Étude de disjoncteurs rapides pour courants intenses

B. Leroux, F. Rioux-Damidau

► To cite this version:

B. Leroux, F. Rioux-Damidau. Étude de disjoncteurs rapides pour courants intenses. Revue de Physique Appliquée, 1979, 14 (7), pp.705-713. 10.1051/rphysap:01979001407070500 . jpa-00244651

HAL Id: jpa-00244651

<https://hal.science/jpa-00244651>

Submitted on 1 Jan 1979

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

85.20 Vq — 84.70 + p — 06.70 Kv

Étude de disjoncteurs rapides pour courants intenses

B. Leroux et F. Rioux-Damidou

Laboratoire d'Electrotechnique des Universités Paris VI et XI, 91405 Orsay, France

(Reçu le 31 janvier 1979, accepté le 6 avril 1979)

Résumé. — Un disjoncteur rapide, à commande électromagnétique à action directe, a été réalisé et étudié. Il permet de couper des courants d'une centaine de kiloampères en quelques microsecondes, avec une faible énergie de commande. Nous utilisons des efforts électromagnétiques entre deux courants de sens contraire, pour projeter et rompre des conducteurs sur des barrettes métalliques. Le courant est alors transféré sur un absorbeur (feuille de cuivre) placé en parallèle sur ces conducteurs ; l'explosion de cette feuille ouvre le circuit. Le prototype réalisé a permis de couper 240 kA en 6 μ s tout en générant 5 kV ; on a pu également couper 130 kA en 2 μ s avec un système légèrement modifié.

Abstract. — A fast circuit-breaker operated by an electromagnetic command has been realized and tested. It can open a 10^5 A current in a few microseconds, requiring only a weak control energy. By means of electromagnetic forces between two opposite currents, a conductor is thrust against metallic rods and is cut into pieces. The current is then transferred onto a fuse (a copper foil) placed in parallel. The explosion of this fuse opens the circuit. A 240 kA current has been opened in 6 μ s by the experimental set-up and simultaneously a 5 kV peak voltage has been generated. A transfer of a 130 kA current has been also obtained in a time as small as 2 μ s.

La réalisation d'un disjoncteur rapide, capable d'ouvrir un courant de l'ordre de 10^5 A en quelques microsecondes, est une des phases essentielles dans la technique du stockage inductif d'énergie [1], si l'on désire que celle-ci puisse supplanter les grands bancs de condensateurs dans des conditions nettement moins onéreuses. Divers systèmes ont déjà été proposés [2, 3, 4]. La difficulté consiste à fabriquer un système qui soit tout à la fois fiable, facile à utiliser, entraînant peu de destruction et dont la mise en œuvre demande une énergie bien plus faible que celle qui est stockée.

L'analyse des diverses fonctions que doit réaliser ce disjoncteur a conduit à le concevoir sous la forme de deux éléments en parallèle : l'ouvreur et l'absorbeur [5]. Le premier supporte le courant pendant un temps relativement long et n'a pas besoin d'absorber beaucoup d'énergie. La fonction absorbeur est en général obtenue par l'explosion d'une feuille de cuivre [6] dont le pouvoir absorbant est élevé (~ 50 J/mm³).

La condition sur l'énergie de commande, qui concerne en pratique l'ouvreur, est particulièrement difficile à satisfaire pour les disjoncteurs rapides. Les diverses expérimentations effectuées nous ont amenés à constater que l'emploi de pression magnétique était finalement l'un des meilleurs procédés. Nous avons tout d'abord testé un disjoncteur à commande électro-

magnétique indirecte [7] ; dans celui-ci, les efforts magnétiques sont transmis au système par l'intermédiaire d'un fluide (de l'huile) qui sert aussi d'isolant. Ce type de disjoncteur est plutôt lent ; il a permis d'ouvrir 180 kA et de tenir une tension de 6 kV après 35 μ s [8].

Afin d'augmenter la rapidité du système, un dispositif à commande directe a été mis au point [9], que nous présentons dans cet article. Nous décrivons d'abord son principe suivi d'une étude paramétrique de ses possibilités ; nous présentons ensuite le modèle expérimental testé, les résultats obtenus ainsi qu'un modèle électrique de ce type d'ouvreur.

