

A. D. SAKHAROV

ŒUVRES SCIENTIFIQUES

Préface du Professeur **Louis Michel**,
de l'Académie des Sciences



éditions anthropos

Extraits sur la magnétohydrodynamique (générateurs à compression de flux magnétique) :

- article 3 : Accumulation magnétique

- article 4 : Générateurs à magnéto-implosion

Article 3

Accumulation magnétique

Toute explosion est une source abondante d'énergie mécanique et thermique. En 1951, Sakharov a proposé une possibilité de transformer cette énergie en énergie magnétique ; il a également proposé la conception d'ensemble de dispositifs destinés à produire des champs et courants très intenses par la déformation explosive de conducteurs de courant. Ce processus a reçu le nom d'accumulation magnétique. Nous allons décrire brièvement deux générateurs représentatifs de ce type : le générateur MK-1, qui utilise la compression d'un champ magnétique axial et le générateur MK-2, dans lequel le champ magnétique issu d'un solénoïde est comprimé par les parois d'une ligne coaxiale.

Terletskii [2] a publié une brève communication sur la compression explosive d'un champ axial ; une publication ultérieure [1] a montré plus tard que des expériences semblables ont eu lieu à la même époque à Los Alamos. Aucun dispositif semblable au MK-2 n'a jamais été décrit jusqu'à présent.

I. Le MK-1 est un tube métallique entouré par une charge explosive et contenant un champ magnétique axial. La charge provoque une compression symétrique rapide, ce qui induit dans le tube un courant tendant à maintenir le champ constant. Pour un tube idéalement conducteur :

$$\Phi = \pi R^2 H = \pi R_0^2 H_0 = \text{const}$$

Co-auteurs : R. Z. Lyudaev, E. N. Smirnov, Yu. I. Plyushchev, A. I. Pavlovskii, V. K. Chernyshev, E. A. Feoktistova, E. I. Zharinov and Yu. A. Zysin.

Source : Магнитная кумуляция, Доклады АН СССР 165:65-68 (1965) (соавторы : Р. З. Людаев, Е. Н. Смирнов, Ю. И. Пдющев, А. И. Павловский, В. К. Чернышев, Е. А. Феоктистова, Е. И. Жаринов, Ю. А. Зысин). Reproduit de Sov. Phys. Dokl. 10 : 1045-1047 (1966), avec la permission de l'American Institute of Physics.

alors que la grandeur du champ et l'énergie magnétique sont inversement proportionnelles au carré du rayon interne :

$$H = \frac{H_0 R_0^2}{R^2}$$

$$W = \frac{W_0 R_0^2}{R^2}$$

où R_0 , W_0 , H_0 correspondent respectivement aux valeurs initiales du rayon interne du tube, de l'énergie magnétique et de la grandeur du champ.

Le flux magnétique décroît si la conductivité est finie, le paramètre crucial étant $\eta = (4\pi\sigma Rv/c^2)^{1/2}$, où σ est la conductivité et $v = -dR/dt$. Le flux est conservé si $\eta \gg 1$. Nous obtenons $\eta = \text{const}$ pour $v \sim 1/R$. Le flux suit une loi telle que $\Phi \sim R\alpha$, où $\alpha = 2,26 \eta^{-1}$ pour les fortes valeurs de η .

Les essais préliminaires effectués avec des tubes d'aluminium d'environ 100 mm de diamètre ont donné des champs de 10^6 Œ ; dans un essai utilisant un tube en acier inoxydable, on a trouvé un champ de 25×10^6 Œ pour un diamètre final de 4 mm (la pression du champ étant de 25×10^6 atm). La figure 1 représente l'oscillogramme du champ au cours de cet essai. La région correspondant à $H > 25 \times 10^6$ Œ est située en dehors de l'image.

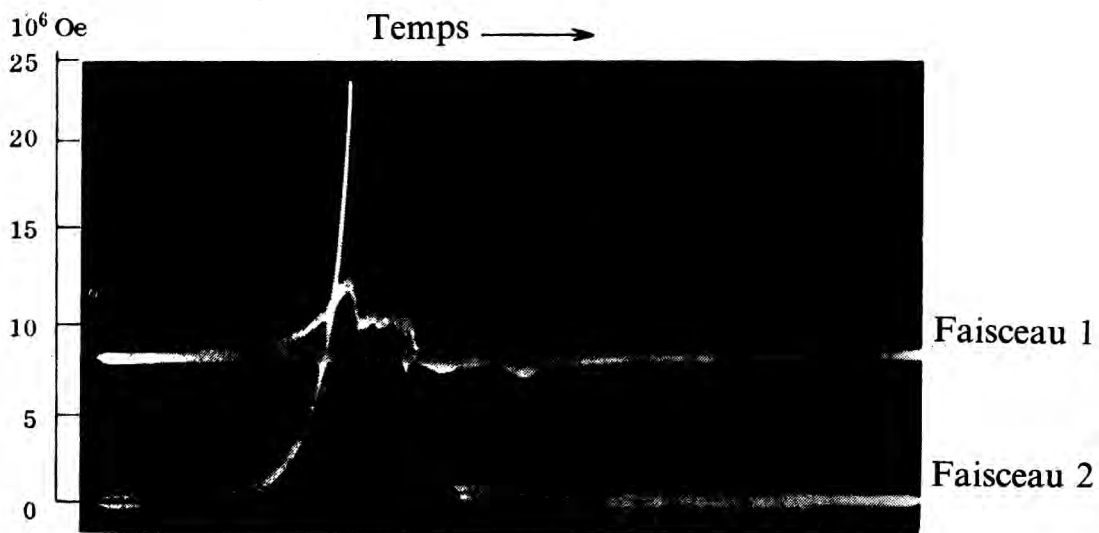


Figure 1 Oscillogramme de champ. Faisceau 1: signal de fond (dû au court-circuit des conducteurs de sortie). Faisceau 2 : signal provenant d'une spire détectrice ayant un diamètre de 1,5 mm (avec intégration RC).

La figure 2 représente la disposition d'ensemble du générateur. Pour ces essais, on a utilisé une charge produisant une compression très rapide et suffisamment symétrique. Le champ magnétique initial était produit par

un bobinage de feuillard d'aluminium enroulé sur le tube, et dans lequel se déchargeait une batterie de condensateurs. Le champ initial pouvait pénétrer dans l'espace libre, bien que le tube ne soit pas fendu, parce que la conductivité de l'acier inoxydable est assez basse. La surface intérieure avait été revêtue d'une couche de cuivre de 20μ afin de mieux capturer le champ au cours de la compression.

Il est également possible de faire produire le champ par un dispositif MK-2 (voir plus loin) qui permet de réaliser des champs élevés dans des volumes importants ; nous avons enregistré un champ de 5×10^6 Oe dans un volume de 100 cm^3 au cours d'un essai utilisant un tube de cuivre de 300 mm de diamètre.

