

## Interrupteur explosif permettant le transfert d'une énergie de deux mégajoules d'une inductance dans un arc

E. GAIGNEBET et J. MONTAMBAUX (\*\*)

*Les auteurs exposent les principes du circuit de stockage à utiliser et les conditions à remplir pour réaliser le disjoncteur explosif. Après divers essais, le disjoncteur à barrette explosive a été retenu, car il est bien adapté à un problème de stockage d'énergie inductive, présente des qualités de simplicité, de fiabilité, de sécurité et de grande efficacité du fait de sa promptitude.*

### I. Introduction.

Une inductance de cuivre, de 94 mH, refroidie à la température de l'azote liquide est d'abord reliée à une source de courant continu de 500 V au moyen d'un conjoncteur classique. Le courant croît exponentiellement; quand il atteint 7 000 A une barrette explose et ouvre en 2 ms un intervalle de 0,14 m. La surtension qui s'ensuit croît jusqu'à 2 500 V, valeur pour laquelle s'amorce un arc dans une enceinte contenant de l'azote comprimé à 100 bars. L'énergie de l'inductance est transférée dans l'arc. La température du gaz se trouve portée à 6 000 K et la pression à 1 500 bars.

### II. Circuit de stockage inductif.

L'interrupteur explosif a été utilisé pour transférer 2 MJ d'une inductance dans un arc et cette application particulière doit être rappelée pour expliquer la solution.

Une soufflerie à arc chaud, dite « hot-shot » (fig. 1) comporte une enceinte contenant de l'azote comprimé à 200 bars. On y fait éclater un arc chaud; la température s'élève à 6 000 K et la pression à 2 000 bars. On amorce alors l'écoulement qui atteint des vitesses largement supersoniques ( $M = 17$ ) et qui dure 100 ms. La figure 2 donne une idée de l'une des installations dont l'ONERA dispose pour expérimenter en aérodynamique hypersonique.

L'énergie est fournie par le réseau E.D.F. en 40 ms (80 kA sous 5 kV). Le branchement et la déconnexion se font au moyen d'un enclencheur synchrone agissant au passage du courant par zéro.

Bien que cette opération se déroule à Fontenay, lieu privilégié d'E.D.F., il fut souhaité d'éviter un aussi brutal appel de courant. Le moyen de stockage éventuel devait

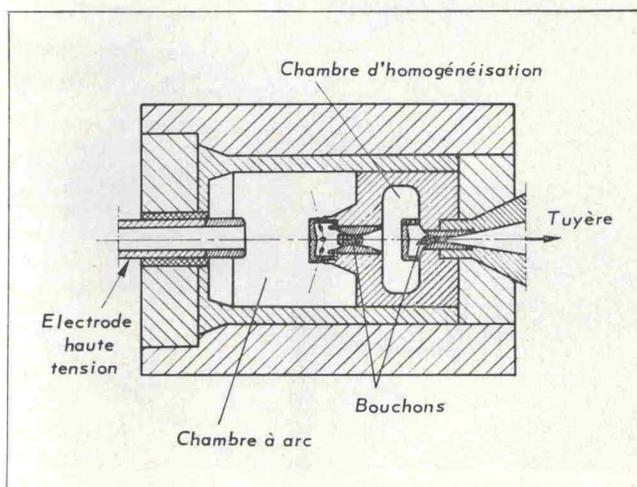


Fig. 1. — Schéma d'une soufflerie à arc.

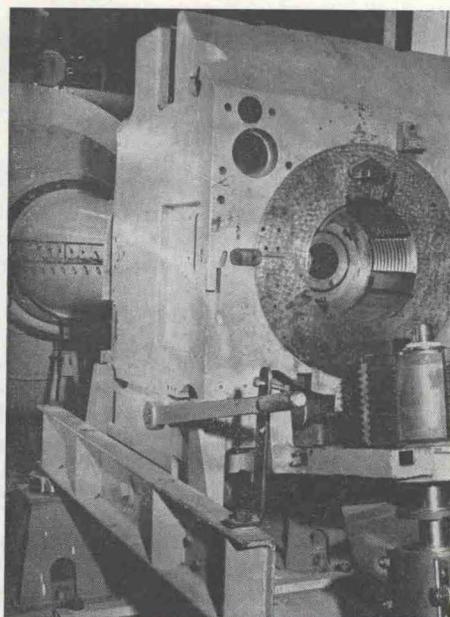


Fig. 2. — Soufflerie à arc de Fontenay pour  $15 < M < 20$ .