1. Description du disjoncteur. — Le schéma de principe est celui de la figure 1. Le courant principal est noté I_1 , il dure un temps T_1 , le courant de commande I_2 , sa durée est T_2 . Quand on désire couper le courant principal on envoie le courant de commande ; les conducteurs étant parcourus par des courants de sens contraire se repoussent alors sous l'action des forces électromagnétiques mises en jeu. Si le courant I_2 est suffisant, le conducteur qui en a la possibilité se met en mouvement et est projeté sur des barrettes métalliques disposées perpendiculairement ; il se rompt. Des arcs apparaissent ; le courant I_1 est ainsi

Fig. 1. — Schéma du principe du disjoncteur.

[Circuit-breaker basic scheme.]

dérivé sur l'absorbeur (ici, une feuille métallique mince) qui génère une tension élevée en explosant, permettant un transfert rapide sur la charge. (Le courant I_2 est d'ailleurs simultanément coupé.)

On peut déjà faire les remarques suivantes :

- C'est le courant de commande I_2 qui met le conducteur en mouvement, sa durée T_2 peut donc être très faible devant celle du courant de commande ($T_2 < T_1$).

- Pour assurer une bonne mise en vitesse, il est vraisemblable que le courant de commande devra être élevé, supérieur au courant principal ($I_2 > I_1$).

- L'énergie de commande reste cependant faible devant l'énergie principale, le courant de commande n'agissant que pendant un temps très court et circulant dans un circuit d'inductance et résistance très faibles.

- Il est préférable que les deux circuits d'amenée des courants I_1 et I_2 aient une mutuelle nulle pour éviter toute interaction énergétique entre eux.

- La tension d'explosion est appliquée aussi aux bornes de l'ouvreur qui doit être suffisamment résolu au moment où elle est générée. Pour cela, l'ouvreur est placé dans un gaz sous pression.

2. Etude paramétrique de l'ouvreur. — Nous allons préciser les caractéristiques que doit avoir l'ouvreur : le courant à couper défini par (I_1, T_1) étant supposé fixé, il s'agit de trouver le courant de commande (I_2, T_2) et les dimensions de l'ouvreur assurant un bon fonctionnement du système. Nous supposons que le courant principal est un créneau d'amplitude I_1 et de durée T_1 et que le courant de commande croît linéairement de la valeur 0 à la valeur I_2 pendant le temps T_2 . Les conducteurs doivent laisser passer I_1 sans subir un échauffement important et I_2 ne doit pas apporter un échauffement supplémentaire trop important. Enfin, la commande doit assurer une bonne mise en vitesse du conducteur qui doit arriver au niveau des barrettes de coupure au bout du temps T_2 .

2.1 CALCULS D'ÉCHAUFFEMENT. — **2.1.1 Notations.** — Nous appelons :

e, d, D : respectivement épaisseur, largeur, longueur des conducteurs de l'ouvreur (Fig. 2).

$\rho, \bar{\omega}, c$: résistivité, masse volumique, capacité calorifique du métal constituant les lames conductrices.

i_1, i_2 : densités de courant relatives à I_1, I_2 .

Fig. 2. — Dimensions caractéristiques.

[Characteristic dimensions.]

2.1.2 Hypothèses de calcul. — Les courants I_1 et I_2 étant variables dans le temps, des phénomènes de pénétration ont lieu dans les conducteurs. On ne peut définir une épaisseur de peau au sens propre du terme puisque les courants ne sont ni sinusoïdaux, ni exponentiels mais qu'ils sont tous les deux impulsionnels. Pour évaluer l'échauffement, on supposera qu'ils sont répartis uniformément dans des épaisseurs e_1 et e_2 égales à des épaisseurs caractéristiques δ_1 et δ_2 , ou à l'épaisseur de la plaque si celle-ci est plus petite que δ_1 ou δ_2 . Les valeurs de ces dernières dépendent de la forme des courants ; nous prendrons $\frac{\delta_1}{\delta_2} = \sqrt{T_1/T_2}$.

Il est évident immédiatement que l'on a intérêt à ce que $e \leq \delta_1$. En effet, dans le cas contraire, l'échauffement superficiel serait du même ordre que pour $e = \delta_1$ mais la mise en vitesse serait plus difficile. Ainsi, le courant principal sera toujours uniformément réparti sur $e_1 = e$.

Si, par ailleurs, on a $e < \delta_2$, les courants sont tous les deux uniformément répartis.

On a donc :

$$i_1 = \frac{I_1}{e_1 d}, \quad i_2 = \frac{I_2}{e_2 d}, \quad e_1 = e$$

$$1 \leq \frac{e_1}{e_2} \leq \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}.$$

On supposera que le temps de diffusion de la chaleur est grand comparé à T_2 ; seule l'épaisseur e_2 sera donc affectée par l'échauffement supplémentaire apporté par I_2 .

