ km/s}$
- Pour la température maximale, 320 keV ou 3,7 milliards de degrés : $\langle V_i \rangle = 1258 \text{ km/s}$

Haines comparent ces valeurs à la "vitesse d'expansion" du plasma et dit qu'elle représente 15 % de cette valeur. Quelle que soit la façon de l'évaluer en prenant des points sur la courbe elle reste inférieure à la vitesse thermique ce qui semble effectivement indiquer que la pression dans le plasma a équilibré la pression magnétique.

Après, le diamètre du plasma se remet à croître. Pourquoi ? Parce que le chauffage des ions continue. On pourrait essayer de calculer cette expansion.

Il reste une chose que je ne comprends pas, pour le moment : pourquoi la température électronique redescend-elle puisque le gaz d'électrons devrait continuer à être alimenté en énergie par le gaz d'ions qui, lui, continue de s'échauffer, du moins dans la fourchette temporelle qui nous est accessible.

Précision : quelle est la vitesse d'agitation thermique dans le gaz d'électrons porté à 3 keV (35 millions de degrés).

$$\langle V_e \rangle = \sqrt{\frac{3kT_e}{m_e}} = \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 3.5 \cdot 10^7}{0.9 \cdot 10^{-30}}} = 40000 \text{ km/s}$$

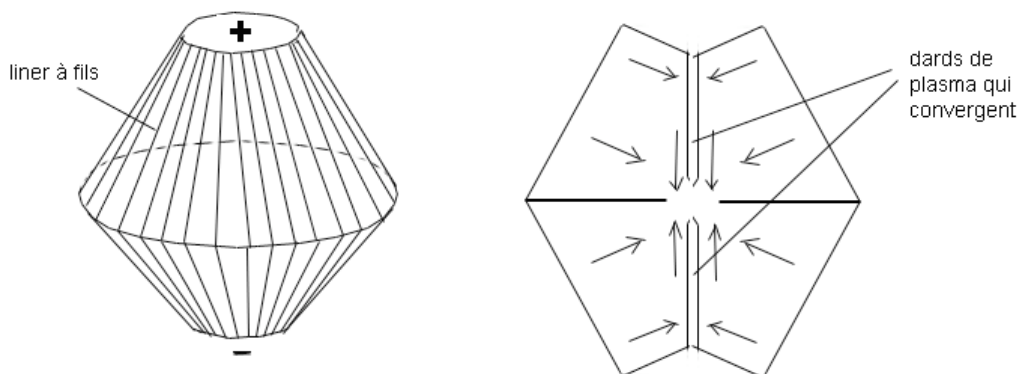
Supposons que nous arrivions à faire passer 18 millions d'ampères dans un cordon de plasma d'un millimètre et demi de diamètre. Quelle est la valeur du champ magnétique au contact du plasma et la valeur correspondante de la pression magnétique ? (modulo l'hypothèse qu'on considère le conducteur comme infini, évidemment)

$$I = 1,8 \cdot 10^7 \text{ A} \quad \mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \quad r = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} = 4500 \text{ teslas} \quad p_m = \frac{B^2}{2 \mu_0} = 9 \cdot 10^{12} \text{ pascals ou } 90 \text{ mégabars}$$

27 juin 2006 : En France, une idée intéressante.

Dans un autre dossier consacré aux machines à magnétocumulation, inspirées des machines russes des années cinquante, on a vu le principe de la machine MK-1. Par la suite des gens ont expérimenté avec des liners non plus cylindriques, mais coniques. On obtient un "effet de charge creuse". La masse du liner en rassemblant sur l'axe donne naissance à un dard projeté à grande vitesse. Je crois qu'on a obtenu des vitesses de 80 km/s. A vérifier. Toujours est-il, comme me le faisait remarquer Violent qu'on peut envisager des Z-machines avec des liners à fils non plus cylindriques mais coniques. On peut alors espérer obtenir de la même façon un effet de charge creuse. Différentes configurations peuvent être imaginées. La MHD est le terrain de prédilection des solutions les plus imaginatives. Ci-après un montage constitué avec deux troncs de cône ayant leur base commune. Si les deux dards de plasma se forment et entrent en collision on pourrait obtenir des températures plus élevées, même avec une machine comme celle de Gramat.



On ne peut guère faire autre chose que ce dessin. Des simulations pourraient être envisagées et, bien sûr, des expériences.

16 juillet 2006. Que vaut le paramètre de Hall $\beta_i = \Omega_i \tau_{ii}$ pour les ions ?