(\*) Demi-Journée d'études organisée le 3 juin 1971 par la 6<sup>e</sup> Section de la Société française des Electriciens et la 1<sup>re</sup> Section de la Société française des Electroniciens et des Radioélectriciens.

(\*\*) Émile Gaignebet et Jean Montambaux, Ingénieurs à l'Office national d'Études et de Recherches aéronautiques (O.N.E.R.A.).

se substituer à l'alimentation directe en satisfaisant à l'ensemble des conditions antérieures dont les principales sont :

- Restitution en 0,1 s de 2 MJ selon une méthode permettant l'extrapolation jusqu'à 50 MJ. L'arc qui consomme cette énergie a les caractéristiques d'une résistance provoquant une chute de tension sensiblement constante.
- Montée en courant aussi lente que possible afin de minorer la puissance de l'alimentation, par exemple cent fois plus longue que la durée de la décharge. Par contre, le temps pendant lequel on souhaite conserver la charge peut, sans inconvénient, être très faible ou même nul.
- Rendement acceptable de l'ordre de 50 % pour ne pas avoir à évacuer trop d'énergie perdue.
- Grande simplicité, sécurité et économie.

On a choisi une inductance de 90 mH pour une résistance de circuit de 45 mΩ. L'enroulement, en fil de cuivre nu désoxydulé, est bobiné sur des cales isolantes. Il est immergé dans un bain d'azote liquide.

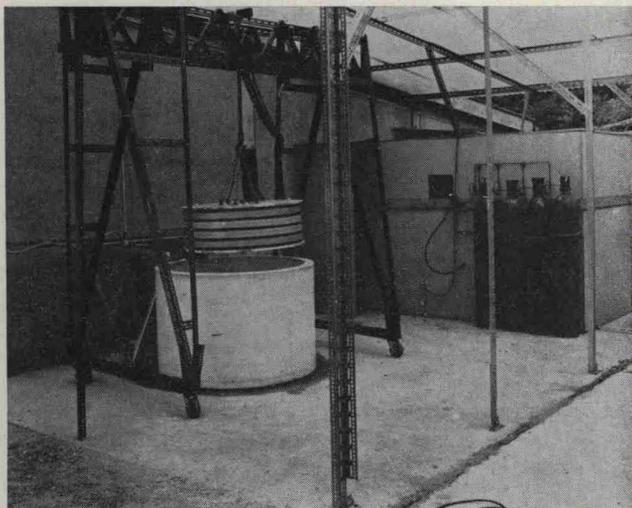


Fig. 3. — L'inductance est suspendue au-dessus de la cuve en polyester cellulaire qui contient l'azote liquide. Au fond, l'abri de tir.

Le rapport des résistivités entre la température ambiante et 80 K est de 8 ; la densité de courant permise conduit à un bobinage plus compact, donc deux fois plus avantageux comme forme. Ces deux effets combinés ont permis avec 475 kg de cuivre dans les mêmes conditions d'exploitation, un stockage aussi facile avec 7 600 kg pris à la température ambiante.

Un bobinage supraconducteur eût procuré des montées en courant plus avantageuses et des tenues de charge de durées infinies. Mais les câbles sont encore sujets à des phénomènes d'instabilité en régime transitoire et l'alimentation en hélium est moins simple que l'approvisionnement en azote. Quant à l'interrupteur supraconducteur à transition commandée, il sera comparé plus loin aux autres disjoncteurs.

L'alimentation en courant continu s'est faite à partir d'une batterie d'accumulateurs au plomb destinée au fonctionnement de chalumeaux dits à « plasma ». Il a été heureusement possible, sans avoir à recourir à un primaire et à un secondaire, d'adapter l'inductance unique à la fois à la batterie et à l'arc de la soufflerie. Il n'en aurait pas été de même pour 50 MJ.

Le schéma de la figure 4 montre comment l'ouverture du disjoncteur crée la surtension qui, à travers un éclateur dans l'air, amorce la décharge. Un deuxième disjoncteur de sécurité serait commandé par l'opérateur en cas de nécessité.

