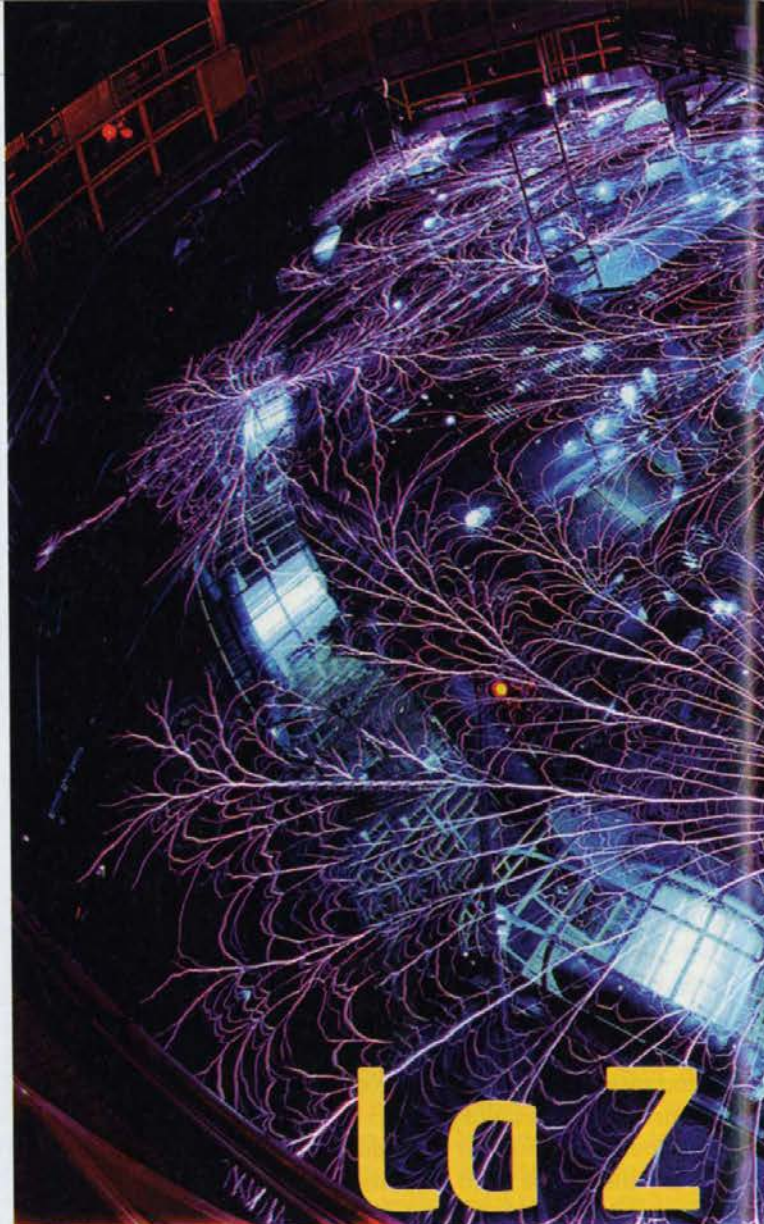


Propre et économique avec trois milliards de degrés et une énergie rayonnée quatre fois plus intense que celle initialement prévue, la Z machine pulvérise les records. Ses retombées directes sont susceptibles de bouleverser l'industrie de l'énergie nucléaire. Pourtant, elle demeure étrangement confidentielle.



La Z Énergie propre

Révolution dans le monde de la physique nucléaire! Le 8 mars 2006, le laboratoire Sandia¹ annonce avoir atteint plus de deux milliards de degrés Celsius (100 fois plus que la température au centre du Soleil) à l'aide de sa Z machine. Bizarrement, et malgré un développement prometteur depuis quatre ans, cet incroyable engin ne reçoit toujours qu'un faible écho médiatique. Quels sont les étonnants principes de ce procédé permettant de récupérer directement par induction 70 % d'une énergie rayonnée 4 fois plus importante qu'attendue? Comment le simple résultat fortuit d'une expérimentation a-t-il pu ouvrir la voie à des centrales nucléaires écologiques de demain? Quelles sont les éventuelles implications économiques et militaires? Leur importance est-elle susceptible de priver la société civile d'une réponse au défi énergétique planétaire? Et aussi: quelles avancées cette technologie a-t-elle permises dans la compréhension de la mécanique des plasmas dans le cosmos? Réponses.

À propos de l'auteur

Jérôme Dangmann est professeur de sciences physiques dans l'enseignement supérieur. Il est passionné depuis de nombreuses années par les approches scientifiques non conventionnelles.



La Z machine lors d'une décharge. À cause des tensions électriques extrêmement élevées, la totalité des systèmes d'alimentation en énergie de la machine est immergée dans des bassins d'huile de transformateur (2000 m³) et d'eau purifiée (2300 m³) qui agissent comme isolants. Malgré cela, de nombreux arcs électriques se forment entre les objets métalliques de l'installation lors de la décharge de la machine.

machine

ou arme atomique?