Il est clair que des champs encore plus élevés sont réalisables, car on peut obtenir une valeur de H aussi élevée que l'on désire par compression symétrique d'un tube à la vitesse appropriée, à condition bien entendu que les parois demeurent conductrices malgré la présence de courants très importants.

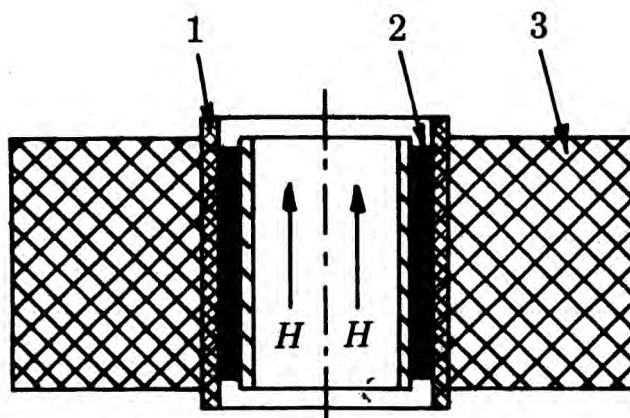


Figure 2 Dispositif MK-1. 1 : Tube en acier inoxydable. 2 : Bobinage en feuillard d'aluminium. 3 : Explosif.

II. Le dispositif MK-2 se compose d'un tube métallique central et d'une spirale extérieure coaxiale reliée à un tube de même diamètre, ou chambre, fixé sur le tube central (Fig. 3). Ce dernier contient une longue charge cylindrique qui est mise à feu à l'une des extrémités de la spirale. Une autre charge peut être disposée autour de la chambre et de la spirale. Une batterie de condensateurs se décharge dans le circuit constitué par la spirale, la chambre et le tube central. L'explosion produit une déformation conique du tube, qui rejoint le point de départ de la spirale à l'instant où le courant de décharge est maximum. La déformation se propage ensuite le long du tube, ce qui revient à chasser un cône métallique le long de la spirale, à la vitesse de détonation ; le point de contact avec l'enroulement

décrit une hélice tandis que le nombre de spires non court-circuitées diminue, et avec lui l'inductance du générateur. Le cône atteint éventuellement le point du départ de la chambre pour former un volume coaxial dont la longueur et l'inductance continuent à décroître. La chute de l'inductance conduit à une augmentation du courant I et de l'énergie magnétique W .

La déformation rapide conduit à la conservation du flux, soit ($\Phi = LI \approx L_0 I_0$, et par conséquent

$$I = \frac{\Phi}{L} \approx \frac{L_0}{L} I_0$$

$$W = \frac{\Phi^2}{2L} \approx \frac{L_0}{L} W_0$$

où L_0 , I et W_0 sont les valeurs initiales.

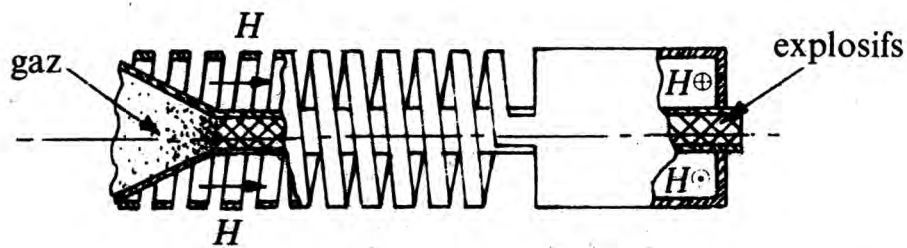


Figure 3 Dispositif MK-2.

L'énergie magnétique augmente en raison du travail effectué contre les forces exercées par le champ sur les parois du tube central.

Le dispositif MK-2 a permis d'obtenir des courants de 5×10^7 A avec une inductance finale de $0,01 \mu\text{H}$; dans certains essais, le gain de courant a été supérieur à mille (le courant pouvant atteindre ou même dépasser 10^8 A). Les champs obtenus avec le MK-2 vont de 1 à $1,5 \times 10^6$ Œ dans des volumes de plusieurs litres, l'énergie stockée étant de 1 à 2×10^7 J soit 10 à 20 % de celle produite par l'explosif au sein de la chambre ; le flux est conservé pendant la déformation de la partie coaxiale.

III. Une charge peut être couplée au MK-2, soit directement (auquel cas l'inductance finale est celle de la charge, et il importe de la minimiser), soit par l'intermédiaire d'un transformateur (couplage inductif de la charge avec le générateur). L'usage d'un transformateur permet de communiquer à la charge une partie notable de l'énergie explosive; on a ainsi, avec un petit générateur, extrait 50% de l'énergie magnétique. Ceci permet d'accumuler une énergie considérable dans une charge assez fortement inductive, et de disposer cette charge à distance, de manière à la protéger contre les

effets de l'explosion. Ce principe autorise également la réalisation d'un générateur à plusieurs étages : l'énergie magnétique initiale du premier générateur est fournie par un aimant permanent, et l'énergie produite transférée par intermédiaire d'un transformateur, à un second générateur dans lequel elle est amplifiée, puis transférée à un troisième générateur, et ainsi de suite.

Un autre moyen de transférer l'énergie du générateur à la charge est d'interrompre le circuit conducteur au moyen d'une charge explosive supplémentaire, le flux magnétique étant projeté du MK-2 dans la charge (méthode de rupture). Cette méthode permet de transférer plus de 50 % de l'énergie produite par le MK-2 à une charge composée d'une inductance et d'une résistance. Au cours de certains essais, on a relevé un temps de transfert de $0,5 \times 10^{-6}$ sec.

IV. Les générateurs ci-dessus peuvent s'appliquer à la réalisation d'accélérateurs coup par coup relativement compacts pouvant produire 100 à 1000 BeV, ainsi qu'à des études sur les plasmas: à l'accélération de corps denses jusqu'à des vitesses voisines de 1 000 km/s (production de températures et pressions stellaires en laboratoire), à la production d'ondes de choc, aux recherches sur les équations d'état et sur les propriétés des matériaux, et à l'étude de l'effet des météorites sur les vaisseaux spatiaux.

Un générateur de ce type est en cours de développement pour la réalisation de bêtatrons sans fer [3], et des essais ont été effectués sur l'alimentation à distance de l'électro-aimant. Des essais ont également été effectués sur des accélérateurs coaxiaux électrodynamiques ; on a enregistré une vitesse de 100 km/sec pour le métal vaporisé d'un feuillard d'aluminium ayant une masse initiale d'environ 2 g.

Ces générateurs permettent aussi d'obtenir les champs très élevés qui sont nécessaires à l'étude d'effets tels que la magnéto-résistance dans les métaux et semiconducteurs, ou les effets magnéto-optiques et ainsi de suite.