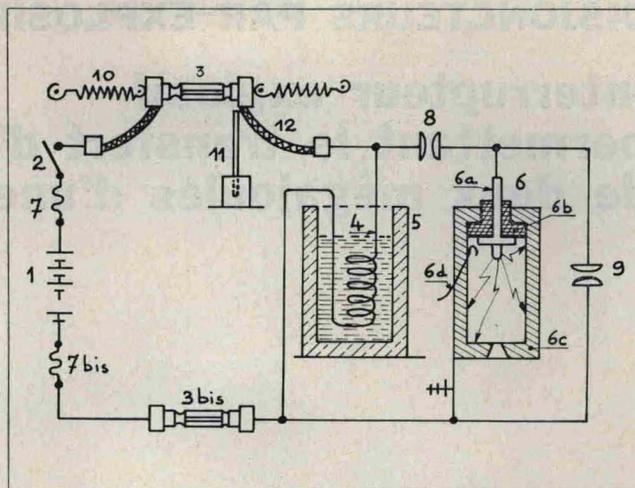


Fig. 4. — Schéma général de l'installation de stockage. 1: Batterie d'accumulateurs. - 2: Conjoncteur à courant continu. - 3: Barettes explosives. - 4: Bobine de cuivre hyperconducteur. - 5: Cuve de cryostat. - 6: Chambre à arc: a) Electrode centrale. - b) Traversée isolante. - c) Paroi de la chambre. - d) Amorçage de l'arc. - 7: Fusibles. - 8: Eclateur série (conjoncteur). - 9: Eclateur parallèle (sécurité). - 10: Tendeur allongeant la coupure. - 11: Cloison isolante étranglant l'arc. - 12: Tresses souples d'amenée de courant.

Les figures 5 et 6 représentent les diagrammes des cycles charge-décharge. La durée de la charge est d'environ 1,2 fois la constante de temps, soit 2,4 s. Le rendement est alors voisin de 50 % et les 2 MJ dissipés vaporisent 13 litres d'azote par tir.

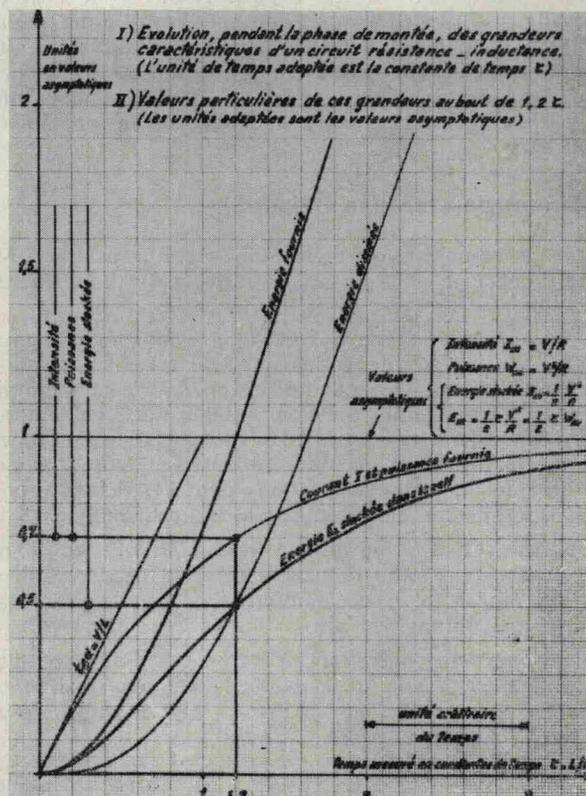


Fig. 5. — Représentation paramétrique des régimes de charge d'un circuit selfique.

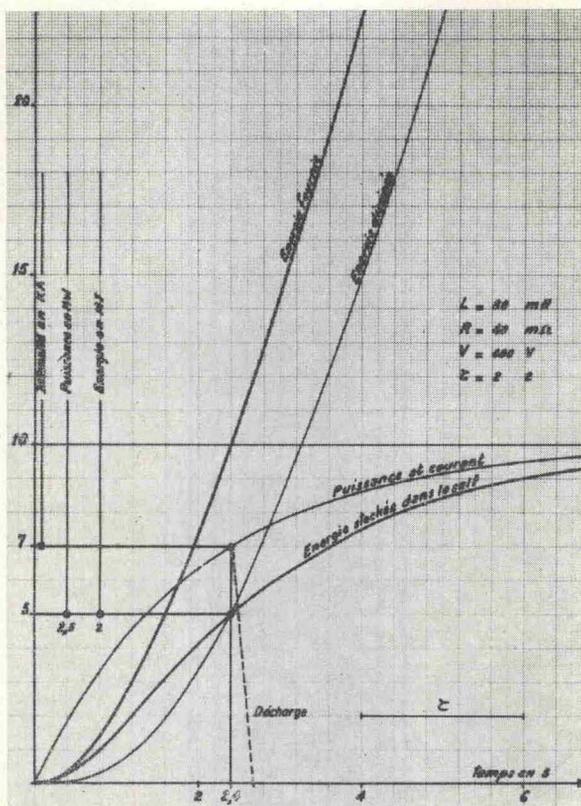


Fig. 6. — Tir réel : essai du 5 juin 1970.