Genèse de la Z machine

Puissance pulsée et fusion

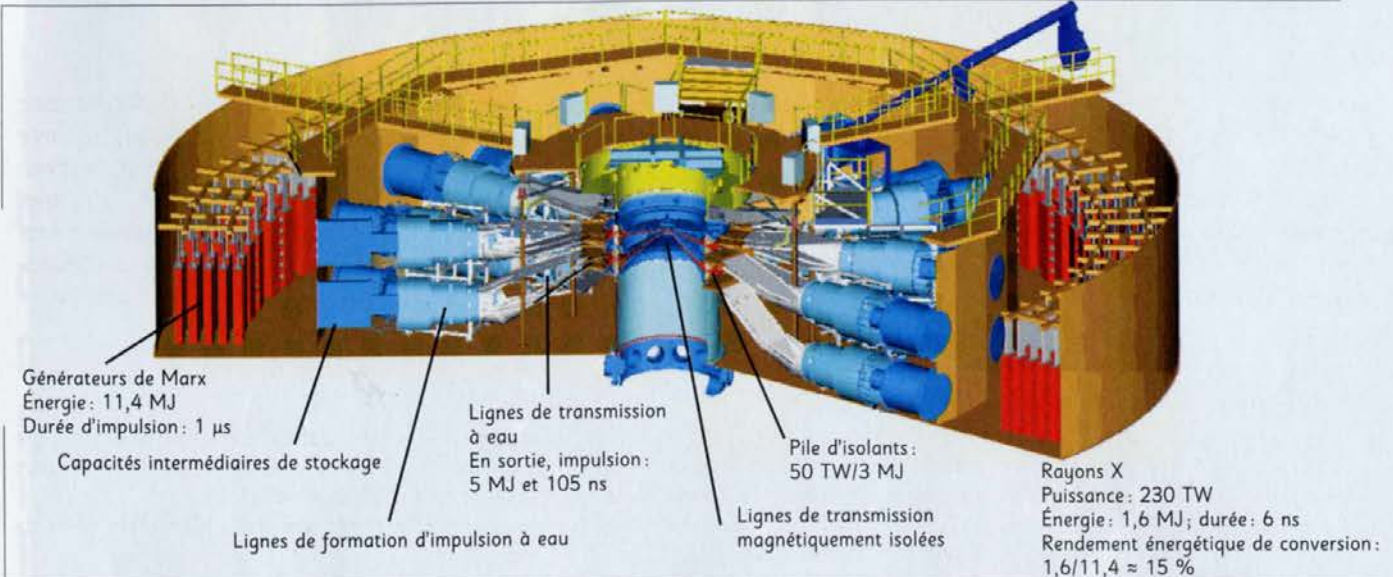
À mesure que les puissances produites par leurs machines augmentaient, les chercheurs du laboratoire Sandia, aux États-Unis, se sont mis à rêver au Graal des physiciens: recréer sur Terre les réactions de fusion du Soleil et résoudre le problème de l'énergie. Pour réaliser cet objectif ambitieux, le spécialiste des plasmas et des accélérateurs à électrons Gerald Yonas fut embauché en 1972 (sa détermination et son travail dans le domaine de la fusion à confinement inertiel durant la vingtaine d'années passée à Sandia font de lui l'un des pères de la Z machine). La période était propice pour démarrer cette recherche sur la fusion. Les accords SALT de 1972 sur la réduction des missiles antibalistiques et la première crise du pétrole en 1973 ont en effet favorisé

Les chercheurs du laboratoire Sandia, aux États-Unis, se sont mis à rêver au Graal des physiciens: recréer sur Terre les réactions de fusion du Soleil et résoudre le problème de l'énergie.

l'octroi de crédits à la filière fusion aux dépens de l'armement.

Malgré cela, les espoirs à l'époque de réaliser la fusion reposaient principalement sur les lasers de haute puissance sur lesquels les laboratoires de Livermore, et dans une moindre mesure celui de Los Alamos, possédaient la maîtrise. Dans ce contexte, les machines à puissance pulsée n'attiraient pas, proportionnellement, de gros financements.

De plus, la politique du gouvernement américain durant de nombreuses années a été axée sur la défense et la course aux armements, aux dépens des crédits affectés à l'étude de la fusion. Néanmoins, les laboratoires Sandia ont toujours su préserver le développement des machines à puissance pulsée grâce à leur fonction première: tester le comportement des armes sous un fort



rayonnement gamma. Une exception toutefois: en 1983, le président Reagan a lancé le programme Strategic Defense Initiative ou Guerre des étoiles qui apporta des crédits de recherche au laboratoire Sandia afin de concevoir des canons à électrons à longue portée. Ce projet n'apporta pas de résultat probant, même s'il mit en lumière les machines à puissance pulsée.

Collaboration américano-russe

Résoudre le problème de l'énergie a rapproché les scientifiques de tous les pays. Cette recherche d'autres sources d'énergie s'est particulièrement intensifiée dans les années 70. Cela a fait naître une collaboration technique entre des équipes russe et américaine dans le domaine nucléaire. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, cette coopération ne s'est jamais arrêtée pendant toutes les années de la guerre froide. À cette époque, les Russes publiaient ouvertement des résultats sur le montage de la feuille implosive (*imploding foil*): une feuille métallique parcourue par une intensité électrique extrêmement élevée permet d'atteindre des températures colossales. Du côté des Américains, cette technologie était classifiée car elle était employée dans la fabrication des bombes nucléaires. D'où leur vif intérêt pour le travail des scientifiques russes.

Au début des années 90, les Américains de Sandia réalisent leur retard par rapport aux équipes russes et décident d'établir une collaboration plus étroite avec des scientifiques tels que Georgyi Volkov et Eugene Grabovski. Il en résulte un échange de chercheurs entre les deux pays en 1993 et 1994. Cette collaboration permet d'augmenter très rapidement les niveaux d'énergie atteints par les rayons X sur l'accélérateur Saturn de Sandia. Ces améliorations remarquables motivent la conversion en 1995 de l'accélérateur PBFA II (Particle Beam Fusion Accelerator) en « Z machine » pour le prix de 12 millions de dollars.

Simuler une explosion atomique

Dans les années soixante, les militaires américains équipent leurs missiles de nouveaux systèmes de guidage électronique. Ils ont besoin de tester la vulnérabilité de ces circuits vis-à-vis de radiations émises par l'explosion d'armes atomiques ennemies. Les scientifiques de l'armement réalisent en effet que les rayonnements électromagnétiques de type gamma sont potentiellement dangereux pour les missiles, et cela même à grande distance d'une explosion atomique.

Pour simuler le rayonnement gamma d'une explosion atomique, il faut une machine qui soit capable de créer un faisceau d'électrons à haute énergie (10 à 15 MeV), de forte intensité (100 à 1000 kA) et pendant une période très courte, inférieure à 100 nanosecondes. Au début des années soixante, de telles machines n'existent pas. Les scientifiques de l'époque doivent donc rechercher des approches innovantes.

Une équipe de chercheurs britanniques de l'Atomic Weapons Research Establishment (AWRE) à Aldermaston vient justement de développer une nouvelle technologie capable de créer des impulsions à haute tension et de forte intensité. Celles-ci sont converties en faisceaux d'électrons de grande intensité pendant un temps très court. Les deux laboratoires, Sandia et AWRE, s'associèrent à partir de 1963 et une machine américaine appelée SPASTIC (signifie spasmodique en anglais) fut construite, plus puissante encore que la version

britannique, avec une émission de 0,20 gray (radiations reçues) à un mètre de la cible. Cette technique développée à AWRE puis reprise par Sandia représente le début de ce qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui la technologie à haute puissance pulsée.

► Rayons X et rayons gamma

Les rayons gamma sont des ondes électromagnétiques de même nature que les ondes radio ou les rayons X. Leur longueur d'onde est plus faible (inférieure à dix picomètres environ), ce sont donc les plus énergétiques de tout le spectre électromagnétique. Pour fabriquer des rayons gamma (ou X) artificiels, il suffit de mettre en mouvement des particules chargées, électrons ou ions par exemple, puis de les décélérer brutalement sur une cible fixe. Leur énergie cinétique se transforme alors partiellement en rayonnement. Cet effet est connu sous le nom de rayonnement Bremsstrahlung ou rayonnement continu de freinage.