2.1.3 Échauffement dans les conducteurs de l'ouvreur. — Un courant de densité i parcourant un conducteur pendant un temps τ provoque un échauffement $\theta_F - \theta_0$ tel que :

$$\int_0^\tau \rho i^2 dt = \int_{\theta_0}^{\theta_F} \bar{\omega} c d\theta.$$

Prenons pour $\rho(\theta)$ la loi classique

$$\rho = \rho_0 \frac{\theta}{\theta_0}$$

et considérons le créneau (I_1, T_1) circulant tout seul dans le conducteur, ce dernier est porté à la température θ_1 que nous caractériserons par le paramètre E :

$$E = i_1^2 T_1 = \frac{\bar{\omega} c \theta_0}{\rho_0} \text{Log} \frac{\theta_1}{\theta_0} \quad (2)$$

θ_1 est la température atteinte par la portion de conducteur non parcourue par le courant de commande I_2 .

Ce dernier est de la forme $i_2 = \frac{I_{2M} t}{T_2}$; la portion e_2 de conducteur parcourue par $i_1 + i_2$ est alors portée à la température θ_F telle que :

$$\text{Log} \frac{\theta_F}{\theta_0} = (1 + f) \text{Log} \frac{\theta_1}{\theta_0} \quad (3)$$

avec

$$f = \left[\frac{1}{3} \left(k \frac{e_1}{e_2} \right)^2 + k \frac{e_1}{e_2} \right] \frac{T_2}{T_1} \quad (4)$$

et

$$k = \frac{I_{2M}}{I_1}. \quad (5)$$

f caractérise l'échauffement supplémentaire dû au courant de commande.

2.2 CALCUL DU MOUVEMENT DU CONDUCTEUR MOBILE. — **2.2.1 Hypothèses de calcul.** — 1) L'excitation magnétique H est constante entre les deux conducteurs et est indépendante de leur distance (du moins tant que $x/d \ll 1$; voir figure 2 pour les notations).

2) On néglige les frottements devant les efforts électromagnétiques.

3) Pour tenir compte des effets de bords on pose $F = \alpha^2 F_0$, F_0 étant la force calculée entre deux plaques. Dans les calculs numériques, nous prendrons $\alpha^2 = 0,5$ ce que nous justifierons par la suite.

4) La coupure du conducteur intervient au bout du temps T_2 .

2.2.2 Calcul du mouvement des conducteurs. — Il est immédiat de montrer que, par unité de longueur :

$$F_0 = \frac{\mu_0}{2d} I_2(I_1 + I_2).$$

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\mu_0}{2\bar{\omega}ed^2} \alpha^2 I_2(I_1 + I_2). \quad (6)$$

Avec les lois $I_1(t)$ et $I_2(t)$ définies plus haut on en déduit $x(t)$ et $v(t)$, et en particulier $x(T_2) = x_1$ et $v(T_2) = v_1$.

$$v_1 = \alpha^2 \frac{\mu_0}{12\bar{\omega}} e_1 E \frac{T_2}{T_1} k(2k + 3) \quad (7)$$

$$x_1 = \alpha^2 \frac{\mu_0}{24\bar{\omega}} e_1 E \frac{T_2^2}{T_1} k(k + 2). \quad (8)$$

Si l'on pose

$$G = \frac{24\bar{\omega}}{\alpha^2 \mu_0} \cdot \frac{x_1}{e_1} \quad (9)$$

(8) peut alors s'écrire

$$G = E \cdot \frac{T_2^2}{T_1} k(k + 2). \quad (10)$$

On a aussi :

$$\frac{x_1}{v_1} = T_2 \frac{k + 2}{4k + 6}. \quad (11)$$

Comme $k \in [0, \infty[$, on voit que $\frac{T_2}{4} < \frac{x_1}{v_1} < \frac{T_2}{3}$. En pratique, on peut considérer que :

$$v_1 \simeq \frac{x_1}{0,3 T_2}. \quad (12)$$

2.3 DIAGRAMME DE FONCTIONNEMENT. SES LIMITATIONS. — Les données sont I_1 et T_1 . Par ailleurs, un certain nombre de paramètres sont fixés par des conditions de bon fonctionnement :

— E , par l'intermédiaire de θ_1 , que l'on a intérêt à prendre le plus grand possible (par exemple $\theta_1 - \theta_0 \sim 100$ K) pour mettre en jeu le minimum de métal cassé.

