
PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

8.2

**L'UTILISATION DES SUPRACONDUCTEURS
POUR LE STOCKAGE ET LA DECHARGE
DE L'ENERGIE ELECTRIQUE**

par

Jean SOLE

Centre d'Etudes de Limeil :

Rapport CEA - R - 3515

1968

Na *

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A

C.E.N. - SACLAY B.P. n°2, 91 - GIF-sur-YVETTE - France

CEA-R-3515 - SOLE Jean

L'UTILISATION DES SUPRACONDUCTEURS POUR LE STOCKAGE ET LA DECHARGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Sommaire. - Rappelant les propriétés élémentaires qui avaient conduit à utiliser les supraconducteurs pour engendrer des champs magnétiques intenses, ainsi que les moyens utilisés pour atteindre pratiquement les très basses températures nécessaires, l'auteur présente sous sa forme élémentaire le principe du stockage et de la libération de l'énergie.

Une analyse plus détaillée des opérations successives de charge, piégeage, stockage et décharge de l'énergie, faisant apparaître différents aspects du problème, permet de faire le point sur les rares travaux connus à ce jour et de présenter le travail original qui a été effectué dans ce domaine.

./.

CEA-R-3515 - SOLE Jean

THE USE OF SUPERCONDUCTORS FOR STORAGE AND DISCHARGE OF ELECTRICAL ENERGY

Summary. - After recalling the elementary properties which led to superconductors being used for generating very strong magnetic fields, as well as the methods used to attain the required very low temperatures in practice, the author presents in its elementary form the principle of storage and liberation of energy.

A more detailed analysis of the successive charging, trapping, storage and discharge operations shows up the different aspects of the problem and is followed by a review of the very small amount of research published up to now and also by a presentation of the original work which has been carried out in this field.

On peut déjà exploiter les matériaux supraconducteurs tels qu'ils sont (c'est-à-dire malgré que leurs caractéristiques n'aient été ajustées qu'en vue de réaliser des champs magnétiques intenses). On obtiendra encore bien davantage des supraconducteurs lorsqu'ils auront été correctement adaptés à cette nouvelle application pleine de promesses que représentent le stockage et la décharge de l'énergie électrique.

1968

201 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

It is already possible to use superconducting materials as they are (i.e., although their characteristics have been adjusted with a view only to obtain very strong magnetic fields). Much more will be obtained from superconductors when they have been correctly adapted to this new very promising application to the storage and discharge of electrical energy.

1968

201 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

A partir de 1968, les rapports CEA sont classés selon les catégories qui figurent dans le plan de classification ci-dessous et peuvent être obtenus soit en collections complètes, soit en collections partielles d'après ces catégories.

Ceux de nos correspondants qui reçoivent systématiquement nos rapports à titre d'échange, et qui sont intéressés par cette diffusion sélective, sont priés de se reporter à la lettre circulaire CENS/DOC/67/4690 du 20 décembre 1967 que nous leur avons adressée, et qui précise les conditions de diffusion.

A cette occasion nous rappelons que les rapports CEA sont également vendus au numéro par la Direction de la Documentation Française, 31, quai Voltaire, Paris 7^e.

PLAN DE CLASSIFICATION

- | | |
|---|---|
| 1. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES ISOTOPES ET DES RAYONNEMENTS | 8. PHYSIQUE |
| 2. BIOLOGIE ET MEDECINE | 8. 1 Accélérateurs
8. 2 Electricité, électronique, détection des rayonnements
8. 3 Physique des plasmas
8. 4 Physique des états condensés de la matière
8. 5 Physique corpusculaire à haute énergie
8. 6 Physique nucléaire
8. 7 Electronique quantique, lasers |
| 2. 1 Biologie générale
2. 2 Indicateurs nucléaires en biologie
2. 3 Médecine du travail
2. 4 Radiobiologie et Radioagronomie
2. 5 Utilisation des techniques nucléaires en médecine | 9. PHYSIQUE THEORIQUE ET MATHEMATIQUES |
| 3. CHIMIE | 10. PROTECTION ET CONTROLE DES RAYONNEMENTS. TRAITEMENT DES EFFLUENTS |
| 3. 1 Chimie générale
3. 2 Chimie analytique
3. 3 Procédés de séparation
3. 4 Radiochimie | 10. 1 Protection sanitaire
10. 2 Contrôle des rayonnements
10. 3 Traitement des effluents |
| 4. ETUDES DU DOMAINE DE L'ESPACE | 11. SEPARATION DES ISOTOPES |
| 5. GEOPHYSIQUE, GEOLOGIE, MINERALOGIE ET METEOROLOGIE | 12. TECHNIQUES |
| 6. METAUX, CERAMIQUES ET AUTRES MATERIAUX | 12. 1 Mécanique des fluides - Techniques du vide
12. 2 Techniques des températures extrêmes
12. 3 Mécanique et outillage |
| 6. 1 Fabrication, propriétés et structure des matériaux
6. 2 Effets des rayonnements sur les matériaux
6. 3 Corrosion | 13. UTILISATION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE ATOMIQUE |
| 7. NEUTRONIQUE, PHYSIQUE ET TECHNOLOGIE DES REACTEURS | 13. 1 Centres d'études nucléaires, laboratoires et usines
13. 2 Etudes économiques, programmes
13. 3 Divers (documentation, administration, législation, etc...) |
| 7. 1 Neutronique et physique des réacteurs
7. 2 Refroidissement, protection, contrôle et sécurité
7. 3 Matériaux de structure et éléments classiques des réacteurs | |

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VII^e.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VII^e.

- Rapport CEA-R-3515 -

Centre d'Etudes de Limeil

L'UTILISATION DES SUPRACONDUCTEURS
POUR LE STOCKAGE ET LA DECHARGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

par

Jean SOLE

- Mai 1968 -

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	2
PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES	5
I - LE SUPRACONDUCTEUR	7
BIBLIOGRAPHIE	10
2 - COMMENT ON ATTEINT LES TRES BASSES TEMPERATURES NECESSAIRES	14
BIBLIOGRAPHIE	20
3 - LE PRINCIPE DE L'UTILISATION DES SUPRACONDUCTEURS POUR STOCKER ET DECHARGER DE L'ENERGIE	22
BIBLIOGRAPHIE	26
4 - LA CHARGE DE L'ENERGIE	27
4-1- Les connexions électriques	27
4-2- Les dynamos et génératrices	32
4-3- Les pompes à flux	33
4-4- L'utilisation de transformateurs statiques	35
4-5- Remarque	36
BIBLIOGRAPHIE	37
5 - LE PIEGEAGE DE L'ENERGIE	39
5-1- La charge a été effectuée au moyen d'un générateur extérieur	39
5-2- La charge a été effectuée au moyen d'un générateur intérieur	42
6 - LE STOCKAGE DE L'ENERGIE	43
6-1- Expression de l'énergie stockée	43
6-2- Choix de L et de I	44
6-3- Stabilité du circuit	45
6-4- Comparaison aux conducteurs normaux	48
6-5- Comparaison aux condensateurs	49
6-6- "Optimisation" du circuit de stockage	50
6-7- Quelles énergies pourra-t-on stocker ?	52
BIBLIOGRAPHIE	54
7 - LA DECHARGE DE L'ENERGIE	56
7-1- Connexion directe	56
7-2- Couplage inductif	58
7-3- Caractéristiques de la décharge	60
7-3-1- Impédance d'utilisation dissipative	60
7-3-1-1- Examen d'une certaine catégorie de cas	66
7-3-1-1-1- Front de montée de l'impulsion	66
7-3-1-1-2- Energie transférée dans la résistance d'utilisation	72
7-3-1-1-3- Energie dissipée dans l'interrupteur	76

7-3-1-1-4- Expression du courant dans la résistance d'utilisation	79
7-3-2- Impédance d'utilisation selfique	80
7-3-3- Impédance d'utilisation capacitive	82
7-3-4- Impédance d'utilisation quelconque	86
7-4- Rendement de la décharge	89
7-4-1- Impédance d'utilisation dissipative	89
7-4-1-1- Expression du rendement	89
7-4-2- Impédance d'utilisation selfique	95
7-5- L'interrupteur	96
7-5-1- Elément du circuit supraconducteur que l'on fait transiter	98
7-5-1-1- Self de l'interrupteur	101
7-5-1-2- Vitesse de transition	101
7-5-1-3- Résistance en position "ouverte"	107
7-5-1-3-1- Interrupteur séparé	107
7-5-1-3-2- Interrupteur confondu	109
7-5-1-3-3- Influence de la nature du matériau supraconducteur	110
7-5-1-3-4- Influence des dimensions géométriques du circuit	115
7-5-2- Contacts supraconducteurs actionnés mécaniquement	118
7-5-3- Contacts conducteurs actionnés mécaniquement	120
7-5-4- Elément de circuit destructible	120
7-6- Particularités des montages	121
BIBLIOGRAPHIE	123
8 - QUELQUES APPLICATIONS ACTUELLEMENT POSSIBLES	125
8-1- Décharges dans le gaz	126
8-1-1- Réalisation pratique de l'alimentation	126
8-1-1-1- Décharges entre électrodes	126
8-1-1-2- Décharges par induction	130
8-1-2- Utilisation pour les recherches sur la fusion nucléaire contrôlée	130
8-1-3- Alimentation de sources de neutrons	132
8-1-4- Alimentation de tubes "éclair"	133
8-1-4-1- Pompes des lasers	133
8-1-4-2- Alimentation de tubes générateurs d'éclairs pour la photographie	135
8-1-4-3- Alimentation de tubes générateurs de rayons X	135
8-1-5- Alimentation de canons à plasmas	135
8-2- Décharges dans les liquides	136
8-3- Décharges dans les solides	136
8-3-1- Alimentation d'essais de rigidités diélectriques	136
8-3-2- Explosions de fils	136
8-3-2-1- Création d'ondes de choc	136
8-3-2-2- Amorçage d'arcs de grandes puissances	137
8-3-2-3- Métallisations	138

8-3-3- Soudage par points	138
8-3-4- Alimentation de circuits cryogéniques	138
8-4- Alimentation d'autres circuits	138
8-4-1- Mémoires supraconductrices	138
8-4-2- Alimentation d'accélérateurs de particules	139
8-4-3- Alimentation électrique de fusées	139
8-4-4- Alimentation électrique de véhicules	140
8-4-5- Stockage d'énergie réactive	140
BIBLIOGRAPHIE	141
9 - <u>EXEMPLES DE PREDETERMINATIONS SIMPLIFIEES D'ENSEMBLES DE STOCKAGE ET DECHARGE D'ENERGIE</u>	143
9-1- Alimentation d'un tube éclair pour laser	143
9-1-1- Caractéristiques du tube à alimenter	143
9-1-1-1- Données du constructeur	144
9-1-1-1-1- Performances	144
9-1-1-1-2- Conditions de fonctionnement	144
9-1-1-2- Montage électrique classique	145
9-1-1-3- Données relevées expérimentalement	146
9-1-2- Données de départ du calcul	148
9-1-3- Détermination des caractéristiques de l'alimentation	148
9-1-4- Détermination du montage électrique	152
9-1-5- Réalisation pratique	162
9-1-5-1- Décharge utilisant des connexions directes	162
9-1-5-1-1- La charge s'effectue par des connexions directes	162
9-1-5-1-2- La charge s'effectue par un transformateur d'énergie	168
9-1-5-2- Décharge utilisant un circuit couplé	168
9-1-5-2-1- La charge s'effectue par des connexions directes	168
9-1-5-2-2- La charge s'effectue par un transformateur d'énergie	171
9-1-5-2-3- L'interrupteur supraconducteur est confondu	172
9-1-5-3- Dispositif cryogénique	174
9-1-6- Densités d'énergie stockées	174
9-2- Alimentation d'un arc de grande puissance	176
9-2-1- Caractéristiques de l'arc à alimenter	176
9-2-2- Schéma du montage	176
9-2-3- Données de départ du calcul	177
9-2-4- Détermination des caractéristiques de l'alimentation	178
9-2-5- Réalisation pratique	183
9-3- Remarques	190
BIBLIOGRAPHIE	195
10 - <u>REMARQUES RELATIVES AU MATERIAU SUPRACONDUCTEUR ET CONCLUSION</u>	196
BIBLIOGRAPHIE	200

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

CIRCUIT DE STOCKAGE :

L	coefficient de <u>self induction</u> du circuit de stockage
r	<u>résistance</u> électrique(s'il y a lieu) du circuit de stockage
$i(t)$	<u>courant</u> dans le circuit de stockage en fonction du temps
I_0	<u>courant</u> initial piégé ou courant maximum à charger
J_c	<u>densité de courant critique</u> du matériau supraconducteur
B_c	<u>induction critique</u> du matériau supraconducteur
m	<u>masse</u> totale du matériau supraconducteur
W_0	<u>énergie</u> initiale piégée

INTERRUPTEUR :

$R_2(t)$	<u>résistance</u> de l'interrupteur en fonction du temps
R_m	valeur maximum de $R_2(t)$
R_0	<u>résistance</u> (s'il y a lieu) de l'interrupteur "fermé".
L_2	coefficient de <u>self induction</u> de l'interrupteur
$V_2(t)$	<u>tension</u> aux bornes de l'interrupteur en fonction du temps
$i_2(t)$	<u>courant</u> dans l'interrupteur en fonction du temps
w_2	<u>énergie</u> dissipée dans l'interrupteur
K_2	ce symbole désigne l'interrupteur qui sert à piéger l'énergie

CONNEXIONS :

R_3	<u>résistance</u> des connexions
L_3	coefficient de <u>self induction</u> des connexions
w ou w_3	<u>énergie</u> dissipée par effet Joule dans les connexions (voir aussi à "Grandeurs liées à la température")

UTILISATION :

Z_u	<u>impédance</u> d'utilisation
R_u	" " purement dissipative

L_u	impédance d'utilisation purement selfique
C_u	" " " capacitive
$i_u(t)$	courant dans l'impédance d'utilisation en fonction du temps
I_m	valeur maximum du courant de décharge
W_u	énergie transférée dans l'utilisation
K_3	ce symbole désigne (s'il y a lieu) l'interrupteur qui sert à connecter l'utilisation

GENERATEUR :

K_1	ce symbole désigne (s'il y a lieu) l'interrupteur qui sert à connecter le générateur.
-------	---

GRANDEURS LIEES A LA TEMPERATURE :

T	température en un point donné du circuit
w	énergie transportée par conduction thermique (voir aussi à Connexions")
$\rho(T)$	résistivité électrique en fonction de la température
$\sigma(T)$	conductivité thermique en fonction de la température

GRANDEURS LIEES AU TEMPS :

τ_c	durée de la charge
τ_s	durée du stockage
τ_u	temps de fonctionnement en froid du cryostat
τ	période d'oscillation (cas d'une décharge oscillante) ou bien durée de la décharge ou bien constante de temps de la décharge (c'est précisé dans le texte).
τ_2	constante de temps normale propre du circuit de stockage

RENDEMENT

η	rendement en énergie électrique
--------	---------------------------------

I - LE SUPRACONDUCTEUR

Si l'on abaisse la température d'un métal ou d'un composé métallique on observe d'une façon générale une diminution progressive de sa résistivité électrique 1/. Cependant la résistivité électrique de certains métaux ou composés peut brusquement devenir identiquement nulle 2/ au-dessous d'une certaine température 3/ à 10/. Ce phénomène a été observé pour la première fois par le physicien Hollandais KAMERLINGH ONNES en 1911 sur du mercure. Cette température, qui dépend du matériau, aussi bien de sa nature que de sa structure et de sa forme géométrique, est appelée "température critique".

En 1933 l'Allemand MEISSNER découvrit expérimentalement que pour les matériaux dont nous venons de parler, lorsque la résistivité était nulle, l'induction dans le matériau restait non seulement constante mais encore était nulle. Ce phénomène actuellement appelé "effet MEISSNER" caractérise le supraconducteur. Celui-ci se comporte ainsi non seulement comme un conducteur parfait (résistivité nulle) mais aussi comme un diamagnétique parfait (induction nulle).

Si l'on soumet ce supraconducteur à un champ magnétique croissant, pour une certaine valeur du champ le matériau retrouve brusquement les propriétés d'un conducteur normal. Il n'est plus supraconducteur. On dit qu'il a transité de l'état supraconducteur à l'état normal. Cette valeur du champ magnétique qui dépend du matériau, est appelée "champ critique". On aurait pu de même restituer au matériau son état normal en le faisant parcourir par un courant supérieur à une certaine valeur. Cette valeur du courant, qui dépend encore du matériau, est appelée "courant critique".

L'état dans lequel se trouve le matériau dépend donc de l'ensemble des valeurs des trois grandeurs :

T température du matériau,

H champ magnétique auquel il est soumis,

I courant électrique qui le parcourt,

c'est à dire de la position d'un point représentatif de coordonnées T, H, I, dans un système d'axes à trois dimensions : température, champ magnétique, courant. Si ce point se trouve dans une région suffisamment voisine de l'origine des coordonnées ($T = 0$, $H = 0$, $I = 0$) le matériau est à l'état supraconducteur. Si ce point se trouve au contraire dans une région qui en est suffisamment éloignée le matériau est à l'état normal.

Ces deux régions représentatives peuvent être séparées très schématiquement :

- soit par une surface unique. Cette surface correspond alors à des ensembles de "valeurs critiques" pour T, H, I . La transition du matériau s'effectue complètement au passage du point représentatif à travers cette surface et le matériau est dit " supraconducteur de première espèce ". (Cela n'exclut pas par exemple que dans un même échantillon massif puissent coexister des zones supraconductrices et des zones normales correspondant respectivement à des ensembles différents de valeurs de T, H et I . On dit dans ce cas que l'échantillon est dans l'état mixte $\angle 3/ \angle 4/$).

- soit par toute une région comprise entre deux surfaces extrêmes. Les points représentatifs situés à l'intérieur de cette région correspondent à une pénétration partielle du flux magnétique dans le matériau $\angle 11/ \angle 12/$ et $\angle 3/$ à $\angle 7/$. Le matériau correspondant est dit " supraconducteur de deuxième espèce ".

Les comportements qui viennent d'être décrits sont relatifs à un régime permanent c'est à dire à des valeurs constantes (ou à la limite, très lentement variables) de T, H, I . En régimes transitoires on peut observer un effet de "dégradation" des propriétés supraconductrices $\angle 13/$ à $\angle 16/$.

D'une façon générale lors de la transition le réseau cristallin du matériau supraconducteur ne subit pas de modification, par contre la chaleur spécifique admet une discontinuité (bien que conservant le même ordre de grandeur) lorsqu'on est en présence d'un champ magnétique. Il en résulte dans ce cas une chaleur latente de transition. La conductivité thermique est en général plus basse à l'état supraconducteur qu'à l'état normal pour un métal pur, alors qu'elle est plus élevée pour certains alliages $\angle 3/$ à $\angle 7/$ et $\angle 17/$.

A l'heure actuelle sont connus comme étant supraconducteurs un certain nombre d'éléments $\angle 3/$ à $\angle 7/$, tous métalliques, et un grand nombre d'alliages et de composés $\angle 27/$ à $\angle 30/$ pouvant même faire intervenir des métalloïdes $\angle 27/$. Les températures critiques maximales de ces supraconducteurs étaient jusqu'à ces derniers temps toutes inférieures à 18°K . Tout récemment des matériaux encore supraconducteurs à 20°K viennent d'être découverts $\angle 37/$. Théoriquement des supraconducteurs possédant des températures critiques de l'ordre de grandeur de la température ambiante ont été prévus $\angle 31/$ à $\angle 35/$ mais une telle possibilité est encore très discutée $\angle 10/$.

Jusqu'à maintenant les propriétés des supraconducteurs les plus exploitées ont été :

- leur résistance électrique pratiquement nulle ;
- leurs champs critiques élevés.

Cela a permis de réaliser des bobinages pratiquement sans pertes (cependant on pourra par exemple consulter la référence $\angle 36/$ sur le phénomène de dégradation) capables d'engendrer des champs magnétiques permanents intenses $\angle 11/$ et $\angle 18/$ à $\angle 26/$. C'est cette utilisation qui a donné aux supraconducteurs de deuxième espèce l'essor prodigieux qu'ils viennent de connaître en sept ans. Mais, comme on le verra, les améliorations qui en ont résulté ont conduit à élaborer des matériaux possédant des caractéristiques optimales qui diffèrent de celles que demandent le stockage et la libération de l'énergie électrique.

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ - GEORGE TERENCE MEADEN .- (Centre de Recherche sur les Très Basses Températures, Grenoble, France) .- Electrical resistance of metals. - Heywood books, London .
- /2/ - FILE (J.), MILLS (R.G.) .- Observation of persistent current in a superconducting solenoid . - Physical Review Letters.- February 1 1963.- pp. 93-96.
- /3/ - de GENNES (P.G.) .- Superconductivity of metals and alloys.- Benjamin Inc, New York .
- /4/ - SHOENBERG (D) .- Superconductivity .- Cambridge at the University Press .- 1960 .
- /5/ - NEWHOUSE (V.L.) .- (General Electric Research Laboratory).- Applied Superconductivity .- John Wiley and sons .- New York
- /6/ - LYNTON (E.A.) .- La supraconductivité traduit par NOZIERES (A.) .- Dunod, Paris, 1964
- /7/ - TINKHAM (M.) .- Superconductivity .- Gordon and Breach .- New York .
- /8/ - LACHLAN MACKINNON .- Experimental physics at low temperatures .- Wayne State University Press .- Detroit ,1966 .
- /9/ - NOZIERES (PH.) .- La supraconductivité.- Nucleus N°4 (1960),pp. 257-266
- /10/- ABRIKOSOV (A.A.) .- The present state of the theory of superconductivity.- Soviet Physics Uspekhi . Vol. 8. n°5 .- March-April 1966,pp. 710 - 719

- /11/- de GENNES (P.G.) .- Propriétés magnétiques des supraconducteurs de deuxième espèce . - L'Onde Electrique tome 45 . n°460 .- Juillet, Aout 1965, pp. 926 - 931 .
- /12/- GOODMAN (B.B.) .- La physique des supraconducteurs de la deuxième espèce.- Bulletin de la Société Française des Electriciens.- 8ème série, Tome 5 n° 58, Octobre 1964 , pp. 624 - 629 .
- /13/- GRANEAU (P.) .- Alternating currents in superconductors .- Physics Letters, Vol. 5, n° 1 , June 1963 , p. 15 .
- /14/- THOMAS (P.) .- Courant critique dans un solénoïde en courant alternatif de basse fréquence. - Bulletin de la Société Française des Electriciens.- 8ème série, Tome 5 , n°58, Octobre 1964 .
- /15/- MAILFERT (A.), FOURNET (G.), HURET (J.) .- Courant alternatif critique de fils supraconducteurs.- Physics Letters, Vol. 7 , n°4 , 1963 , p.227
- /16/- WISSEMAN (W.R.), BOATNER (L.A.), LOW (F.J.) .- Alternating current power losses in superconducting Nb - Zr alloys.- Journal of Applied Physics . - Vol.35, n°9 , 1964, p. 2649.
- /17/- von LAUE (M.) .- Theory of superconductivity - Academic Press inc. publishers, New York, 1952.
- /18/- L'onde Electrique 45^e année n° 460 - 461 .- Juillet - Aout 1965
- GRIVET (P.) Les supraconducteurs en électronique .- pp. 907 - 911 .
- MOREL (P.) Introduction à la théorie de la supraconductivité .- pp. 912-925.
- SEPTIER (A.) .- Les résonateurs supraconducteurs et leurs applications.- pp. 932 - 945.
- SAUZADE (M.) .- Production de champs magnétiques homogènes et intenses à l'aide de supraconducteurs .- pp. 946 - 957 .
- DONADIEU (L.) .- Etude de quelques problèmes relatifs aux bobinages et câbles supraconducteurs .- pp. 958 - 965 .

- /19/- GAUSTER (W.F.) .- Development of superconducting magnets .- Electronics and Power .- March 1964 , pp. 64 - 67 .
- /20/- BOOM (R.W.), ROBERTS (L.D.), LIVINGSTON (R.S.) .- Developments in superconductor solenoids .- Nuclear Instruments and Methods 20 , 1963 , pp. 495 - 502 .
- /21/- LAVERICK (G.) , LOBELL (G.) .- Large high field superconducting magnet system .- The Review of Scientific Instruments .- Vol. 36 n° 6, 1965 p.825.
- /22/- MONTGOMERY (D.B.) .- Generation of intense magnetic fields .- Journal of Applied Physics .- Vol. 36, n° 3, part 2, 1965 , p. 893 .
- /23/- BERLINCOURT (T.G.) .- High magnetic fields by means of superconductors .- British Journal of Applied Physics .- Vol. 14 , n°11 , 1963 , p. 749 .
- /24/- KIM (Y.B.) .- Superconducting magnets and hard superconductivity .- Physics Today .- Sept. 1964, p. 21 .
- /25/- COFFEY (H.T.), HULM (J.K.), REYNOLDS (W.T.), FOSC (D.K.) , SPAN (R.E.) .- A protected 100 KG, superconducting magnet .- Journal of Applied Physics.- Vol. 36 , n° 1 , 1965 p. 128 .
- /26/- SAMPSON (W.B.) .- 112 KG ,superconducting magnet .- Review of Scientific Instruments .- Vol. 36, n° 4, 1965, p. 565 .
- /27/- Superconducting elements and superconducting materials.- Handbook of Chemistry and Physics.- Chemical Rubber Publishing Co, Cleveland Ohio.
- /28/- TANENBAUM (M.) Supraconductors .- WRIGHT (W.V.), Ed. - Interscience publishers , 1962 .