Générateur à haute puissance pulsée

De façon schématique, un générateur classique à haute puissance pulsée est composé d'une batterie de condensateurs qui sont associés en parallèle lors de la charge, puis en série durant la décharge

suivant le principe du générateur de Marx. Celui-ci « compresse l'énergie » dans le temps. En effet, supposons pour simplifier que le temps de charge dure 100 s, alors la durée de décharge n'est que d'une microseconde, soit un rapport de compression de 10^8 . Cette batterie de condensateurs est ensuite reliée à la charge à travers, dans un premier temps, plusieurs lignes de transmission qui augmentent encore la

puissance de l'impulsion. Ces lignes appelées « Pulse Forming Line » mettent en forme l'impulsion en diminuant sa durée donc en augmentant sa puissance, en vertu de la relation: puissance = énergie/temps. Puis les impulsions souhaitées sont conduites dans des lignes de transmission ordinaires vers une diode émettrice d'électrons. Cette diode remplace l'historique tube à vide qui nécessitait le chauffage de sa cathode.

► Des machines de plus en plus puissantes

Les progrès pour augmenter les capacités de ces machines à puissance pulsée ont été spectaculaires. En trente ans, l'énergie stockée a été multipliée par cent, et la puissance produite a été accrue d'un facteur proche de six cents. Dans le tableau ci-dessous sont résumées les caractéristiques de quelques machines importantes fabriquées par les laboratoires Sandia.

Pour fixer les idées, une énergie de 10 J représente l'énergie cinétique d'une masse de 1 kg après une chute libre d'un mètre de hauteur sans vitesse initiale. La Z machine fournit deux millions de joules à la cible...

L'évolution fulgurante de cette technologie est due entre autres à l'augmentation du nombre de condensateurs, au perfectionnement des interrupteurs haute tension et de leur système de synchronisation.

Noms	Année	Énergie	Tension accélératrice	Intensité	Puissance	Durée de rayonnement	Radiation/ énergie rayonnée
Spastic	1965	20 kJ	200 kV		< 0,6 TW	30 ns	0,20 Gy
Hermès II	1968	1Mj	10 MV		< 5 TW	70 ns	20 Gy
PBFA I	1979	1Mj	4 MV		20 TW	40 ns	
Hermès III	1988	1,5 Mj	19 MV	700 kA	< 75 TW	20 ns	200 Gy
Z machine	1995	2 Mj		18 MA	230 TW	6 ns	1,8 Mj
ZR	2007	3 Mj estimé		26 MA	350 TW	4 ns	2,7 Mj

1 ns = 10^{-9} s ; 1 TW = 10^{12} W ; 1 MJ = 10^6 J ; 1 kJ = 10^3 J ; Gy = gray. Un gray est la dose d'énergie absorbée par un milieu homogène d'une masse de 1 kg lorsqu'il est exposé à un rayon ionisant apportant une énergie de 1 joule. 1 gray = 1 J/kg.

Comment ça marche ?

Principe du « Z pinch »

Dès 1989, la feuille implusive a été remplacée par des fils d'aluminium puis plus tard de tungstène. Ces fils dix fois plus fins qu'un cheveu sont placés le long d'un cercle : cette configuration particulière est baptisée « Z pinch » ou striction suivant l'axe des Z. En effet, le conducteur (feuille conductrice ou ensemble de fils conducteurs), appelé « liner » par les scientifiques, est parcouru par un courant d'intensité gigantesque qui le comprime violemment suivant son axe de symétrie selon Z.

D'après ce qui est connu, la striction suivant Z peut être décomposée en trois phases distinctes (les valeurs numériques correspondent aux expériences avec la Z machine) :

- 1) **Initiation** : une intense impulsion de courant de 18 millions d'ampères sur une durée de 100 nanosecondes volatilise les fils et les transforme en cordon de plasma.
- 2) **Implosion** : le champ magnétique produit par l'intensité électrique exerce des forces dites de Laplace qui tendent à comprimer très rapidement (vitesses de l'ordre de 220 km/s) les cordons de plasma en un tube de plasma de diamètre de plus en plus faible.
- 3) **Stagnation** : le tube de plasma s'est complètement effondré sur lui-même, sa taille est celle d'une mine de crayon ; l'arrêt des électrons provoque un rayonnement



Configuration « Z-pinch ». Des fils d'acier dix fois plus fins qu'un cheveu sont disposés le long d'un cercle.

Brmsstrahlung très intense sous forme de rayons X pendant quelques nanosecondes seulement (6 et 4 ns pour Z et ZR respectivement). Ce processus se déroule sur une échelle de temps extrêmement restreinte (inférieur à 100 nanosecondes). Il est très difficile de connaître avec précision son mécanisme de fonctionnement. D'autres explications existent³.

Température et énergie anormales

Le 8 mars 2006, un communiqué officiel de Sandia annonce l'obtention accidentelle d'une température supérieure à deux milliards de degrés. Ce record absolu de température

► Fusion nucléaire, mode d'emploi

La fusion nucléaire est la formation d'un noyau atomique par la combinaison de deux noyaux atomiques plus petits. Elle s'accompagne d'un dégagement d'énergie considérable et généralement d'une émission d'une ou plusieurs particules élémentaires. D'où provient cette colossale énergie? La masse du noyau ainsi formé est inférieure à la somme des masses des noyaux initiaux. La perte de masse correspondante Δm se transforme intégralement en énergie, suivant la célèbre formule d'Einstein* : $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ où c est la célérité de la lumière ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s).

Pourquoi la fusion se réalise-t-elle à haute température? Les noyaux qui réagissent portent des charges – positives – identiques et se repoussent donc par interaction coulombienne. Afin de vaincre ces forces répulsives, les noyaux doivent être animés de vitesses très élevées produites par une agitation thermique considérable. La température correspondante minimum est de l'ordre de 15 millions de degrés, la matière est alors un plasma. Arrivées à une distance inférieure à 10^{-14} m, les forces nucléaires attractives sont ainsi en mesure de lier les noyaux. Exemples de réactions de fusion :

deutérium + tritium : ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n + 17,6 \text{ MeV}$; température de fusion (d'ignition) : 150 millions de degrés environ ;
bore + hydrogène : ${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 3 {}^4_2\text{He} + 8,7 \text{ MeV}$; température de fusion (d'ignition) : près d'un milliard de degrés ! ;

Fusion nucléaire. Cela correspond à des énergies d'agitation thermique très élevées, d'où le nom de « fusion thermonucléaire » donné aux fusions provoquées par la seule température. La température du Soleil est de 15 millions de degrés en son centre.