REFERENCES

1. C. M. Fowler, W. B. Garn, and R. S. Caird, *J. Appl. Phys.* 31:588 (1960).
2. Ya. P. Terletskii, *ZhETF* 32:387 (1957); *Sov. Phys. JETP* 5:301 (1957), trad.
3. A. I. Pavlovskii, G. D. Kuleshov, G. V. Sklizkov, Yu. A. Zysin, and A. I. Gerasimov, *DAN* 160 1:68 (1965); *Sov. Phys. Dokl.* 10:30 (1965), trad.

Article 4

Générateurs à magnéto-implosion

Plusieurs articles, de nature expérimentale et théorique, ont récemment été consacrés à l'utilisation d'explosions pour la production de champs magnétiques ultra-forts [1-9]. Ce même domaine a également fait l'objet d'une récente conférence internationale (Rome, septembre 1965). Aux U.S.A. et en U.R.S.S., on a obtenu, dans des expériences isolées, des champs de 15 à 25 millions de gauss. On peut atteindre, de manière relativement simple, des champs de moindre importance (2 à 5 millions de gauss). Des perspectives s'ouvrent maintenant pour l'étude des propriétés électriques, optiques et élastiques de différentes substances en présence de tels champs, qu'il était jusqu'ici impossible à obtenir. De plus, les générateurs à magnéto-implosion peuvent servir à alimenter des accélérateurs de particules pulsés, ainsi qu'à d'autres usages (recherches en physique des plasmas, lancement de projectiles, etc.).

Dans le présent article, nous allons décrire le principe et la réalisation des générateurs à magnéto-implosion ; nous donnerons leurs caractéristiques et traiterons brièvement de leurs applications.

Nous emploierons l'expression « générateurs magnéto-cumulatifs », ou « générateurs MC », qui est usitée en U.R.S.S. et évoque le phénomène fondamental caractérisant ces dispositifs, c'est-à-dire la compression (accumulation) du flux magnétique.

I. PRINCIPE DES GÉNÉRATEURS MC

Au printemps de 1952, R. Z. Lyudaev, E. A. Feoktistova, G. A. Tsytkov, et A. A. Chvileva réalisaient la première expérience d'implosion effectuée en U.R.S.S. dans le but d'obtenir des champs magnétiques très élevés. Le

montage expérimental est représenté par la figure 1 (les générateurs de ce type ont été désignés par l'appellation MK-1). Un champ magnétique longitudinal est produit à l'intérieur d'un cylindre métallique 1 en déchargeant la batterie de condensateurs C dans l'enroulement 2 (pour assurer une pénétration rapide du champ dans le cylindre, celui-ci est entaillé par une fente oblique étroite S , qui se ferme ensuite sous l'effet de la déformation). Une charge explosive E est placée à l'extérieur du cylindre. Une onde de choc cylindrique convergente est déclenchée dans cette charge, qui est mise à feu soit par un circuit électrique de détonation multi-points, soit par des « lentilles » spéciales de détonation. L'instant de mise à feu est choisi de telle manière que la compression du cylindre débute lorsque le courant qui passe dans le solénoïde est à son maximum.

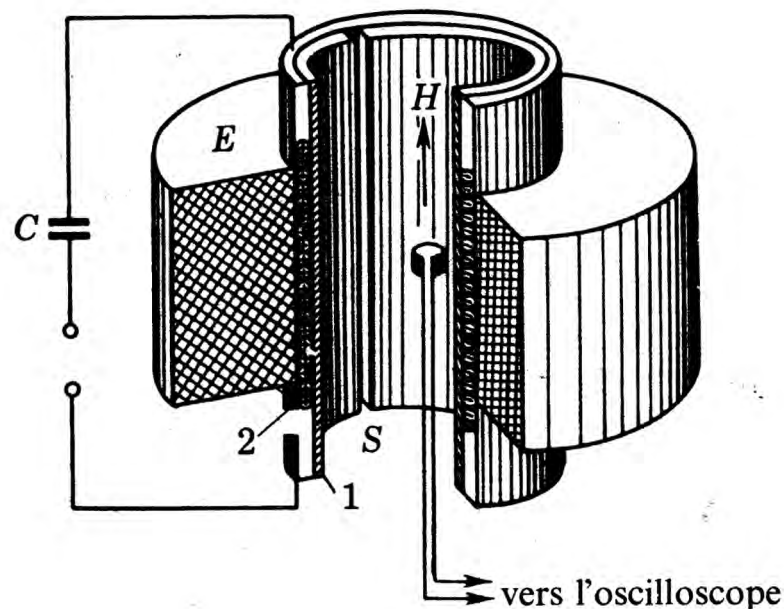


Figure 1 Coupe d'un générateur MK-1.

Lorsque le cylindre se déplace sous l'effet de l'onde de détonation avec une vitesse supérieure à 1 km/sec, le processus de contraction est si rapide que l'on peut, en première approximation, négliger les pertes ohmiques dans le tube et le considérer comme un conducteur parfait (pour une approche plus précise, voir plus loin). Dans un conducteur idéal, le champ électrique est nul, et par conséquent le flux magnétique $\Phi = \pi R^2 H$ qui existe dans la cavité cylindrique en contraction ne change pas lorsqu'elle se contracte. Dans ce cas idéal, le champ magnétique augmente proportionnellement à $1/R^2$, et l'énergie du champ magnétique, qui est égale à $W = (H^2/8\pi) \pi R^2 l$,

où l est la longueur du cylindre, augmente dans les mêmes proportions :

$$\Phi = \pi R^2 H = \text{const}$$

$$H = \frac{H_0 R_0^2}{R^2} \quad (1)$$

$$W = \frac{W_0 R_0^2}{R^2}$$

H et W tendent vers l'infini lorsque R tend vers 0.

Dans la réalité, bien entendu, le flux magnétique décroît et il est impossible d'atteindre des valeurs infinies de H et W . Dans les expériences de ce type, le flux est en général inférieur d'un facteur de 2 à 3, comme c'était le cas en 1952. De plus, pour une certaine valeur de R , le déplacement du cylindre est arrêté par la force antagoniste due au champ magnétique. Il n'en reste pas moins que, dès les premières expériences, on a obtenu un champ d'un million de gauss pour un champ initial de 30 kG. Les champs ont été mesurés au moyen d'un capteur inductif. Nous donnons plus loin un traitement plus détaillé des dispositifs du type MK-1 ; pour le moment, voyons comment se comportent les générateurs magnéto-cumulatifs du point de vue électrotechnique.