— f , par l'intermédiaire de θ_F , qui peut devenir grand mais doit cependant rester limité

$$f_{\text{Max}} = 3 \quad \text{pour} \quad \theta_F \sim 1\,000 \text{ K}.$$

— G , par l'intermédiaire de x_1/e_1 qui ne peut être quelconque. Si x_1/e_1 est trop grand, l'excitation magnétique entre les conducteurs devient inefficace. Si ce rapport est trop faible, la mise en vitesse sera mauvaise. $x_1/e_1 \sim 1$ semble une bonne valeur.

Les relations permettant alors de définir (I_2, T_2) et les dimensions de l'ouvreuse sont (2), (4) et (10). Nous remplacerons (4) par la relation suivante obtenue en reportant (4) dans (10) :

$$T_2 = \frac{G}{Ef} \frac{e_1}{e_2} \left(1 + \frac{ke_1}{3e_2} \right) \frac{1}{(k + 2)} \quad (13)$$

2.2 donne i_1 donc la section $e_1 d$ des languettes. (10) établit une relation entre $k = I_2/I_1$ et T_2 (représentée figure 3 pour diverses valeurs de T_1). (13) établit une autre relation entre T_2 et k pour diverses valeurs de e_1/e_2 . Tout point de fonctionnement possible est alors à l'intersection de deux courbes, l'une correspondant à une valeur de T_1 , l'autre à une valeur de e_1/e_2 . Cependant, e_1/e_2 étant borné (cf. (2.1)), il en résulte que T_2 l'est aussi. La seule courbe correspondant à $e_1/e_2 = 1$ donne la valeur minimale T_{2m} de T_2 . La valeur maximale T_{2M} de T_2 est obtenue en repor-

Fig. 3. — Diagramme fondamental du fonctionnement ($f = 2$).

[Fundamental diagram of the switch.]

tant la valeur maximale de e_1/e_2 , soit $\sqrt{T_1/T_2}$, dans (13); on a :

$$\sqrt{T_2} \left(1 - \frac{k^2}{3f} \right) < \frac{1}{f} \sqrt{\frac{Gk}{E(k+2)}}.$$

Cette valeur est reportée figure 3 en fonction de k .

On voit ainsi se dégager sur le diagramme de la figure 3 le domaine de fonctionnement du disjoncteur; les courbes ont été tracées pour un conducteur en aluminium, $x_1/e_1 = 1$, $\theta_1 = 400$ K, $\theta_F = 530$ K ($E = 8 \times 10^{15}$, $G = 11,5 \times 10^{10}$, $f = 2$, $\alpha^2 = 0,5$).

2.4 UTILISATION DE CE DIAGRAMME. — En chaque point possible du diagramme sont connues les valeurs de T_1 , T_2 , k , e_1/e_2 . Si $e_1/e_2 > 1$, le courant I_2 circule dans l'épaisseur caractéristique δ_2 connue en fonction de T_2 (on a $\delta_2 \approx \sqrt{T_2/\mu_0}$); $e_2 = \delta_2$ est connu et par suite $e_1 = \frac{e_1}{e_2} \cdot e_2$, et $x_1 \approx e_1$. Enfin, la vitesse v_1 lors du choc sur les barrettes est aussi déterminée (par (12)). Il faut bien sûr que cette vitesse soit suffisante pour assurer le découpage de la languette, soit $v_1 > v_0$ où $v_0 \approx 300$ m/s.

Si on calcule v_1 dans le domaine de fonctionnement de la figure 6 tracée pour $f = 2$, on trouve

$$350 \leq v_1 \leq 450 \text{ ms}^{-1};$$

la condition est respectée. Si l'on trace le diagramme pour $f = 1$, on trouve alors $v_1 \sim 250 \text{ ms}^{-1}$, ce qui est un peu trop juste.

En conclusion, on constate que ce type de disjoncteur peut couvrir un large domaine de fonctionnement. Deux caractéristiques typiques sont données ci-dessous, avec $f = 2$.