Les réactions de fusion qui y règnent conduisent à transformer quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission de particules élémentaires. Le rythme de production d'énergie solaire est très lent dû à la petite taille des noyaux d'hydrogène. C'est pourquoi cette réaction de fusion n'est pas envisagée sur Terre pour produire de l'énergie. Une haute température ne suffit pas pour réaliser une fusion contrôlée. Il faut aussi une concentration importante des noyaux afin d'atteindre un taux de collision suffisamment élevé. Cela est obtenu en confinant le milieu de réaction. Un critère général approximatif pour obtenir la « combustion » thermonucléaire auto-entretenue, établi en 1957 par J. D. Lawson est : $n \cdot \tau \geq 3 \cdot 10^{20} \text{ s/m}^3$ avec n le nombre d'ions par mètre cube et τ la durée de confinement.

Deux modes de confinement. Le confinement d'un plasma à très haute température est irréalisable par des moyens classiques car tous les matériaux connus se vaporisent au mieux à quelques milliers de degrés. Deux techniques sont actuellement explorées : le confinement magnétique – qui requiert un dispositif d'une telle complexité qu'aucun réacteur de ce type n'a encore fonctionné sur de longues durées en produisant de l'énergie –, et le confinement inertiel, que réalise la Z machine. Contrairement à l'approche précédente, l'espace réactionnel est de petite taille ($\approx 10^{-3}$ m) et le temps de réaction extrêmement court ($\approx 10^{-11}$ s). Afin de vérifier le critère de Lawson, le plasma est donc comprimé très fortement avec des densités allant jusqu'à 10^{26} ions par cm^3 (10^6 fois la densité de l'air!).

La compression du plasma est obtenue en lançant sur une pastille de tritium-deutérium par exemple un rayonnement électromagnétique de très forte intensité ou un faisceau de particules chargées (ions ou électrons). Cela a pour effet d'ioniser et de vaporiser en plasma la surface extérieure de la cible. L'expansion très rapide du plasma comprime alors fortement le combustible et élève sa température dans de grandes proportions.

*On peut écouter Einstein expliquer lui-même l'équivalence entre masse et énergie : <http://www.aip.org/history/einstein/voice1.htm>

(la température au centre du Soleil n'est « que » de vingt millions de degrés) résulte de deux changements : le remplacement des fils de tungstène par des fils d'acier et l'augmentation du diamètre du liner de 2 à 8 cm. L'expérience a été reproduite plusieurs fois pour s'assurer de la validité des résultats, tellement la température atteinte était considérable, a précisé le chef de projet Chris Deeney. La température ionique se mesure par la méthode spectroscopique de l'élargissement des raies par effet Doppler (voir encadré page 104). C'est d'ailleurs cette technique qui a motivé le choix de fils en acier, car les raies spectrales du fer fournissent des résultats beaucoup plus précis que ceux du tungstène.

Le 8 mars 2006, un communiqué officiel de Sandia annonce l'obtention accidentelle d'une température supérieure à deux milliards de degrés.

Deux anomalies inexplicables

Deux phénomènes restent à ce jour assez mal compris :

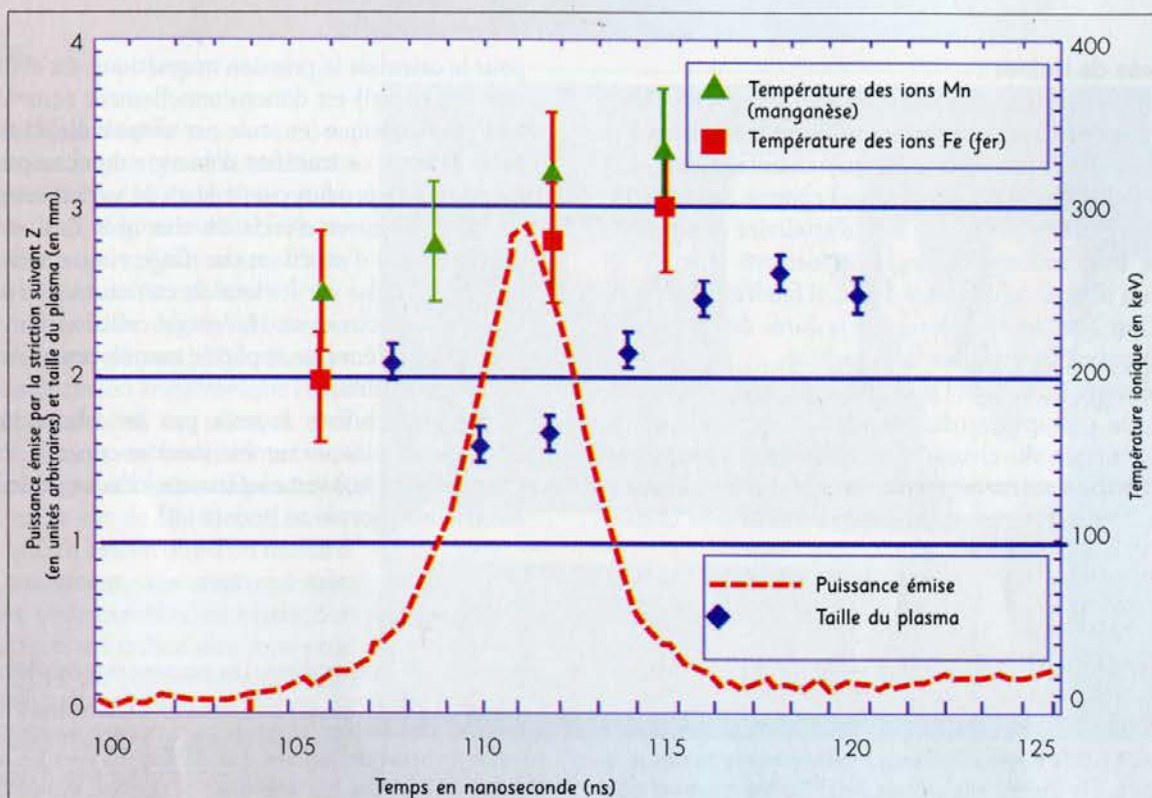
- l'énergie de rayonnement électromagnétique X et γ vaut quatre fois l'énergie cinétique initiale ;
- la haute température des ions se maintient (voir figure page 103) même après l'étape de stagnation qui devrait correspondre à l'arrêt du mouvement

des ions, donc à une chute de leur température.