On peut dire que les générateurs MC reposent essentiellement sur le principe utilisé dans tous les autres dispositifs qui convertissent une énergie mécanique en énergie électrique. Considérons un circuit dont l'inductance L peut varier sous l'effet de forces extérieures. En premier lieu, nous négligerons la résistance du circuit. Le symbole \sim indiquant la proportionnalité, nous pouvons écrire

$$\Phi = LI = \text{const}$$

$$I \sim \frac{1}{R} \quad (2)$$

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L} \approx \frac{L_0 W_0}{L}$$

c'est-à-dire que l'énergie W du champ magnétique augmente lorsque l'inductance diminue. En tenant compte de la résistance R du circuit déformé, les équations (2) sont remplacées par

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\int (R/L) dt}$$

$$W = \frac{W_0 L_0}{L} e^{-2 \int (R/L) dt} \quad (3)$$

En dehors des générateurs MK-1, on a proposé, en U.R.S.S. et ailleurs, de nombreux dispositifs dans lesquels l'énergie et l'intensité du champ magnétique augmentent lorsque des circuits conducteurs sont comprimés par les produits d'implosion. Le générateur MK-2, que nous allons maintenant décrire, en est un exemple.

II. LE GÉNÉRATEUR MK-2

Les figures 2 et 3 sont respectivement une photographie et un schéma d'un générateur MC (le MK-2) qui présente un intérêt particulier pour la

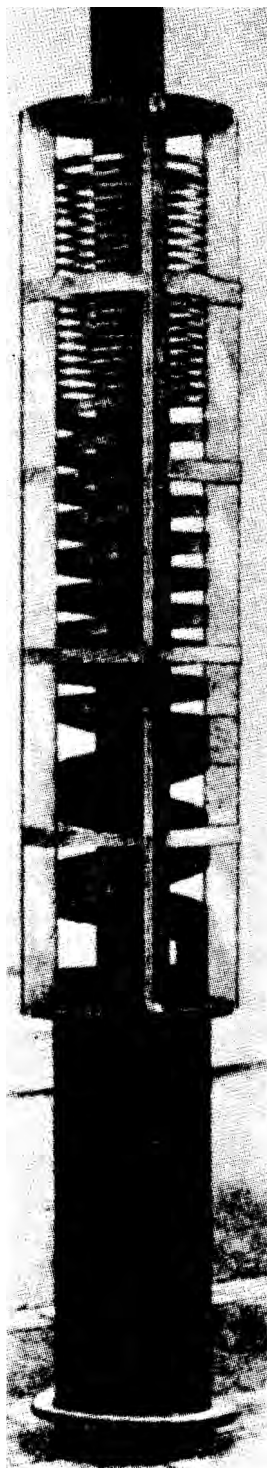


Figure 2 Photographie du générateur MK-2.

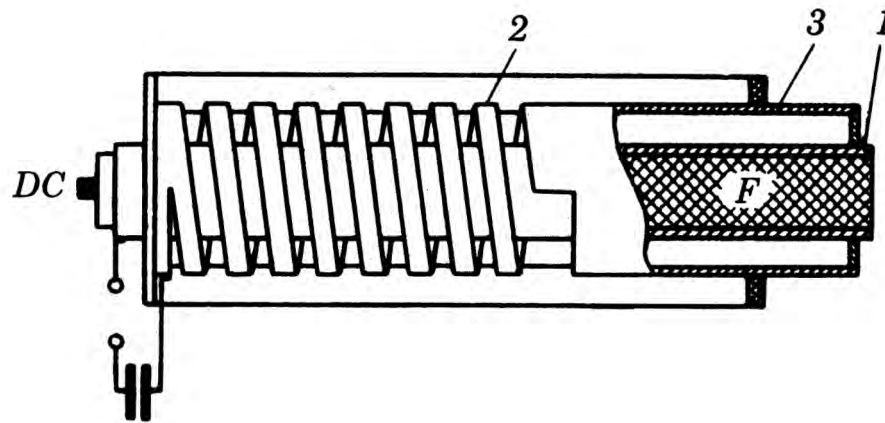


Figure 3 Photographie du générateur MK-2.

production de courants intenses (allant jusqu'à 10^8 A) et de champs magnétiques à très haute énergie (jusqu'à 20 % de l'énergie d'explosion étant convertie en énergie magnétique à des valeurs de champ relativement élevées, pouvant atteindre 2×10^6 Oe). Le principe de fonctionnement du MK-2 est en résumé le suivant (illustré par les figures 4a-4c). Lorsque la capsule DC est mise à feu, l'onde de détonation se propage dans une charge explosive placée à l'intérieur du tube métallique 1. Le tube se déforme pour devenir, à tout instant, un cône (Fig. 4a) qui court-circuite en premier lieu l'hélice 2, puis la virole 3 de telle manière que l'inductance du circuit constitué par l'hélice 2, le tube 1 et la section coaxiale 3 diminue progressivement à mesure que l'onde de détonation se propage vers la droite. Le tube en expansion comprime en même temps le champ magnétique, augmentant ainsi son énergie. Au dernier stade de fonctionnement du générateur MC (Fig. 4c), l'hélice est totalement déconnectée ; le champ magnétique, qui

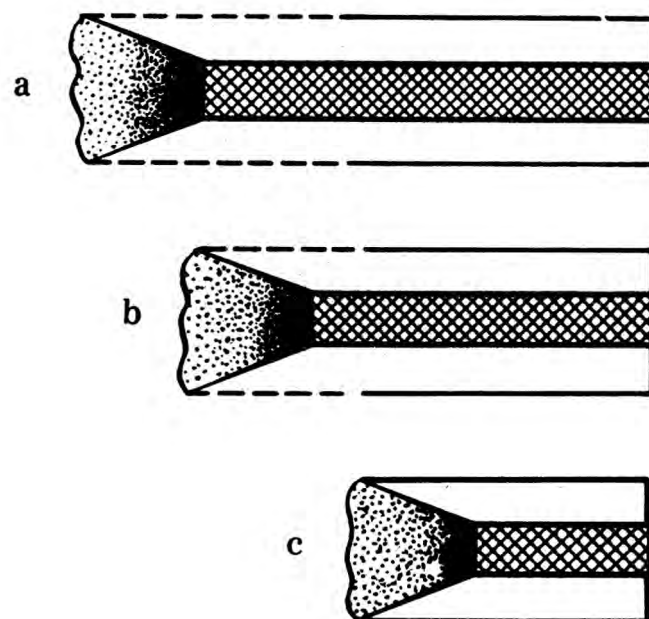


Figure 4 Phases du fonctionnement du générateur MK-2.

dans ce cas coïncide avec le champ tel qu'il serait produit par un courant continu, est alors comprimé dans le volume décroissant délimité par les parois intérieure et extérieure de la structure coaxiale.

La réalisation pratique de systèmes MK-2 à performances élevées a nécessité des études approfondies effectuées par une équipe importante ; elles étaient pratiquement achevées en 1956 (le premier générateur MK-2 a été réalisé en 1952, et des courants allant jusqu'à 100 millions d'ampères étaient obtenus en 1953).