T_1	T_2	i_1	$x_1 = e_1$	k	v_1
100 µs	10 µs	9 kA/mm ²	1 mm	3	360 m/s
1 ms	20 µs	3 kA/mm ²	2 mm	5	370 m/s

3. Etude d'un ouvreur parcouru par un seul courant.

— Les résultats précédents montrent que les paramètres de fonctionnement, notamment la vitesse, dépendent peu du courant principal I_1 . Comparons alors deux ouvreurs, l'un parcouru par l'ensemble $I_1 + \frac{I_{2M}}{T_2}t$ et l'autre parcouru par $\frac{I'_{2M}}{T_2}t$ et cherchons la relation entre I'_{2M} et I_{2M} pour que ces deux ouvreurs aient des performances similaires.

Pour le second, la condition de mouvement s'écrit :

$$x_1 = \frac{\mu_0 \alpha^2}{24 \omega e_1 d^2} I_{2M}'^2 T_2^2. \quad (14)$$

En comparant avec (8) on aura mêmes performances si :

$$I_{2M}'^2 = k(k+2) I_1^2$$

soit

$$I_{2M}'^2 = \frac{k+2}{k} I_{2M}^2. \quad (15)$$

Dans l'étude précédente on peut remarquer que k est grand. Le courant d'essai I_{2M}' sera donc de l'ordre de grandeur du courant de fonctionnement I_{2M} .

Comparons v_1 et v_1' :

$$v_1' = \frac{\mu_0 \alpha^2}{6 \omega e_1 d^2} I_{2M}'^2 T_2 \quad (16)$$

et

$$v_1 = \frac{\mu_0 \alpha^2}{6 \omega e_1 d^2} I_{2M}^2 T_2 \frac{2k+3}{2k}$$

soit

$$\frac{v_1}{v_1'} = \frac{2k+3}{2k+4} \simeq 1.$$

On peut donc tester un ouvreur avec uniquement le courant de commande : les résultats obtenus seront voisins de performances du même ouvreur parcouru par un courant principal à couper associé à un courant de commande voisin du courant d'essai.

Considérons l'ouvreur suivant (choisi dans le tableau du § 2) :

$$x_1 = e_1 = 1 \text{ mm} \quad T_2 = 10 \mu\text{s} \quad v_1 = 360 \text{ m/s}$$

l'équation (15) permet de calculer $I_{2M}'/d = 35 \text{ kA/mm}^2$ (typiquement 105 kA dans 3 mm^2) et $v_1' \simeq 400 \text{ m/s}$.

Cet ouvreur a été construit et testé, nous allons examiner les résultats obtenus.

4. Expérimentation. — **4.1 DESCRIPTION DE L'OUVREUR.** — La figure 4 représente l'ouvreur testé. La partie *active* proprement dite est composée de deux lames d'aluminium $1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$. Le choix de l'aluminium est justifié par le fait que ce métal est bon conducteur, peu résistant (sa résilience

Fig. 4. — Montage expérimental de l'ouvreur.
[Experimental set-up.]

est de l'ordre de $0,75 \text{ J/mm}^2$ à froid), et enfin bon marché. Le courant d'essai est fourni par un banc de 4 condensateurs en parallèle (500 mF, 6 kV).

Dans tous les essais effectués il n'y avait pas de charge réelle aux bornes de l'ouvreur contrairement au schéma de la figure 1 (où il faut faire $I_1 = 0$ en plus). Nous testons ainsi le dispositif dans le cas le plus défavorable du point de vue isolement, les tensions générées par l'absorbeur étant plus élevées en l'absence qu'en présence de charge. L'absorbeur était une feuille de cuivre explosante.

4.2 OBTENTION DE LA CASSURE. — Les premières expériences réalisées avec un banc de seulement 250 mF ont montré que la cassure était franche dès que le courant dans l'ouvreur était supérieur à 90 kA. Nous avons constaté que les 5 barrettes d'acier placées à 1 mm du conducteur mobile étaient réutilisables ; avec le même jeu on a pu réaliser une dizaine d'essais.

Dans l'enceinte contenant l'ouvreur nous avons mis de l'air sous pression (50 bars environ) mais l'oxygène amorçant une combustion lors de l'apparition des arcs, nous avons remplacé l'air par de l'azote ; ainsi, à part le conducteur d'aluminium, aucune partie de l'ouvreur n'est endommagée lors du fonctionnement.

Fig. 5. — Oscillogramme du courant lorsque la feuille est connectée dès le début. Le balayage vertical est de 87 kA/division pour I et de $25 \times 10^9 \text{ A s}^{-1}$ /division pour $\frac{dI}{dt}$; le balayage horizontal est de $10 \mu\text{s}/\text{division}$.