Pour essayer de répondre à cette question et y voir plus clair, le Dr Malcolm Haines, spécialiste du Z pinch et consultant de Sandia, a formulé une hypothèse dans un article du 24 février 2006 publié dans la revue *Physical Review Letters*⁴. Pour la comprendre, commençons par observer ce qui se produit lors de la décharge électrique.

Plasma bi-température

Le plasma décrit un état de la matière constitué de particules chargées : ions et d'électrons. C'est un gaz de particules régi par les équations de la mécanique des fluides et de l'électromagnétisme. Le plasma créé par l'impulsion de 18 millions d'ampères dans des fils conducteurs très fins possède une propriété étonnante : la température du gaz d'électrons est bien plus faible que celle du gaz d'ions. Il s'agit donc d'un plasma dit « bi-température ».



Mesures de la température ionique, de la dimension du plasma et de la puissance rayonnée en fonction du temps.

La taille du plasma a atteint un minimum 1 à 2 nanosecondes avant le pic de rayonnement des rayons X, puis s'est élargie jusqu'à 2,5 mm. La température des ions s'est élevée de 230 à 320 keV. L'énergie cinétique calculée a été atteinte 7 ns après le maximum de rayonnement. À la suite de cet instant, 500 kJ ont été émis par le plasma.

La température électronique se mesure simplement à partir du rayonnement X engendré. Elle est d'environ 35 millions de degrés. La température ionique est quant à elle déterminée par un spectromètre à cristal de fluorure de lithium. On trouve une valeur maximale atteinte de **3,7 milliards de degrés!**

L'évolution dans le temps des températures des ions fer (carrés en rouge) et manganèse (triangle en vert) est représentée sur le graphique ci-dessus.

La température des électrons est proportionnelle à la puissance rayonnée tracée en ligne pointillée rouge. Le diagramme montre que la température ionique (des ions fer et manganèse) poursuit étonnamment sa montée après le pic de température atteint par les électrons.

D'autre part, le diagramme fournit la taille du cordon de plasma en fonction du temps (losanges bleus). Au bout de 110 ns, le cordon de plasma atteint sa taille minimale d'environ 1,5 mm correspondant à l'état de stagnation. Au même moment, l'énergie rayonnée par l'arrêt des électrons (effet Bremsstrahlung) atteint logiquement son maximum.

► Pression magnétique et formule de Bennett

Le courant électrique considérable qui traverse initialement les fils conducteurs puis le plasma crée un champ magnétique de valeur très élevée tout autour. Pour obtenir un ordre de grandeur, il suffit d'appliquer le théorème d'Ampère en faisant l'hypothèse d'un courant rectiligne et infini. On obtient alors: $B = \mu_0 I / (2\pi r)$ avec $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ SI (unité du système international) la perméabilité du vide, I la valeur de l'intensité et r la distance à l'axe de symétrie. En prenant $r = r_{\min} = 0,75$ mm et $I = 18$ MA, on trouve pour B plus de 4800 teslas autour du cordon de plasma à la stagnation. Le calcul de la pression magnétique $B^2 / (2\mu_0)$ qu'exerce un champ magnétique B donne environ 90 millions de fois la pression atmosphérique! Le cordon de plasma à la stagnation n'est pourtant pas écrasé sous cette pression considérable. Par conséquent il possède lui aussi la même pression pour y résister.

La relation qui exprime cet équilibre des pressions du plasma et du champ magnétique a été établie dès 1934 par Bennett: $\mu_0 I^2 = 8\pi N_i k_B (T_i + ZT_e)$ avec N_i le nombre d'ions au mètre de liner, Z la charge de l'ion ($Z = 26$ pour le fer), $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ la constante de Boltzmann et T_i et T_e les températures en kelvin respectivement des ions et des électrons.

En prenant $I = 18$ MA, $N_i = 3,41 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-1}$ (cela correspond à 70 % de la masse initiale du fil, le reste s'étant dispersé), on obtient: 3,44 milliards de degrés. La température des électrons étant de 35 millions de degrés, on trouve alors:

$T_i = 2,5$ milliards de degrés pour les ions fer. Les mesures de température ionique à la stagnation donnent (voir graphique ci-dessus) environ 280 keV, soit 3,2 milliards de degrés (puisque $T_{\text{kelvin}} \cdot k_B = T_{\text{eV}} \cdot e$, avec $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

L'écart ne dépasse pas 30 %. Cela est tout à fait excellent au vu de la simplicité du modèle choisi.

L'hypothèse de Haines

D'où vient l'apport d'énergie qui explique l'énergie rayonnée et la montée en température ionique durant la décharge ? Haines élimine d'emblée le classique chauffage par effet Joule (loi de Spitzer pour les plasmas) comme apport principal d'énergie. Et pour cause : afin d'atteindre une température de trois millions de degrés seulement (énergie de 3 keV) d'un plasma de diamètre 2 mm, il faudrait une durée de 8 μ s. C'est 2000 fois plus long que la durée de l'impulsion employée qui est de 6 ns pour la Z machine. Par conséquent, Haines fait l'hypothèse selon laquelle l'énergie vient du champ magnétique lui-même qui entoure le plasma. L'énergie du champ magnétique est caractérisée localement par sa densité volumique d'énergie (en J/m^3) : $B^2/(2\mu_0)$. Cette expression est identique à celle déjà utilisée

pour le calcul de la pression magnétique. En effet, une pression (en pascal) est dimensionnellement équivalente à une énergie volumique (en joule par mètre cube) : $1 Pa = 1 J/m^3$. Selon Haines, ce transfert d'énergie du champ magnétique au plasma se produit par le biais de variations périodiques de faible longueur d'onde du champ B. Ces variations engendrent tout d'abord un chauffage visqueux des ions. Puis l'énergie acquise par les ions est communiquée par équipartition aux électrons au travers de collisions ions-électrons. Finalement, l'énergie apportée aux électrons est rayonnée par Bremsstrahlung. D'après les chiffres fournis par les laboratoires Sandia, l'énergie du vide ne semble jouer aucun rôle ici : l'énergie rayonnée (1,8 MJ) reste inférieure à l'énergie de l'impulsion électrique apportée au liner (2 MJ).

► Comment mesure-t-on de telles températures ?

La spectroscopie a pour objet l'analyse du spectre électromagnétique émis ou absorbé par un corps. Ce spectre (ou de façon équivalente la composition en fonction de la fréquence ou de l'énergie) du rayonnement émis ou absorbé caractérise de façon unique ce corps. On ne traite ici que des spectres d'émission.