- /29/- Special issue .- Synthesis, characterization, and application of superconducting niobium stannide. - RCA Review .- September 1964, Vol. 25 n° 3 .
- /30/- SMULKOWSKI (O.) .- Procédés d'élaboration et propriétés des fils supraconducteurs destinés à la réalisation des solénoïdes produisant des champs magnétiques intenses.- Bulletin de la Société Française des Electriciens, 8^e série, Tome 5 , n° 58 , Octobre 1964 , p. 640 - 643 .
- /31/- LITTLE (W.A.) .- Possibility of synthesizing an organic superconductor.- Phys. Rev. - Vol. 134 , n° 6 A (1964) p. A 1416 .
- /32/- LITTLE (W.A.) .- Superconductivity at room temperature.- Scientific American.- Vol. 212 , n°2 , (1965), p 21
- /33/- LADIK (J.), BICZO (G), ZAWADOWSKI (A.) .- Simple model calculations on possible organic superconductors.- Physics Letters .- Vol. 18 , n°3 , Sept. 1 1965 ,pp. 257 - 258 .
- /34/- Anonyme .- Thin film superconductors .- Electronics , February 22, 1965 , p. 186 .
- /35/- ATHERTON (D.L.) .- Critical currents of organic superconductors.- Physics Letters .- Vol. 24 A, number 2 , January 16 , 1967 .
- /36/- KIM (Y.B.), HEMPSTEAD (C.F.), STRNAD (A.R.) .- Flux creep in hard superconductors .- Physical Review. - Vol. 131, 1963 , pp. 2486 - 2495 .
- /37/- MATTHIAS (B.T.), GEBALLE (T.H.), LONGINOTTI (L.D.), CORENZWIT (E.), HULL (G.W) WILLENS (R.H.), MAITA (J.P.) .- Superconductivity at 20 degrees Kelvin .- Science . Vol. 156 , May 5 1967 , pp. 645 - 646 .

2 - COMMENT ON ATTEINT LES TRES BASSES TEMPERATURES NECESSAIRES

C'est grace à la liquéfaction de l'hélium qu'il avait réalisée pour la première fois en 1908 que KAMERLINGH ONNES avait pu découvrir par hasard en 1911 le premier supraconducteur.

A l'heure actuelle pour refroidir un supraconducteur on en est resté à peu près à la même technique qu'à cette époque. On effectue encore ce refroidissement à partir de l'hélium naturel liquide (Hélium 4) qui bout à la pression atmosphérique à la température de 4,2 °K et dans lequel on immerge immédiatement le montage à refroidir /38/ à /44/. L'hélium est parmi tous les éléments celui dont le point d'ébullition est le plus bas. Le tableau 1 groupe les éléments qui possèdent à la pression atmosphérique les températures d'ébullition les plus basses.

Elément	Point d'ébullition à la pression normale. (degrés absolus) ° K	Température centésimale correspondante ° C	Masse spécifique à l'état liquide g/ litre	Chaleur latente de vaporisation cal / g	Chaleur latente de vaporisation cal / litre
Hélium 3	3,2	- 269,9	≈ 50		< 100
Hélium 4	4,2	- 268,9	125	4,9	610
Hydrogène	20,3	- 252,8	71	108	7 700
Deutérium	23,6	- 249,5	163	72,5	11 800
Tritium (radioactif)	25	- 248,1	255	55	14 000
Néon	27,1	- 246	1 207	20,7	24 700
Azote	77,3	- 195,8	808	47,6	38 400

TABLEAU 1

On peut encore abaisser les températures d'ébullition indiquées en diminuant la pression d'équilibre du gaz qui se trouve au contact du liquide mais on est limité, dès des abaissements de températures relativement faibles, par la solidification du liquide.

Dans le cas de l'hélium 4 /45/ à /47/ il apparaît aux environs de 2° K un phénomène nouveau : la suprafluidité. L'hélium acquérant une viscosité nulle se trouve littéralement aspiré par les pompes destinées à abaisser la pression. Au dessous de 1,2 °K il faut alors le remplacer par son isotope l'hélium 3 /40/ /48/, mais ce dernier est très rare et très onéreux. Il semble d'ailleurs qu'actuellement il n'y ait pas intérêt à descendre trop bas en températures car les champs critiques des matériaux actuellement utilisés n'augmentent pas beaucoup quand on se rapproche de la température zéro /3/ à /7/ alors que leurs conductivités thermiques et leurs capacités calorifiques diminuent considérablement /38/ /39/ /42/ /44/.

Si l'on voulait au contraire atteindre des températures supérieures à celles indiquées dans le Tableau 1 on pourrait augmenter la pression. Pratiquement on préfère chauffer légèrement le montage en lui apportant un flux de chaleur convenable de façon à le maintenir à une température d'équilibre supérieure à celle du fluide de refroidissement.

En fait, comme le montre le Tableau 1, l'hélium est le seul fluide pratiquement utilisable pour réaliser les températures nettement inférieures à 18 ° K.

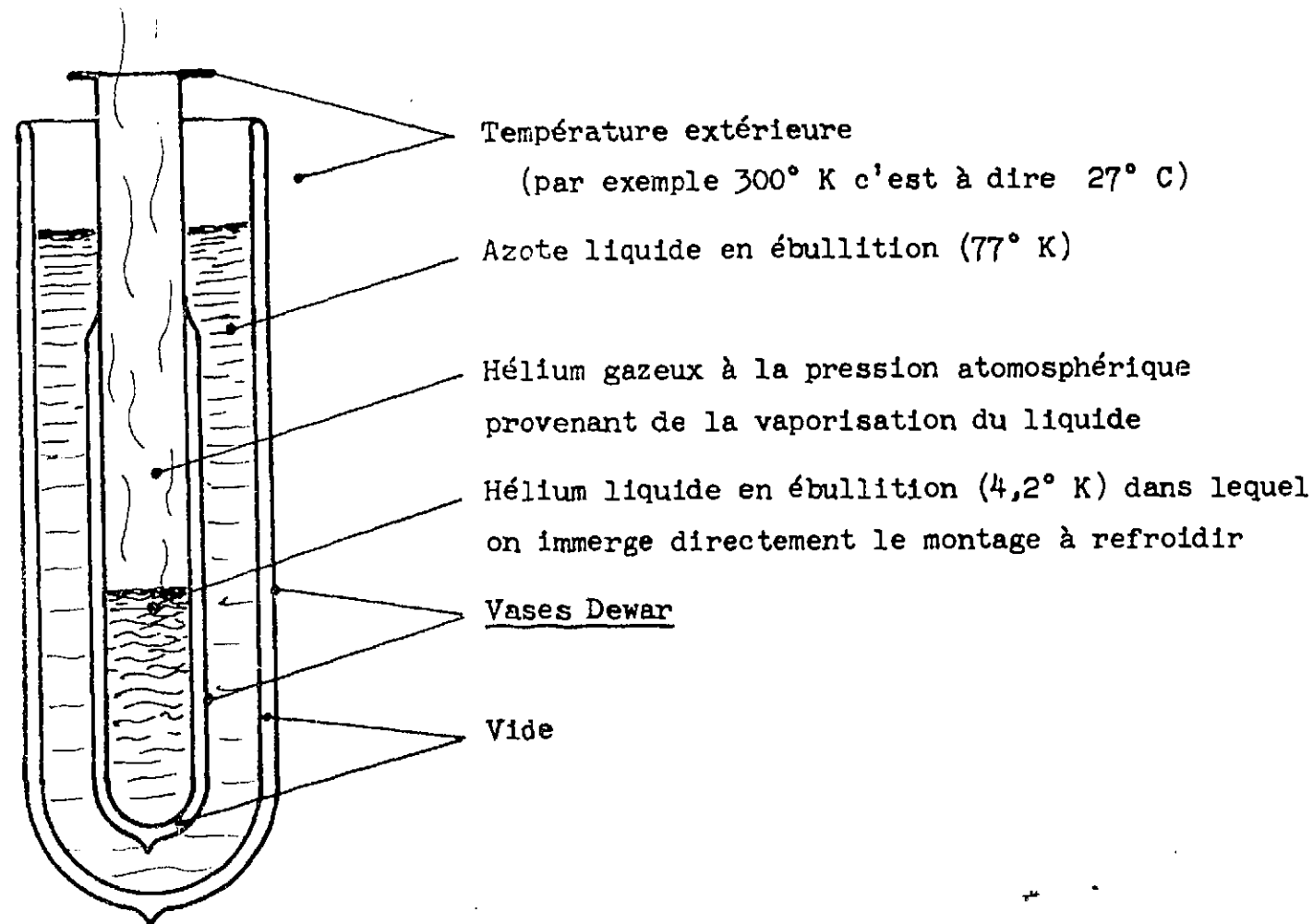


Figure 1

L'hélium liquide est placé dans un container appelé "cryostat" constitué en fait par un ensemble de "vases Dewar" spécialement étudié pour réduire au minimum l'apport de calories venant de l'extérieur. La Figure 1 représente un cryostat utilisant un bain d'azote liquide qui maintient une température intermédiaire de 77 ° K autour du Dewar à hélium. La tendance actuelle est de substituer au bain d'azote liquide un écran thermique "super-isolant" (ce qui simplifie les manipulations et rend le cryostat moins encombrant plus léger et plus solide) ou encore de faire circuler autour du Dewar à hélium les vapeurs de ce gaz encore froides.

Autrefois de nombreux cryostats étaient en verre. Mais ce matériau, très fragile, est actuellement remplacé par l'acier inoxydable mauvais conducteur de la chaleur aux très basses températures et utilisable en feuilles de très faibles épaisseurs. Pour éviter l'apparition de courants induits dans la masse même du cryostat lors de la décharge des circuits supraconducteurs on est amené à s'orienter vers l'utilisation de matériaux très mauvais conducteurs du courant électrique ou isolants [49]. D'autre part on adapte la forme géométrique des cryostats à celles des circuits à refroidir (par exemple : cryostats toriques). Dans certains cas on réalise des dispositifs à circulation d'hélium permettant de refroidir localement juste les parties nécessaires des montages [50/ 51/ 52/].

L'hélium liquide est obtenu par liquéfaction du gaz au moyen de machines frigorifiques encore appelées "liquéfacteurs" [43]. Il est alors en général nécessaire de transporter le liquide jusqu'au cryostat d'utilisation. On peut au lieu de liquéfacteurs utiliser des "réfrigérateurs". Ceux-ci font décrire au fluide cryogénique un circuit directement fermé dans le cryostat.

L'énergie frigorifique utile du fluide cryogénique comprend la chaleur latente de vaporisation du liquide (Tableau 1) plus la chaleur de réchauffement du gaz jusqu'à la température à laquelle il est évacué. A titre indicatif la figure 2 tirée de la référence [50/ donne directement pour une consommation de 1 litre par heure de différents fluides cryogéniques, initialement à l'état liquide, et en fonction de la température d'évacuation du gaz la puissance utile recueillie exprimée en watt.

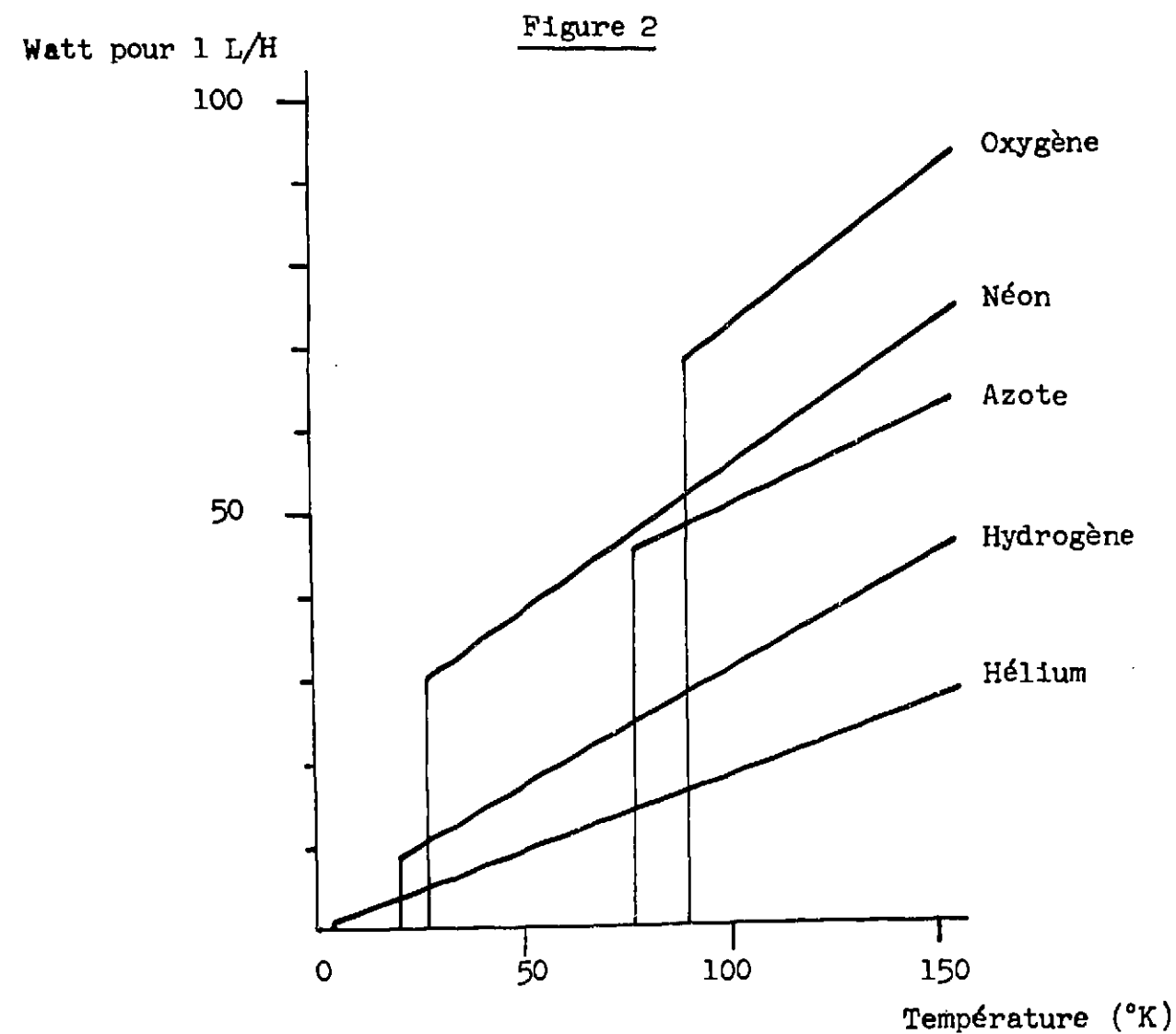
Cette énergie frigorifique sert :

- 1°) à abaisser initialement la température du montage supraconducteur jusqu'à sa température d'utilisation (cette opération est effectuée lentement pour améliorer les échanges de chaleur et éviter de soumettre le montage à des chocs thermiques) ;

2°) lorsque cette température est atteinte, à compenser les pertes du cryostat (l'effet Joule étant nul dans le supraconducteur).

Rappelons que ces pertes ont lieu 53/ par :

- convection du gaz contenu dans le cryostat (Il faut signaler aussi la convection du gaz qui a pu s'introduire, par diffusion à travers les parois, dans les enceintes d'isolement qui devraient rester sous vide)
- conduction thermique (parois du cryostat, supports du montage, connexions diverses...)
- rayonnement (On diminue ces pertes au moyen d'écrans réfléchissants maintenus à des températures intermédiaires) .



Si des supraconducteurs à températures critiques plus élevées venaient à apparaître cela permettrait d'utiliser des fluides de refroidissement à températures d'ébullition plus élevées ce qui faciliterait le refroidissement. En effet la dernière colonne du Tableau 1 ainsi que la figure 2 montrent qu'à la pression atmosphérique par exemple la puissance frigorifique des différents fluides cryogéniques est en général (sauf pour l'azote) d'autant plus élevée que leur température d'ébullition est plus élevée. D'autre part l'écart de température avec la température ambiante étant plus faible les pertes totales du cryostat seraient plus réduites.

Notre tendance actuelle consiste à nous orienter vers un dispositif réfrigérateur permettant d'assurer automatiquement et en toute sécurité (en évitant les "chocs thermiques") la mise en froid progressive, la tenue en froid et la remontée en température du montage supraconducteur.

BIBLIOGRAPHIE

- /38/- ROSE-INNES (A.C.) .- Low temperature techniques .- The use of liquid helium in the laboratory.- The English Universities Press ltd - London .
- /39/- WHITE (G.K.) .- Experimental techniques in low temperature physics.- Oxford at the Clarendon Press .
- /40/- VANCE (R.W.), and DUKE (V.M.) ed.- Applied cryogenic engineering WILEY (J.) and sons .- New York.
- /41/- MENDELSSOHN (K.) .- Cryophysique .- Dunod - Paris.
- /42/- VANCE (R.W.) ed .- Cryogenic technology .- WILEY (J.) and sons .- New York.
- /43/- RUSSELL (B.) SCOTT .- Cryogenic engineering .- VAN NOSTRAND (D.) company Inc. New York.
- /44/- VANCE (R.W.) .- Introduction to cryogenics .- Machine Design October 8, 1964, pp. 169 - 192 .
- /45/- ROLLIN (R.) . - Propriétés physiques de l'hélium liquide .- Travail collectif de la division Thermodynamique de la D R M E .- Entropie n° 1, pp. 37 à 50 .
- /46/- PASCAL (P.) .- Nouveau Traité de Chimie Minérale .- Tome 1 .- Masson et C°, éditeurs.
- /47/- ADKINS (C.J.) .- Device for the stabilization of helium cryostat temperatures Journal of Scientific Instruments .- Vol. 38 , July 1961, p. 305 .
- /48/- RAUCH (C.J.) .- Advances in cryogenic engineering .- TIMMERHANS (K.D.) ed. Plenum Press Inc. , New York .- Vol. 6, p. 345 .

- /49/- On peut citer les efforts effectués actuellement par les firmes suivantes pour développer des cryostats constitués par des matériaux électriquement isolants :
Alsthom, Colombes, France
Hofman, Newark, N.J., U.S.A., représenté en France par Seurolec, Boulogne-Billancourt .
- /50/- ROUBEAU (P) .- Techniques nouvelles d'utilisation de l'hélium liquide.- Journées internationales des états extrêmes de la matière aux très hautes et très basses températures, très hautes et très basses pressions. Paris 6 Avril 1967 .
- /51/- GENEVEY (P.) , SOLE (J.) .- Procédé pour amener à basse température une zone déterminée d'un objet ou d'un ensemble.- Brevet d'invention C.E.A. n° 1.437.675 - F 25 K , P.V. n° 10864 du 26/3/1965.
- /52/- KLIPPING (G.) , VETTERKIND (D.), WALENTOWITZ (G.) .- An electrical temperature control for continuous flow cryostats between 4,2 and 293 °K .- Cryogenics, April 1965 pp. 76 - 80 .
- /53/- Par exemple DELOBEAU (F.) .- Echanges de chaleur .- Propagation de la chaleur .- Cours de physique générale C N A M .- Centre associé de Saclay .

3 - LE PRINCIPE DE L'UTILISATION DES SUPRACONDUCTEURS POUR STOCKER ET DECHARGER DE L'ENERGIE

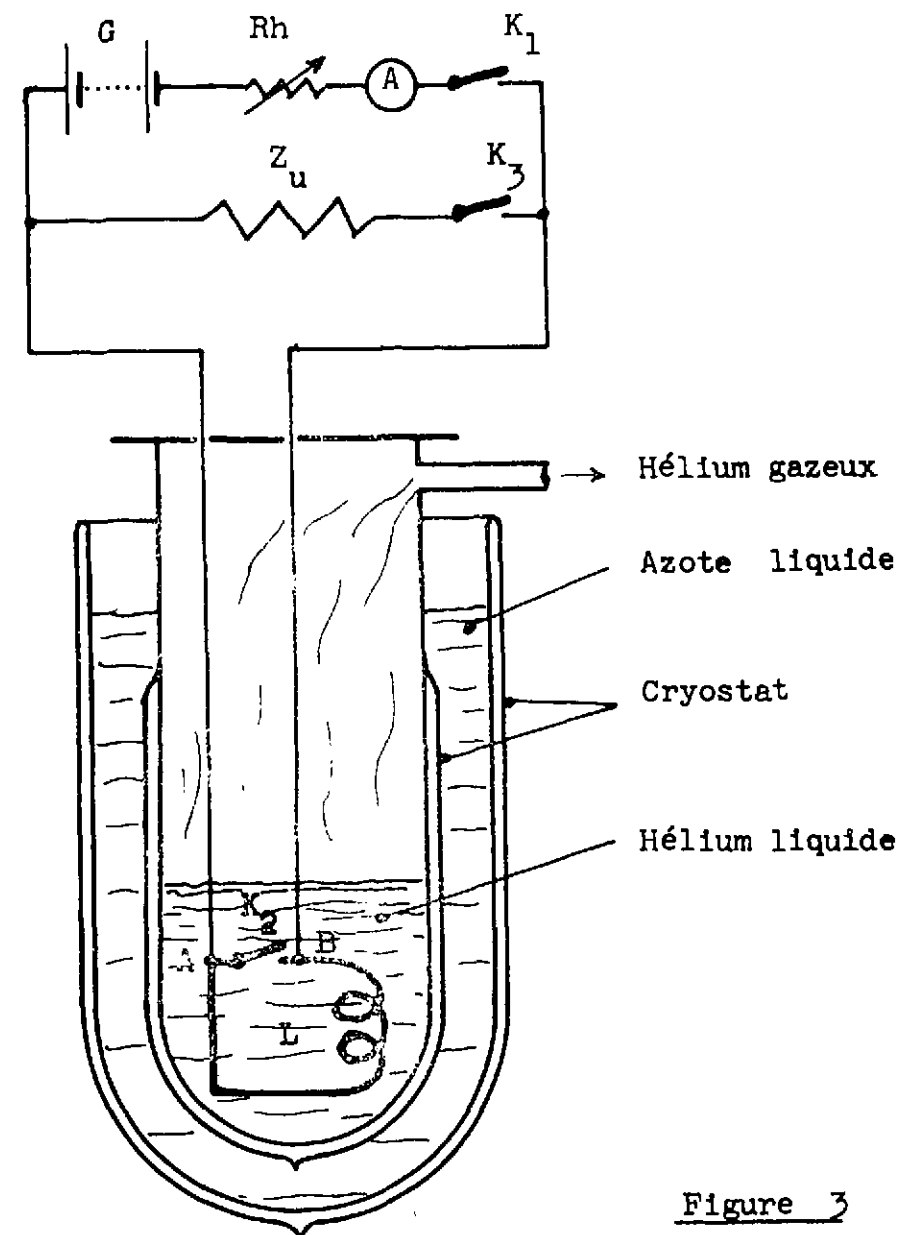


Figure 3

Légende

- G Générateur de courant
- Rh Rhéostat
- A Ampèremètre
- Z_u Impédance d'utilisation
- K₁, K₃ Interrupteurs
- K₂ Interrupteur supraconducteur

Un circuit supraconducteur de coefficient de self-induction L parcouru par un courant I emmagasine, de même que s'il était constitué par des conducteurs conventionnels, une énergie électromagnétique W qui a pour expression /54/ /55/ (§ 6 - 1) :

$$(1) \quad W = \frac{1}{2} L I^2$$

Nous verrons par contre dans ce qui suit quelles possibilités nouvelles apportent les supraconducteurs.

La figure 3 schématise un montage permettant à partir d'un générateur électrique G de stocker de l'énergie dans une self L puis de libérer cette énergie dans un circuit d'utilisation d'impédance Z_u. Seul le circuit A, K₂, B, L, A, peut être supraconducteur. Le principe des opérations est le suivant :

1°) La self L étant supraconductrice et les interrupteurs K₂ et K₃ étant ouverts, on ferme l'interrupteur K₁. Au moyen du générateur G de courant continu et du rhéostat Rh on augmente progressivement le courant dans la self L jusqu'à atteindre une valeur donnée I₀. Une énergie W₀ = $\frac{1}{2} L I_0^2$ se trouve alors emmagasinée dans la self L.

2°) On maintient constant le courant I₀. La différence de potentiel entre les points A et B aux bornes de la self a pour expression :

$$(2) \quad V = r I_0 + L \frac{d I_0}{dt}$$

Or : la self étant supraconductrice, sa résistance r est nulle ;
le courant I₀ étant maintenu constant le terme $\frac{d I_0}{dt}$ est nul.

La différence de potentiel V est donc nulle et les points A et B sont au même potentiel. On peut alors, sans changer le courant I_0 qui parcourt la self, relier A et B en fermant l'interrupteur K_2 .

3°) Cet interrupteur étant supraconducteur sa résistance est nulle. Si de plus son coefficient de self-induction est nul on pourra abaisser progressivement jusqu'à zéro le courant débité par le générateur G sans qu'apparaisse de différence de potentiel entre A et B. On débranchera alors le générateur G.

En écrivant que la différence de potentiel entre les points A et B aux bornes de la self reste nulle on obtient :

$$(3) \quad r I_0 + L \frac{d I_0}{dt} = 0$$

et comme la résistance r du circuit supraconducteur est nulle il reste :

$$(4) \quad L \frac{d I_0}{dt} = 0$$

d'où l'on déduit :

$$I_0 = C^{te}$$

c'est à dire que le courant I_0 initialement piégé dans la self n'a pas changé. L'énergie W_0 initiale reste piégée dans le circuit supraconducteur fermé sur lui même.

4°) Pour libérer cette énergie dans l'impédance d'utilisation Z_u on connectera cette impédance en fermant l'interrupteur K_3 puis on "ouvrira" l'interrupteur supraconducteur K_2 . Le courant piégé s'écoulera alors dans l'impédance Z_u où l'énergie correspondante se dissipera.

Nous allons dans ce qui suit examiner plus en détails les principaux problèmes relatifs à ces différentes opérations.

BIBLIOGRAPHIE

- /54/- SOLE (J.) .- Stockage d'énergie .- Possibilités de supraconducteurs en vue des décharges de grandes puissances .- Rapport C.E.A. R. 3243 - 1967.
- /55/- PROST (G.) , SOLE (J.) .- Libération rapide d'énergie stockée au moyen de supraconducteurs .- Rapport C.E.A. R. 3255 - 1967 .

4 - LA CHARGE DE L'ENERGIE

Cette charge peut être effectuée au moyen d'un générateur extérieur fournissant directement le courant continu nécessaire comme indiqué sur la figure 3. Ceci oblige à utiliser des connexions électriques.

On peut aussi, comme on va le voir, effectuer des transformations intermédiaires d'énergie et même supprimer toute connexion électrique matérielle avec le circuit de stockage d'énergie.

4-1 - Les connexions électriques :

Elles doivent être à la fois bonnes conductrices du courant électrique de façon à réduire l'effet Joule pendant la charge et mauvaises conductrices de la chaleur pour éviter d'apporter par conduction thermique trop d'énergie calorifique dans le cryostat /56/ /57/ .