Dans le cadre de ces travaux, les problèmes suivants ont été résolus

1. Prévention des fissures dans le tube en dilatation, réalisation d'une dilatation à très bonne symétrie, choix du matériau (on a utilisé le cuivre pour tous les appareils à l'exception des plus grands), détermination des dimensions et tolérances, contrôle de l'homogénéité des explosifs, etc. A ce stade, les observations ont été faites par photographie à rayons X pulsés, et par d'autres méthodes.

2. Minimisation des pertes de flux magnétiques dans la partie hélicoïdale, par utilisation d'enroulements à pas variable et raccordement progressif avec la partie coaxiale, chanfreinage des arêtes des spires avec un angle égal à l'angle d'évasement du tube, etc.

3. Etude et développement expérimental de la partie coaxiale (que l'on a décidé d'appeler « le vase ») dans laquelle se produit principalement la croissance de l'énergie du champ magnétique.

4. Développement de dispositifs à transformateur pour le couplage de l'énergie électrique issue de la partie coaxiale (Fig. 5). Ceci permet de relier le générateur MK-2 à des charges ayant des inductances très supérieures.

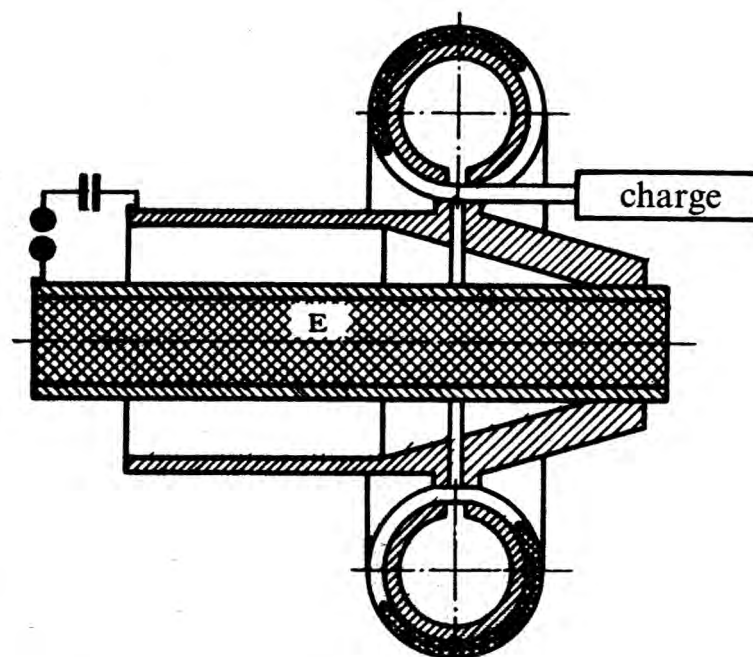


Figure 5 Dispositif MC à transformateur.

5. Développement de dispositifs dans lesquels le flux magnétique initial est produit au moyen d'aimants permanents.

6. Développement dispositifs en cascade, à couplage par transformateurs.

Les générateurs MK-2 ont été développés en U.R.S.S. dans une vaste gamme de dimensions et de puissances. Dans un générateur ayant un poids de 150 kg, et dont le vase contient 15 kg d'explosif, plus de 10^7 J sont convertis en énergie magnétique. Une batterie de condensateurs capables de produire une décharge d'énergie équivalente serait une installation très complexe et coûteuse.

III. THÉORIE DU GÉNÉRATEUR MK-1 ET PRODUCTION DE CHAMPS ULTRA-FORTS

Du point de vue théorique, le plus simple de ces dispositifs est le générateur MK-1 ; c'est aussi celui qui produit les champs magnétiques les plus élevés (jusqu'à 25 Mœ). En prenant le générateur MK-1 pour exemple, nous allons maintenant examiner certaines caractéristiques essentielles du fonctionnement des générateurs MC ; commençons par prendre en compte la conductivité non infinie du cylindre dans lequel le flux magnétique est comprimé. On sait que la conductivité d'un métal dépend de sa densité et de la température, qui varient au cours de la contraction. Si nous supposons connues la loi de dépendance et l'équation d'état du matériau constitutif du cylindre, nous pouvons résoudre simultanément, par des méthodes numériques, les équations différentielles aux dérivées partielles qui décrivent la contraction radiale mono-dimensionnelle et l'écoulement des courants de Foucault induits dans le métal en déplacement. (La résolution numérique des équations différentielles aux dérivées partielles implique leur réduction à des équations aux différences finies, et n'est pratiquement possible qu'au moyen d'ordinateurs rapides.) Bien entendu, on ne peut pas obtenir de solution analytique du cas général. On peut toutefois expliquer qualitativement le rôle joué par la conductivité finie du matériau constitutif du cylindre en ayant recours à la méthode approchée de la couche superficielle, bien connue en électricité. Dans cette méthode, on obtient une représentation approchée de la répartition du courant dans le cylindre en utilisant un « profil exponentiel » (4). La densité de courant est donnée par

$$j(r) = j_0(t) e^{-x/\delta(t)} \quad (4)$$

où $\delta(t)$ est l'épaisseur de la peau, et $x = -R(t)$, où $R(t)$ est le rayon de la cavité cylindrique ; cette fonction est supposée connue. La relation (4) est

exacte si H croît exponentiellement aux bords, suivant la forme $H \sim \exp(\lambda t)$ où λ est une constante. Dans ce cas δ est constant et sa valeur est donnée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi \times 10^{-9} \sigma \lambda}} \quad (5)$$

où σ est la conductivité en $\text{ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$, δ étant exprimé en cm et λ en sec^{-1} . Dans la méthode de la couche superficielle, les formules (4) et (5) sont utilisées pour obtenir une loi arbitraire de croissance de $H(t)$, la valeur λ dans (5) étant supposée égale à $(1/H) (dH/dt)$. Si nous considérons la variation de flux comme une correction, nous obtenons $\lambda = -2(1/R) (dR/dt)$. De plus, il est évident que $H = 0,4\pi j_0 \delta$, et que, dans un système qui se déplace avec le métal, le champ électrique est $E = (10^{-8}/2\pi R) (d\Phi/dt) = j_0/\sigma$. En combinant ces différentes formules, on obtient

$$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\alpha}{R} \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

où le « coefficient de pertes » α est égal à

$$\alpha = \frac{10^4}{(0,2\pi)^{1/2} \sigma^{1/2} R^{1/2} v^{1/2}}$$

en posant $v = |dR/dt|$.

Dans le cas du cuivre (pour lequel $\sigma = 6 \times 10^5 \text{ } \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$), en prenant $v = 10^5 \text{ cm/sec}$ et $R = 1 \text{ cm}$, on trouve $\alpha = 0,05$, ce qui correspond à une bonne conservation du flux. Cette évaluation simple démontre la validité de notre hypothèse, suivant laquelle il y a conservation approximative du flux magnétique dans les générateurs MC. A ce propos, on peut noter que dans le cas particulier où $\alpha = \text{const}$ et $v \sim 1/R$, une solution analytique (auto-similaire) a été obtenue pour l'équation différentielle aux dérivées partielles correspondant à un coefficient α constant, avec $\Phi \sim R \sim t^{\alpha/2}$ (M. P. Shumaev et l'auteur, 1952).