[Current variation when the fuse is initially connected. The vertical scale for I is 87 kA/division and for $\frac{dI}{dt}$ $25 \times 10^9/\text{division}$. The horizontal scale is $10 \mu\text{s}/\text{division}$.]

4.3 RÉSULTATS OBTENUS AVEC UNE FEUILLE BRANCHÉE EN PERMANENCE SUR L'OUVREUR. — La figure 5 représente une coupure typique du courant d'essai I . Cet oscillogramme ainsi que ceux donnant les courants dans l'ouvreur et dans l'absorbeur et la ten-

sion sont reportés figure 6. On y distingue quatre parties :

- *Partie I* : la lame mobile se déplace sous l'action des forces électromagnétiques. La cassure a lieu au bout de 8 à 9 μ s.

- *Partie II* : apparition des arcs de frottement (petite pointe de tension) pendant 6 μ s environ.

- *Partie III* : apparition des arcs de rupture (1 400 V) qui accélèrent le transfert sur la feuille, donc l'annulation du courant I_2 de l'ouvreur (durée 4 μ s).

- *Partie IV* : le transfert est terminé ($I_2 \approx 0$), la feuille explose, le courant principal s'annule en 6 μ s environ. La tension générée par la feuille est de l'ordre de 5 kV, avec une durée à mi-hauteur de 3 μ s environ.

Fig. 6. — Courants I_2 dans l'ouvreur, I_a dans l'absorbeur, $I_{\text{total}} = I_1 + I_2$.

[Currents in the switch (I_2), in the fuse I_a , total ($I = I_1 + I_2$) and voltage as a function of time.]

Nous constatons aussi que l'ouvreur a tenu cette tension, les courants s'annulent et restent nuls ; 230 kA ont été coupés en 6 μ s (temps caractéristique de décroissance de I). Dans cette expérience la pression d'azote dans l'enceinte était de 50 bars.

Il est à remarquer que la tension aux bornes de l'ouvreur est importante dès le début. En effet, lorsque le conducteur mobile se déplace, le circuit électrique formé par les deux lames se déforme, la self-inductance L_2 de l'ouvreur est variable et une contribution importante à la tension $I_2 \frac{dL_2}{dt}$ apparaît. Cette tension transfère immédiatement une partie importante du

courant sur l'absorbeur qui ne peut donc être adapté pour exploser rapidement [10]. Nous avons alors été amenés à modifier le montage afin de ne connecter la feuille qu'au moment de l'apparition des arcs de rupture.

4.5 RÉSULTATS OBTENUS AVEC UNE CONNEXION DE FEUILLE RETARDÉE. — Nous avons simplement ajouté dans le circuit de l'absorbeur un dispositif qui ferme ce circuit au bout d'un temps donné. Le système utilisé est celui de la figure 7.

Fig. 7. — Système de connexion avec retard de la feuille.

[Experimental set-up for connecting the fuse with a delay.]

Le fil à exploser central est alimenté par un banc de condensateurs annexe dont on peut commander la décharge avec un retard réglable par rapport au phénomène principal. Le fil explose crevant le mylar très fin, ce qui réalise un contact entre la feuille à exploser et la masse du montage principal ; à ce moment la feuille se retrouve en parallèle sur l'ouvreur. Des essais préliminaires nous ont permis de régler ce système annexe pour que la connexion ait lieu 14 μ s après le début du passage du courant dans l'ouvreur. Pratiquement on retarde de 8 μ s le signal de commande principal pour déclencher les condensateurs annexes ($2 \times 80 \mu$ F chargés à 500 V), le fil explosant 6 μ s plus tard. Ce système est fidèle puisque nous avons toujours pu reproduire le fonctionnement désiré sans avoir à modifier aucun paramètre.

Les oscillogrammes rassemblés figure 8 montrent les résultats obtenus lors des expériences suivant cette modification. On retrouve 4 parties :

(I) : déplacement du conducteur et coupure au bout de 8 μ s.

(II) : apparition des arcs de frottements.

(III) : apparition des arcs de rupture et connexion de l'absorbeur à l'instant où cette tension d'arc est maximum. On a alors un transfert très rapide sur la feuille (en 6 μ s environ). Le courant dans l'ouvreur décroît alors très rapidement (temps caractéristique mesuré entre 0,1 et 0,9 $I_2 \sim 3 \mu$ s).