Considérons une connexion de longueur l dont la section s (x) est une fonction de l'abscisse x et dont les extrémités sont respectivement aux températures T₁ du dispositif cryogénique et T₂ du milieu extérieur (Fig.4).

Négligeant les quantités de chaleur échangées par rayonnement et convection nous allons calculer successivement :

1°) L'Energie calorifique libérée par effet Joule w pendant la durée t₀ de la charge :

$$(5) \quad w = \int_0^{t_0} r_3 I^2(t) dt = \int_0^{t_0} \int_0^l \rho(T) \frac{dx}{s(x)} I^2(t) dt$$

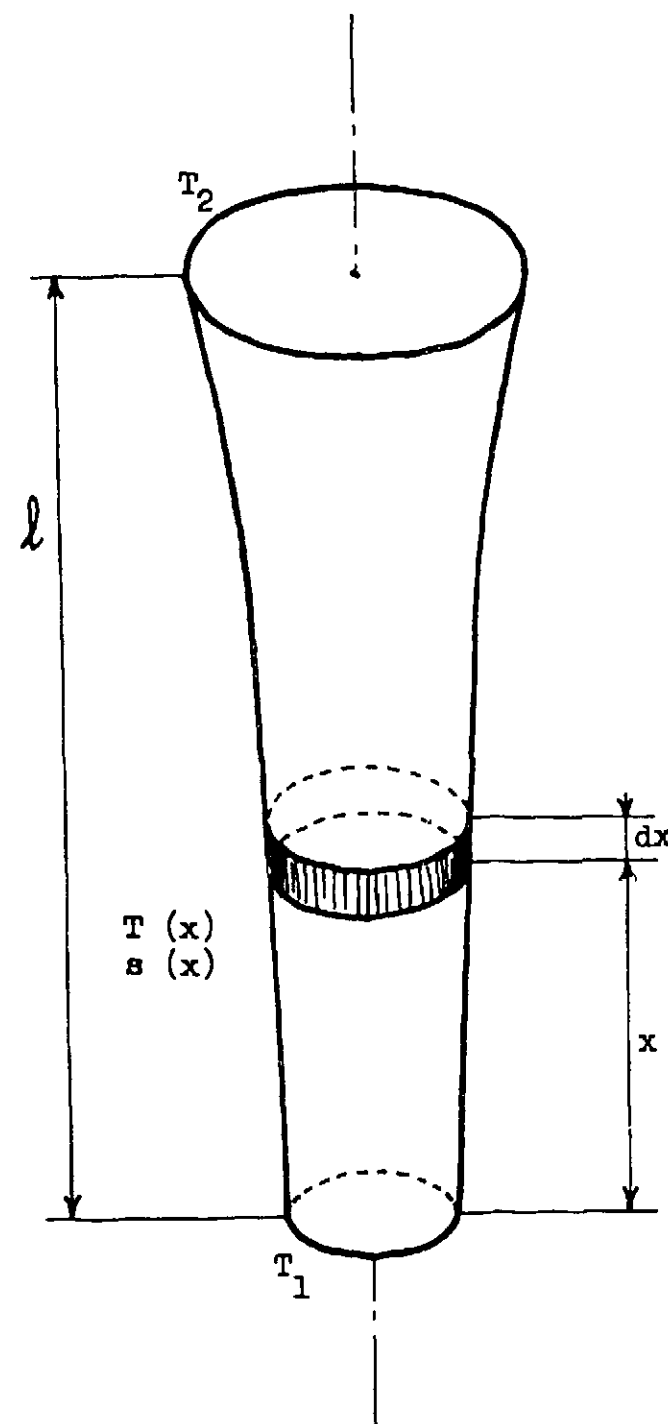


Figure 4

en désignant par :

r_3 la résistance totale de la connexion

$\rho(T)$ la résistivité électrique du matériau qui constitue la connexion (en fonction de la température T)

$I(t)$ le courant électrique.

2°) L'énergie calorifique apportée par conduction thermique w' pendant la durée totale τ_u du fonctionnement :

$$(6) \quad w' = \int_0^{\tau_u} \sigma(T) s(x) \frac{\partial T}{\partial x} dt$$

en désignant par $\sigma(T)$ la conductivité thermique du matériau qui constitue la connexion, en fonction de la température.

3°) L'énergie calorifique totale W :

$$(7) \quad W = w + w' = \int_0^{\tau_u} \int_0^l \rho(T) \frac{dx}{s(x)} I^2(t) dt + \int_0^{\tau_u} \sigma(T) s(x) \frac{\partial T}{\partial x} dt$$

Elle doit être rendue minimum. Or dans les expressions (5) et (6) :

- a) $s(x)$ intervient en sens inverse ;
- b) la longueur l de la connexion intervient en sens inverse (car plus l est élevée plus la valeur numérique de w est élevée et, T_1 et T_2 étant données, plus les valeurs de $\frac{\partial T}{\partial x}$ dans w' sont faibles.)
- c) pour un métal à une température donnée $\rho(T)$ et $\sigma(T)$ varient en sens inverse (en effet ces deux grandeurs sont liées par la loi de WIEDEMAN-FRANZ

$$\rho(T) \sigma(T) = 2 \left(\frac{k}{e} \right)^2 T$$

dans laquelle k est la Constante de BOLTZMAN et e la charge de l'électron).

A la limite il ne sera donc plus possible de diminuer w sans augmenter w' et réciproquement. "L'optimisation" des connexions correspond au meilleur compromis dans le choix de la nature du matériau, sa forme et ses dimensions, sa disposition et le gradient de température correspondant ; différents matériaux peuvent d'ailleurs être simultanément utilisés, de façon à rendre minimum la valeur de W donnée par l'expression (7). En fait pour relier la température à l'abscisse x et au temps t il faut tenir compte des énergies échangées par rayonnement et par convection. L'optimisation est donc multiparamétrique et difficile à déterminer.

De toutes façons la fonction $I^2(t)$ qui intervient dans l'expression de w prend des valeurs d'autant plus élevées que le courant maximum I_0 à établir est plus élevé. Pour éviter une augmentation excessive de w on est amené à adopter des valeurs d'autant plus élevées pour la section $s(x)$ qui intervient en dénominateur. Cela entraîne une augmentation de w' et aussi une augmentation de W .

Il en résulte que les connexions s'avèrent d'autant plus difficilement utilisables que l'intensité maximum I_0 du courant à transporter devient plus élevée. Avec les matériaux actuels "l'optimisation" de la relation (7) donne déjà des énergies calorifiques importantes dès que les courants atteignent plusieurs milliers d'ampères.

Si par contre les connexions ne sont pas parfaitement "optimisées" leurs possibilités deviennent vite très réduites. Nous allons le voir sur un exemple simple où la section s de la connexion est constante sur une longueur l' soumise à une différence de températures $T'_2 - T'_1$.

On suppose que la différence de températures $T'_2 - T'_1$ est suffisamment faible pour que l'on puisse considérer dans cet intervalle des valeurs moyennes ρ_m et σ_m pour ρ et σ .

Dans ce cas l'expression (7) devient :

$$(8) \quad W = w + w' = \rho_m \frac{l'}{s} \int_0^{\tau_c} I^2(t) dt + \sigma_m \frac{s}{l'} (T'_2 - T'_1) \tau_u$$

Sa dérivée première $\frac{dW}{d(\frac{l'}{s})}$ est nulle pour :

$$(9) \quad \frac{l'}{s} = \sqrt{\frac{\sigma_m}{\rho_m} (T'_2 - T'_1) \frac{\tau_u}{\int_0^{\tau_c} I^2(t) dt}}$$

Sa dérivée seconde $\frac{d^2 W}{d(\frac{l'}{s})^2}$ est alors positive. Par conséquent cette

valeur de $\frac{l'}{s}$ correspond bien à un minimum pour W . (D'ailleurs on pouvait voir sur (8) que pour $\frac{l'}{s} = 0$ on a $W = \infty$ et pour $\frac{l'}{s} = \infty$ on a $W = \infty$. Entre ces deux valeurs extrêmes de $\frac{l'}{s}$ la valeur de W passe donc par un minimum).

W vaut alors :

$$(10) \quad W_{\min} = 2 \sqrt{\rho_m \sigma_m (T'_2 - T'_1) \tau_u \int_0^{\tau_c} I^2(t) dt}$$

et dans ce cas on a $w = w'$.

Si la charge de l'énergie est effectuée à $\frac{dI}{dt}$ constant, on obtient en désignant par I_0 le courant maximum à charger :

$$(11) \quad \frac{dI}{dt} = \frac{I}{t} = \frac{I_0}{\tau_c}$$

d'où :

$$(12) \quad W_{\min} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_0 \sqrt{\rho_m \sigma_m (T'_2 - T'_1) \tau_u \tau_c}$$

Or $T'_2 - T'_1$ ainsi que τ_u et τ_c sont fixes et une fois que l'on a choisi le meilleur matériau, c'est à dire celui donnant au produit $\rho_m \sigma_m$ la valeur minimum, on voit dans cet exemple que le minimum de l'énergie calorifique $W_{\min}$ croît proportionnellement au courant à charger I_0 .

En fait on "optimisera" les valeurs de la section $s(x)$ en fonction de l'abscisse (relation (7)) ; dans certains cas on utilisera même différents matériaux. Dans tous les cas on récupérera pour refroidir les connexions l'énergie frigorifique encore contenue dans la vapeur d'hélium avant son évacuation du cryostat /58/.

Malgré toutes ces améliorations, dès qu'il s'agit d'introduire directement dans le cryostat des courants élevés, on est très vite limité par la quantité d'énergie calorifique apportée. On est alors amené à chercher d'autres solutions.

4-2 - Les dynamos et génératrices :

Il s'agit là en général de versions "cryogéniques" ou de versions "supraconductrices" des machines classiques connues sous le même nom (voir § 4-5).

Ces dynamos et génératrices /59/ à /62/, dont le circuit induit est en général supraconducteur, permettent de transformer une énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il est possible d'engendrer ainsi des courants intenses /60/ directement dans le circuit supraconducteur.

L'énergie mécanique peut être introduite dans le cryostat de différentes façons, par exemple :

- Au moyen d'un arbre mécanique. Celui-ci peut transmettre la puissance nécessaire sous un couple élevé et une faible vitesse de rotation, ou sous un couple de faible valeur et une grande vitesse de rotation. Ce dernier cas permet d'utiliser un arbre de plus faible section mais peut nécessiter par contre d'interposer, dans la région à basse température, un réducteur de vitesse /73/ évitant de soumettre les enroulements supraconducteurs à des régimes variables trop rapides /13/ ou de mettre l'hélium en mouvement à trop grande vitesse.

- soit au moyen d'un accouplement électromagnétique entre la région froide du cryostat et l'extérieur /73/.

- soit au moyen d'un "arbre électrique", simple ligne électrique permettant d'introduire la puissance nécessaire sous un courant plus faible et une tension plus élevée et d'alimenter un moteur, accouplé mécaniquement dans la région à basse température, à la génératrice supraconductrice /73/.

4-3 - Les pompes à flux :

Un exemple typique de pompe à flux est donné dans la référence /63/. En fait, malgré les apparences, il ne s'agit là que de différences constructives et opérationnelles relativement aux dynamos et génératrices dont nous venons de parler. D'ailleurs certaines pompes à flux ne s'en distinguent pas. Dans tous les cas le principe fondamental utilisé est le même. La dénomination "pompe à flux" ne résulte que d'une façon de voir à laquelle nous n'étions pas habitués avant d'utiliser les supraconducteurs (§ 4 - 5) .

On trouvera dans la littérature de nombreuses études sur ces dispositifs /59/ /60/ et /62/ à /66/. Ceux-ci permettent d'effectuer des cycles consécutifs. Chaque cycle permet d'introduire un flux magnétique (c'est-à-dire un courant) dans le circuit supraconducteur fermé. Ce circuit fermé n'est jamais interrompu au cours du fonctionnement. Cela permet de conserver le flux (donc le courant) qui a été piégé au cours des cycles antérieurs. Ces pompes peuvent d'ailleurs fonctionner aussi bien pour introduire progressivement un flux magnétique dans un circuit supraconducteur que pour l'en extraire.

On peut distinguer :

- Les pompes à flux mécaniques utilisant un aimant (aimant permanent, électro-aimant classique, "aimant" supraconducteur...) mis en mouvement mécaniquement. Cet aimant, lorsqu'il n'est pas supraconducteur, peut aussi être situé dans une zone non refroidie [67] à l'extérieur du cryostat ce qui élimine toute liaison mécanique entre les parties chaudes et les parties froides.
- Les pompes à flux statiques dans lesquelles le champ mobile (champ glissant, champ tournant...) au lieu d'être engendré par un déplacement mécanique est obtenu électriquement au moyen de courants variables parcourant les bobinages (ou inducteurs) fixes convenablement disposés dans l'espace. L'intensité maximum du courant inducteur peut-être réduite, la tension est alors plus élevée. On peut comme précédemment disposer les inducteurs à l'extérieur du cryostat pour éliminer toute liaison matérielle avec les parties froides. On peut au contraire utiliser aussi des inducteurs supraconducteurs.

Dans de nombreuses réalisations la configuration utilisée ne permet pas d'obtenir un bon couplage magnétique entre le circuit inducteur et le circuit induit ce qui entraîne nécessairement des pertes d'énergie importantes. Mais l'une des principales causes de pertes est commune aux pompes à flux et aux dynamos et génératrices dont on vient de parler (§ 4-2) lorsqu'on les utilise comme indiqué dans la littérature pour charger un circuit d'utilisation supraconducteur selfique. Cette cause de pertes a une origine fondamentale. Elle provient de la dégradation de l'énergie qui se produit lors de son transfert du circuit inducteur selfique dans le circuit d'utilisation selfique. Les résultats du calcul effectué au § 7-3-2 peuvent en particulier s'appliquer aux pompes à flux que nous venons de décrire.

Pour cette raison ces dispositifs, tels qu'ils sont actuellement utilisés, ne pourront pas convenir pour charger des énergies importantes dans des circuits d'utilisation selfiques, l'énergie libérée sous forme de chaleur étant alors en valeur absolue trop importante. Nous verrons au § 4-4 une façon d'éviter cette difficulté.

4 - 4- L'utilisation de transformateurs statiques :

On peut introduire l'énergie dans le cryostat au moyen de courants peu intenses. On les transforme en courants plus intenses à l'intérieur du cryostat au moyen de transformateurs. De tels transformateurs ont déjà été expérimentés [68]. Il est alors intéressant d'utiliser des transformateurs dont au moins le secondaire est supraconducteur et ne comportant pas de circuit magnétique. En effet les matériaux magnétiques actuellement connus, à cause de leur saturation à des inductions relativement basses, ne permettraient pas d'utiliser le champ critique très élevé des supraconducteurs [70]. En éliminant le circuit magnétique on élimine en même temps les pertes dont il serait le siège et on allège le montage. Par contre des précautions doivent être prises pour obtenir un bon couplage entre primaire et secondaire [70] [71].

Cependant, lorsque la self d'utilisation est importante, un tel transformateur ne permettrait pas l'introduction de courants très élevés [68] et [70]. On fait alors fonctionner le transformateur comme une pompe à flux en effectuant des cycles consécutifs au moyen de commutateurs [61] et [69]. On élimine la dégradation de l'énergie, dont il a été question au § 4-3, en effectuant uniquement des commutations permettant des transferts d'énergie réversibles [70] [70 bis] et [72]. (un tel processus peut être facilement étendu à certaines pompes à flux : par exemple la pompe mécanique à piston déjà mentionnée à la référence [63] et qui est aussi décrite à la référence [5].) Pour éviter toute perte d'énergie on utilise de plus des commutateurs qui sont entièrement supraconducteurs lorsqu'ils sont fermés.

Dans le cas du transformateur statique les pertes ne sont alors engendrées que par les connexions d'alimentation. Si l'on adopte un rapport de transformation convenable on peut rendre ces pertes négligeables en utilisant un courant d'alimentation suffisamment faible. Il faut leur ajouter l'énergie nécessaire à la commande des commutateurs.

4 - 5 - Remarque :

En fait il semble exister dans la littérature une certaine confusion entre dynamos et génératrices supraconductrices, pompes à flux, dispositifs utilisant des transformateurs statiques, des redresseurs ou des commutateurs. En fin de compte tous ces dispositifs sont des transformateurs d'énergie qui permettent d'introduire un flux magnétique ou un courant électrique (ce qui revient au même), c'est à dire une énergie électrique dans un circuit supraconducteur. Il serait certainement préférable de distinguer entre les dispositifs qui fournissent cette énergie électrique à partir d'une énergie mécanique et ceux qui la fournissent à partir d'une énergie électrique.

BIBLIOGRAPHIE

- /56/- FOURNET (G.), MAILFERT (A.) .- Détermination optimale des conducteurs électriques des cryostats. -
C.R. Acad. Sciences Paris t. 257 23 Déc. 1963 pp. 4153 à 4155 .
" " " " t. 258 6 Janv.1964 pp. 103 à 105 .
- /57/- MERCOUROFF (W.) .- Minimization of thermal losses due to electrical connections in cryostats .- Cryogenics ,sept 1963 , pp. 171 - 173 .
- /58/- WILLIAMS (J.E.C.) .- Counterflow current leads for cryogenic applications Cryogenics , Dec. 1963 , pp. 234 - 238 .
- /59/- VOLGER (J.) .- Dynamo pour la génération d'un courant permanent dans un circuit supraconducteur .- Revue Technique Philips, Tome 24 n°9, 1962/1963 , pp. 294 - 297 .
- /60/- VAN SUCHTELEN (J.) , VOLGER (J.), VAN HOUWELINGEN (D.) .- The principle and performance of a superconducting dynamo .- Cryogenics October 1965, pp. 256 - 266 .
- /61/- Generators supply hundreds of amps for cryogenic coils .- Electronic Design 27-4-1964 , pp. 28-29 .
- /62/- VAN HOUWELINGEN(D.), ADMIRAAL (P.S.), VAN SUCHTELEN (J.) .- A superconducting d.c. dynamo driven by a rotary magnetic field .- Physics Letters.- Vol.8 n^{ber} 5, March 1964 , pp. 310 - 311 .
- /63/- HILDEBRANDT (A.F.), ELLEMAN (D.D.), WHITMORE (F.C.), SIMPKINS (R.) .- Some experimental consequences of flux conservation within multiply - connected superconductors.- Journal of Applied Physics.- Vol. 33 n^{ber} 7 July 1962 , pp. 2375 - 2377 .

- ∠64/- ATHERTON (D.L.) .- Superconducting d.c. generators and motors .- I.E.E. spectrum .- Dec. 1964 , pp. 67 - 71 .
- ∠65/- VAN BEELEN (H.), ARNOLD (A.J.P.T.) .- A flux pump for the generation of high persistent currents in a superconducting foil magnet .- Physics Letters, 4, 1963 , p.310 .
- ∠66/- CORSAN (J.M.) , COLES (G.N.) , GOLDSMID (H.J.) .- High magnetic fields by means of superconductors .- British Journal of Applied Physics . Vol 15, n°11, 1964 , pp. 1383 - 1390
- ∠67/- N.V. PHILIP'S GLOCILAMPENFABRIEKEN (Pays-Bas) .- Dispositif générateur de courant dans un circuit supraconducteur .- Brevet d'invention n° 1.370.941 - H 01 d - H 02 k , 12 Septembre 1963
- ∠68/- Mc FERRAN (J.B.) .- The direct current transformer .- Advances in cryogenic engineering . Vol 6 , 1961 , pp. 136 - 142 .
- ∠69/- BUCHHOLD (T.A.) .- Cryogenic flux pump switches high currents .- Electronics, March 1964 , pp. 61 - 63 .
- ∠70/- SOLE (J.) .- Théorie, analyse et applications du fonctionnement du transformateur supraconducteur alimentant en courant continu un circuit de charge supraconducteur non dissipatif. - Rapport C.E.A. - R 3242 (1967).
- ∠70bis/- SOLE (J.) .- Travaux en cours .
- ∠71/- Nous faisons réaliser actuellement un tel transformateur par la C S F au moyen d'enroulements enchevêtrés constitués à partir de rubans de Nb₃ Sn stabilisés.
- ∠72/-- DESCHANELS (J.L.) .- Fonctionnement du transformateur à courant continu utilisé en "pompe à flux" .- Rapport C.E.A. .- R 3249 , 1967.
- ∠73/- A notre connaissance de tels perfectionnements n'ont encore jamais été signalés dans la littérature.

5 - LE PIEGEAGE DE L'ENERGIE

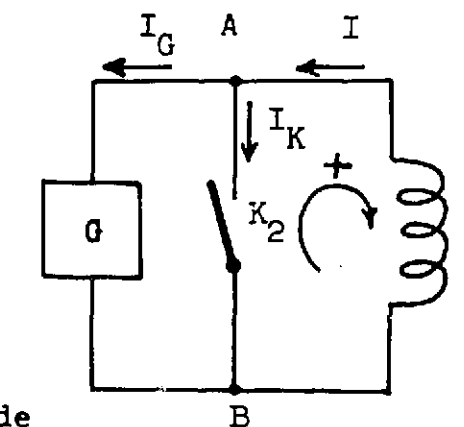
Selon le procédé de charge que l'on a adopté on se trouve dans des conditions différentes. Nous allons examiner les différents cas.

5 - 1 - La charge a été effectuée au moyen d'un générateur extérieur :

Le circuit supraconducteur se trouve ouvert, il faut tout d'abord le fermer. Pour cela on utilise un "interrupteur" monté à ses bornes. Cet interrupteur doit être supraconducteur lorsqu'il est fermé si l'on veut éviter qu'il dissipe de l'énergie après sa fermeture. De même ses jonctions (si elles existent) au circuit supraconducteur doivent être supraconductrices.

Une fois l'interrupteur fermé on peut ramener à zéro le courant débité par le générateur (§ 3 - 3°). Nous allons voir qu'il faut cependant redescendre ce courant très progressivement car si à l'instant où l'on ferme l'interrupteur le courant qui le parcourt est nul (la différence de potentiel à ses bornes étant nulle), ce courant monte progressivement jusqu'à la valeur du courant stocké à mesure que le courant débité par le générateur est ramené à zéro.

Figure 5



Légende

- I_G = courant débité par le générateur
 I_K = " traversant l'interrupteur K_2
 I = " " la self de stockage

En effet considérons le schéma de la Figure 5 (qui correspond au montage de la figure 3) : les équations de Kirchhoff appliquées à ce circuit donnant :

$$(13) \quad \text{noeud A :} \quad I = I_G + I_K$$

(les sens positifs étant ceux indiqués sur la Figure 5)

$$(14) \quad \text{et} \quad \frac{L}{dt} \frac{dI}{dt} = 0$$

(car l'interrupteur supraconducteur K_2 ne présente ni self ni résistance entre A et B)

De (14) on déduit :

$$(15) \quad I = C^{te} = I_0$$

I_0 étant la valeur du courant initialement piégé dans la self lors de la fermeture de K_2

De (13) on déduit :

$$(16) \quad I_0 = I_G + I_K$$

Avec les conventions de signes de la figure 5 on a :

$$\text{à l'instant initial} \quad I_G = I_0$$

$$\text{d'où il résulte} \quad I_K = 0$$

$$\text{à l'instant final} \quad I_G = 0$$

$$\text{d'où il résulte} \quad I_K = I_0$$

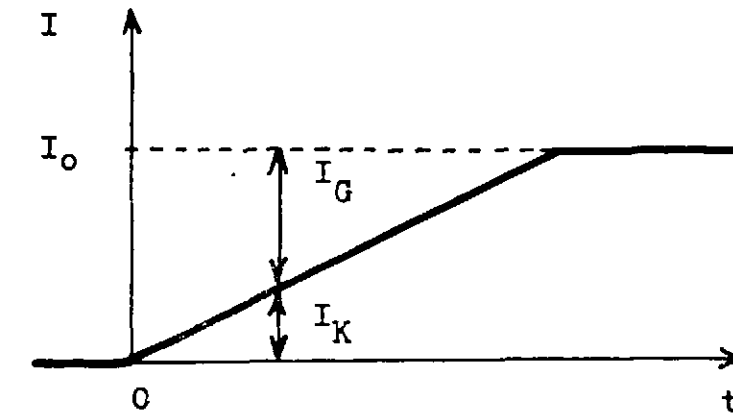


Figure 6

Le courant I_K dans l'interrupteur passe donc de la valeur zéro à la valeur I_0 , ce qui nécessite de baisser lentement le courant débité par le générateur de façon à éviter des valeurs de $\frac{dI_K}{dt}$ trop élevées dans le supraconducteur constituant l'interrupteur. Par exemple si l'on opère à $\frac{dI_K}{dt}$ constant on obtient un diagramme des courants en fonction du temps t tel que celui représenté par la figure 6. En fait la loi optimum de variation sera à déterminer dans chaque cas.

Si l'interrupteur possède un coefficient de self-induction L_2 non négligeable, l'équation de Kirchhoff (14) relative à la maille constituée par cet interrupteur et la self de stockage devient :

$$(17) \quad L \frac{dI}{dt} + L_2 \frac{dI_K}{dt} = 0$$

c'est à dire en éliminant I_K au moyen de (13) :

$$(18) \quad \frac{dI}{dt} = - \frac{L_2}{L + L_2} \frac{dI_G}{dt}$$

ou encore :

$$(19) \quad dI = - \frac{L_2}{L + L_2} dI_G$$

Donc lors de la descente du courant débité par le générateur l'intensité du courant dans la self de stockage va diminuer proportionnellement au rapport $\frac{L_2}{L + L_2}$. Pour $L_2 = 0$ on retrouve que le courant dans la self de stockage reste constant.

On peut toutefois utiliser un interrupteur qui n'est pas supraconducteur. Dans ce cas pour que la dissipation d'énergie correspondante ne soit pas trop gênante il faut que la constante de temps $\frac{L}{R_0}$ déterminée par la self L de stockage et la résistance $R_2 = R_0$ de l'interrupteur fermé soit suffisamment grande devant la durée du stockage de l'énergie (§ 7 - 5).

5 - 2 - La Charge a été effectuée au moyen d'un générateur intérieur :

Que ce générateur soit une dynamo, une génératrice, une pompe à flux ou un transformateur statique :

- si son circuit secondaire est supraconducteur le circuit de stockage d'énergie se trouve toujours fermé par ce circuit supraconducteur ;
- si son circuit secondaire n'est pas supraconducteur on est ramené comme précédemment à l'introduction d'une constante de temps dissipative dans le circuit de stockage. On peut toujours adjoindre un interrupteur supraconducteur qui à l'arrêt du générateur referme la self de stockage d'énergie sur elle-même.