Dans la réalité, la conductivité est fortement diminuée en raison de l'échauffement du métal par effet Joule (tous les métaux ont un coefficient de température négatif en ce qui concerne la conductivité). L'implosion superficielle de la couche métallique, qui donne lieu à un dégagement de chaleur dépassant l'énergie de sublimation, joue un rôle particulièrement important. Un métal qui se dilate perd une partie de sa conductivité. Si ces phénomènes se traduisent par la création d'une zone de conductivité réduite, de grandeur comparable au rayon de la cavité, et ayant une conductivité telle que l'épaisseur de la couche superficielle à l'intérieur de la cavité soit également comparable au rayon, il se produit alors une perte appréciable de champ magnéti-

que. Toutefois, si la pression $H^2/8\pi$ due au champ magnétique et la densité de la chaleur dégagée par effet Joule, qui lui est comparable, sont inférieures à ρv^2 , où ρ est la densité du tube, alors la vitesse de dilatation thermique de la couche évaporée est plus petite que $v = |dR/dt|$. Les phénomènes d'implosion superficielle ne joueront pas dans ce cas de rôle catastrophique, même si la valeur de la conductivité de la couche de plasma est défavorable. Le critère

$$\rho v^2 > \frac{H^2}{8\pi} \quad (8)$$

entre également en jeu lorsque l'on considère les problèmes liés à l'arrêt du tube par la contre-pression magnétique, compte tenu de la compressibilité de la paroi. Si la vitesse communiquée au tube est suffisante, l'énergie du champ magnétique peut être aussi élevée que l'on désire. Dans les expériences soviétiques, les tubes étaient animés d'une vitesse de 10 à 20 km/sec.

Dans la pratique, il est important d'assurer que la compression dans le cylindre métallique s'effectue suivant une très bonne symétrie cylindrique (ce qui implique une charge explosive de haute qualité) ; les lentilles de détonation doivent également présenter une telle symétrie, et les détonateurs électriques doivent être mis à feu précisément au même instant. La compression accentue les petits défauts de symétrie en raison de l'instabilité dynamique du tube en cours d'implosion. Il en résulte qu'en pratique le changement de rayon est limité à un facteur ne dépassant pas 10. Pour obtenir des champs particulièrement élevés, il est donc nécessaire de disposer de champs initiaux très importants. Dans les expériences soviétiques, on a utilisé le dispositif MK-2 pour produire les champs initiaux (Fig. 6). La

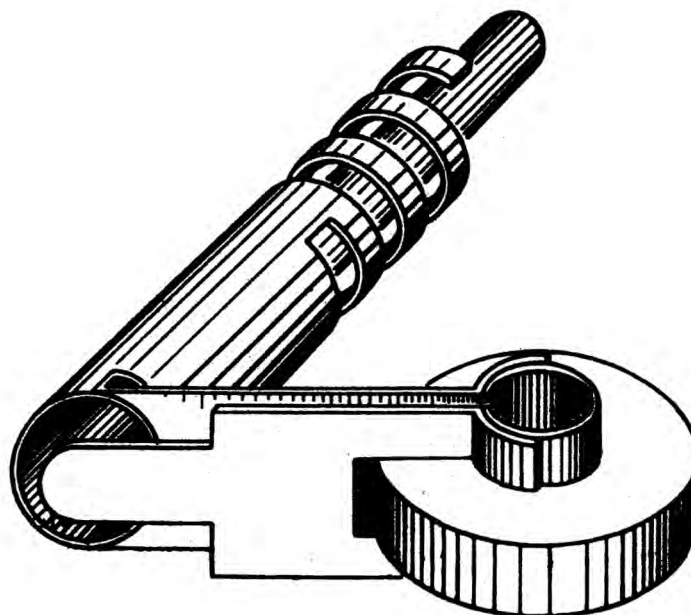


Figure 6 Utilisation d'un générateur MK-2 pour alimenter le noyau d'un générateur MK-1.

figure 7 représente un oscillogramme obtenu au moyen d'une sonde inductive étalonnée, pendant une expérience qui a permis d'enregistrer un champ de 25 millions de gauss.

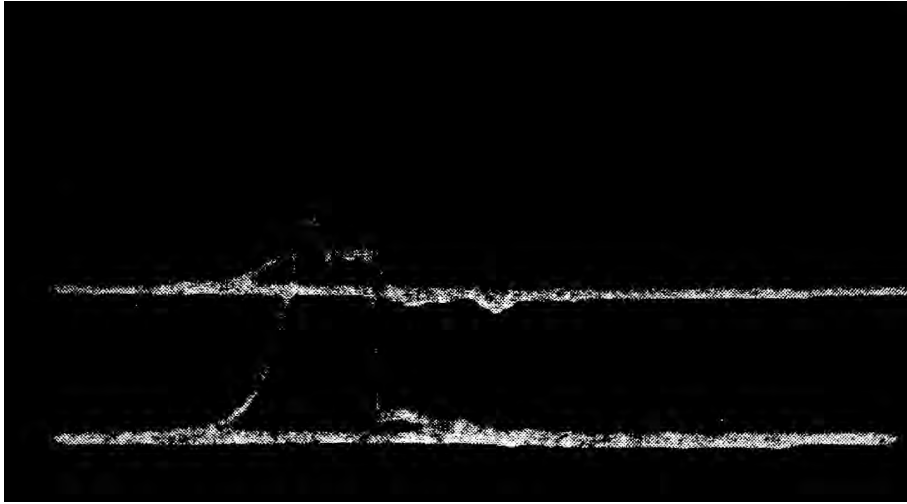


Figure 7 Oscillogramme de l'intensité du champ magnétique. Faisceau 1 : Effet de fond (signal dû à la mise en court-circuit des conducteurs) ; Faisceau 2 : Signal provenant de la spire de mesure (intégration par circuit RC).