L'analyse du spectre émis par les étoiles a ainsi permis de connaître leur composition en identifiant les raies d'éléments connus tels que l'hydrogène, l'hélium (qui fut d'abord découvert dans notre Soleil avant de l'être sur Terre), le fer, etc.

Effet Doppler. Par ailleurs, grâce à l'effet Doppler, la vitesse relative des étoiles par rapport à la Terre peut aussi être extraite de leur spectre. En acoustique, l'effet Doppler explique pourquoi le son émis par un moteur de mobylette est plus aigu quand il se rapproche vers nous et plus grave quand il s'éloigne de nous. Il en est de même pour un rayonnement électromagnétique : la fréquence de la lumière émise par les étoiles qui s'éloignent de nous (la majorité d'entre elles) est plus faible. On parle alors du décalage vers le rouge, couleur qui correspond à la fréquence la plus petite du spectre visible. Les étoiles qui se rapprochent de nous ont par conséquent un spectre décalé vers le bleu.

Raies d'émission. Revenons aux ions métalliques du plasma dont on cherche à mesurer la température. Les électrons qui restent encore accrochés aux noyaux sont excités par l'énergie ambiante et atteignent des niveaux d'énergie plus élevés. En redescendant à leur niveau d'énergie antérieur plus faible, ils émettent des photons. Le rayonnement créé possède alors des fréquences particulières (on parle de « raies » d'émission) qui dépendent des différences des niveaux d'énergie électroniques.

Sur la figure 1 ci-contre, est donné le spectre d'émission de l'acier inoxydable porté à une température de 100000 K en fonction de l'énergie exprimée en keV. On reconnaît les raies (de gauche à droite) du chrome, du manganèse, du fer et du nickel.

Raies élargies. Considérons maintenant une température beaucoup plus grande. Celle-ci fait vibrer fortement tous les ions du plasma et l'effet Doppler s'applique à nouveau ici. En effet, les vitesses de vibration des ions sont très

élevées à ces températures. Les mouvements oscillatoires des ions étant aléatoires, les ions qui possèdent des vitesses plus grandes, plus faibles et nulles par rapport au spectromètre sont en proportions égales. Les décalages vers les hautes et basses fréquences (ou énergies) sont donc symétriques par rapport à la raie initiale. Ce phénomène est appelé « élargissement des raies par effet Doppler ». À des températures de l'ordre de 3 milliards de degrés, le même spectre d'émission de l'acier inoxydable avec ses raies élargies est présenté sur la figure 2. À partir de ce résultat expérimental, la largeur des raies obtenues permet d'accéder, à l'aide d'un modèle mathématique, à la température des ions du plasma.

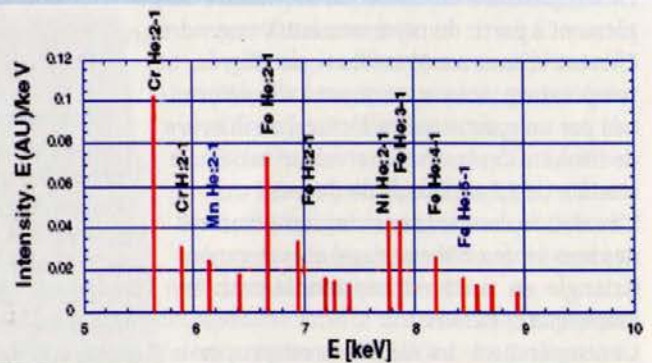


Fig. 1 : Spectre de l'acier inoxydable à 100 000 K.

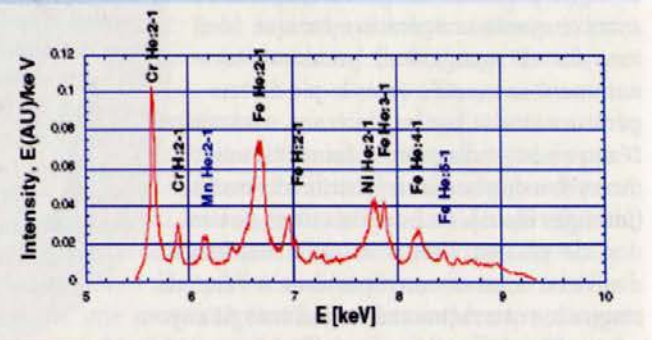


Fig. 2 : Spectre de l'acier inoxydable à 3 000 000 000 K.

Et après

4 000 milliards de degrés

La température de plus de trois milliards de degrés atteinte par la Z machine ne représente pas le record mondial terrestre en la matière: le collisionneur d'ions lourds relativistes de Brookhaven a atteint 4 000 milliards de degrés⁵. Toutefois cette température permet déjà d'initier des réactions de fusion aneutronique (sans émission de neutrons), ou presque. Des réactions nucléaires secondaires produisent en effet des neutrons, mais peu énergétiques. C'est le cas de la réaction bore-hydrogène qui n'a besoin que d'un milliard de degrés seulement. Les neutrons très énergétiques sont capables de briser des noyaux d'atomes en créant des sous-produits radioactifs. On comprend alors tout l'intérêt de réaliser la fusion aneutronique. Une fusion sans radioactivité ni déchet nucléaire. En clair, une fusion propre.

D'autre part, comme l'affirme le spécialiste des plasmas et de la magnétohydrodynamique Jean-Pierre Petit, l'énergie des champs magnétiques très puissants créés lors de la fusion peut être captée aisément. Grâce au phénomène d'induction électromagnétique, une ou plusieurs bobines placées autour du liner suffiraient pour transformer les variations du champ magnétique en courant électrique. Le rendement énergétique correspondant serait élevé, au moins 70 %. On peut même qualifier ce rendement de très élevé si on le compare à ceux des centrales actuelles de production d'électricité, quel que soit leur combustible, de l'ordre de 40 % (de 35 % à 45 %).

Version ultra-compacte

Quoi de plus lourd et encombrant qu'une Z machine, à part sa version rénovée baptisée ZR ? Il est bien difficile d'imaginer une application militaire opérationnelle du Z pinch. Une bombe à fusion de plusieurs centaines de tonnes, ça n'existe pas. Mais c'est sans compter sur l'ingéniosité des scientifiques russes. Dans les années 50, Andreï Sakharov, le père de la bombe H russe, a imaginé un système ultra-compact qui génère une impulsion de plusieurs dizaines de millions d'ampères, appelé générateur magnéto-cumulatif⁶. La première génération de ce type de générateur utilisant des explosifs pour déformer un tube en cuivre est le MK1^{6,7} (photo ci-dessus).

Bombe propre ?