6 - LE STOCKAGE DE L'ENERGIE

Si le circuit est entièrement supraconducteur on peut ainsi conserver indéfiniment l'énergie piégée. En fait lorsque le supraconducteur est un matériau de 2ème espèce et lorsqu'on l'utilise au voisinage de ses caractéristiques critiques on peut observer [36] une légère décroissance du courant piégé en fonction du temps.

6-1 - Expression de l'énergie stockée :

L'énergie stockée a pour expression :

$$(20) \quad W = \iiint_V \frac{B^2}{2\mu_r\mu_0} dv \text{ qui peut encore s'écrire } W = \frac{1}{2} L I^2$$

dv est l'élément de volume courant de perméabilité relative μ_r où règne l'induction B créée par le circuit supraconducteur, v représente tout l'espace embrassé par l'induction magnétique, μ_0 la perméabilité absolue du vide.

La deuxième expression a déjà été donnée formule (1). Elle revient à négliger l'énergie piégée dans le supraconducteur lui même. Cette énergie piégée est toujours négligeable dans le cas des circuits de stockage d'énergie où le volume occupé par le supraconducteur est faible devant le volume de l'espace embrassé par l'induction magnétique. (Si l'on utilisait des supraconducteurs de première espèce (§ 1) cette énergie piégée dans le matériau à l'état supraconducteur serait rigoureusement nulle puisqu'on a vu au § 1 que l'induction dans le matériau était nulle. En fait les matériaux utilisés seront des supraconducteurs de deuxième espèce, à cause de leurs champs critiques beaucoup plus élevés, mais l'énergie piégée dans le matériau restera très faible dans nos applications).

Par contre l'énergie stockée W peut-être comprise entre zéro et une limite supérieure très élevée difficile à estimer à l'heure actuelle.

6-2- Choix de L et de I :

L'énergie W étant fixée nous allons voir que l'on peut choisir arbitrairement soit la valeur de la self L soit celle du courant I. Une fois qu'on a choisi la forme géométrique du circuit de stockage ses dimensions extérieures ne dépendent alors que de l'énergie stockée.

En effet, un circuit étant supposé réalisé, il en résulte en chaque domaine élémentaire de l'espace M (figure 7) une certaine valeur du vecteur induction $\vec{B}$, c'est à dire, d'après la relation (20), une certaine valeur de l'énergie totale stockée. Considérons un contour fermé (C) quelconque entourant le circuit. D'après les équations de Maxwell, qui régissent les lois de l'électromagnétisme, la circulation du vecteur $\vec{B}$ le long du contour (C) est égale au flux du courant I à travers toute surface (S) s'appuyant sur ce contour. Ce flux est le même si, sans modifier la distribution spatiale du courant, on suppose le courant total décomposé en N filets d'intensités respectives $\frac{I}{N}$ indépendamment du fait que ces filets parcourent ou non un même conducteur ; l'induction $\vec{B}$ en un point quelconque de l'espace ne change pas et il en est de même d'après (20) de l'énergie stockée.

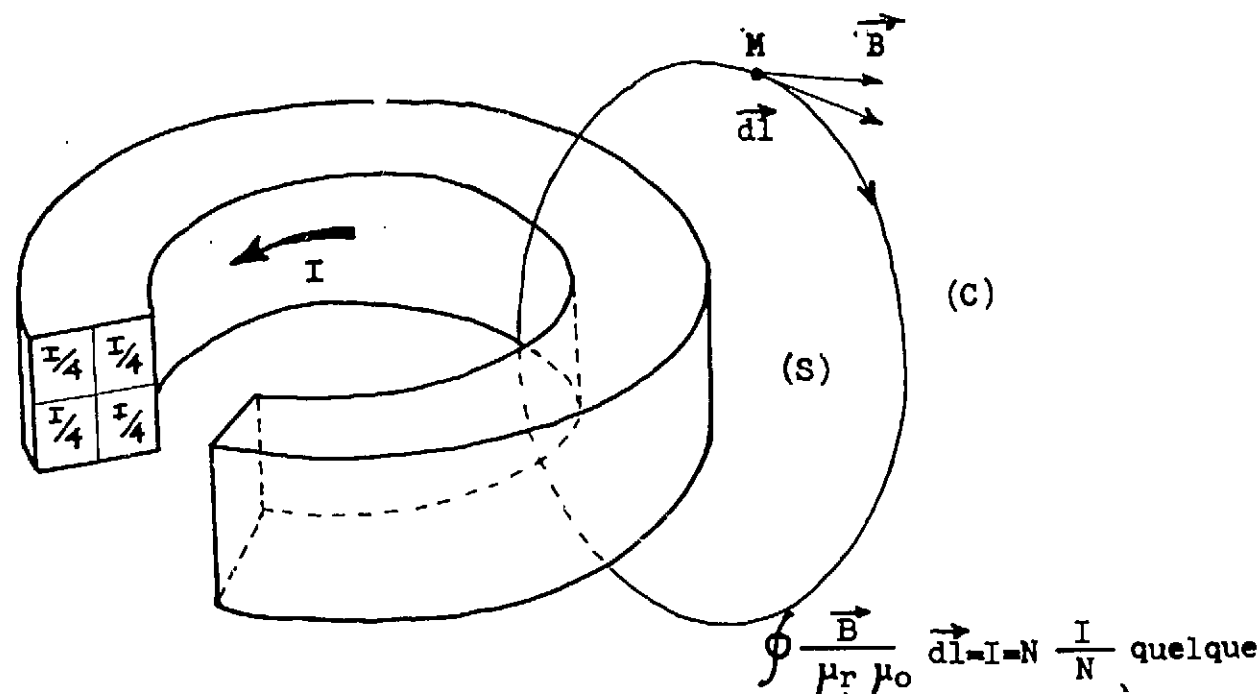


Figure 7

Donc $\vec{B}$ est indépendant de N

Il s'en suit que si un circuit de self L parcouru par un courant I stocke une énergie dont la valeur est donnée par la seconde expression (20), un circuit constitué par N fois plus de spires parcourues chacune par un courant N fois plus faible mais possédant la même forme géométrique et les mêmes dimensions extérieures, stockera la même énergie. On aura donc en désignant par $\mathcal{L}$ la self de ce nouveau circuit :

$$(21) \quad W = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \mathcal{L} \left(\frac{I}{N} \right)^2$$

c'est à dire :

$$(22) \quad \mathcal{L} = N^2 L$$

Par conséquent une énergie W étant fixée, et la forme du circuit de stockage ayant été choisie, ni les dimensions extérieures de ce circuit ni l'induction produite ne dépendent de la valeur de la self ou du courant de stockage que l'on a choisi. On peut donc choisir arbitrairement soit L, soit I.

6-3- Stabilité du circuit :

Un circuit emmagasinant des densités d'énergie importantes deviendrait d'autant plus dangereux qu'il serait moins stable.

Tous les procédés, utilisés couramment pour stabiliser les bobinages de champs magnétiques, qui consistent à court-circuiter des spires ou des tronçons du bobinage sont à éliminer (§ 7-6) . Il reste la ressource de réaliser la self de stockage directement à partir de matériaux "stabilisés" tels que ceux que l'on trouve actuellement dans le commerce (câbles ou rubans supraconducteurs gainés ou doublés de conducteurs) . Par contre l'interrupteur (§ 7-5) ne peut pas être réalisé avec un tel matériau, mais on peut toujours, pendant la durée du piégeage, agir sur sa température (§7-5-1) /55/ ou bien le shunter par exemple au moyen d'un interrupteur mécanique supraconducteur (§ 7-5-2) qui peut être lui même stabilisé.

Cependant les résultats de nos travaux montrent (§ 7-5-1 - interrupteur confondu) qu'il y a des avantages à faire fonctionner le circuit de stockage lui-même comme son propre interrupteur. Dans ce cas les procédés actuels de stabilisation thermique sont encore utilisables dans la mesure où l'on ne shunte électriquement ni le bobinage ni le supraconducteur qui le constitue. On utilise alors comme isolants électriques des matériaux bons conducteurs de la chaleur à la température envisagée. Par contre les procédés actuels de stabilisation électrique ne sont plus utilisables (§ 7-6). On est alors conduit à réaliser d'autres types de bobinages.

Dans les bobinages classiques les spires sont connectées, entre elles, en série c'est à dire que le courant les parcourt successivement les unes après les autres. La probabilité pour que ce courant rencontre un défaut sur son parcours est d'autant plus grande que le nombre de spires est plus important. D'autre part, d'après § 6-2, pour une géométrie et une énergie stockée donnée, la section utile du supraconducteur qui constitue chaque spire est d'autant plus réduite que le nombre de spires est plus important. Or si un défaut apparaît dans le supraconducteur ses dimensions géométriques sont d'autant moins négligeables que la section utilisée pour le passage du courant est plus faible. Dans ces conditions il peut en résulter localement une transition du supraconducteur dans toute sa section utile entraînant dans la région correspondante la libération de toute l'énergie stockée dans le circuit.

Une solution que nous avons imaginée [74/ consiste alors, pour la même énergie stockée (§ 6-2) à diminuer le nombre de spires et par conséquent à augmenter la section du supraconducteur qui les constitue (c'est à dire à augmenter la valeur du courant utilisé). L'optimum est atteint à la limite lorsque le bobinage est constitué par une spire unique. On peut alors le réaliser au moyen d'un supraconducteur massif constituant une spire fermée. En fait pour mieux "figer" dans l'espace et dans le temps la répartition du courant dans le matériau, et éviter ainsi des instabilités qui pourraient

apparaître dans cette distribution, on subdivise la spire massive unique fermée sur elle-même en un grand nombre de spires fermées chacune sur elle-même et conductivement indépendantes entre elles. Le circuit est alors constitué par des spires fermées parcourues par des courants en parallèle. Il peut encore être constitué par des feuilles ou des couches fermées chacune sur elle-même [74 Bis/ ou encore par des anneaux, chacun étant fermé sur lui-même. Chacune des couches en question peut d'ailleurs être constituée par un grand nombre d'anneaux conductivement indépendants. On peut réaliser de tels circuits avec des matériaux déposés en couches successives, chaque couche étant constituée par des anneaux indépendants, chaque anneau étant fermé sur lui-même. On peut d'une façon plus générale employer un matériau massif présentant des anisotropies dans ses propriétés supraconductrices de telle façon que les lignes de courant ne puissent pas se déplacer perpendiculairement à la direction de propagation du courant.

Ces montages " massifs " permettent alors, si leur géométrie est convenable , d'obtenir que le matériau supraconducteur utilisé conserve des propriétés voisines de celles qu'il présente sous la forme "d'échantillons courts". Il en résulte une bien meilleure utilisation du matériau. De plus la section de passage du courant étant alors importante, ce courant n'est plus interrompu par la présence ou l'apparition d'un défaut local dans le supraconducteur comme cela se produisait, avec des conséquences catastrophiques, dans le cas des bobinages constitués à partir d'un câble cu, à fortiori, à partir d'un simple fil.

De tels procédés permettent aussi d'obtenir dans le circuit de stockage des distributions plus uniformes du champ magnétique et d'utiliser des matériaux successifs différents suivant les conditions magnétiques dans lesquelles les placent leurs positions géométriques respectives dans le circuit. Dans un bobinage classique où c'est le même fil qui constitue successivement les différentes spires et les différentes couches on n'a pas d'aussi grandes possibilités. On trouve par exemple dans la littérature la description de bobinages, destinés à produire des champs magnétiques intenses, qui ont été effectués en disposant concentriquement plusieurs bobinages indépendants réalisés avec des fils ou des câbles de natures différentes [75/ . C'est une première approximation.

Tout cela conduit à stocker l'énergie donnée sous un courant élevé dans une self de faible valeur (§ 6-2). Ceci n'empêche ni de charger l'énergie dans le circuit (§ 4-2, 4-3, 4-4) = /74/, une partie au moins du circuit de stockage constituant alors l'induit du dispositif de charge de l'énergie (par exemple /74 Bis/), ni de libérer l'énergie sous un courant différent de celui sous lequel elle est stockée, ni d'adapter correctement l'impédance de l'utilisation (§ 7-2).

6-4 - Comparaison aux conducteurs normaux :

Dans les bobinages conventionnels destinés à fonctionner en régime permanent à la température ambiante on est limité par l'effet Joule à des densités de courant de l'ordre de 100 à 500 A / cm². Par exemple un bobinage de cuivre /76/ produisant une induction de 88 kG dans un volume utile de 0,2 litre dissipe par effet Joule et par seconde une énergie de 1,5 mégajoule (alors que l'énergie magnétique stockée dans ce volume utile est dans ces conditions inférieure à 10 kilojoules). Un tel bobinage nécessite un circuit d'eau de refroidissement débitant 5000 litres/minute.

On pourrait chercher à stocker des énergies plus élevées sans augmenter l'effet Joule. Pour cela il faudrait abaisser la température des conducteurs de façon à diminuer leur résistivité /1/. Dans ces conditions, même si l'on divisait cette dernière par 1000, l'effet Joule, qui est proportionnel au carré du courant, ne permettrait d'augmenter le courant que d'un facteur $\sqrt{1000} = 33$. Mais alors cette même puissance calorifique dissipée devrait être évacuée à très basse température ce qui dans cet exemple ne serait pratiquement pas réalisable.

Par contre on peut admettre à l'heure actuelle dans des supraconducteurs de 2ème espèce des densités de courant qui peuvent dépasser 10⁵ à 10⁷ A / cm² /77/ /78/ /79/ /10/ à 4,2° K en présence de champs magnétiques élevés. Dans ces conditions, si l'on ne dépassait pas les caractéristiques critiques du matériau, un circuit de dimensions données réalisé avec

des supraconducteurs actuels pourrait emmagasiner jusqu'à $\frac{(10^7)^2}{(10^2)^2} 10^{10}$ fois plus d'énergie que le même circuit conventionnel. Le refroidissement du circuit supraconducteur est relativement facile vu ses faibles dimensions relatives et l'absence d'effet Joule, aux "sauts du flux" /80/ /81/ /82/ et à la "dérive" près /36/.

5- Comparaison aux condensateurs :

Les meilleurs condensateurs actuels permettent de stocker dans leur diélectrique des densités d'énergie de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de joules par litre /54/ /83/ alors que la relation (20) montre que les supraconducteurs permettent déjà, par exemple à 100 kG, de stocker des énergies de 40 kilojoules par litre dans le diélectrique. Ce dernier ne coûte rien, il est constitué par le milieu ambiant puisqu'à ces inductions tout noyau magnétique doit être éliminé à cause de sa saturation.

L'énergie stockée dans les conditions optima par un condensateur est proportionnelle au volume total du diélectrique, ce qui signifie que le volume et, par suite, le poids et le prix d'une batterie de condensateurs sont sensiblement proportionnels à l'énergie stockée. Avec les supraconducteurs il en est tout autrement. A induction magnétique constante sur le supraconducteur, l'énergie stockée augmente plus vite que le volume ou le poids de matériau utilisé (§ 6-6). Il en résulte que le prix du joule stocké est d'autant moins élevé que l'énergie totale stockée est plus grande /54/. Ce fait donne aux supraconducteurs d'autant plus d'intérêt que l'énergie à stocker est plus élevée.

Nous verrons aussi, lors de la décharge sur une impédance dissipative (§ 7-3-1), une autre propriété intéressante des circuits supraconducteurs : ils se comportent comme des "générateurs de courant" alors que les condensateurs se comportent comme des "générateurs de tension". Dans le cas des circuits supraconducteurs c'est le courant initial qui est fixé avant la décharge ; dans le cas des condensateurs c'est la tension.

Nous verrons encore que l'on peut attendre des progrès considérables directement liés au matériau supraconducteur (§10) lui-même.

6-6- "Optimisation" du circuit de stockage :

Le circuit doit être optimisé en fonction du but à atteindre. L'énergie à emmagasiner étant donnée, ce but peut être par exemple l'obtention d'un prix minimum, d'un poids minimum, ou d'un volume minimum, etc ... Le circuit de stockage optimum dans ces conditions n'est pas celui qui permet d'atteindre l'induction maximum dans le diélectrique. Le problème est totalement différent de celui qui consiste à chercher, avec le matériau donné, à engendrer le champ magnétique maximum.

Les supraconducteurs étant à l'heure actuelle relativement onéreux et permettant par contre d'atteindre des densités d'énergie très supérieures à celles que permettent les condensateurs, le problème d'optimisation qui se pose souvent à l'heure actuelle est d'aboutir à un prix minimum /54/. Cela revient sensiblement à vouloir stocker l'énergie donnée en utilisant la quantité minimum de supraconducteurs.

En examinant trop rapidement la formule (20) on pourrait penser que cette condition sera satisfaite si l'on réalise les valeurs de B maxima. En fait il n'en est rien. C'est l'intégrale de B^2 , s'étendant à tout l'espace embrassé par l'induction magnétique, qui doit être rendue maximum. Le calcul s'effectue en cherchant le maximum de cette intégrale, à quantité de supraconducteur constante, en tenant compte du fait qu'en tout point du supraconducteur le champ doit rester inférieur au champ critique, lui-même lié à la valeur du courant /54/. Le calcul permet de préciser la forme et les dimensions du circuit. A l'intérieur même de cette "forme" et de ces "dimensions" on peut mettre en place, comme on l'a vu (§ 6 -2), un bobinage dont le coefficient de self-induction peut avoir une valeur quelconque entre de très vastes limites.

En définitive la forme et les dimensions auxquelles on aboutit sont en général moins "ramassées" que celles nécessaires pour obtenir des champs magnétiques intenses. De même les champs sous lesquels on est ainsi amené à utiliser un matériau donné sont en général inférieurs à ceux auxquels on est conduit pour la production des champs magnétiques intenses, les courants étant au contraire plus élevés /54/.

D'autres conditions peuvent encore s'introduire dans "l'optimisation" des bobinages, par exemple des conditions de résistance mécanique ..., ou encore le fait que l'on cherche à réaliser un bobinage qui ne doit pas rayonner électromagnétiquement à l'extérieur de lui-même, etc ...

Dans ce dernier cas par exemple, si l'on utilise des géométries toriques /54/ "l'optimisation" conduit à une expression de la densité d'énergie stockée par unité de masse de matériau supraconducteur de la forme :

$$(23) \quad \frac{W}{m} = k \delta_c \sqrt[3]{B_c} \sqrt[3]{W}$$

où :
W : est l'énergie totale stockée,
m : la masse de supraconducteur utilisé,
k : un coefficient qui dépend de la forme du tore,
 δ_c et B_c : respectivement la densité de courant critique et l'induction critique du matériau utilisé, ces deux valeurs correspondant au même point de fonctionnement.

On en déduit que la densité d'énergie maximum stockée croît comme la racine cubique de l'énergie totale stockée W.

En résolvant en W on obtient l'énergie maximum totale stockée :

$$(24) \quad W = k^{3/2} m^{3/2} \delta_c^{3/2} \sqrt[2]{B_c}$$

et on voit bien qu'elle n'est pas proportionnelle à B_c^2 (comme un examen trop rapide de la formule (20) aurait pu à priori le laisser supposer).

Dans ce cas pour une masse de supraconducteur m donnée l'énergie stockée W est donc maximum lorsque le produit $\oint_c^{3/2} \sqrt{B_c}$, ou ce qui revient au même $\oint_c \sqrt[3]{B_c}$, est maximum.

(Pour examiner un autre aspect de cette question on pourra aussi se reporter au § 7-5-1-3-4.)

6-7- Quelles énergies pourra-t-on stocker ?

On a vu que :

- actuellement l'énergie stockée au moyen de supraconducteurs pourrait atteindre dans certains cas 10^{10} fois l'énergie que l'on stockerait dans le même circuit conventionnel (§ 6-4) ;
- à 100 kG on obtient dans le diélectrique une densité d'énergie de 40 kJ / litre, cette densité d'énergie croissant comme le carré de l'induction B ;
- dans le cas d'un circuit optimisé (24), l'énergie totale stockée croît comme la puissance $3/2$ de la masse de supraconducteur utilisée, ceci permettant d'atteindre des densités d'énergie, rapportées à la masse totale de supraconducteur, comparables par exemple à celles obtenues dans les explosifs.

Des limitations pourront intervenir, imposées par le volume, le poids ou le prix du dispositif. Mais volume, poids et prix auront tendance à diminuer à mesure que progresseront les matériaux et qu'ils seront mieux adaptés au problème du stockage (§ 10). La réalisation de dispositifs massifs simplifiera considérablement la fabrication, supprimant la nécessité d'élaborer initialement un fil, un câble ou un ruban puis de le bobiner, etc... De même des matériaux qui jusqu'à maintenant n'étaient pas utilisés à cause des difficultés que soulevait l'élaboration de fils ou de ruban pourront être utilisés.

On peut encore prévoir que lorsque les supraconducteurs seront produits industriellement à plus grande échelle leur prix de revient baissera.

Les problèmes d'efforts mécaniques sur les circuits seront à résoudre principalement aux champs élevés puisque la pression magnétique p augmente comme le carré de l'induction B

$$(25) \quad p = \frac{B^2}{2\mu_r\mu_0}$$

S'il est possible de résoudre ces problèmes et d'utiliser par exemple des matériaux supraconducteurs fonctionnant à des champs critiques très élevés tels que ceux signalés dans la littérature [85] sous le nom de matériaux "à champs négatifs", on obtiendra alors dans le diélectrique des densités d'énergie énormes. Par exemple à 10^6 G on obtient 4 MJ/litre dans le diélectrique, c'est à dire une densité d'énergie comparable à celle contenue dans les explosifs. La densité d'énergie stockée rapportée à la masse de supraconducteur utilisée pourrait être encore beaucoup plus élevée.

BIBLIOGRAPHIE

- ∠74/- Demandes de brevets d'inventions en cours.
- ∠74/ Bis- SOLE (J.) .- Dispositif accumulateur électromagnétique .- Demande de brevet d'invention déposée par le C.E.A. n° P.V. 70 148 du 20 Juillet 1966.
- ∠75/- COFFEY (H.T.), HULM (J.K.), REYNOLDS (W.T.), FOSC (D.K.), SPAN (R.E.) .- A protected 100 kG superconducting magnet .- Journal of Applied Physics.- Vol. 36 n° 1 January 1965 , pp. 128 - 136 .
- ∠76/- KUNZLER (J.F.) .- Superconductivity in high magnetic fields at high current densities .- Review of modern physics. Vol. 33 n° 4 , Oct. 1961, p.509 .
- ∠77/- MONTGOMERY (D.B.) .- Measurements on niobium - tin samples in 200 kG continuous fields .- Applied Physics Letters . - Vol. 6 n°6, March 15 1965 , pp. 108 - 111 .
- ∠78/- MARTIN (D.L.), BENZ (M.G.), BRUCH (C.A.), ROSNER (C.H.) .- A 101,000 gauss niobium-tin superconducting solenoid .- Cryogenics September 1963 pp. 161 - 166 .
- ∠79/- BERLINCOUNT (T.G.), HAKE (R.R.), LESLIE (D.H.) .- Superconductivity at high magnetic fields and current densities in some Nb - Zr alloys.- Physical Review Letters . Vol. 6, N°12, June 15, 1961 pp. 671 - 674.
- ∠80/- IWASA (Y.), BRUCE MONTGOMERY (D.) .- Flux creep as a dominant source of degradation in superconducting solenoids. Applied Physics letters , Vol. 7 n° 9 , 1 Nov. 1965 , pp. 231 - 233 .

- ∠81/- ROSNER (C.H.) .- Flux jumping behavior of some niobium-tin solenoids.- Journal of Applied Physics. Vol. 36, n° 3 , March 1965, pp. 1175 - 1176 .
- ∠82/- LUBELL (M.S.), MALLICK (G.T.) .- Training and flux jumping in superconducting solenoids of Nb Zr and Nb Ti .- Applied Physics Letters. Vol.4 n° 12, 1964 , p.206 .
- ∠83/- WIEDERHOLD (P.R.) .- Energy storage for high-power discharges .- Astronautics and Aerospace Engineering .- May 1963 , pp. 104 - 106 .
- ∠84/- HASSEL (W.F.) .- Energy storage in superconducting magnetic coils.- A R S Space Powers Systems Conf., Santa Monica, Calif, September 25-28 1962 , Power systems for space flight , p. 461 .
- ∠85/- Dispositifs supraconducteurs.- Western Electric Company Incorporated U.S.A. Brevet d'invention N° 1.369.163 - H 01 d (11/9/1963) .

7- LA DECHARGE DE L'ENERGIE :

Le circuit d'utilisation étant donné il faut y transférer l'énergie stockée. On peut procéder de différentes façons :

7- 1- Connexion directe :

Comme on l'a vu figure 3 l'impédance d'utilisation Z_u peut être directement connectée aux bornes A et B de la self de stockage L (fig.8).

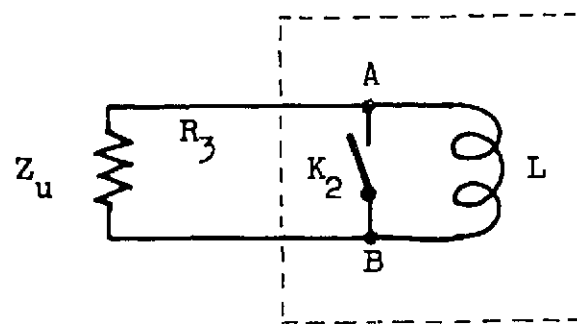


Figure 8

Le problème que posent les connexions entre le circuit à basse température (entouré d'un cadre en pointillés sur la figure 8) et l'impédance d'utilisation Z_u à la température ambiante n'est pas le même lors de la décharge que celui qui se pose lors de la charge. En effet par exemple dans tous les cas de décharges rapides, c'est-à-dire fortement amorties, et en particulier dans les cas où le circuit d'utilisation est essentiellement dissipatif (§ 7-3-1), le courant $I(t)$ pendant la décharge reste inférieur au courant I_0 initialement piégé puis tend rapidement vers zéro. L'effet Joule dans les connexions de résistance R_3 a pour expression

$$(26) \quad w_d = \int_0^{\infty} R_3 I^2(t) dt$$

Il est alors inférieur à

$$R_3 I_0^2 \tau$$

où τ est la durée pratique de la décharge, durée telle que le courant soit devenu pratiquement nul.