Haines, dans son papier, dit qu'il est supérieur à l'unité. Ce paramètre est le rapport de la gyrofréquence à la fréquence de collision. Selon Haines cette fréquence de collision ionique est essentiellement une fréquence des collisions ion-ion. Son inverse, le temps de relaxation τ_{ii} est donné comme étant de 37 picosecondes. Ce qui donne une fréquence de collision :

$$\nu_{ii} = 3 \times 10^{10}$$

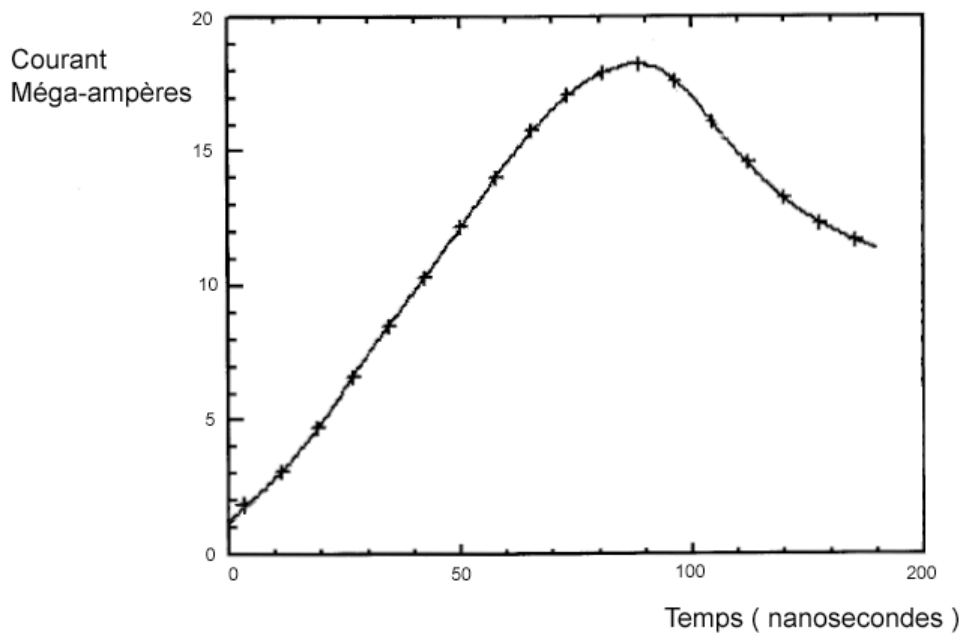
La gyrofréquence est :

$$\Omega_i = \frac{e B}{m_i} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4500}{9.3 \cdot 10^{-26}} = 7.74 \cdot 10^9$$

Ce qui donne la valeur $\beta_i = 0,258$ pour le paramètre de Hall des ions. Je ne le trouve pas... supérieur à l'unité. Il y a peut être quelque chose que je n'ai pas capté...

Une donnée annexe - source: [Radiation Ablation gap closure calculations for Z and ZR](#)

Le profil caractéristique de la décharge de courant dans la Z machine :

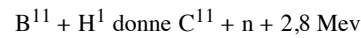


C'est la brièveté de cette montée en intensité (cent nanosecondes) qui a permis d'obtenir ces résultats sur la machine de Sandia. En effet il s'est avéré que la sublimation des fils était moins rapide que prévu. Aini cette structure de "liner à fils" a pu perdurer durant l'implosion, en préservant l'axisymétrie, laquelle disparaît immédiatement quand l'objet, transformé en rideau de plasma, se met à se contorsionner sous l'effet d'instabilités MHD. Quand on tente de faire imploser un liner constitué par un cylindre de métal on obtient à peu près ce qui se passerait si on tentait d'écraser un cylindre de papier dans sa main. Je crois que les Français ([la machine Sphinx, papier présente en septembre 21006 au colloque de Tomsk, Sibérie](#) , temps minimal de montée : 800 nanosecondes) n'ont pas bien saisi que cet aspect des choses était crucial, ce que m'avait aussitôt dit Yonas par mail en 2006.

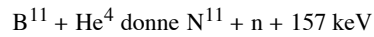
17 février 2008 : Une précision sur les réactions parasites liée à la formule $B^{11} + H^1$

Le Bore a 5 charges électriques, l'hydrogène une. Le carbone 6 et l'azote 7.

Le refroidissement radiatif du plasma se fait par rayonnement de freinage. La puissance émise varie comme le carré de la charge électrique. La puissance émise en rayons X par un électron spiralant autour d'un atome de Bore est donc 25 fois plus élevée que celle perdue en spiralant autour d'un atome d'hydrogène (léger ou lourd, c'est la charge qui compte)



Durée de vie du carbone C^{11} : 20 minutes. On peut ouvrir sans danger la chambre 10 heures après arrêt de fonctionnement



Protection : 20 cm de B^{10} ou 1 mètres d'eau.

Radioactivité induite dans l'électrode en béryllium : 5 microcuries par an (données : condérence d'Eric J. Lerner)

Selon Lerner, dans cette fusion impulsionnelle *on utilise* les instabilités MHD. Sa description des mécanismes est la suivante. La décharge électrique "en parapluie" tend d'abord à donner des condensations de plasma comparables "aux baleines de ce même parapluie". Puis ces filaments s'enroulent selon l'axe pour donner un cordon de plasma. Celui-ci, par instabilité de Kink se configure "comme un cordon de téléphone spiralé". Puis dans cette même structure se forment des "plasmoides autoconfinés" des points chauds d'un volume infime, inférieur au micron cube. Dans ces plasmoides le champ magnétique a la topologie torique. Nouveau pincement selon l'axe de ce plasmotide-goutelette. Et c'est alors, dixit Lerner, que les réactions de fusion se produisent.

Jean-Pierre Petit

www.mhdprospects.com