IV. APPLICATIONS DES TECHNIQUES MC

Le phénomène magnéto-cumulatif est bref ; il est accompagné d'une onde de choc pneumatique et, fréquemment d'une combinaison d'écoulements gazeux et de particules, ainsi que par des bruits mécaniques, thermiques et électriques dus à la variation du champ magnétique lui-même ; tout ceci rend difficile la mesure des propriétés des substances en présence de champs magnétiques ultra-forts produits par des techniques MC. Les dispositifs de mesure doivent faire l'objet d'un blindage particulier et il est nécessaire d'utiliser des techniques de mesure en régime impulsif. Il y a souvent

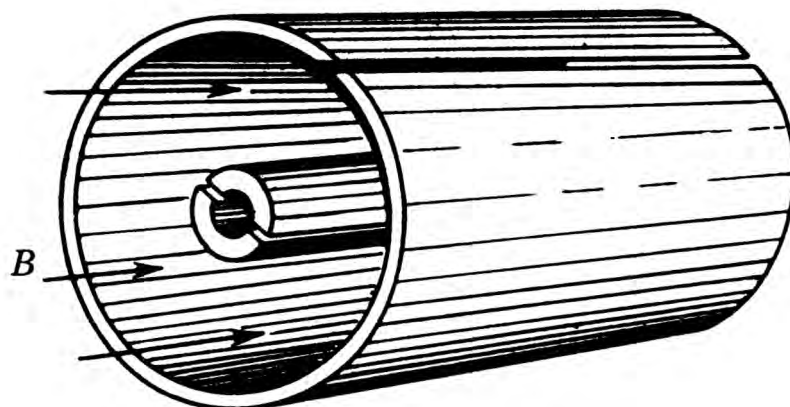


Figure 8 Concentration de champ magnétique.

intérêt à faire sortir le courant ultra-fort de la zone bruyante (la figure 8, extraite de la référence [3], représente un tel dispositif). Ceci explique que les résultats obtenus jusqu'ici soient peu nombreux.

La figure 9 représente un montage expérimental destiné à mesurer la résistivité du graphite en présence de champs magnétiques allant jusqu'à $1,5 \times 10^6$ Oe obtenus dans un dispositif MC coaxial ; la figure 10 est un oscillogramme représentatif de la tension aux bornes de l'échantillon (la montée de la tension est due à l'augmentation de la résistance de l'échantillon et à celle de l'intensité du champ magnétique).

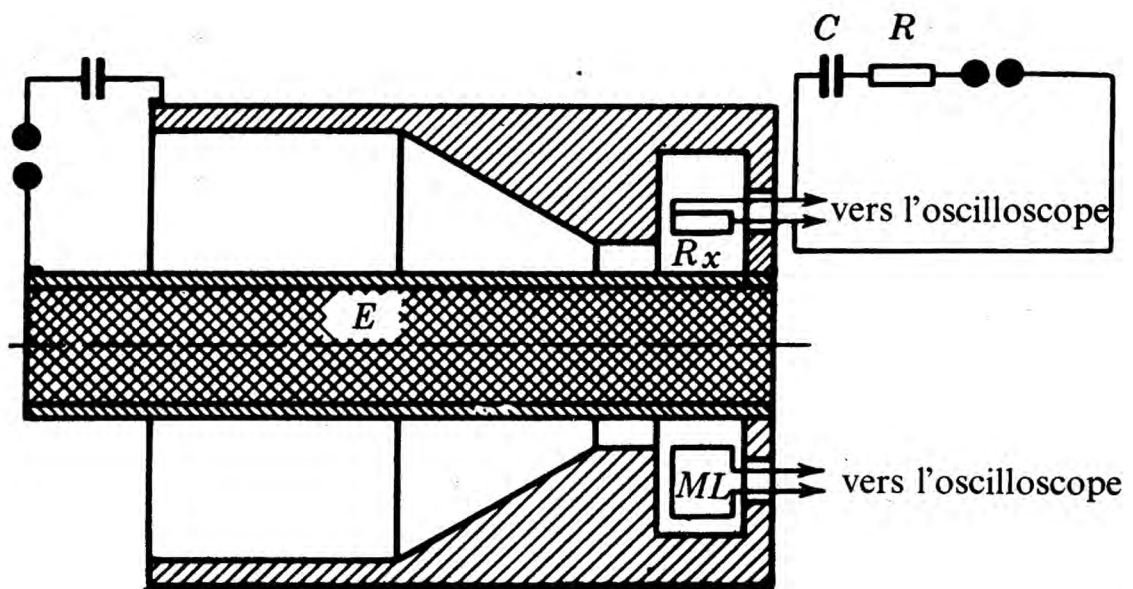


Figure 9 Mesure de la résistance R_x d'un échantillon

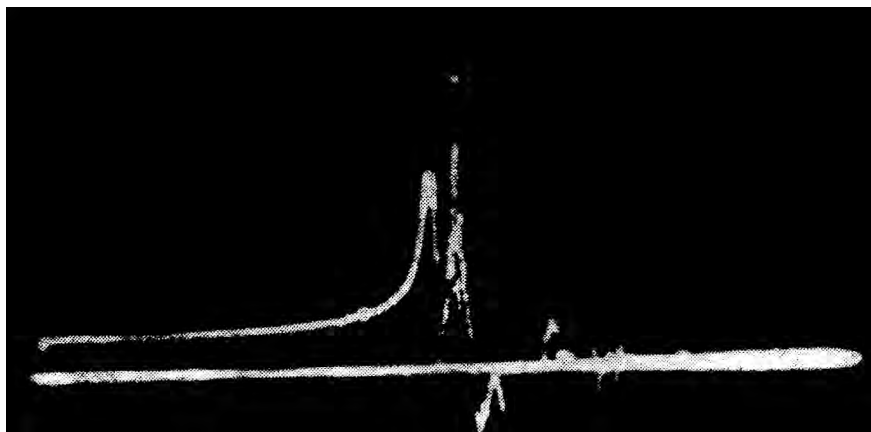


Figure 10 Oscillogramme de la tension d'un échantillon de graphite.

Des expériences ont été réalisées pour observer la rotation du plan de polarisation de la lumière dans un champ magnétique (Effet Faraday) [2, 3]. La variation très importante de l'intensité lumineuse observée au cours des expériences apporte la preuve que le plan de polarisation a effectué une rotation de plusieurs milliers de degrés. La linéarité de l'effet Faraday dans le verre en présence de champs magnétiques de l'ordre du mégagauss a été confirmée par des chercheurs américains et italiens. Les Américains ont photographié des spectres Zeeman dans les champs allant jusqu'à deux millions de gauss. On a enregistré le décalage du centre du multiplet de Zeeman résultant de la compression des atomes par le champ magnétique (à l'intérieur de l'atome, le champ magnétique est quelque peu inférieur en raison du diamagnétisme atomique).

Les chercheurs américains et soviétiques se sont beaucoup intéressés à l'utilisation de dispositifs MC pour la propulsion de corps métalliques aux vitesses de mise en orbite. L'intérêt de ces études réside dans leur application à la simulation des micrométéorites et aux expériences sur les phénomènes qui se produisent aux pressions ultra-hautes obtenues lorsqu'un tel corps frappe une paroi. La figure 11 représente un montage destiné au lancement d'un anneau en aluminium pesant environ 2 gr, qui est accéléré dans un entrefer annulaire par la pression d'un champ magnétique, pour atteindre une vitesse supérieure à 100 km/sec (ce qui doit certainement vaporiser l'anneau).