Cet effet Joule est donc d'autant plus faible que la durée de la décharge est plus faible. Dans les décharges très rapides il peut devenir extrêmement faible si l'on prend des précautions convenables pour que "l'effet de peau", bien connu en hautes fréquences, ne provoque pas une trop forte augmentation de R_3 .

Dans certains cas l'impédance d'utilisation Z_u peut être aussi située à basse température ce qui peut permettre de diminuer l'importance des connexions ou même pratiquement d'éliminer ces connexions dans des configurations particulières [74/].

Dans tous les cas la self L doit être conçue de façon à réaliser l'adaptation de l'impédance donnée Z_u . On pourrait dans certains cas envisager des commutations supplémentaires permettant de modifier l'impédance présentée par le circuit de stockage L lors de la décharge (par exemple en utilisant des spires qui une fois chargées en série seraient déchargées en parallèle [86/]).

La self L peut être réalisée au moyen d'un matériau "stabilisé" par adjonction de conducteurs normaux ceux-ci pouvant être utilisés pour faciliter l'écoulement de l'énergie vers l'utilisation lors du régime transitoire de la décharge [87/ (voir aussi § 7-5-1-3-2 et 7-5-1-3-3).

7- 2- Couplage inductif

L'impédance d'utilisation Z_u peut aussi être couplée par induction au circuit de stockage d'énergie, soit directement : elle constitue alors elle-même une sorte de circuit secondaire, soit par l'intermédiaire d'un circuit secondaire S auquel elle est connectée et qui est couplé par induction au circuit de stockage (Fig. 9). L'ensemble des circuits couplés se comporte alors de la même façon qu'un transformateur.

Pour le circuit secondaire S on peut utiliser un matériau supraconducteur et le "stabiliser" de façon à éviter les risques de transitions lors des régimes transitoires [13] de la décharge. On peut aussi utiliser un matériau conducteur normal de faible résistivité (et de faible magnéto-résistance) disposé de façon à réduire l'effet de peau pour que la perte Joule pendant la durée de la décharge soit suffisamment faible (§ 7-4).

Un tel montage permet soit de charger soit de stocker l'énergie sous des courants très différents de ceux sous lesquels elle est ensuite utilisée. On peut aussi coupler simultanément au circuit de stockage plusieurs circuits secondaires dans les cas où l'utilisation comprend différents circuits.

Ce montage " en transformateur" permet de réaliser une bonne adaptation d'impédances entre le circuit de stockage et le circuit d'utilisation. Dans le cas où l'utilisation Z_u est dissipative on peut ainsi, en prenant les précautions nécessaires (§ 7-3-1), atteindre des rendements élevés [55/ [88/ très voisins de l'unité. (En ce qui concerne la référence [88/ il faut cependant signaler que l'auteur oublie d'indiquer qu'en modifiant le rapport du transformateur, si toutes les autres grandeurs restent les mêmes, on modifie la "constante de temps" de la décharge. Voir § 7-5-1-3-3 .

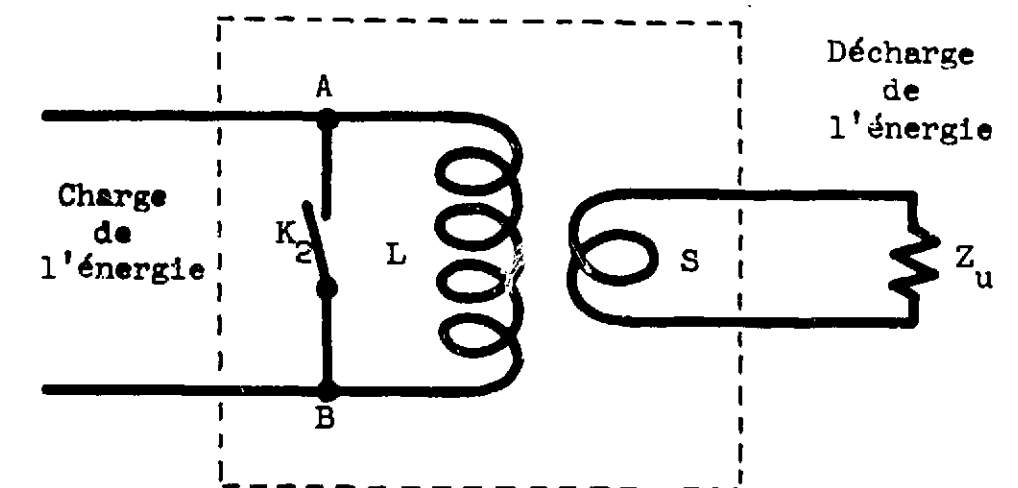


Figure 9

7-3- Caractéristiques de la décharge :

La loi de décharge de l'énergie dépend de la nature de l'impédance d'utilisation Z_u et de la loi d'ouverture de l'interrupteur K_2 . Nous allons passer brièvement en revue les différents effets.

7-3-1- Impédance d'utilisation dissipative:

Lorsque l'impédance Z_u est essentiellement dissipative, on obtient une décharge amortie. Pour entraîner l'oscillation de la décharge il faudrait que le circuit possède des capacités parasites importantes (§ 7-3-4).

Considérons donc le cas où Z_u est purement dissipative (conversion totale de l'énergie en travail, en chaleur, etc...). Elle se comporte alors comme une résistance pure R_u qui peut être une fonction du temps. En désignant par $R_2(t)$ la résistance présentée par l'interrupteur K_2 en fonction du temps (telle que $R_2(0) = 0$) et en posant :

$$(27) \quad R(t) = \frac{R_u(t) R_2(t)}{R_u(t) + R_2(t)}$$

on établit facilement les expressions qui donnent :

le courant $i(t)$ dans la self de stockage L

$$(28) \quad i(t) = I_0 e^{-\frac{1}{L} \int_0^t R(t) dt}$$

la tension aux bornes de la résistance d'utilisation R_u

$$(29) \quad v(t) = R(t) I_0 e^{-\frac{1}{L} \int_0^t R(t) dt}$$

la dérivée de cette tension par rapport au temps

$$(30) \quad \frac{dv(t)}{dt} = \left[\frac{dR(t)}{dt} - \frac{R^2(t)}{L} \right] I_0 e^{-\frac{1}{L} \int_0^t R(t) dt}$$

le courant dans la résistance d'utilisation R_u

$$(31) \quad i_u(t) = \frac{R_2(t)}{R_u(t) + R_2(t)} I_0 e^{-\frac{1}{L} \int_0^t R(t) dt}$$

Les relations (29) et (30) montrent que, si $R(t)$ est une fonction décroissante, la tension $v(t)$ aux bornes de l'utilisation part de zéro, passe par un maximum qui a lieu pour l'une des valeurs de t annulant le crochet de l'équation (30) puis redescend asymptotiquement à zéro.

La relation (28) montre que si la résistance $R(t)$ subit des fluctuations rapides le courant $i(t)$ débité par la self de stockage n'aura pas tendance à suivre ces fluctuations. Par contre la tension aux bornes de l'utilisation R_u aura donc tendance d'après (29) à varier de la même façon que $R(t)$. Le circuit de stockage se comportera alors comme un "générateur de courant" peu sensible aux fluctuations de l'impédance d'utilisation.

Dans le cas particulier où la résistance d'utilisation est constante, nous allons montrer que les instants t_1 auxquels ont lieu les extréma de la tension $v(t)$ à ses bornes, ou du courant $i_u(t)$ qui la parcourt, sont indépendants de sa propre valeur R_u .

Les instants t_1 sont des valeurs de t parmi celles qui annulent le crochet de la relation (30) :

$$(32) \quad \frac{dR(t)}{dt} - \frac{R^2(t)}{L} = 0$$

équation dans laquelle $R(t)$ s'exprime d'après (27) :

$$(33) \quad R(t) = \frac{R_u R_2(t)}{R_u + R_2(t)}$$

En éliminant $R(t)$ l'équation (32) devient, si R_u n'est pas nulle :

$$(34) \quad \frac{d R_2(t)}{dt} - \frac{R_2^2(t)}{L} = 0$$

Cette équation ne faisant pas intervenir la résistance d'utilisation R_u , ses racines sont bien indépendantes de R_u .

Dans le cas particulier où l'équation (34) n'a qu'une racine, que nous désignerons par t_1 , (c'est à dire par exemple si $R_2(t)$ est une fonction monotone non décroissante telle que sa dérivée première soit elle-même une fonction monotone non décroissante) et dans le cas où $R_2(t)$ atteint dès le début de la décharge des valeurs très supérieures à R_u , le courant $i_u(t)$ donné par la relation (31) suit une loi dont l'allure peut être schématisée par la figure 10.

Au début de la décharge, tant que $R_2(t)$ reste très inférieure à R_u , la relation (33) est équivalente à :

$$(35) \quad R(t) \sim R_2(t)$$

La pente à l'origine du front de montée de la tension a pour expression d'après (30) :

$$(36) \quad \left(\frac{d v(t)}{dt} \right)_{t=0} = I_0 \frac{d R_2(t)}{dt}$$

d'où l'on déduit immédiatement pour le courant dans l'utilisation :

$$(37) \quad \left(\frac{d i_u(t)}{dt} \right)_{t=0} = \frac{I_0}{R_u} \frac{d R_2(t)}{dt}$$

Au début de la décharge, les relations (29) et (31) deviennent, en tenant compte de (35) :

$$(38) \quad v(t) \sim R_2(t) I_0 e^{-\frac{1}{L} \int_0^t R_2(t) dt}$$

$$(39) \quad i_u(t) \sim R_2(t) \frac{I_0}{R_u} e^{-\frac{1}{L} \int_0^t R_2(t) dt}$$

Il en résulte que si la fonction $R_2(t)$ subit des fluctuations rapides à l'échelle de l'intervalle de temps considéré, ces fluctuations seront alors fidèlement reproduites par les fonctions représentant la tension $v(t)$ et le courant $i_u(t)$.

En conséquence le début du front de montée de l'impulsion peut être considéré comme très représentatif des caractéristiques de l'interrupteur.

Figure 10

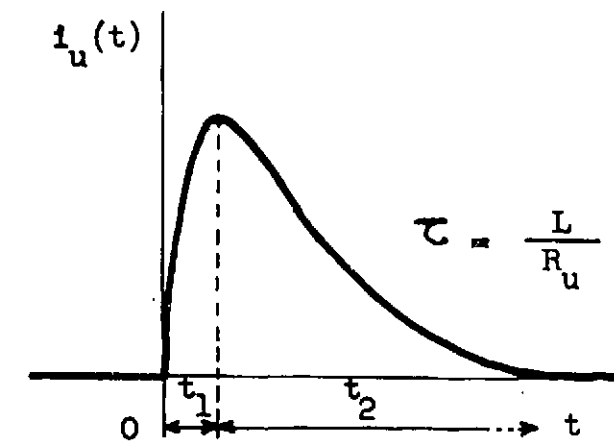
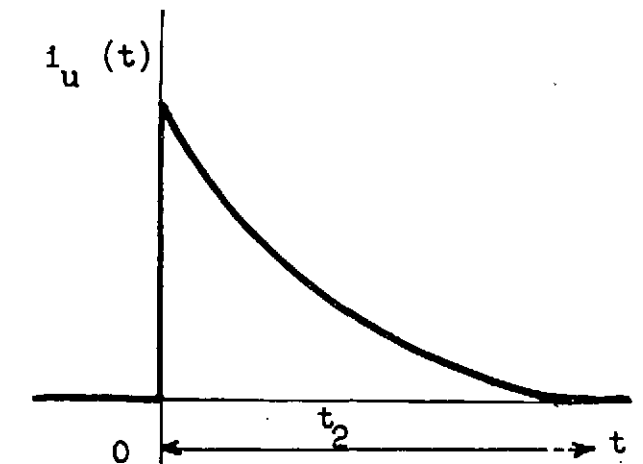


Figure 11



La durée t_2 ne dépend, dans le cas où $R_2(t)$ atteint dès le début de la décharge des valeurs très supérieures à R_u , que de la constante de temps $\tau = \frac{L}{R_u}$ du circuit de stockage fermé sur l'utilisation.

Si l'interrupteur acquérait une résistance très supérieure à R_u en un temps très bref devant $\frac{L}{R_u}$ on obtiendrait pratiquement une loi de décharge telle que celle schématisée par la Figure 11, représentant l'équation :

$$(40) \quad i_u(t) = I_0 e^{-\frac{R_u}{L} t}$$

qui résulte de (31).

Lorsque l'impédance d'utilisation est donnée, si l'interrupteur est convenable (§ 7-5), la "vitesse de décharge" dépend essentiellement de la self du circuit de stockage. Or on a vu (§ 6-2) que l'on pouvait stocker une énergie donnée sous une self quelconque entre certaines limites. On pourra donc toujours réaliser le circuit de stockage de façon à obtenir une "vitesse de décharge" donnée entre les limites correspondantes. Les possibilités seront encore plus étendues si l'on utilise pour la décharge un montage "en transformateur" (§ 7-2).

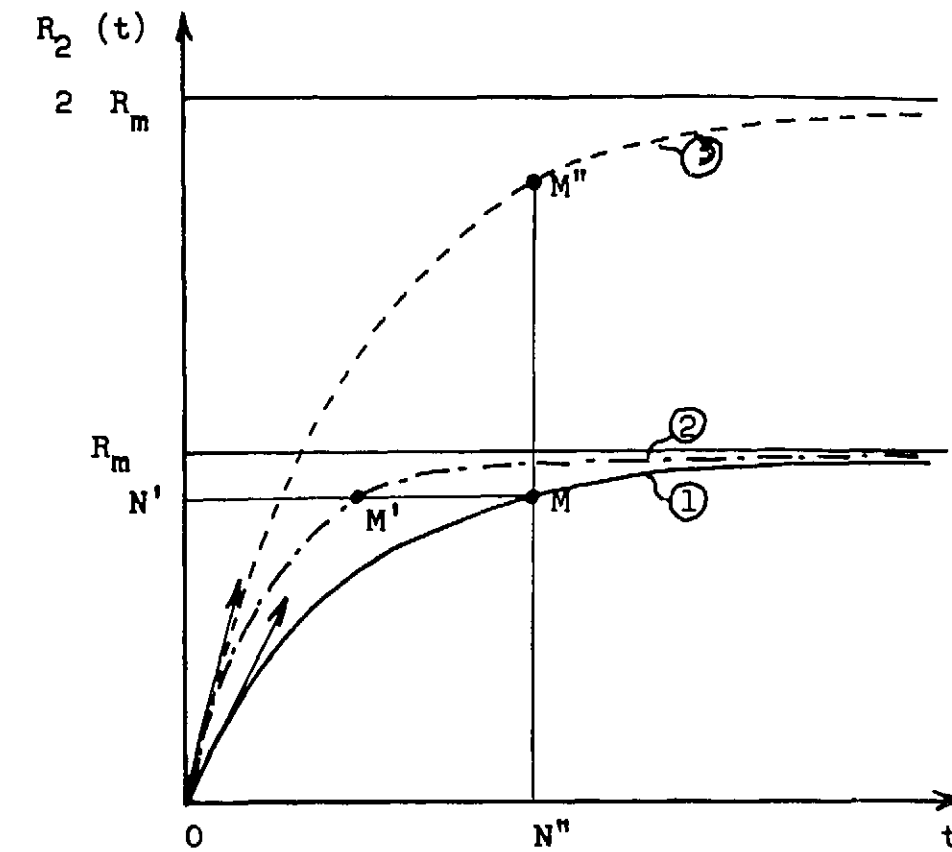


Figure 12

Représentation de la fonction $R_2(t) = R_m (1 - e^{-kt})$

- La courbe ① représente la fonction $R_2(t) = R_m (1 - e^{-kt})$
dont la dérivée est $\frac{d}{dt} R_2(t) = R_m k e^{-kt}$
- La courbe ② représente la fonction $R_2(t) = R_m (1 - e^{-\alpha kt})$
Elle se déduit de ① par une contraction ($\frac{M'N'}{MN} = \frac{1}{\alpha}$) parallèlement à l'axe des temps.
- La courbe ③ représente la fonction $R_2(t) = \alpha R_m (1 - e^{-kt})$
Elle se déduit de ① par une dilatation ($\frac{M''N''}{MN} = \alpha$) parallèlement à l'axe des résistances.
- Les fonctions ② et ③ ont la même dérivée : $\frac{d}{dt} R_2(t) = \alpha R_m k e^{-kt}$
sur la figure, α a été pris égal à 2.

7-3-1-1- Examen d'une certaine catégorie de cas :

Nous allons examiner plus en détails une certaine catégorie de cas, qui intéresse de nombreuses applications (§ 8), où :

- l'utilisation est équivalente à une résistance R_u constante ;
- l'impédance des connexions est négligeable ;
- la résistance en fonction du temps de l'interrupteur, pendant son ouverture, obéit à une loi de la forme :

$$(41) \quad R_2(t) = R_m (1 - e^{-kt})$$

e étant la base des logarithmes népériens, R_m étant par conséquent la résistance finale de l'interrupteur à l'état normal et k une grandeur constante caractérisant la vitesse de la transition. La figure 12 illustre l'influence de k et R_m sur l'allure de cette fonction dont on trouvera un sens plus précis au § 7-5-1-2.

Une loi de cette forme a déjà été utilisée /93/ et semble en accord avec celles de nos expériences auxquelles elle a été confrontée /95/.

7-3-1-1-1- Front de montée de l'impulsion:

Nous allons calculer la valeur de t_1 qui correspond au maximum de courant (figure 10) dans la résistance d'utilisation, c'est à dire au maximum de tension à ses bornes.

Le crochet de la relation (30) devient, en remplaçant dans (27) l'expression $R_u(t)$ par la résistance d'utilisation R_u constante et l'expression $R_2(t)$ par la relation (41) :

$$(42) \quad \left[\frac{dR(t)}{dt} - \frac{R^2(t)}{L} \right] = \frac{R_u^2 R_m^2}{L (R_u + R_m - R_m e^{-kt})^2} \left[-e^{-2kt} + \left(2 + \frac{kL}{R_m} \right) e^{-kt} - 1 \right]$$

Au second membre le premier facteur est positif. Le facteur entre crochets est un polynôme du second degré en e^{-kt} qui est positif pour $t = 0$, décroît quand t augmente, s'annule pour la valeur t_1 donnée en (44) et est négatif pour t inférieur à t_1 . Par conséquent la fonction $v(t)$ donnée par (29) passe bien par un maximum pour $t = t_1$.

En posant :

$$(43) \quad \frac{L}{R_m} = \tau_2$$

(τ_2 est la constante de temps normale propre du circuit de stockage, c'est à dire la constante de temps de décharge de la self de stockage sur l'interrupteur seul entièrement à l'état normal (résistance R_m constante et l'impédance d'utilisation étant débranchée) on obtient

$$(44) \quad t_1 = -\frac{1}{k} \log \left[1 + \frac{k\tau_2}{2} - \sqrt{\left(1 + \frac{k\tau_2}{4} \right) k\tau_2} \right]$$

Les courbes de la figure 12-1 représentent la variation du terme entre crochets, ce terme étant désigné par y_1 (conformément à la relation (55)).

Les courbes de la figure 12-2 représentent la variation de t_1 .

Figure 12-1

Variation de

$$y_1 = \left[1 + \frac{k \tau_2}{2} - \sqrt{\left(1 + \frac{k \tau_2}{4} \right) k \tau_2} \right]$$

en fonction de k pour différentes valeurs de τ_2

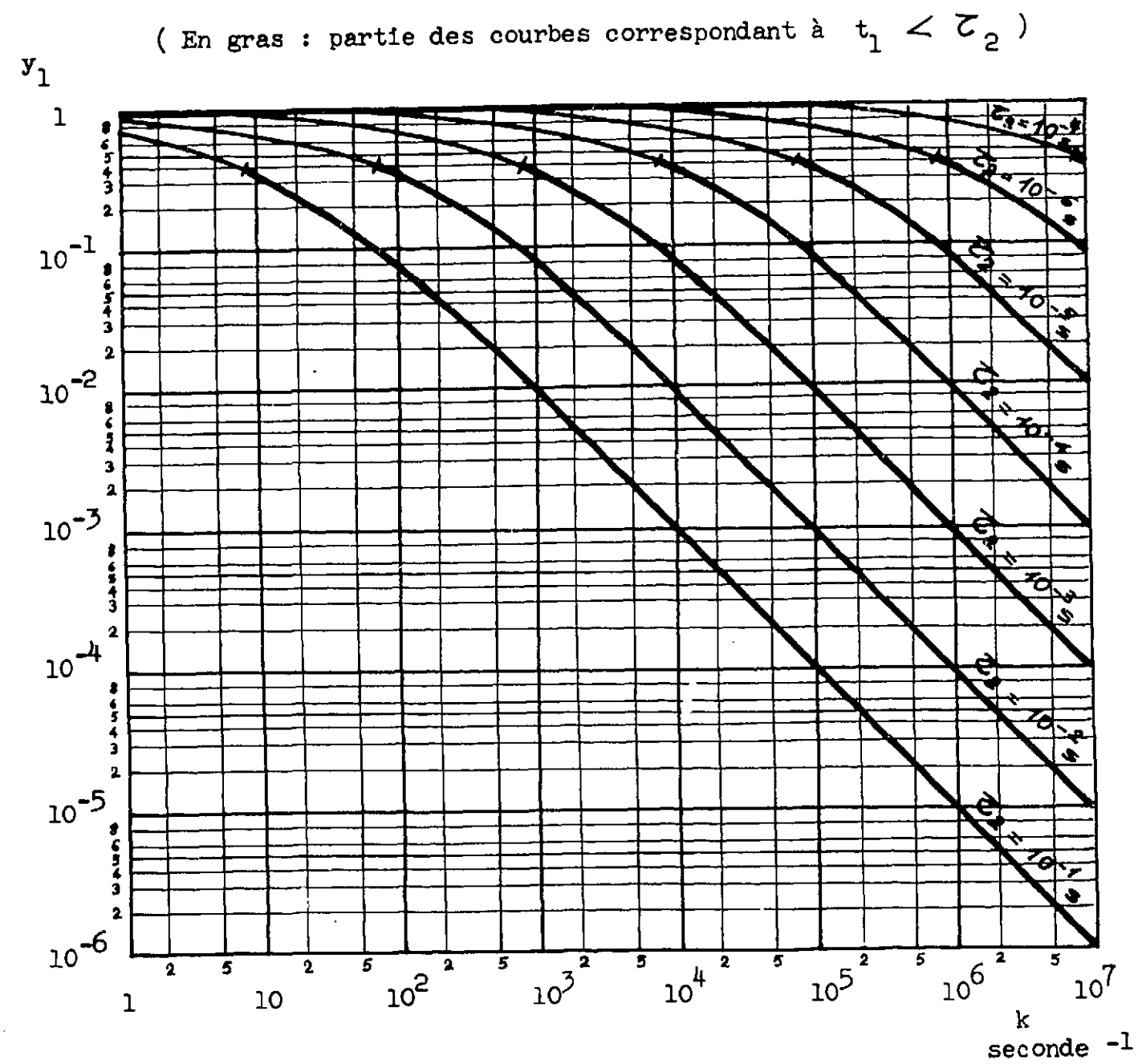
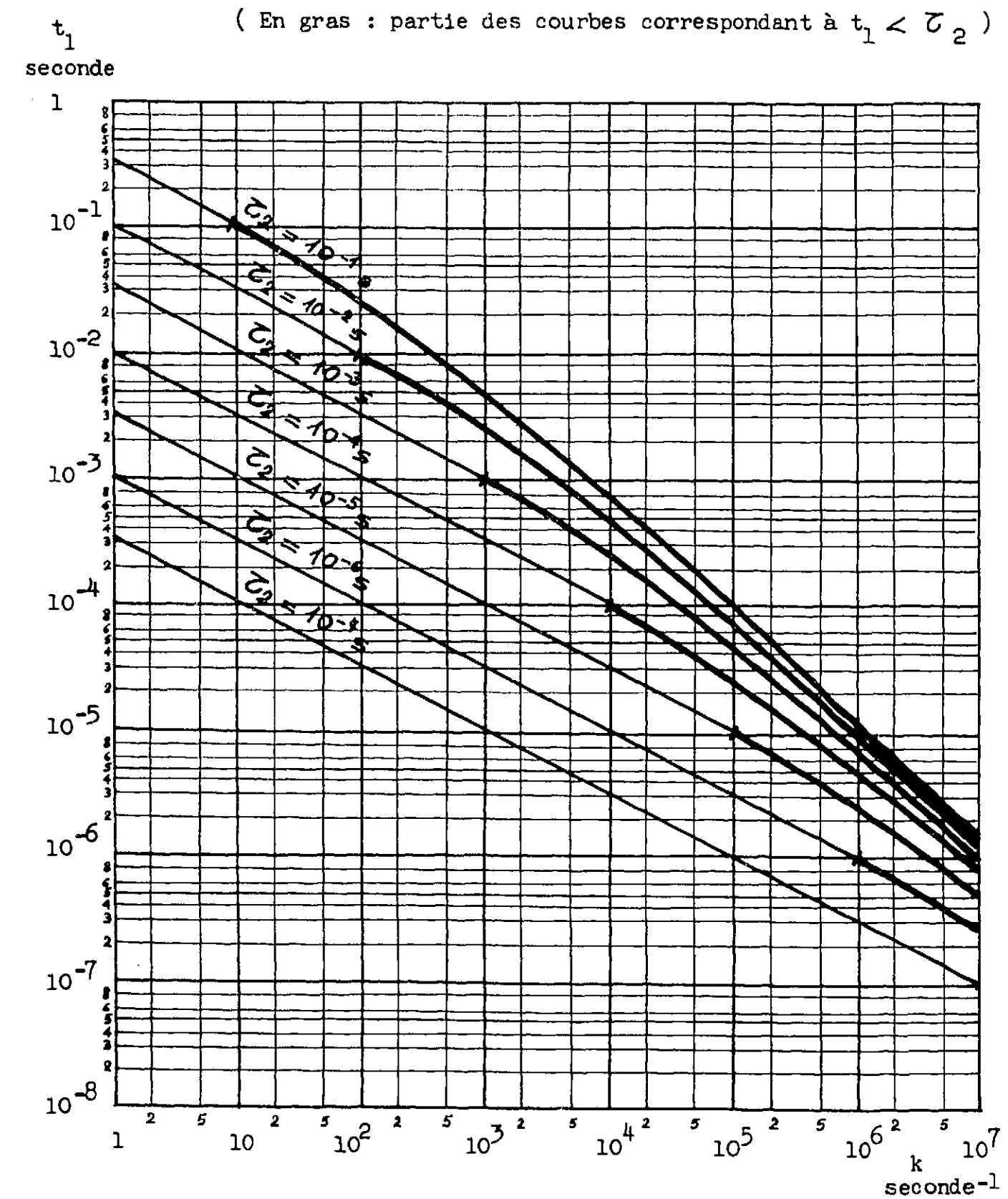


Figure 12-2

Variation de

$$t_1 = - \frac{1}{k} \text{Log } y_1$$

en fonction de k pour différentes valeurs de τ_2



Ces courbes ont été tracées en fonction de k pour différentes valeurs de τ_2 . La partie des courbes correspondant à $t_1 < \tau_2$ a été tracée en trait plus fort.