Jusqu'à présent, l'accessibilité très limitée des matières fissiles réduisait considérablement la fabrication d'armes nucléaires. Mais



L'Américain Fowler, de Los Alamos, inspectant un générateur MK1 à Arzamas-16, Russie. En blanc: l'enveloppe explosive.



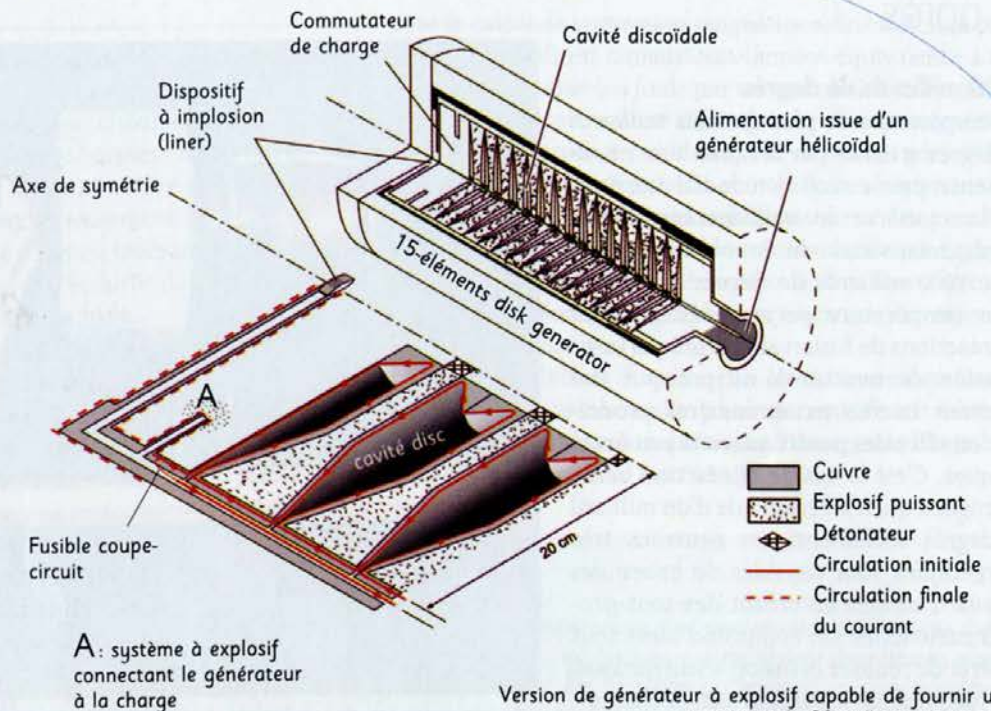
avec un liner à fils couplé à un générateur d'impulsion russe comme on vient de le voir, le plutonium et l'uranium deviennent obsolètes. De plus, la fabrication de ces nouveaux dispositifs ne demande pas une haute technicité. Des amateurs éclairés et outillés sont quasiment capables de construire de telles bombes nucléaires. En outre, en l'absence de matériaux radioactifs, ces nouvelles bombes sont indétectables par les détecteurs Geiger de radioactivité.

Enfin, toujours pour la même raison que précédemment, la pollution nucléaire dévastatrice qui rallongeait dramatiquement la liste des victimes plusieurs mois après l'explosion est écartée. D'où l'appellation de « bombe propre » parfois donnée à ce type d'arme. Le risque du terrifiant hiver nucléaire, dont la menace nous a certainement protégés jusqu'à présent, disparaît en même temps.

Il y a fort à parier que la décision du Congrès américain en 2005 de moderniser ses ogives nucléaires n'est pas étrangère au record en température atteint par la Z machine.

Comme on peut l'imaginer, les avantages de ces nouvelles bombes plus fiables et moins coûteuses n'ont certainement pas échappé aux scientifiques de l'armement. Il y a fort à parier que la décision du Congrès américain en 2005 de moderniser ses ogives nucléaires⁸ n'est pas étrangère au record en température atteint par la Z machine. Il en est sans doute de même concernant l'accord franco-britannique de novembre 2010 portant sur la modernisation de l'arsenal nucléaire. Il ne s'agit bien sûr que d'hypothèses, impossibles à vérifier pour cause de secret défense, mais néanmoins fort probables.

Avec la version ZR, l'intensité est passée de 18 à 26 millions d'ampères, et la puissance de 290 à 350 térawatts pour un coût total de 90 millions de dollars.



► ITER, le rival de la Z machine

L'ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est un projet international destiné à démontrer la faisabilité scientifique et technique d'un réacteur de fusion produisant dix fois plus d'énergie que d'énergie injectée. Ce prototype doit produire une puissance de 500 MW pendant 400 secondes sous forme de chaleur et non pas d'électricité. Si les objectifs sont atteints, ITER sera suivi par un réacteur de démonstration appelé DEMO et capable de produire une puissance thermique de 2 gigawatts en étant 15 % plus grand qu'ITER. ITER est un réacteur à confinement magnétique possédant la géométrie torique, la plus performante à ce jour pour ce type de confinement. Son mode de fonctionnement est celui des réacteurs tokamak avec, entre autres, des bobines externes parcourues par des intensités variables qui créent un courant à l'intérieur du plasma, le long du tore.

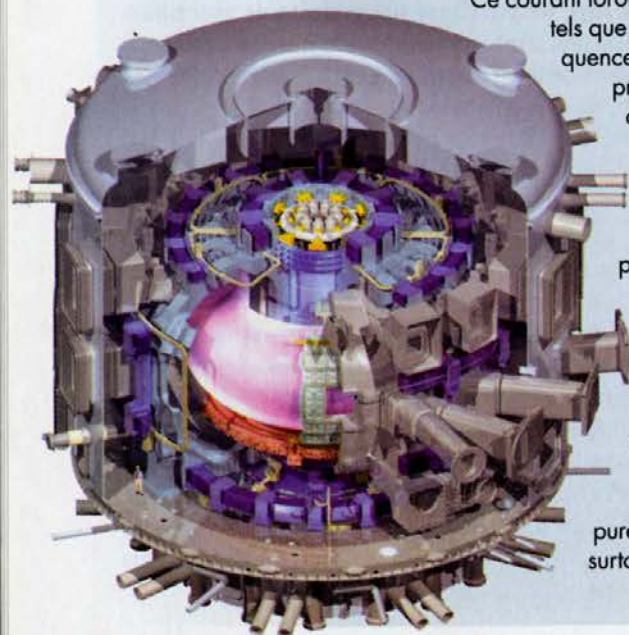
Ce courant toroïdal contribue à chauffer le plasma. D'autres dispositifs tels que le chauffage par ondes électromagnétiques hautes fréquences et par injection d'atomes neutres énergétiques sont prévus pour atteindre la température de 150 millions de degrés. Cette température relativement peu élevée ne laisse pas d'autre choix que de réaliser la réaction de fusion entre le tritium et le deutérium (voir encadré « Fusion nucléaire, mode d'emploi » p. 102.) En effet, cette réaction possède le gros inconvénient de créer des neutrons très énergétiques de 14,06 MeV. Ces neutrons seront en partie absorbés par une épaisseur d'un mètre d'eau et d'acier afin de protéger les aimants supraconducteurs. Toutefois, nombre de scientifiques craignent qu'ils détériorent la surface torique du réacteur. Cela conduirait à une dispersion d'impuretés susceptibles de polluer le plasma et surtout de le refroidir.