### III. Disjoncteur explosif.

#### A. Conditions à remplir.

A l'ouverture du disjoncteur  $D_1$  la surtension qui fait jaillir l'arc utile en  $A_3$  s'accompagne d'un arc parasite  $A_2$ . Ces deux arcs sont en série par rapport à l'alimentation et en parallèle par rapport à l'inductance. Pour que l'énergie dissipée dans l'arc parasite reste négligeable, il faut qu'il s'éteigne vite, typiquement en moins de 3 ms. D'autre part, l'instant du début de la coupure, qui fixe la fin du régime de charge, donc l'énergie stockée, doit être défini avec une dispersion de l'ordre de 10 ms.

Les tirs étant séparés par des intervalles de plusieurs heures, intervalles imposés par les servitudes d'exploitation, on admet que quelques minutes perdues au changement du disjoncteur sont chose acceptable.

La résistance propre du disjoncteur, qui intervient dans la constante de temps  $\tau = \frac{L}{R}$ , ne doit pas représenter plus de 1 à 2 m $\Omega$ .

Pour faire des essais de principe on ne souhaitait pas immobiliser un appareillage coûteux. L'expérience devait se faire sans danger, car elle était réalisée dans un abri très léger.

Après comparaison avec des appareils plus ou moins classiques, c'est le disjoncteur à barrette explosive qui fut choisi. Donnons-en une justification particulière.

La première solution envisagée pour le stockage, reposant sur l'utilisation de supraconducteur, conduisait logiquement à l'emploi d'un disjoncteur à transition commandée. Un tel interrupteur aurait d'ailleurs pu commander la bobine cryoconductrice. Plusieurs raisons nous ont fait renoncer à ce projet : danger d'une transition inopinée dans un fil transportant un courant de caractère impul-

sionnel, fil obligatoirement fin, long et non stabilisé. Pour obtenir après transition une résistance suffisante, il eût fallu utiliser des centaines de kilomètres de fil qui eussent été d'un poids et d'un prix prohibitifs.

#### B. Barreau explosif.

C'est un cylindre d'aluminium (fig. 7) de 22 mm de diamètre et 290 mm de longueur, foré au diamètre de 8 mm afin de loger la charge explosive. Ce barreau porte trois sortes de saignées destinées à organiser sa fragmentation : six creusures longitudinales assurant la séparation en six branches.

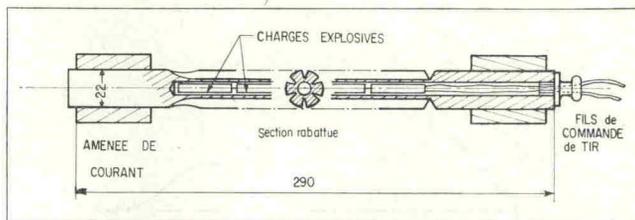


Fig. 7. — Disjoncteur pyrotechnique à épanouissement.

A une extrémité une creusure annulaire à angle vif provoque la rupture de ce côté. De l'autre règne un congé progressif de sorte que les six branches se replient autour de cette zone qui forme des charnières. Ainsi le tir n'est jamais accompagné du moindre éclat.

La figure 8 a représente un barreau simple avant et après le tir.

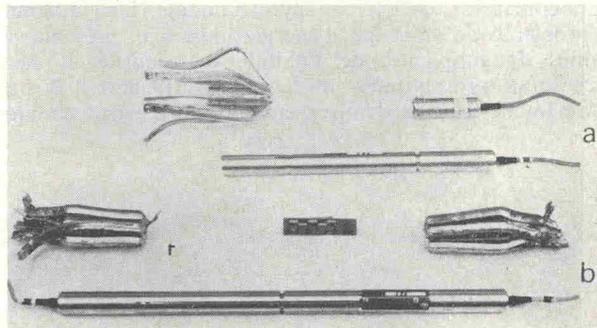


Fig. 8. — Barrette simple a) et double b) avant et après l'explosion.

L'intervalle de coupure se trouve porté à 140 mm en 2 ms ce qui représente, pour l'extrémité des branches auxquelles l'arc tend à rester attaché, une vitesse de 200 m/s. La plupart des tirs ont eu lieu à 7 000 A sous 2 500 V. La figure 9 représente la valeur du courant enregistrée pendant un cycle de charge et de décharge.

La figure 10, tirée d'un film pris à la cadence de 16 000 images par seconde, montre les positions successives des barrettes.