(IV) : la feuille explose, coupant le courant qui la traverse en 3 μ s, valeur que l'on retrouve à mi-hauteur du pic de tension. La tension générée est de l'ordre de 3 kV. L'allure du courant dans la feuille est très satisfaisante, on a une ouverture rapide du circuit, cependant la tension générée reste faible, ceci, comme nous le verrons, parce que l'énergie à absorber dispo-

Fig. 8. — Courbes des courants et tension dans le montage amélioré.

[Currents and switch voltage in the new set-up.]

nible pour la feuille est trop faible. La modification apportée est intéressante puisque l'on coupe 130 kA en 3 μs environ.

5. Etude du circuit électrique. — Nous allons maintenant étudier l'évolution du système en tenant compte de ses caractéristiques électriques.

5.1 SCHÉMA ÉLECTRIQUE. — Le schéma électrique est donné figure 9. R_a et L_a sont la résistance et l'inductance de l'absorbeur, R_2 et L_2 celles de l'ouvreur, R et L celles des liaisons ($R_a = 2 \text{ m}\Omega$ à froid, $L_a = 40 \text{ nH}$,

Fig. 9. — Modèle électrique.

[Electrical circuit.]

$R_2 = 1,5 \text{ m}\Omega$, $L_2(t=0) = L_0 = 12 \text{ nH}$, $R = 1 \text{ m}\Omega$, $L = 8 \text{ nH}$). C est la capacité du banc de condensateurs (500 mF).

L'inductance L_2 varie car les conducteurs actifs de l'ouvreur s'écartent l'un de l'autre. En introduisant comme en 2.2 le coefficient α pour tenir compte du fait que l'induction entre les languettes est plus petite qu'entre deux plaques infinies, nous écrivons :

$$L_2 = \mu_0 \alpha \frac{Dx}{d} + L_0 \quad (17)$$

x , ou plutôt d^2x/dt^2 , est donné par (6).

L'absorbeur étant constitué par une feuille de cuivre, sa résistance dépend de sa température. Si l'on appelle s et l la section et la longueur de la feuille ρ_0 et $\rho = \rho_0 \frac{\theta}{\theta_0}$ la résistivité aux températures θ_0 et θ , $\bar{\omega}$ et c la masse et la chaleur volumique du cuivre, on a :

$$\frac{dR_a}{dt} = \frac{\rho_0}{\bar{\omega}c\theta_0} \frac{I_a^2}{s^2} R_a \quad (18)$$

5.2 EQUATIONS D'ÉVOLUTION. — Elles s'écrivent :

$$\begin{aligned} \frac{dI_2}{dt} &= \frac{L_a}{L_a L_2 + L L_a + L L_2} \left[U_c - I_2 \left(R + \frac{L + L_a}{L_a} \left(R_2 + \frac{dL_2}{dt} \right) \right) - I_a \left(R - R_a \frac{L}{L_a} \right) \right] \\ \frac{dI_a}{dt} &= \frac{L_2}{L_a L_2 + L L_a + L L_2} \left[U_c + I_2 \left(\frac{L}{L_2} \left(R_a + \frac{dL_2}{dt} \right) - R \right) - I_a \left(R_a \frac{1}{L_2} + \frac{L}{L_2} + R \right) \right] \\ \frac{dU_c}{dt} &= - (I_a + I_2) \cdot \frac{1}{C} \\ \frac{d^2 L_2}{dt^2} &= \alpha^3 I_2^2(t) \mu_0^2 \frac{D}{2 d^3 \bar{\omega} c} \\ \frac{dR_a}{dt} &= \frac{\rho_0}{\bar{\omega}c\theta_0} \frac{I_a^2}{s^2} R_a \end{aligned} \quad (19)$$

Ce système différentiel à coefficients variables a été résolu numériquement sur ordinateur UNIVAC 1110. Nous avons pu tracer l'allure des courbes théoriques de $I_a(t)$, $I_2(t)$, $U_c(t)$, $U(t)$ (notations, voir figure 9) dans les deux cas suivants :

- les conjoncteurs 1 et 2 sont fermés en même temps
- le conjoncteur 2 est fermé avec un certain retard par rapport à 1.