Si $k\tau_2$ est d'un ordre de grandeur très inférieur à l'unité cette expression devient :

$$(45) \quad t_1 \sim \sqrt{\frac{\tau_2}{k}}$$

Les relations (41) et (44) donnent pour $t=t_1$ la valeur correspondante de la résistance de l'interrupteur :

$$(46) \quad R_2(t_1) = R_m \left[\sqrt{1 + \frac{k\tau_2}{4}} - \frac{k\tau_2}{2} \right]$$

Si $k\tau_2 \ll 1$ on obtient :

$$(47) \quad R_2(t_1) \sim R_m \sqrt{k\tau_2}$$

Les relations (29) et (31) donnent respectivement pour $t = t_1$ les valeurs des maxima de tension et de courant dans la résistance d'utilisation.

Les relations (36) et (37) donnent respectivement, pour $t = 0$, la pente à l'origine des fronts de montée de la tension et du courant dans l'utilisation:

$$(48) \quad \left(\frac{d v(t)}{dt} \right)_{t=0} = k R_m I_0$$

$$(49) \quad \left(\frac{d i_u(t)}{dt} \right)_{t=0} = k \frac{R_m}{R_u} I_0$$

Il peut être intéressant de comparer :

- la valeur absolue de la pente à l'origine du front de montée de l'impulsion de courant,

- et la pente qu'aurait eu à l'origine sa partie descendante, donnée par (40) et représentée en pointillés sur la figure 13, si l'interrupteur avait atteint une résistance infinie en un temps pratiquement nul (interrupteur parfait § 7-5)

En posant :

$$(50) \quad \frac{L}{R_u} = \tau$$

la pente à l'origine de la fonction (40) est :

$$(51) \quad \left(\frac{d i_u(t)}{dt} \right)_{t=0} = - \frac{I_0}{\tau}$$

La comparaison des valeurs absolues de ces deux pentes revient à comparer la valeur absolue des expressions (49) et (51), c'est à dire, en tenant compte de (43) et (50) :

$$(52) \quad k \frac{\tau}{\tau_2} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\tau}$$

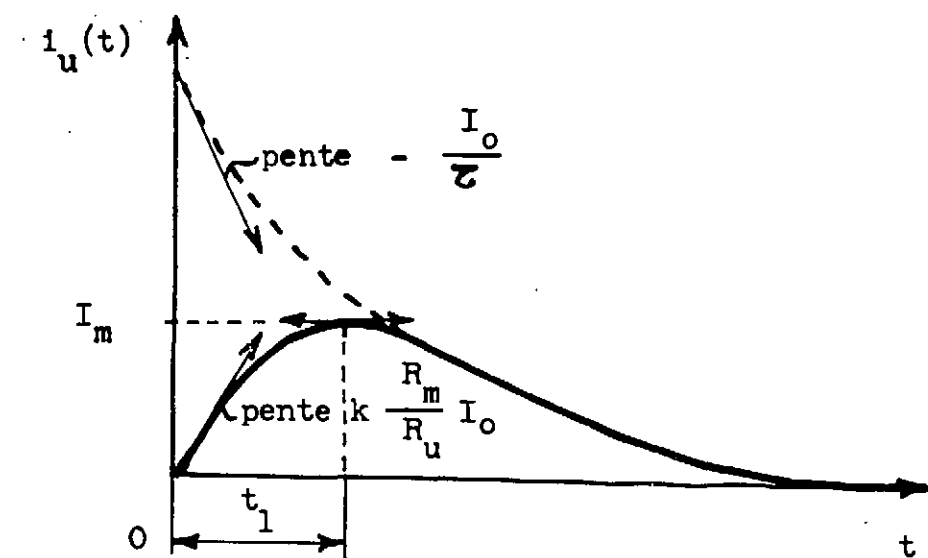


Figure 13

7-3-1-1-2- Energie transférée dans la résistance d'utilisation :

L'énergie transférée, pendant la décharge jusqu'à l'instant t , dans la résistance d'utilisation a pour expression :

$$(53) \quad W_u(t) = \int_0^t \frac{v^2(t)}{R_u} dt$$

et en remplaçant $v(t)$ par son expression (29) :

$$(54) \quad W_u(t) = \frac{I_0^2}{R_u} \int_0^t R^2(t) e^{-\frac{2}{L} \int_0^t R(t) dt} dt$$

Tenant compte de (33) et (41) si l'on pose :

$$(55) \quad e^{-kt} = y$$

et

$$(56) \quad \frac{R_m + R_u}{R_m} = a$$

il vient :

$$(57) \quad W_u(t) = - \frac{R_u I_0^2}{k} \int_1^{y(t)} \frac{(1-y)^2}{y(a-y)^2} e^{-\frac{2 R_u}{k L} \int_1^y \frac{1-y}{y(a-y)} dy} dy$$

De la relation :

$$(57-1) \quad \int_1^y \frac{1-y}{y(a-y)} dy = \int_1^y \frac{dy}{y(a-y)} - \int_1^y \frac{dy}{a-y} = -\frac{1}{a} \text{Log} \frac{a-y}{y(a-1)} + \text{Log} \frac{a-y}{a-1}$$

il résulte :

$$(57-2) \quad e^{b \int_1^y \frac{1-y}{y(a-y)} dy} = \left(\frac{a-y}{y(a-1)} \right)^{-\frac{b}{a}} \left(\frac{a-y}{a-1} \right)^b$$

et l'expression (57) devient : /97/

$$(58) \quad W_u(t) = W_0 b(a-1)^{-b} \frac{a-1}{a} \int_{y(t)}^1 (1-y)^2 (a-y)^{b \frac{a-1}{a} - 2} \frac{b}{y} \frac{1}{a} - 1 dy$$

en posant :

$$(58-1) \quad \frac{1}{2} L I_0^2 = W_0$$

$$(59) \quad \frac{2 R_u}{k L} = b$$

Nous allons effectuer le calcul de la relation (58) en utilisant un développement en série de l'expression qui se trouve sous le signe d'intégration. /97/

Nous allons poser :

$$(59-1) \quad b \frac{a-1}{a} - 2 = \alpha$$

$$(59-2) \quad \frac{b}{a} - 1 = \beta$$

Nous pouvons alors écrire :

$$(59-3) \quad (a-y)^\alpha = \begin{cases} a^\alpha - \alpha a^{\alpha-1} y + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} a^{\alpha-2} y^2 - \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!} a^{\alpha-3} y^3 \\ + \dots + (-1)^p \frac{\alpha(\alpha-1) \dots (\alpha-p+1)}{p!} a^{\alpha-p} y^p + \dots \end{cases}$$

et comme :

$$(59-4) \quad (1-y)^2 = 1 - 2y + y^2$$

le terme général du développement en série de l'expression sous le signe d'intégration, dans la relation (58) s'écrit :

$$(59-5) \quad y^{\alpha+\beta} \left[(-1)^p \frac{\alpha(\alpha-1) \dots (\alpha-p+1)}{p!} a^{\alpha-p} + 2(-1)^p \frac{\alpha(\alpha-1) \dots (\alpha-p+2)}{(p-1)!} a^{\alpha-p+1} + (-1)^p \frac{\alpha(\alpha-1) \dots (\alpha-p+3)}{(p-2)!} a^{\alpha-p+2} \right]$$

En faisant attention à la signification des opérations qu'elle exprime cette relation est valable à partir de $\beta = 3$. Les trois premiers termes du développement en série, correspondant aux puissances de y en $\beta, \beta+1$ et $\beta+2$, s'obtiennent facilement à partir des relations (59-3) et (59-4).

Une primitive du terme général (59-5) est :

$$(59-6) \quad (-1)^k \frac{y^{\beta+k+1}}{\beta+k+1} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-k+3)}{(\beta-k)!} a^{\alpha-k} \left[\frac{(\alpha-k+2)(\alpha-k+1)}{(\beta-k)!} + 2 \frac{\alpha-k+2}{\beta-k-1} a + a^2 \right]$$

L'intégration (58) conduit à prendre la valeur de cette primitive pour $y=1$ diminuée de la valeur pour $y=y(t)$.

Le développement de l'intégrale figurant dans la relation (58) s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \text{1er terme: } & (1-y)^{\beta+1} \frac{a^\alpha}{\beta+1} \\ \text{2ème terme: } & - (1-y)^{\beta+2} \frac{1}{\beta+2} (\alpha a^{\alpha-1} + 2 a^\alpha) \\ \text{3ème terme: } & (1-y)^{\beta+3} \frac{1}{\beta+3} \left(\frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} a^{\alpha-2} + 2\alpha a^{\alpha-1} + a^\alpha \right) \\ \text{4ème terme: } & - (1-y)^{\beta+4} \frac{1}{\beta+4} \left(\frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!} a^{\alpha-3} + 2 \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} a^{\alpha-2} + \alpha a^{\alpha-1} \right) \\ & \dots \dots \dots \\ \text{kème terme: } & (-1)^{k-1} (1-y)^{\beta+k} \frac{1}{\beta+k} A \end{aligned}$$

$$\text{avec } A = \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-k+2)}{(\beta-k)!} a^{\alpha-k+1} + 2 \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-k+3)}{(\beta-k-1)!} a^{\alpha-k+2} + \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-k+4)}{(\beta-k-2)!} a^{\alpha-k+3}$$

En ordonnant la somme de ces termes suivant les puissances de a on obtient la série suivante :

$$\begin{aligned} (59-7) \quad \gamma(y(t)) = & a^\alpha \left(\frac{(1-y)^{\beta+1}}{\beta+1} - \frac{2(1-y)^{\beta+2}}{\beta+2} + \frac{(1-y)^{\beta+3}}{\beta+3} \right) \\ & - a^{\alpha-1} \alpha \left(\frac{(1-y)^{\beta+2}}{\beta+2} - \frac{2(1-y)^{\beta+3}}{\beta+3} + \frac{(1-y)^{\beta+4}}{\beta+4} \right) \\ & + a^{\alpha-2} \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} \left(\frac{(1-y)^{\beta+3}}{\beta+3} - \frac{2(1-y)^{\beta+4}}{\beta+4} + \frac{(1-y)^{\beta+5}}{\beta+5} \right) \\ & \dots \dots \dots \\ & + (-1)^k a^{\alpha-k} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-k+1)}{k!} \left(\frac{(1-y)^{\beta+k+1}}{\beta+k+1} - \frac{2(1-y)^{\beta+k+2}}{\beta+k+2} + \frac{(1-y)^{\beta+k+3}}{\beta+k+3} \right) \\ & \dots \dots \dots \end{aligned}$$

En multipliant la somme de cette série par le facteur $W_0 b(a-1)^{-b} \frac{a-1}{a}$ on obtient la valeur de l'expression (58) de $W_u(t)$ à l'instant t :

$$(59-8) \quad W_u(t) = W_0 b(a-1)^{-b} \frac{a-1}{a} \gamma(y(t))$$

Pour $t = \infty$ il résulte de (55) que la valeur correspondante de y est nulle et la série (59-7) s'écrit alors :

$$(59-9) \quad \gamma = \frac{2}{(\beta+1)(\beta+2)(\beta+3)} a^\alpha - \frac{2}{(\beta+2)(\beta+3)(\beta+4)} a^{\alpha-1} \alpha + \frac{2}{(\beta+3)(\beta+4)(\beta+5)} a^{\alpha-2} \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} + \dots + (-1)^p \frac{2}{(\beta+p+1)(\beta+p+2)(\beta+p+3)} a^{\alpha-p} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-p+1)}{p!} + \dots$$

En multipliant la somme de cette série par le facteur $W_0 b(a-1)^{-b} \frac{a-1}{a}$ on obtient la valeur de l'expression (58) de $W_u(t)$ pour $t = \infty$, c'est à dire, en fait, l'énergie qui a été transférée dans la résistance d'utilisation au cours de la décharge :

$$(59-10) \quad W_u(\infty) = W_0 b(a-1)^{-b} \frac{a-1}{a} \gamma$$

7-3-1-1-3- Energie dissipée dans l'interrupteur :

L'énergie dissipée, pendant la décharge jusqu'à l'instant t , dans l'interrupteur a pour expression:

$$(60) \quad w_2(t) = \int_0^t \frac{v^2(t)}{R_2(t)} dt$$

et en remplaçant $v(t)$ par son expression (29) :

$$(61) \quad w_2(t) = I_0^2 \int_0^t \frac{R^2(t)}{R_2(t)} e^{-\frac{2}{L} \int_0^t R(t) dt} dt$$

En tenant compte de (33), (41), (55), (56), (58-1) et (59) on obtient en effectuant une première intégration de la même façon qu'au paragraphe 7-3-1-1-2 /97/ :

$$(62) \quad w_2(t) = W_0 \frac{R_u}{R_m} b(a-1)^{-b} \frac{a-1}{a} \int_{y(t)}^1 (1-y)(a-y)^b \frac{a-1}{a} - 2 \frac{b}{y} \frac{a-1}{a} dy$$

Nous allons de même effectuer le calcul de cette relation en utilisant le développement en série de l'expression qui se trouve sous le signe d'intégration. Avec les mêmes notations qu'au paragraphe 7-3-1-1-2 le terme général de ce développement en série s'écrit :

$$(62-1) \quad (-1)^p y^{\beta+p} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-p+2)}{(p-1)!} a^{\alpha-p} \left[\frac{\alpha-p+1}{p} + a \right]$$

Une primitive de cette expression est :

$$(62-2) \quad (-1)^p \frac{y^{\beta+p+1}}{\beta+p+1} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-p+2)}{(p-1)!} a^{\alpha-p} \left[\frac{\alpha-p+1}{p} + a \right]$$

L'intégration (62) conduit à prendre la valeur de cette primitive pour $y=1$ diminuée de la valeur pour $y=y(t)$.

Le développement de l'intégrale figurant dans la relation (62) s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \text{1er terme :} & \quad (1-y)^{\beta+1} \frac{a^\alpha}{\beta+1} \\ \text{2ème terme :} & \quad - (1-y)^{\beta+2} \frac{1}{\beta+2} (\alpha a^{\alpha-1} + a^\alpha) \\ \text{3ème terme :} & \quad (1-y)^{\beta+3} \frac{1}{\beta+3} \left(\frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} a^{\alpha-2} + \alpha a^{\alpha-1} \right) \\ \text{4ème terme :} & \quad - (1-y)^{\beta+4} \frac{1}{\beta+4} \left(\frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!} a^{\alpha-3} + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} a^{\alpha-2} \right) \\ & \quad \dots \dots \dots \end{aligned}$$

$$p^{\text{ième}} \text{ terme : } (-1)^{p-1} (1-y)^{\beta+p} \frac{1}{\beta+p} \left(\frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-p+2)}{(p-1)!} a^{\alpha-p+1} + \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-p+3)}{(p-2)!} a^{\alpha-p+2} \right)$$

En ordonnant la somme de ces termes suivant les puissances de a on obtient la série suivante :

$$(62-3) \quad \delta(y(t)) = a^{\alpha} \left(\frac{1-y}{\beta+1} - \frac{1-y}{\beta+2} \right) - a^{\alpha-1} \alpha \left(\frac{1-y}{\beta+2} - \frac{1-y}{\beta+3} \right) + a^{\alpha-2} \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} \left(\frac{1-y}{\beta+3} - \frac{1-y}{\beta+4} \right)$$

.....

$$+ (-1)^p a^{\alpha-p} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-p+1)}{p!} \left(\frac{1-y}{\beta+p+1} - \frac{1-y}{\beta+p+2} \right)$$

En multipliant la somme de cette série par le facteur $W_0 \frac{R_u}{R_m} b (a-1)^{-b} \frac{a-1}{a}$ on obtient la valeur de l'expression $w_2(t)$ à l'instant t .

$$(62-4) \quad w_2(t) = W_0 \frac{R_u}{R_m} b (a-1)^{-b} \frac{a-1}{a} \delta(y(t))$$

Pour $t = \infty$ il résulte de (55) que la valeur correspondante de y est nulle et la série (62-3) s'écrit alors :

$$(62-5) \quad \delta = \frac{1}{(\beta+1)(\beta+2)} a^{\alpha} - \frac{1}{(\beta+2)(\beta+3)} a^{\alpha-1} \alpha + \frac{1}{(\beta+3)(\beta+4)} a^{\alpha-2} \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!}$$

.....

$$+ (-1)^p \frac{1}{(\beta+p+1)(\beta+p+2)} a^{\alpha-p} \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-p+1)}{p!}$$

En multipliant la somme de cette série par le facteur $W_0 \frac{R_u}{R_m} b (a-1)^{-b} \frac{a-1}{a}$ on obtient la valeur de l'expression (62) de $w_2(t)$ pour $t = \infty$, c'est à dire, en fait, l'énergie qui a été dissipée dans l'interrupteur au cours de la décharge :

$$(62-6) \quad w_2(\infty) = W_0 \frac{R_u}{R_m} b (a-1)^{-b} \frac{a-1}{a} \delta$$

7-3-1-1-4 Expression du courant dans la résistance d'utilisation

La relation (31) s'écrit, en utilisant les notations données en (55), (56) et (59) :

$$(62-7) \quad i_u(t) = \frac{1-y}{a-y} I_0 e^{\frac{b}{2} \int_1^{y(t)} \frac{1-y}{y(a-y)} dy}$$

puis en utilisant la relation (57-2) :

$$(62-8) \quad i_u(t) = I_0 (a-1)^{\frac{b}{2} \frac{1-a}{a}} (1-y)^{\frac{b}{2} \frac{a-1}{a} - 1} y^{-\frac{b}{2a}}$$

La valeur maximum I_m de i_u (figure 13) a lieu à l'instant $t = t_1$ donné par la relation (44). On a alors :

$$(62-9) \quad I_m = i_u(t_1)$$

7-3-2- Impédance d'utilisation selfique :

Nous allons voir que lorsque l'impédance Z_u est essentiellement selfique le transfert d'énergie est au contraire défavorable.

Examinons le cas extrême où Z_u se comporte comme une self pure L_u (par exemple bobinage destiné à engendrer uniquement un champ magnétique et ne produisant ni travail, ni chaleur...) (figure 14), l'interrupteur K_2 étant aselfique.

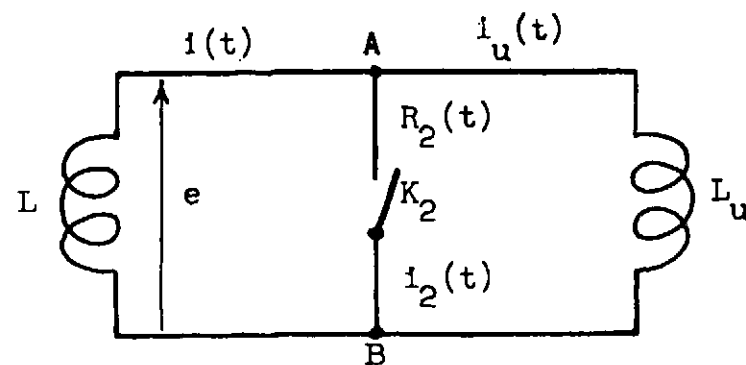


Figure 14

Les équations de Kirchhoff :

$$(63) \quad i(t) = i_u(t) + i_2(t)$$

$$(64) \quad \begin{cases} e = -L \frac{di(t)}{dt} = R_2(t) i_2(t) = L_u \frac{di_u(t)}{dt} \end{cases}$$

donnent :

le courant dans l'interrupteur :

$$(65) \quad i_2(t) = I_0 e^{-\frac{L+L_u}{L L_u} \int_0^t R_2(t) dt}$$

le courant dans l'utilisation :

$$(66) \quad i_u(t) = \frac{L}{L+L_u} I_0 \left(1 - e^{-\frac{L+L_u}{L L_u} \int_0^t R_2(t) dt} \right)$$

En désignant par W_0 (avec $W_0 = \frac{1}{2} L I_0^2$) l'énergie initiale stockée dans L ces expressions permettent de calculer :

l'énergie magnétique transférée dans L_u :

$$(67) \quad W_u = \frac{1}{2} L_u i_u^2(\infty) = W_0 \frac{L L_u}{(L + L_u)^2}$$

(quelle que soit la valeur de L cette expression ne peut pas être supérieure à $\frac{W_0}{4}$)

l'énergie magnétique qui reste dans L après la décharge :

$$(68) \quad W = \frac{1}{2} L i^2(\infty) = W_0 \frac{L^2}{(L + L_u)^2}$$

l'énergie dissipée par effet Joule dans l'interrupteur :

$$(69) \quad W_2 = \int_0^\infty R_2(t) i_2^2(t) dt = W_0 \frac{L_u}{L + L_u}$$

Il est assez remarquable que ces quantités d'énergie, et en particulier l'énergie dissipée par effet Joule dans l'interrupteur, ne dépendent pas de la résistance de l'interrupteur. Elles ne dépendent que de l'énergie initiale et des valeurs des selfs. La résistance de l'interrupteur ne joue un rôle que sur la "vitesse" de la décharge (équations (65) et (66)).

Dans le cas particulier où l'interrupteur peut atteindre dans un intervalle de temps négligeable une résistance R_m qui reste constante le courant dans l'interrupteur a pour expression, d'après (65) :

$$(70) \quad i_2(t) = I_0 e^{-\frac{R_m}{\lambda} t}$$

en posant $\lambda = \frac{L L_u}{L + L_u}$. La constante de temps de la décharge $\frac{\lambda}{R_m}$ est alors la même que celle que l'on obtiendrait si l'on déchargeait les selfs L et L_u en parallèle dans la résistance R_m .

Dans tous les cas, la valeur de w_2 donnée par l'équation (69) n'étant jamais nulle si w_0 et L_u ne sont pas nuls on en déduit que dans tout transfert d'énergie de self à self il y a toujours dégradation d'une certaine quantité d'énergie sous forme de chaleur, quel que soit l'interrupteur utilisé.

7-3-3- Impédance d'utilisation capacitive :

Nous allons examiner le cas extrême où l'impédance d'utilisation se comporte comme une capacité pure C_u (figure 15) l'interrupteur K_2 étant aselfique et acquérant une résistance constante R_m dans un temps négligeable.

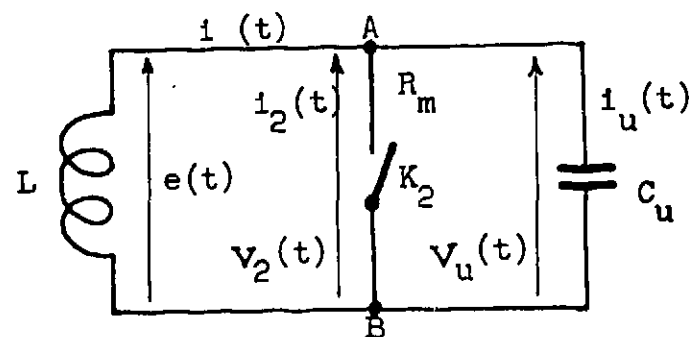


Figure 15

En désignant respectivement par $v(t)$, $v_2(t)$, $v_u(t)$ les tensions aux bornes de la self, de l'interrupteur et du condensateur, les équations de Kirchhoff :

$$(71) \quad \begin{cases} i(t) = i_2(t) + i_u(t) \\ e(t) = -v(t) = v_2(t) = v_u(t) \end{cases}$$

permettent d'établir l'équation de fonctionnement du circuit, de la forme :

$$(73) \quad C_u \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_2} + \frac{1}{L} \int v(t) dt = 0$$

On déduit immédiatement de cette équation que la tension $v(t)$ aux bornes du conducteur n'oscille pas si

$$(74) \quad R_m < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C_u}}$$

oscille si

$$(75) \quad R_m > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C_u}}$$

et dans le cas où R_2 est très élevée la période d'oscillation tend vers :

$$(76) \quad \tau = 2\pi \sqrt{L C_u}$$

Remarque 1 :

Si sur la figure 15 on remplace la résistance R_m de l'interrupteur par la résistance R donnée par la relation (27), puis si on remplace celle-ci par une résistance R_u constante on est alors dans le cas où l'on a branché entre A et B une charge résistive

constante R_u en parallèle sur un interrupteur dont la résistance $R_2(t)$ à l'ouverture devient très grande devant R_u en un temps négligeable. Le condensateur C_u peut être considéré comme la capacité parasite de l'utilisation R_u . La relation (75) montre alors que, pour que la décharge oscille, il faudra que

$$(77) \quad \sqrt{\frac{L}{C_u}} < 2 R_u$$

Cette condition ne sera pas réalisée si R_u et C_u sont suffisamment faibles. On en déduit que le stockage d'énergie dans des self est particulièrement bien adapté à l'obtention de décharges amorties lorsque l'impédance d'utilisation est équivalente à une faible résistance.

Remarque 2 :

Le cas qui vient d'être envisagé dans la remarque 1 peut être comparé très simplement au cas, que l'on peut envisager par dualité, du stockage d'énergie dans un condensateur C , l'utilisation étant constituée par une résistance constante R_u , le circuit comprenant une self parasite L_u , figure 16.