Le courant est amené aux barrettes par des tresses souples et un effort de 2 000 N en traction est exercé entre leurs bornes au moyen de tendeurs en caoutchouc ; ainsi l'intervalle de coupure se trouve porté, dans un deuxième temps, à 1,5 m.

#### Amélioration des conditions de tir.

Une plaque de stratifié-fibre de verre, percée d'un trou, est placée au droit du point de rupture. L'arc, forcé de s'allonger, s'éteint plus vite.

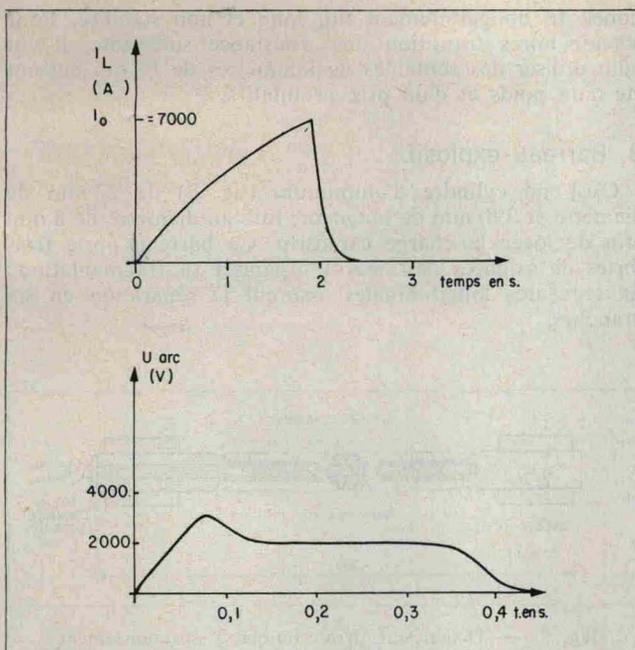


Fig. 9. — Enregistrement du courant dans l'inductance et de la tension d'arc.

Il a été envisagé d'utiliser un violent jet d'air pour provoquer une désionisation plus rapide.

En outre un modèle « à double barrette » augmente l'effet utile en doublant la valeur de l'intervalle de coupure (fig. 8 b).

En conclusion ce barreau pyrotechnique, bien adapté à un problème de stockage d'énergie inductive, présente des qualités de simplicité, de fiabilité, de sécurité et aussi, grâce à sa promptitude, une grande efficacité. Il peut certainement trouver d'autres emplois en électrotechnique.

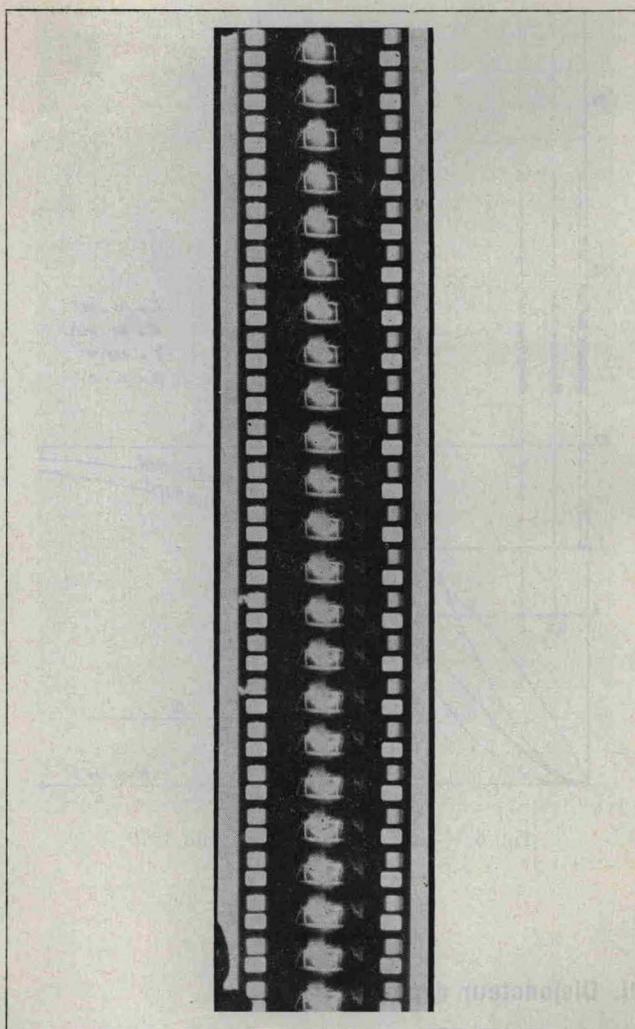


Fig. 10. — L'intervalle de temps entre deux vues est de 60  $\mu$ s.