Par ailleurs l'équation (17) montre que $x(t)$ est

proportionnel à $(L_2 - L_0)$. Le système (19) permettant de calculer $L_2(t)$, on en déduit $x(t)$ ainsi que la vitesse :

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{d}{\mu_0 D} \frac{dL_2}{dt}.$$

5.3 RÉSULTATS OBTENUS. DÉTERMINATION DE α . — Le paramètre α tenant compte des effets de bord était jusqu'à présent non déterminé. Aussi, pour des conditions expérimentales données (U_{co} , feuille à exploser donnée) nous avons comparé la courbe $I_a(t)$ expérimentale aux courbes théoriques correspondant à différentes valeurs de α . On constate que pour $\alpha^2 = 0,5$ toutes les courbes théoriques et expérimentales coïncident ; on en déduit que pour les conducteurs utilisés $\alpha^2 = 0,5$. Les courbes de la figure 10 correspondent à l'expérience décrite figures 5 et 6 ; celles de la figure 11 correspondent à l'essai de la figure 8. Ce modèle ne faisant pas intervenir les tensions d'arc, il est donc valable jusqu'à l'instant de la coupure c'est-à-dire jusqu'aux environs de 8 μs .

Fig. 10. — Comparaison des courbes théoriques (trait pointillé) et expérimentales (trait continu) pour l'essai correspondant à la figure 5.

[Theoretical (dotted line) and experimental (continuous line) curves of currents for the experiment corresponding to figure 5.]

Cette coïncidence des courbes théoriques et expérimentales de courants et tension peut être extrapolée aux courbes de vitesse et de déplacement puisque $x(t)$ est proportionnel à $L_2(t) - L_0$ et $v(t)$ à $\frac{dL_2}{dt}$ (Fig. 11).

Fig. 11. — Courbes théorique et expérimentale du courant, courbes théoriques de $v(t)$ et $x(t)$ pour l'essai correspondant à la figure 8.

[Theoretical and experimental curves of current, theoretical curves of $v(t)$ and $x(t)$ for the experiment corresponding to figure 8.]

A partir de $x(t)$ nous déterminons l'instant théorique de coupure et la limite de validité du modèle. Le conducteur ayant à parcourir 1 mm nous voyons que ceci se produit pour $T = 8,5 \mu s$, la vitesse étant ~ 360 m/s ; rappelons que la coupure se produisait expérimentalement vers 8 μs .

6. Conclusion. — Nous avons présenté un ouvreur à commande magnétique directe à faible énergie de commande. Une étude paramétrique a tout d'abord précisé ses caractéristiques (dimensions, courants à mettre en jeu). Un dispositif expérimental a permis de tester la commande et de prévoir le fonctionnement d'un disjoncteur complet, parcouru par le courant que l'on cherche à couper par le courant impulsionnel servant à la commande. Nous avons pour l'instant les caractéristiques minimales de réisolement (5 kV environ).

Les bons résultats obtenus actuellement nous incitent à poursuivre cette étude, en particulier du point de vue expérimental. Nous construisons pour cela un disjoncteur complet, avec lequel nous déterminons les possibilités effectives de réisolement et par suite les caractéristiques d'utilisation dans un système de transfert rapide d'énergie à partir d'une bobine de stockage d'énergie magnétique.

Bibliographie

- [1] CARRUTHERS, R., *Proc. of the International Conference on High Magnetic Fields*, MIT (MIT Press Wiley, Cambridge), 1961, p. 307.
 - [2] DELMAS, A., RIOUX, C., RIOUX-DAMIDAU, F., *Revue Phys. Appl.* **10** (1975) 241.
 - [3] FORD, R. D., VITKOVITSKY, I. M., NRL Memorandum Report 3561. (Naval Research Laboratory, Washington DC) 1977.
 - [4] INALL, E. K., ROBSON, A. E., TURCHI, P. J., *Rev. Sci. Instrum.* **48** (1977) 462.
 - [5] RIOUX-DAMIDAU, F., Congrès électrotechnique mondial. Moscou, juin 1977, communication n° 2-64.
 - [6] MAISONNIER, C., LINHART, J. G., GOURLAN, C., 4th Symposium on Engineering Problems in Thermonuclear Research, Frascati, mai 1966.
 - [7] BLEYS, C. A., LEBELY, D., RIOUX, C., RIOUX-DAMIDAU, F., *Rev. Sci. Instrum.* **46** (1975) 5.
 - [8] BAGET, R., Thèse 3^e cycle, Université Pierre-et-Marie-Curie, mai 1978.
 - [9] LEROUX, B., Thèse 3^e cycle, Université Pierre-et-Marie-Curie, mars 1978.
 - [10] ANTONI, B., DELVAUX, J., RIOUX-DAMIDAU, F., *Revue Phys. App.* **13** (1978) 463.
-