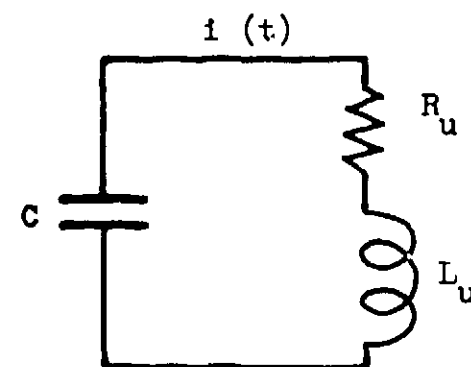


Figure 16

L'équation de fonctionnement d'un tel circuit est de la forme :

$$(78) \quad L_u \frac{d i(t)}{dt} + R_u i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = 0$$

et admet une solution $i(t)$ non oscillante si

$$(79) \quad R_u > 2 \sqrt{\frac{L_u}{C}}$$

oscillante si

$$(80) \quad R_u < 2 \sqrt{\frac{L_u}{C}}$$

la période d'oscillation tendant, lorsque R_u est très faible, vers la valeur :

$$(81) \quad \tau = 2\pi \sqrt{L_u C}$$

La relation (80) montre que ce circuit est mal adapté à l'obtention de décharges amorties lorsque l'utilisation est équivalente à une faible résistance et ceci est d'autant plus marqué que l'on utilise une capacité C plus importante. D'autre part si l'on utilise des capacités importantes (et c'est ce que l'on est amené à faire si l'on veut stocker des énergies importantes, voir par exemple § 8-1-2), la relation (81) montre que l'on ne peut pas obtenir des périodes d'oscillation de faible valeur. Comme on l'a vu à la remarque 1 le stockage d'énergie dans les selfs ne présente pas ces inconvénients.

7-3-4- Impédance d'utilisation quelconque :

A cause de son importance pour les applications (§ 8), nous allons envisager le cas particulier où l'impédance d'utilisation présente, en plus d'un terme dissipatif, un terme selfique fonction du temps. Nous nous limiterons aux conditions idéales d'un circuit sans capacités parasites et d'un interrupteur parfait (§7-5), mais nous introduirons une résistance R_3 et une self-induction L_3 parasites dans les connexions (figure 17) :

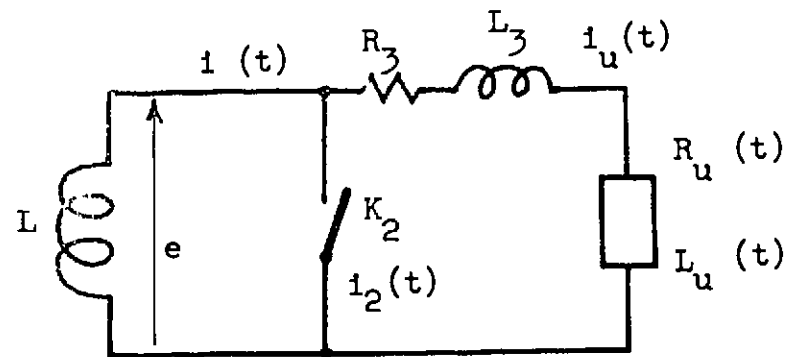


Figure 17

Avec les notations de la figure 15 l'interrupteur parfait peut-être représenté par les conditions :

$$(82) \quad \text{pour } t < 0 \quad \begin{cases} i_2(t) = i(t) \\ i_u(t) = 0 \end{cases}$$

$$(83) \quad \text{pour } t \geq 0 \quad \begin{cases} i_2(t) = 0 \\ i_u(t) = i(t) \end{cases}$$

Considérons donc la décharge de l'énergie dans le circuit d'utilisation (c'est à dire $t \geq 0$). Les équations de Kirchhoff se réduisent alors à l'équation unique :

$$(84) \quad e = -L \frac{di(t)}{dt} = [R_3 + R_u(t)] i(t) + L_3 \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

Dans cette expression $\Phi(t)$ est le flux magnétique qui embrasse le circuit d'utilisation. Il a pour expression dans le cas que nous envisageons :

$$(85) \quad \Phi(t) = L_u(t) \cdot i(t)$$

L'expression (84) s'écrit alors :

$$(86) \quad \left[L + L_u(t) + L_3 \right] \frac{di(t)}{dt} + \left[R_u(t) + R_3 + \frac{dL_u(t)}{dt} \right] i(t) = 0$$

En multipliant par $i(t) dt$ les deux membres de cette expression, qui représentent des différences de potentiel on fait apparaître une relation entre les énergies mises en jeu dans l'intervalle de temps $(t, t + dt)$:

$$(87) \quad \frac{1}{2} \left[L + L_u(t) + L_3 \right] di^2(t) + \left[R_u(t) + R_3 + \frac{dL_u(t)}{dt} \right] i^2(t) dt = 0$$

Le terme $\frac{1}{2} L di^2(t)$ représente, à l'instant t , la variation de l'énergie magnétique stockée par le circuit supra-conducteur, alors parcouru par un courant de valeur bien définie $i(t)$, lorsque le courant varie de di .

Le terme $\frac{1}{2} L_u(t) di^2(t)$ représente, à l'instant t , la variation de l'énergie magnétique emmagasinée par le circuit d'utilisation, dont la self a une valeur bien définie $L_u(t)$, alors parcouru par un courant de valeur bien définie $i(t)$, lorsque le courant varie de di .

Le terme $\frac{1}{2} L_3 di^2(t)$ représente, à l'instant t , la variation de l'énergie magnétique emmagasinée par les connexions alors parcourues par le courant $i(t)$, lorsque le courant varie de di .

Ces trois termes représentent, à l'instant t , des variations d'énergies magnétiques, respectivement dans le circuit de stockage, dans le circuit d'utilisation et dans les connexions, résultant des variations des champs magnétiques correspondants, dues uniquement à une variation du courant.

Le terme $R_u(t) i^2(t) dt$ représente l'énergie dissipée dans le circuit d'utilisation, parcouru par le courant de valeur bien définie $i(t)$, entre les instants t et $t + dt$.

Le terme $\frac{dL_u(t)}{dt} i^2(t) dt$ représente l'énergie mise en jeu dans le circuit d'utilisation, parcouru par le courant de valeur bien définie $i(t)$, à la suite de sa variation de self $dL_u(t)$ entre les instants t et $t + dt$. Ce terme correspond à la somme d'une énergie magnétique $\frac{1}{2} \frac{dL_u(t)}{dt} i^2(t) dt$ emmagasinée dans la self $dL_u(t)$ et d'un travail $\frac{1}{2} \frac{dL_u(t)}{dt} i^2(t) dt$ engendré par la déformation du circuit d'utilisation.

Le terme $R_3 i^2(t) dt$ représente l'énergie dissipée dans les connexions parcourues par le courant $i(t)$ entre les instants t et $t + dt$.

Le cas général d'une impédance d'utilisation absolument quelconque déborderait du cadre de cet article et ne sera pas examiné. Pratiquement les cas que l'on pourra rencontrer posséderont souvent des caractéristiques prédominantes ce qui les rapprochera plus ou moins de l'un des cas envisagés. De cette façon on pourra très vite, en toute première approximation, se faire une première idée de l'allure des phénomènes. Une analyse plus détaillée sera ensuite nécessaire.

7-4- Rendement de la décharge :

Le rendement est le rapport entre l'énergie transférée à l'utilisation et l'énergie initialement stockée. Nous allons l'évaluer dans quelques cas particuliers.

7-4-1- Impédance d'utilisation dissipative (transformation de l'énergie en travail, ou en chaleur etc ...) :

7-4-1-1- Expression du rendement :

Si l'impédance des connexions est négligeable le rendement peut s'écrire en désignant par $v(t)$ la tension aux bornes de l'utilisation R_u et en utilisant (27) :

$$(88) \quad \eta = \frac{W_u(\infty)}{W_o} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{v^2(t)}{R_u(t)} dt}{\frac{1}{2} L I_o^2} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{v^2(t)}{R_u(t)} dt}{\int_0^{\infty} \frac{v^2(t)}{R(t)} dt} = \frac{1}{1 + \frac{\int_0^{\infty} \frac{v^2(t)}{R_2(t)} dt}{\int_0^{\infty} \frac{v^2(t)}{R_u(t)} dt}}$$

Dans le cas plus particulier où R_u est constante, (§ 7-3-1), si l'on désigne par R_m la limite supérieure de $R_2(t)$ pendant la décharge on obtient successivement :

$$(89) \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{\int_0^\infty \frac{v^2(t)}{R_2(t)} dt}{\int_0^\infty \frac{v^2(t)}{R_u} dt}} \leq \frac{1}{1 + \frac{R_u}{R_m}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_2}{\tau}}$$

la dernière égalité résultant de (50) et (43) où R_m désigne d'une façon générale la limite supérieure de $R_2(t)$.

Il en résulte que :

- le rendement sera toujours inférieur à la limite supérieure représentée par le second membre de l'inégalité (89) ;
- cette limite supérieure sera d'autant plus élevée que R_m sera plus élevée devant R_u , c'est à dire que la constante de temps normale propre τ_2 du circuit de stockage sera plus faible devant la constante de temps de décharge τ ;
- cette limite supérieure du rendement sera d'autant mieux atteinte que $R_2(t)$ atteindra plus rapidement sa valeur maximum ; en effet l'expression tout à fait à droite de (89) est la valeur qui serait atteinte par η si $R_2(t)$ atteignait sa valeur maximum dans un intervalle de temps nul et restait fixée à cette valeur.

Dans le cas encore plus particulier où R_u est constante et où $R_2(t)$ est de la forme donnée en (41) (§ 7-3-1-1) l'expression (88) du rendement peut être formulée à partir de la relation (59-10) :

$$(89-1) \quad \eta = \frac{W_u(\infty)}{W_0} = b (a-1)^{-b \frac{a-1}{a}} \delta$$

Cette relation s'exprime sous la forme suivante en fonction de a et b :

$$(89-2) \quad \eta = (a-1)^{-b \frac{a-1}{a}} \left[\frac{2}{(\frac{b}{a}+1)(\frac{b}{a}+2)} a^{b \frac{a-1}{a} - 1} - \frac{2b}{(\frac{b}{a}+1)(\frac{b}{a}+2)(\frac{b}{a}+3)} a^{b \frac{a-1}{a} - 3} (b \frac{a-1}{a} - 2) \right. \\ \left. + \frac{2b}{(\frac{b}{a}+2)(\frac{b}{a}+3)(\frac{b}{a}+4)} a^{b \frac{a-1}{a} - 4} - \frac{(b \frac{a-1}{a} - 2)(b \frac{a-1}{a} - 3)}{2!} \dots \right]$$

Lorsque $b \rightarrow 0$, ce qui se produit par exemple pour $k \rightarrow \infty$ dans la relation (59), le rendement η exprimé ci-dessus tend vers la valeur :

$$(89-3) \quad \lim_{b \rightarrow 0} \eta = a^{-1} = \frac{1}{1 + \frac{R_u}{R_m}}$$

résultant du fait que tous les termes du crochet sauf le premier tendent alors vers zéro.

Pratiquement la valeur de a étant voisine de l'unité l'expression (89-2) se rapproche très vite de sa limite (89-3) dès que b est petit devant l'unité.

Si l'impédance des connexions n'est pas négligeable, en particulier si les connexions présentent une résistance R_3 (figure 18)

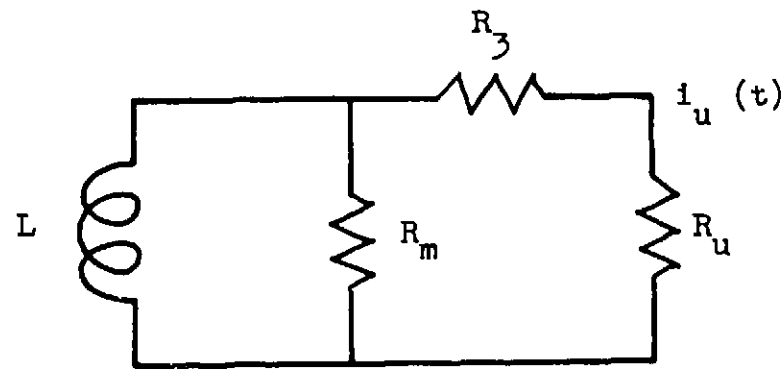


Figure 18

l'énergie totale dissipée par les connexions est :

$$(89-4) \quad w_3 = \int_0^{\infty} R_3 i_u^2(t) dt = R_3 \int_0^{\infty} i_u^2(t) dt$$

l'énergie totale transférée dans l'utilisation est :

$$(89-5) \quad w_u = \int_0^{\infty} R_u i_u^2(t) dt = R_u \int_0^{\infty} i_u^2(t) dt$$

On en déduit :

le rapport entre l'énergie dissipée dans les connexions et celle transférée dans l'utilisation :

$$(89-6) \quad \frac{w_3}{w_u} = \frac{R_3}{R_u}$$

le rapport entre l'énergie transférée dans l'utilisation et celle transférée dans l'ensemble du circuit constitué par l'utilisation en série avec ses connexions :

$$(89-7) \quad \frac{w_u}{w_u + w_3} = \frac{R_u}{R_u + R_3}$$

Si dans l'expression (89) on remplace R_u par $R_u + R_3$ on obtient une nouvelle expression qui représente le rapport entre l'énergie totale libérée dans le circuit constitué par l'utilisation en série avec ses connexions et l'énergie initialement stockée. Si l'on multiplie cette nouvelle expression par le second membre de l'expression (89-7) on obtient alors le rapport entre l'énergie transférée dans l'utilisation et l'énergie initialement stockée, c'est à dire le rendement de transfert d'énergie :

$$(90) \quad \eta = \frac{R_u}{R_u + R_3} \frac{1}{1 + \frac{\int_0^{\infty} \frac{v^2(t)}{R_2(t)} dt}{\int_0^{\infty} \frac{v^2(t)}{R_u + R_3} dt}} < \frac{R_u R_m}{(R_u + R_3)(R_u + R_3 + R_m)}$$

Pour que cette limite maximum du rendement reste élevée on voit que R_3 doit rester faible devant R_u .

Moyennant ces précautions le cas d'une impédance d'utilisation essentiellement dissipative est particulièrement favorable à l'obtention de rendements voisins de l'unité. De tels rendements sont couramment obtenus dans les expériences au laboratoire /55/.

Il faut noter que l'élimination des circuits magnétiques a permis de supprimer toutes les pertes qui leur sont propres.

De même l'expression (89-1) devient :

$$(90-1) \quad \eta = \frac{R_u}{R_u + R_3} b' (a' - 1)^{-b' \frac{a' - 1}{a'}} \gamma'$$

les symboles a' , b' , γ' représentant respectivement les expressions a , b , γ dans lesquelles on remplace R_u par $R_u + R_3$.

Lorsque $b' \rightarrow 0$, ce qui se produit par exemple pour $k \rightarrow \infty$ dans la relation (59), on retrouve dans ces conditions :

$$(90-2) \quad \lim_{b' \rightarrow 0} \eta = \frac{R_u}{R_u + R_3} a'^{-1} = \frac{R_u}{R_u + R_3} \frac{R_m}{R_m + R_u + R_3}$$

Pratiquement la valeur de a' étant voisine de l'unité l'expression (90-1) se rapproche très vite de sa limite (90-2) dès que b' est petit devant l'unité.

7-4-2- Impédance d'utilisation selfique :

L'énergie transférée à l'utilisation L_u est une énergie magnétique dont la valeur est donnée par l'expression (67) celle-ci nous permet d'exprimer le rendement :

$$(91) \quad \eta = \frac{W_u}{W_o} = \frac{L L_u}{(L + L_u)^2}$$

Ce rendement est maximum lorsque $L_u = L$ et il vaut alors $1/4$. Lorsque cette condition est réalisée les relations (68) et (69) donnent respectivement :

$$W = \frac{W_o}{4}$$

$$w_2 = \frac{W_o}{2}$$

cette dernière énergie w_2 , rappelons le, étant libérée sous forme de chaleur.

Dans ce cas seulement 25 % de l'énergie magnétique initiale est transférée dans la self d'utilisation, 25 % est retenue dans la self de stockage et 50 % est transformée en chaleur par effet Joule. Toutes ces valeurs, rappelons le (§ 7-3-2), sont indépendantes de la valeur de la résistance de l'interrupteur.

On voit donc que sur une utilisation purement selfique le rendement de transfert d'énergie non seulement n'est pas favorable mais encore conduit à une dégradation d'énergie inévitable et importante.

7- 5- L'interrupteur

L'interrupteur (K_2 sur les figures 8,9,14, et 15) doit présenter les caractéristiques suivantes :

Lorsqu'il est fermé :

- Il doit permettre le passage du courant total.
- Il doit posséder, toutes connexions et jonctions comprises, une résistance totale R_0 suffisamment faible pour éviter d'introduire, par dissipation d'énergie, une atténuation appréciable du courant piégé dans le circuit de stockage L. Or dans un tel circuit le courant piégé s'atténue selon la loi :

$$(52) \quad I = I_0 e^{-\frac{R_m}{L} t}$$

Si l'on veut que le courant ne s'abaisse pas au dessous d'une valeur I (correspondant à une certaine atténuation $\frac{I}{I_0}$) pendant une durée de stockage τ_s donnée, cela impose pour R_0 la condition :

$$(93) \quad R_0 \leq \frac{L}{\tau_s} \log \frac{I_0}{I}$$

Il faut donc que R_0 soit suffisamment faible.

A titre d'exemple si l'interrupteur, y compris ses jonctions, est supraconducteur lorsqu'il est fermé cette condition est satisfaite.

- Il doit posséder un coefficient de self-induction suffisamment faible devant la self induction du circuit de stockage, comme on l'a vu, dans le cas où la charge est effectuée au moyen d'un générateur extérieur (§ 5 - 1).

Lors de son ouverture :

Lorsque l'impédance d'utilisation est dissipative on a vu (relations (88) et (89)) que pour obtenir un bon rendement il fallait que la résistance de l'interrupteur atteigne une valeur relativement élevée en un temps relativement bref devant la durée de la décharge.

Lorsque l'impédance d'utilisation est selfique on a vu (§ 7-3-2) que la résistance de l'interrupteur n'avait aucune influence sur le rendement mais déterminait par contre la "vitesse" de la décharge.

En ce qui concerne le coefficient de self-induction de l'interrupteur, en dehors des conditions relatives à la charge de l'énergie (§5-1), on peut être amené soit à le maintenir en dessous d'une valeur imposée par la nécessité de ne pas "pertuber" la décharge, soit au contraire à lui donner une valeur optimum qui permettra d'obtenir une loi de décharge bien déterminée.

Lorsqu'il est ouvert :

Il doit supporter la tension qui apparaît à ses bornes sans que prennent naissance des phénomènes parasites tels qu'amorçages, etc ...

Lors de sa fermeture :

En général on ne demande pas à l'interrupteur des temps de fermeture aussi brefs que ceux que l'on peut lui demander à l'ouverture. Les temps de fermeture les plus rapides que l'on puisse être amené à utiliser actuellement peuvent correspondre à des commutations liées à des cycles de l'opération de charge de l'énergie, tels que ceux que nous avons signalés par exemple au § 4-4.

Interrupteur parfait :

Dans les cas de transfert d'énergie active du circuit supraconducteur de stockage dans le circuit d'utilisation, un interrupteur qui dissiperait des quantités d'énergie pratiquement négligeables pendant la durée de son utilisation pourrait être considéré comme parfait.

Plusieurs possibilités s'offrent alors pour réaliser des interrupteurs présentant de telles caractéristiques. Nous allons examiner les suivantes :

- élément du circuit supraconducteur que l'on fait transiter entre les états supraconducteur et normal ;
- contacts supraconducteurs que l'on ouvre ou ferme mécaniquement ;
- contacts conducteurs que l'on ouvre ou ferme mécaniquement ;
- élément de circuit destructible .

7-5-1- Elément du circuit supraconducteur que l'on fait transiter :

On utilise comme interrupteur un élément du circuit supraconducteur [87/ 93]. L'interrupteur est "fermé" lorsque l'élément de circuit est à l'état supraconducteur (résistance nulle). et il est "ouvert" lorsqu'il est à l'état normal (résistance non nulle). La dynamique d'un tel interrupteur (rapport des résistances en position "ouverte" et "fermée") peut être très élevée (voir tableau 2)

Tableau 2

Comparaison entre les résistivités qui interviennent en position "ouverte" et en position "fermée" pour un interrupteur supraconducteur et un interrupteur classique. Ces résistivités n'ont qu'une valeur indicative. En fait il faut comparer les résistances correspondantes des interrupteurs réalisés. Les interrupteurs classiques révèlent alors une dynamique très inférieure à celle des interrupteurs supraconducteurs.

Résistivités intervenant en	Interrupteur supraconducteur	Interrupteur classique
position "ouverte"	$10^{-4} \Omega \times \text{cm}$	Résistivité du Nb - 48 % Ti à l'état normal $10^{18} \Omega \times \text{cm}$
		Résistivité dans la masse des meilleurs isolants connus
		$10^{10} \Omega \times \text{cm}$
		Résistivité superficielle possible
position "fermée"	$< 3,6 \times 10^{-23} \Omega \times \text{cm}$	Limite supérieure connue de la résistivité à l'état supraconducteur [96/] $1,7 \times 10^{-6} \Omega \times \text{cm}$
		Résistivité d'un conducteur classique en cuivre
Ordre de grandeur de la dynamique possible :		
rapport des résistivités intervenant en position "ouverte" et "fermée"	$> 2,7 \times 10^{18}$	$6 \times (10^{15} \text{ à } 10^{23})$

par comparaison à celle des meilleurs interrupteurs classiques utilisés jusqu'ici en électrotechnique. Cependant avec les matériaux supraconducteurs actuellement disponibles on ne peut pas encore réaliser, en valeur absolue, des résistances très élevées en position "ouverte" sans utiliser de grandes quantités de matériau supraconducteur (§ 7-5-1-3).

Malgré cela un tel interrupteur possède déjà de nombreux avantages parmi lesquels nous pouvons signaler les suivants :

- il ne se produit pas d'étincelle lors de la commutation
- le champ électrique peut conserver une distribution uniforme le long de l'interrupteur pendant et après sa commutation ; l'interrupteur peut alors supporter sans détérioration des surtensions très élevées. Ceci suppose que l'énergie dissipée dont il est le siège, c'est à dire :

$$(94) \quad w_2 = \int_0^{\infty} \frac{v_2^2(t) dt}{R_2(t)}$$

soit suffisamment faible. Lors d'une décharge sur une impédance dissipative il en est ainsi dans le cas où la résistance $R_2(t)$ de l'interrupteur atteint une valeur élevée devant la résistance équivalente de l'utilisation dans un intervalle de temps suffisamment faible (§ 7-4-1) devant la durée de la décharge,

- il n'y a pas de pièces mécaniques en mouvement.

On peut "actionner" l'interrupteur en agissant (§1) soit sur le champ magnétique auquel est soumis le matériau, soit sur le courant qui le parcourt, soit sur sa température, soit sur une combinaison de ces grandeurs /55/ /89/. En fait à l'heure actuelle l'action sur le courant qui parcourt l'interrupteur s'est avérée la moins intéressante à cause du couplage électrique que cela introduit entre le circuit de déclenchement et le circuit de stockage et de la difficulté d'introduire pratiquement les impulsions

de courant très élevées nécessaires. Cette difficulté s'avérerait encore plus grande dans le cas particulier que nous envisageons au § 7-5-1-3 où l'interrupteur est constitué par le circuit de stockage lui-même : augmenter le courant dans l'interrupteur reviendrait alors à augmenter l'énergie accumulée dans le circuit de stockage. Les meilleurs résultats ont été obtenus jusqu'à maintenant en agissant simultanément sur la température et sur le champ magnétique /55/.

Nous avons vu au § 7-5 quelles étaient les principales qualités demandées à l'interrupteur. Nous allons voir comment on peut les obtenir.

7-5-1-1- Self de l'interrupteur :

On réalise la valeur voulue en agissant sur la disposition géométrique du matériau supraconducteur.

7-5-1-2- Vitesse de transition :

Des vitesses de transition très rapides ont été obtenues en procédant en deux temps /55/ /89/. Dans un premier temps on amène le matériau constituant l'interrupteur, dans toute sa masse, très près des conditions de transition ; dans un deuxième temps on franchit très rapidement ces conditions en tous les points du matériau au moyen d'une impulsion de grande amplitude à front de montée très raide. D'excellents résultats ont été obtenus en amenant le matériau dans le premier temps très près de sa température critique puis en le soumettant dans le deuxième temps à une impulsion magnétique de grande amplitude (de l'ordre par exemple de la dizaine de kilogauss) à front de montée très rapide (de l'ordre par exemple de la dizaine de μs). On a ainsi obtenu au laboratoire sur des interrupteurs constitués par des câbles de Nb-Zr de plusieurs dizaines de mètres de longueur des transitions

totales de l'état supraconducteur à l'état normal dans des temps de l'ordre de la μs . On envisage à l'heure actuelle de réaliser des temps de transition totale beaucoup plus courts. Il est d'ailleurs bien connu par exemple que les cryotrons [9] (bien que leur transition soit relativement facile à obtenir, la masse de matériau supraconducteur mise en jeu étant très faible) peuvent transiter dans des temps de l'ordre de 10^{-8} s. On sait d'autre part que le temps de relaxation de la transition de l'état supraconducteur à l'état normal est inférieur à 10^{-9} s. Ceci permet donc théoriquement de prévoir la possibilité de transitions totales dans des temps de cet ordre de grandeur.

Le fait de procéder en deux temps pour déclencher l'ouverture de l'interrupteur présente aussi d'autres avantages. Cela permet tout d'abord lorsque l'interrupteur est dans sa position "fermée" de l'utiliser assez loin de ses conditions critiques de transition. Il en résulte une amélioration de la stabilité et de la sécurité du circuit, car comme on le verra (§ 7-5-1-3) l'interrupteur ne peut pas être "stabilisé" par les procédés actuellement utilisés pour stabiliser les bobinages supraconducteurs. Ensuite en agissant sur sa température il est possible de porter avec précision toute la masse de l'interrupteur dans des conditions très voisines des conditions critiques de transition. Ainsi on pourra alors déclencher la transition au moyen d'une impulsion d'amplitude beaucoup plus faible tout en permettant à tous les points de l'interrupteur de transiter pratiquement "au même instant". Les figures 19 à 21 précisent ce résultat.