Z, ZR, ZN...

Née en 1995, la Z machine historique n'existe plus. En 2007, elle a été modernisée. La nouvelle version s'appelle ZR, pour « *refurnished Z machine* » ou Z machine rénovée, et est identique à Z sur le principe. Avec ZR, l'intensité est passée de 18 à 26 millions d'ampères, et la puissance de 290 à 350 térawatts (10^{12} watt) pour un coût total de 90 millions de dollars. Elle est toujours en fonctionnement actuellement.

Pour fabriquer de l'énergie à grande échelle, il ne suffit pas d'initier une réaction de fusion puis d'attendre plusieurs heures avant de démarrer la suivante. Un moteur à explosion fonctionnant sur ce principe n'irait pas très loin.

Pour accélérer la fréquence des tirs, il faut un saut technologique car les générateurs de Marx de ZR ne peuvent suivre la cadence. Ce sont encore des scientifiques russes,



Cœur de l'International Thermonuclear Experimental Reactor.

travaillant cette fois au High Current Electronics Institute de Tomsk en Sibérie, qui vont fournir la solution, en association toutefois avec leurs collègues américains de Sandia. Leur création est appelée le « *linear transformer driver* » ou LTD que l'on pourrait traduire par « commutateur à transformateur linéaire ».

Une nouvelle machine est prévue, équipée de générateurs LTD et qui s'appellera la ZN machine, N pour neutrons. Elle pourra générer 60 MA sous une tension de 6 MV et effectuer des tirs toutes les 100 secondes environ. La puissance dégagée par la fusion sera comprise entre 20 et 30 MJ. Ces caractéristiques devraient en théorie être suffisantes pour la transformer en centrale électrique expérimentale. Il faudrait 35 millions de dollars et cinq années environ pour réaliser ZN.

Les scientifiques de Sandia sont même allés jusqu'à imaginer l'après-ZN, un premier prototype de centrale électrique appelé Z-IFE (Z Inertial Fusion Energy). La puissance électrique développée sera de 1000 MW avec une fréquence de tir de 0,1 Hz, soit un tir toutes les 10 secondes.

La concurrence avec ITER, dans les pays concernés, est écrasante. Pourtant, de nombreux scientifiques comparent ITER à une machine à vapeur et la Z machine à un moteur à explosion !



Un chercheur de Sandia teste un générateur LTD.

Pas de volonté politique

Les projets de Sandia nous rendent optimistes au sujet de l'avenir énergétique de la planète. Le seul ennui, c'est qu'à ce jour aucun moyen financier n'a été débloqué pour mettre en chantier la Z machine. Tout est prêt, sauf la volonté politique. La nouvelle centrale Z-IFE semble encore loin...

En France, il existe une Z machine contrôlée par les militaires, surnommée « Sphinx ». L'intensité qu'elle délivre est faible (5 MA) mais pourrait être augmentée facilement. Les auto-

rités militaires refusent catégoriquement toute recherche civile sur la filière énergétique.

En Angleterre, il existe aussi l'équivalent d'une Z machine d'assez faible capacité (1,4 MA) qui est utilisée partiellement par les Américains pour compléter leurs recherches. Les Russes ont sans doute investi eux aussi dans une Z machine.

Pourquoi ces blocages et ce silence assourdissant ? Sans doute pour deux raisons :

- La technologie civile du Z-pinch est très proche d'armes nucléaires de nouvelle génération.

- La concurrence avec ITER, dans les pays concernés, est écrasante. Pourtant, de nombreux scientifiques comparent ITER à une machine à vapeur et la Z machine à un moteur à explosion ! La comparaison est plus fine qu'il n'y paraît¹⁰.

Si rien ne bouge très rapidement (et pourquoi cela bougerait-il ?), alors il faudra très

vraisemblablement

chercher ailleurs la

solution à nos problèmes

énergétiques. Dans l'hypothèse

quasi certaine où Z-IFE ne voit jamais

le jour, cette histoire de la Z machine

aura au moins le mérite de nous

livrer le profil du système idéal qui

fournira de l'énergie propre. Il ne devra renfermer

aucune application pour la défense afin de ne pas aggraver l'intérêt des militaires.

Jérôme Dangmann

Remerciements :

À Jean-Pierre Petit pour ses pages très détaillées sur la Z machine ; à Neal Singer de Sandia pour des compléments d'information.

Notes

1. Sandia est un laboratoire multiprogramme géré par Sandia Corporation, société appartenant à Lockheed Martin, pour le ministère américain de l'Énergie. Sandia a des responsabilités de recherche et développement dans les domaines de la sécurité nationale, l'énergie, les technologies environnementales et la compétitivité économique.

2. Voir l'article « Une cosmologie des plasmas » par Wallace Thornhill dans NEXUS n° 68 page 94.

3. Une autre hypothèse consiste à penser que le fer ne se transforme pas en plasma immédiatement. Il serait d'abord projeté vers l'axe des Z par les forces de Laplace avant d'être transformé en plasma.

4. Haines M.G. *et al*, Phys. Rev. Lett., 96, 075003 (2006)

5. Annonce officielle du laboratoire de Brookhaven en février 2010 : http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=1074. Cependant, même si cette température est gigantesque, le milieu est trop raréfié pour amorcer une réaction de fusion. Pour la réaliser, il faut revenir au principe de la fusion confinée.

6. http://fr.wikipedia.org/wiki/Generateur_magneto-cumulatif

7. http://www.jp-petit.org/science/Z-machine/machines_MHD/machines_MHD_bases.htm

8. <http://www.mondialisation.ca/index.php?context=va&aid=2671>

9. http://www.jp-petit.org/science/Z-machine/from_geffray/ltd.html

10. http://www.jp-petit.org/nouv_f/lettres_ouvertes/charpak/charpak_lettre_ouverte.htm