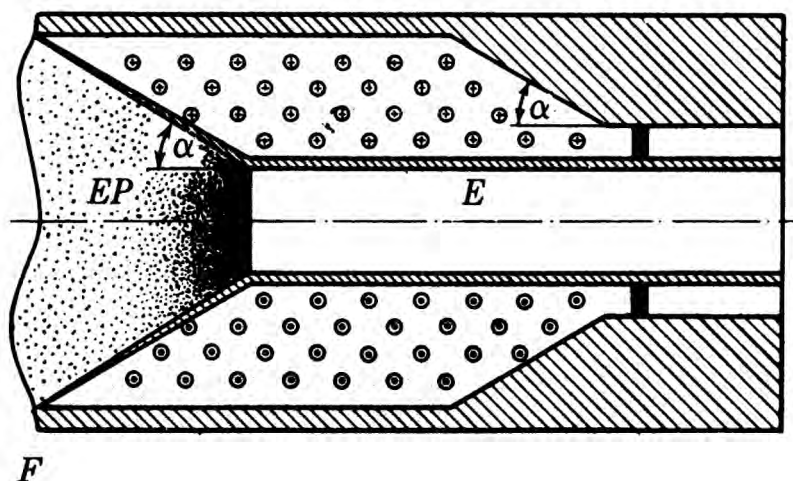


Figure 11 Dispositif pour propulsion d'un anneau.

A notre avis, la plus importante application scientifique des générateurs MC pourrait bien être la fourniture d'une puissance très élevée aux accélérateurs de particules élémentaires, et aux installations de mesure et d'enregistrement. Considérons un accélérateur périodique à induction sans fer (bien que cette conception ne soit probablement pas optimale). L'impulsion

d'un proton soumis à l'accélération est $p = HR$. L'énergie du champ magnétique est

$$W \sim R^3 H^2 \sim \frac{p^3}{H}$$

Le coefficient de proportionnalité peut être calculé en prenant pour exemple les bêtatrons pulsés sans noyau actuellement en service (voir par exemple A. I. Pavlovskii *et al.* [10] (1)). L'énergie du champ magnétique étant exprimée par son équivalent en tonnes de TNT, soit 1 tonne = 4×10^9 J, nous obtenons

$$W \text{ (tonnes)} = \frac{10^7 \text{ (G)}}{H} \left[\frac{P}{10^{10} \text{ (eV/c)}} \right]^3$$

On voit que, pour obtenir une énergie de 1 000 GeV, soit 10^{12} eV, qui représente l'idéal de la physique moderne des hautes énergies, en utilisant $H = 10^7$ G au centre du bêtatron (ce qui ne constitue certainement pas une limite), l'énergie magnétique nécessaire serait l'équivalent d'environ 1 million de tonnes de TNT. L'énergie totale serait bien entendu plusieurs fois supérieure, c'est-à-dire qu'il s'agirait de l'explosion souterraine d'une charge thermonucléaire de puissance « moyenne ». Une telle explosion peut avoir lieu, sans retombées radioactives, à une profondeur quelque peu supérieure à 1 km. La dépense principale serait représentée par la construction à une telle profondeur d'une chambre ayant un volume supérieur à 10 000 m³, et le montage dans cette chambre de plusieurs milliers de tonnes de structures métalliques. Nous pouvons toutefois compter obtenir 10^{18} protons en un temps de 10^{-5} sec (le coefficient d'utilisation de l'énergie explosive est d'environ 10^{-3} %). A de tels niveaux, une expérience unique permet d'obtenir beaucoup de données scientifiques. La répétition de l'expérience 50 à 100 fois serait d'un coût comparable à celui de la réalisation d'un accélérateur de 1 000 GeV à fonctionnement continu, c'est-à-dire plusieurs billions de roubles. Il faudrait bien entendu développer des appareils d'enregistrement spéciaux, par exemple un ensemble de photomultiplicateurs enregistrant le rayonnement synchrotron des produits de la collision des protons accélérés avec l'objectif, qui aurait lieu dans des champs magnétiques spéciaux dit « de mesure », à l'intérieur d'un vaste volume. D'après le rayon de courbure des trajectoires dans le champ magnétique, on peut dans ce cas déterminer l'impulsion des particules secondaires, dont la masse peut être calculée à partir du spectre et de l'intensité du rayonnement synchrotron.

(1) Avec une énergie de 5×10^5 J et un champ maximum de $1,2 \times 10^5$ G, les électrons atteignent une énergie de 100 MeV.

Il faut également signaler une autre possibilité, que l'on pourrait presque qualifier de fantastique. Au moyen de vastes lentilles magnétiques pulsées (l'énergie du champ magnétique représentant l'équivalent de plusieurs centaines de kilotonnes), il est possible de focaliser un faisceau ayant une intensité de $10^{18}/10^{-5} = 10^{23}$ protons/sec sur une surface de 1 mm^2 . On pourrait alors obtenir, dans de bonnes conditions de fiabilité, l'enregistrement de phénomènes mettant en jeu la collision des faisceaux de deux accélérateurs, avec une section efficace de l'ordre de 10^{-30} cm^2 . Pour procéder à de telles expériences, il serait bien entendu nécessaire de disposer de systèmes automatiques (asservissements) pour compenser la charge d'espace et corriger le champ magnétique.

En dehors des projets tout à fait grandioses dont nous venons de parler, il nous semble que les générateurs MC peuvent avoir leur utilité dans de nombreux domaines de la recherche scientifique.

REFERENCES

1. C. M. Fowler, W. B. Garn, and R. S. Caird, *J. Appl. Phys.* 31:588 (1960).
2. R. S. Caird, W. B. Garn, D. B. Thomson, and C. M. Fowler, *J. Appl. Phys.* 35:781 (1964).
3. F. Herlach and H. Knoepfel, *Rev. Sci. Instrum.* 36(8):1088 (1965).
4. A. D. Sakharov, R. Z. Lyudaev, E. N. Smirnov, Yu. N. Plyushchev, A. I. Pavlovskii, V. K. Chernyshev, E. A. Feoktistova, E. I. Zharinov, and Yu. A. Zysin, *DAN SSSR* 165:65 (1965); *Sov. Phys. Dokl.* 10:1045 (1966), trad. [Article 3 dans ce volume].
5. Ya. P. Terletskii, *JETP* 32:387 (1957); *Sov. Phys. JETP* 5:301 (1957), trad.
6. E. I. Bichenkov, *PMTF* 6:3 (1964).
7. J. D. Lewin and P. F. Smith, *Rev. Sci. Instrum.* 35:541 (1964).
8. G. Lehner, J. G. Linhart, and J. P. Somon, *Nucl. Fusion*, No. 4:362 (1964).
9. F. Bitter, *Sci. Am.* 213(1):65 (1965).
10. A. I. Pavlovskii, G. D. Kuleshov, G. V. Sklizkov, Yu. A. Zysin, and A. I. Gerasimov, *DAN SSSR* 160:68 (1965); *Sov. Phys. Dokl.* 10:30 (1965), trad.