La figure 19 schématise en fonction du temps l'impulsion magnétique $B(t)$ supposée relevée en un point bien défini de l'espace. La bande hachurée représente la plage des valeurs correspondantes pour lesquelles transitent les différents points de l'interrupteur (la partie inférieure représente la transition du premier point de l'interrupteur et la partie supérieure celle du dernier point). La largeur ΔB de cette plage provient de l'hétérogénéité du matériau ou des conditions dans lesquelles se trouvent ses divers points (parties de l'interrupteur situées dans des régions de l'espace où le champ est plus ou moins élevé par rapport à la région où le champ est représenté par la courbe de la figure 19).

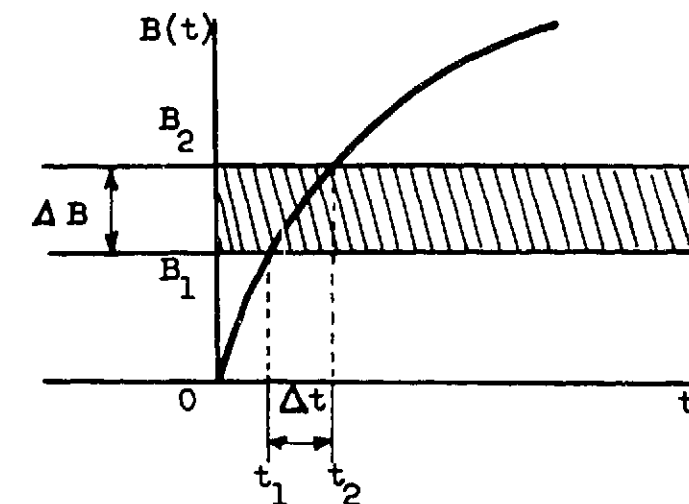


Figure 19

A cet intervalle ΔB correspond une durée de transition totale Δt d'autant plus grande que ΔB est plus grand et que la pente de l'impulsion $B(t)$ est plus faible.

On voit donc que pour obtenir des transitions totales dans des temps très courts on peut :

- réduire directement l'intervalle ΔB , par exemple en utilisant pour l'interrupteur un matériau aussi homogène que possible dont on porte toute la masse aussi uniformément que possible dans des conditions très voisines des conditions critiques et en assurant une répartition spatiale aussi uniforme que possible de l'impulsion magnétique de déclenchement,
- augmenter la pente de l'impulsion magnétique ; ou encore pour une impulsion donnée avoir préalablement amené l'interrupteur à la limite de ses conditions critiques de façon à déplacer la plage ΔB vers l'origine des coordonnées sur la figure 19. En effet c'est près de l'origine, dans ce cas, que la pente de l'impulsion magnétique $B(t)$ est maximum.

Lorsque l'on veut obtenir des transitions totales et rapides on ne peut pas compter sur la propagation d'une transition initiée en un point ou en quelques points du supraconducteur. En effet la vitesse de propagation de la transition dans le supraconducteur est relativement faible ; dans les meilleures conditions elle atteint quelques dizaines de mètres à la seconde [90/ 91/ et c'est pour cette raison que l'on est amené à initier la transition d'une façon aussi uniforme que possible c'est à dire en tous les points de l'interrupteur "en même temps" [55/ 89/. La résistance apparaît alors brutalement et elle acquiert "instantanément" la valeur maximum réalisable, c'est à dire celle qui correspond à l'état normal de tous les points de l'interrupteur. La figure 20 schématise la variation de résistance $R_2(t)$ d'un interrupteur lorsque la transition n'est pas initiée

uniformément et la figure 21 schématise la variation de résistance du même interrupteur lorsque la transition a été initiée uniformément. De plus sur la figure 20 tous les points de l'interrupteur n'ont pas encore transité dans l'intervalle de temps représenté.

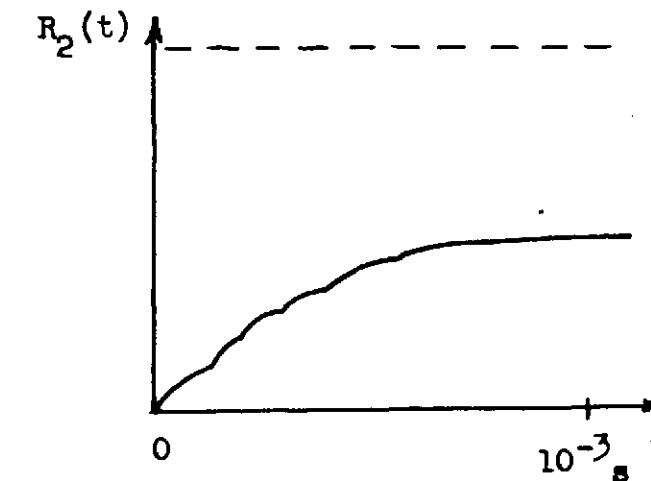


Figure 20

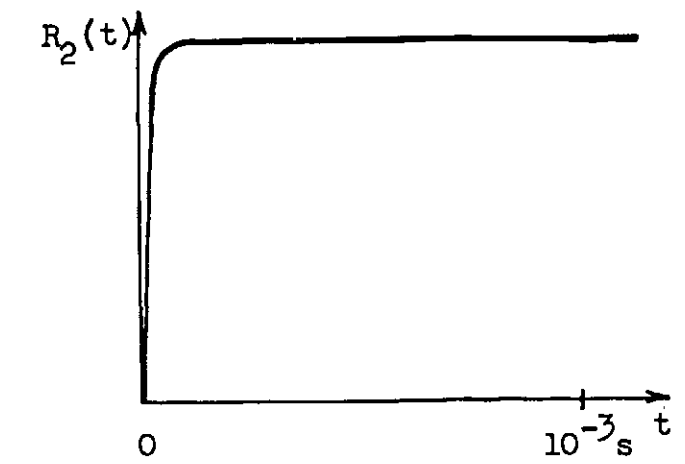


Figure 21

Nous avons utilisé au § 7-3-1-1, pour représenter la variation de la résistance $R_2(t)$, la fonction empirique (41) dont l'allure est schématisée par la figure 12. Nous allons voir quels phénomènes physiques peut traduire cette loi.

Considérons l'interrupteur comme constitué par un supraconducteur homogène résultant de la juxtaposition longitudinale d'un très grand nombre de domaines identiques

possédant les propriétés suivantes :

- la résistance d'un domaine à l'état supraconducteur est nulle ;
- la résistance d'un domaine à l'état normal a une valeur finie, telle que si tous les domaines constituant l'interrupteur sont à l'état normal, la résistance de l'interrupteur est égale à R_m ;
- la transition d'un domaine est instantanée par rapport aux durées qui vont être envisagées.

A l'instant t , au cours de la transition, désignons par $x(t)$ la proportion relative des domaines qui n'ont pas encore transité par rapport au nombre total des domaines qui constituent l'interrupteur. On aura :

$$(95) \quad R_2(t) = R_m (1 - x(t))$$

Supposons qu'à tout instant le rapport entre le nombre de domaines qui transitent par unité de temps et le nombre de domaines qui n'ont pas encore transité soit constant. Désignons par k ce rapport constant ; on aura :

$$(96) \quad -\frac{dx}{dt} = kx(t) \quad \text{avec } k > 0$$

Par intégration entre les instants 0 et t on obtient :

$$(97) \quad x(t) = e^{-kt}$$

et l'expression (95) devient alors

$$(98) \quad R_2(t) = R_m (1 - e^{-kt})$$

qui n'est autre que l'expression (41) .

7-5-1-3- Résistance en position "ouverte" :

Le cas où l'on veut que la résistance en position "ouverte" soit élevée étant le plus difficile à réaliser et se rencontrant lorsque l'on cherche à obtenir des décharges rapides nous allons plus spécialement l'examiner lorsque l'impédance d'utilisation est dissipative (figures 8 et 9 dans lesquelles Z_u est remplacé par R_u). Nous avons vu (§ 7-4-1) que dans ce cas les valeurs que prend la résistance de l'interrupteur ont une influence sur le rendement. Pour que l'énergie soit transférée dans la résistance d'utilisation R_u (et non dissipée dans l'interrupteur) il faut (§ 7-4-1) que, dans un temps très bref devant la durée de la décharge, la résistance $R_2(t)$ de l'interrupteur devienne très supérieure à R_u .

7-5-1-3-1- Interrupteur séparé :

Si l'interrupteur est distinct du circuit de stockage et s'il est tel qu'il ne soit pas détruit lors de la décharge, il est "optimisé" lorsque pour un courant total donné I et une résistance normale R_m le volume $s \ell$ de matériau supraconducteur utilisé est minimum (s désignant la section du matériau supraconducteur qui constitue l'interrupteur et ℓ sa longueur).

En désignant par ρ la résistivité du matériau supraconducteur à l'état normal la résistance de l'interrupteur à l'état normal a pour expression :

$$(99) \quad R_m = \rho \frac{\ell}{s} = \rho \frac{s \ell}{s^2}$$

et comme

$$(100) \quad I = \delta_c s$$

δ_c désignant la densité de courant critique, on en déduit :

$$(101) \quad sl = \frac{R_m I^2}{\rho \delta_c^2}$$

Si R_m et I sont donnés il faut donc pour que sl soit minimum que l'on ait :

$$(102) \quad \boxed{\rho \delta_c^2 \text{ maximum}}$$

En particulier cette condition conduit à l'élimination du gainage conducteur qui est généralement utilisé sur les matériaux supraconducteurs pour les stabiliser. En effet le gainage conducteur a pour effet de diminuer la résistivité apparente du supraconducteur ainsi utilisé lorsqu'il est à l'état normal.

En agissant sur la configuration et la disposition géométrique du matériau on pourra augmenter le produit $\rho \delta_c^2$. On sera amené de plus à choisir pour l'interrupteur un matériau différent de celui qui sera "optimisé" (voir par exemple la relation (24)) pour le bobinage de stockage.

Nous avons entrepris, depuis quelques années, différents travaux sur ces questions. Certains travaux sont orientés principalement vers des matériaux nouveaux ainsi que vers des configurations en couches.

7-5-1-3-2- Interrupteur confondu

La solution indiquée ci-dessus oblige à utiliser une certaine quantité de matériau supraconducteur pour réaliser le bobinage de stockage de coefficient de self-induction L , qui devra conserver une résistance négligeable lors de la décharge principalement dans le cas de la figure 8, et une autre quantité de matériau supraconducteur pour réaliser l'interrupteur de résistance normale R_m , qui devra par contre posséder une self négligeable. Il est plus économique de faire jouer au même matériau supraconducteur en même temps le rôle de self de stockage et celui d'interrupteur /92/. On utilise alors le montage représenté par la figure 9 et c'est tout le bobinage L (constitué par un supraconducteur non gainé) que l'on fait transiter pour "ouvrir" ce circuit de stockage. Cela permet pour une quantité donnée de matériau supraconducteur d'obtenir la résistance normale maximum possible puisque l'on fait transiter tout le supraconducteur utilisé. On peut bénéficier ainsi à la fois d'une amélioration du rendement et d'une économie de matériau.

L'optimisation du circuit peut alors conduire à faire un compromis entre une condition du type (102) correspondant comme on va le voir à une constante de temps propre du circuit minimum et une condition du type (24) correspondant à un maximum d'énergie stockée. De toutes façons dans ces deux types de relations on voit l'importance que joue la densité de courant critique. Nous n'entrerons pas ici plus avant dans les détails.

7-5-1-3-3- Influence de la nature du matériau supraconducteur :

Nous avons vu (§ 7-4-1) dans le cas de la décharge sur une impédance dissipative qu'il fallait, pour obtenir un bon rendement de transfert d'énergie, que la résistance de l'interrupteur atteigne dans un temps suffisamment court devant la durée de la décharge une valeur R_m suffisamment élevée devant les valeurs de la résistance d'utilisation. Supposons, pour simplifier, la résistance R_u constante et la condition précédente réalisée. La valeur du coefficient d'induction L de la self de stockage étant donnée, la constante de temps propre $\frac{L}{R_m}$ de décharge du circuit sur lui-même est alors faible devant la constante de temps $\frac{L}{R_u}$ de décharge du circuit de stockage sur l'utilisation. Si la nature et la quantité de matériau supraconducteur utilisé sont données, la constante de temps propre $\frac{L}{R_m}$ de décharge du circuit sur lui-même sera évidemment minimum si l'on rend R_m maximum. Ceci sera réalisé si l'on fait transiter tout le supraconducteur utilisé c'est à dire si l'on utilise comme interrupteur la self de stockage elle-même (§ 7-5-1-3-2) ce qui oblige à récupérer l'énergie par l'intermédiaire d'un circuit couplé S (figure 9) .

Supposons, encore pour simplifier, un couplage parfait entre les enroulements L et S du transformateur ainsi constitué. Désignons par n_L et n_S les nombres de spires respectifs de ces enroulements. On a alors rigoureusement entre L et S la relation :

$$(103) \quad S = L \left(\frac{n_S}{n_L} \right)^2$$

Dans ces conditions le circuit de la figure 22 peut être remplacé par le circuit équivalent de la figure 23 dans lequel la résistance $R'_2(t)$ est égale à la résistance $R_2(t)$,

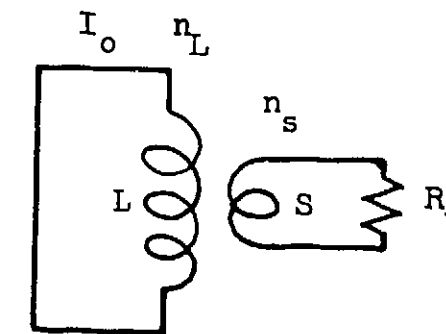


Figure 22

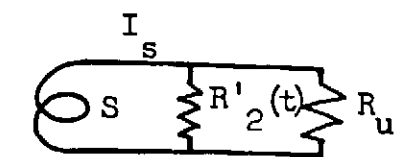


Figure 23

présentée par la self L lors de sa transition, multipliée par le carré du rapport de transformation $\frac{n_S}{n_L}$:

$$(104) \quad R'_2(t) = R_2(t) \left(\frac{n_S}{n_L} \right)^2$$

A l'instant initial la résistance $R'_2(t)$ est donc rigoureusement nulle . Le courant équivalent I_S piégé dans la self équivalente S du circuit équivalent de la figure 23 est égal à :

$$(105) \quad I_S = I_0 \frac{n_L}{n_S}$$

I_0 étant le courant initial piégé dans le circuit réel (figure 22)

On vérifie que l'énergie ainsi initialement stockée dans le circuit équivalent (figure 23).

$$(106) \quad W = \frac{1}{2} \cdot S \cdot I_S^2 = \frac{1}{2} \cdot L \left(\frac{n_S}{n_L} \right)^2 \cdot \left(I_0 \frac{n_L}{n_S} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_0^2$$

est bien identiquement égale à l'énergie initialement stockée dans le circuit réel.

Lorsque la self L transitera sa résistance $R_2(t)$ atteindra une valeur R_m et la résistance équivalente $R_2'(t)$ dans le circuit équivalent atteindra la valeur correspondante R_m' donnée par (70) :

$$(107) \quad R_m' = R_m \left(\frac{n_S}{n_L} \right)^2$$

On vérifie que la constante de temps propre du circuit équivalent :

$$(108) \quad \frac{S}{R_m'} = \frac{L \left(\frac{n_S}{n_L} \right)^2}{R_m \left(\frac{n_S}{n_L} \right)^2} = \frac{L}{R_m}$$

est la même que celle du circuit réel.

On vérifie de même que la constante de temps de décharge du circuit équivalent :

$$(109) \quad \frac{S}{R_u} = \frac{L \left(\frac{n_S}{n_L} \right)^2}{R_u \left(\frac{n_L}{n_S} \right)^2} = \frac{L}{R_u}$$

est la même que celle du circuit réel.

Si la valeur de L est fixée à priori, le fait de vouloir alimenter une résistance d'utilisation R_u donnée avec une constante de temps de décharge $\frac{S}{R_u}$ donnée impose la valeur de S, c'est à dire la valeur du rapport de

transformation $\frac{n_L}{n_S}$. Et pour que le rendement reste élevé il faut que la constante de temps propre $\frac{S}{R_m'}$ soit très inférieure à la constante de temps de la décharge $\frac{S}{R_u}$. Cela définit la valeur de R_m' qui doit satisfaire la relation :

$$(110) \quad R_m' \gg R_u$$

ce qui d'après (107) définit la valeur de R_m :

$$(111) \quad R_m \gg \left(\frac{n_L}{n_S} \right)^2 R_u$$

Propriété remarquable :

Nous allons montrer que la constante de temps propre $\frac{L}{R_m}$ du circuit est toujours la même quelles que soient la façon d'utiliser ou de disposer le matériau supraconducteur et la valeur de la self réalisée (fil fin et grand nombre de spires, câble de forte section et faible nombre de spires, ou même circuit massif constitué par une seule spire $\angle 74$ bis/, si la quantité de matériau utilisé est fixée, une fois que l'on a choisi la forme et les dimensions d'encombrement de la self de stockage. Cette constante de temps dépend par contre de la nature du matériau utilisé, c'est à dire de sa résistivité normale.

Supposons réalisée une self L au moyen d'une longueur l de fil supraconducteur de section s . En désignant par ρ la résistivité normale du supraconducteur la résistance normale correspondante sera :

$$(112) \quad R_m = \rho \frac{l}{s}$$

En conservant constante la quantité de matériau utilisé multiplions par N (supérieur ou inférieur à 1) le nombre de spires constituant le bobinage. La longueur de fil utilisé sera multipliée par N et la section du fil divisée par N, pour que le volume total du matériau :

$$(113) \quad Nl \cdot \frac{s}{N} = l \cdot s$$

demeure constant. La résistance normale sera alors égale à :

$$(114) \quad R_m = \rho \frac{Nl}{\frac{s}{N}} = N^2 R_m$$

Or d'après (22) le coefficient d'induction de ce nouveau bobinage sera :

$$(115) \quad \mathcal{L} = N^2 L$$

La constante de temps propre du nouveau circuit sera :

$$(116) \quad \frac{\mathcal{L}}{R_m} = \frac{N^2 L}{N^2 R_m} = \frac{L}{R_m}$$

Elle est donc indépendante de la valeur de la self réalisée.

Par contre si l'on remplace le matériau supraconducteur par un matériau possédant une résistivité normale p fois plus élevée les résistances normales R_m et R_m seront chacune multipliées par p . La constante de temps propre du circuit (relation (116)) sera alors divisée par p .

Il en résulte que si, avec une quantité donnée d'un matériau donné, on réalise l'énergie stockée maximum possible, la "vitesse" maximum à laquelle on pourra espérer décharger cette énergie sera limitée par la résistivité

normale du matériau considéré. Ce résultat nous a conduits à orienter des recherches vers l'étude de matériaux présentant à l'état normal une résistivité élevée.

De toutes façons, un matériau étant donné, on peut toujours diminuer la constante de temps propre $\frac{L}{R_m}$ du circuit, c'est à dire augmenter la "vitesse" maximum de décharge possible. Il suffit de réaliser avec la quantité donnée de matériau une self totale inférieure à la self maximum réalisable. C'est ce que l'on fait par exemple lorsque l'on adjoint à une self supraconductrice un interrupteur sans self (figure 8). On peut toujours augmenter la valeur de la résistance normale R_m de l'interrupteur au-delà d'une valeur donnée. Mais cela revient alors, pour une énergie stockée déterminée, à utiliser une quantité de matériau supraconducteur d'autant plus élevée.

7-5-1-3-4 - Influence des dimensions géométriques du circuit

On peut se demander comment varient les constantes de temps propres et les énergies stockées dans le cas de bobinages géométriquement semblables. D'après les résultats du paragraphe qui précède la loi de variation sera la même quelles que soient les valeurs des coefficients de self-induction des bobinages envisagés. Nous allons donc considérer deux bobinages rigoureusement semblables c'est à dire tels que toutes les dimensions de l'un (y compris les dimensions du fil utilisé) soient un multiple α des dimensions correspondantes de l'autre.

Désignons par :

- L et L' les coefficients de self-induction des deux bobinages,
- R et R' leurs résistances normales,
- I et I' les courants piégés,

Dans ce cas pour utiliser le minimum de matériau supraconducteur on sera amené à conserver la même densité de courant dans les deux bobinages. Ceci ne sera possible que si l'on ne multiplie pas par α l'épaisseur du deuxième bobinage. Mais alors les deux bobinages ne seront plus géométriquement semblables, les épaisseurs des enroulements ayant été maintenues identiques.

Les résistances et les coefficients de self-induction (pour des bobinages de faible épaisseur) seront liés par les relations :

$$(124) \quad R'' = \frac{R}{\alpha} \propto R$$

$$(125) \quad L'' = \alpha L$$

d'où l'on déduit :

la relation entre les constantes de temps propres :

$$(126) \quad \frac{L''}{R''} = \alpha \frac{L}{R}$$

la relation entre les énergies stockées

$$(127) \quad W'' = \frac{1}{2} L'' I''^2 = \alpha^3 \frac{1}{2} L I^2 = \alpha^3 W$$

Dans ce cas l'énergie stockée croîtra comme α^3 alors que la masse du supraconducteur utilisé ne croîtra que comme α^2 (l'épaisseur du bobinage restant constante). On retrouve bien la relation (24) $W \sim m^{3/2}$ à densité de courant et à induction constantes.

La constante de temps propre du circuit croît comme α alors que l'énergie stockée croît comme α^3 .

Pour conclure sur les particularités de l'interrupteur constitué par un élément de circuit que l'on fait transiter on peut dire qu'avec ce type d'interrupteur on peut obtenir des ouvertures très rapides mais qu'avec les matériaux supraconducteurs actuels les valeurs de la résistance finale (en position "ouverte") ne sont actuellement pas très élevées.

7-5-2- Contacts supraconducteurs actionnés mécaniquement

L'interrupteur est constitué par des contacts supraconducteurs que l'on sépare mécaniquement pour provoquer l'ouverture. Cette ouverture n'est pas aussi rapide que dans le cas précédent, de plus elle peut donner lieu à un arc.

On remédie partiellement à cet inconvénient en utilisant des contacts sous vide. On peut encore, pour faciliter l'extinction de l'arc, disposer un condensateur aux bornes de l'interrupteur [94]. On peut de plus réaliser l'interrupteur de façon que les parties qui se séparent les dernières lors de l'ouverture, ou celles qui entrent en contact les premières lors de la fermeture, soient doublées d'un contact supraconducteur constituant une sorte de verrouillage en position fermée. On sépare ainsi les organes destinés à la fonction de commutation de ceux qui servent en position fermée à assurer la continuité du circuit supraconducteur.

L'intérêt d'un tel interrupteur est qu'il peut avoir une résistance pratiquement nulle en position fermée et pratiquement infinie en position ouverte.

Les utilisations possibles d'un tel interrupteur sont les suivantes :

- On peut l'utiliser pour la décharge d'une énergie stockée sur une impédance d'utilisation dissipative (interrupteur K_2 sur les figures 8 et 9) . Il faut que pendant son ouverture sa

résistance $R_2(t)$ passe brusquement (intervalle de temps Δt sur la figure 24) par rapport à la durée de la décharge, d'une valeur très faible à une valeur très élevée devant les valeurs de la résistance d'utilisation $R_u(t)$. Tant que la résistance présentée par l'interrupteur reste très faible la constante de temps du circuit de stockage reste très grande et l'énergie reste stockée.

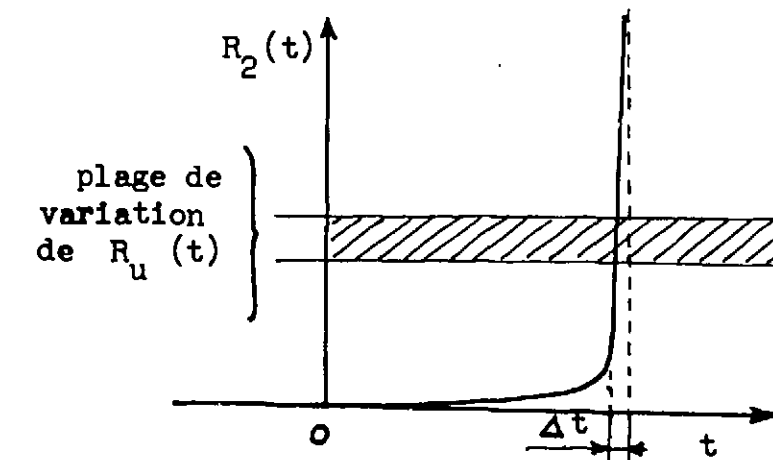


Figure 24

Dès que la résistance de l'interrupteur est devenue très supérieure à celle de l'utilisation l'énergie stockée se décharge dans l'utilisation.

- On peut utiliser cet interrupteur comme dispositif de sécurité destiné à shunter un autre interrupteur (§ 6-3). Dans ce cas il peut être actionné sans qu'apparaisse pratiquement de différence de potentiel entre ses bornes, c'est à dire sans donner lieu à un arc.
- On peut l'utiliser comme sectionneur. On ne l'actionne que lorsque le courant qui le parcourt est nul. On en trouvera deux exemples associés au transformateur statique, faisant l'objet de la référence [70], utilisé pour charger l'énergie. Dans ce cas la tension à ses bornes est nulle lorsqu'il est actionné.

Il ne peut pas apparaître d'arc.

- On peut encore l'utiliser comme sectionneur d'isolement pour séparer deux circuits supraconducteurs que l'on veut isoler l'un de l'autre et entre lesquels peuvent apparaître des tensions élevées. Ce cas pourra se produire par exemple si l'on veut séparer le dispositif de charge de l'énergie du dispositif de stockage avant d'effectuer la décharge. L'interrupteur peut alors supporter en position ouverte des différences de potentiel très élevées qui sont fonction de la distance entre ses contacts.

7-5-3- Contacts conducteurs actionnés mécaniquement

Certains interrupteurs, sectionneurs, disjoncteurs... peuvent posséder en position fermée des résistances de contact suffisamment faibles pour pouvoir être utilisés à la place des interrupteurs précédents. Leurs contacts et leurs connexions peuvent être soit à la température ambiante, soit portés à basse température de façon à diminuer leur résistance.

7-5-4- Élément de circuit destructible

L'interrupteur peut être constitué par un élément de circuit (supraconducteur ou non) que l'on détruit. Le montage doit être tel que, lors de la rupture, l'arc électrique provenant de la destruction du matériau soit suffisamment vite interrompu. Un tel interrupteur peut être utilisé dans les mêmes conditions que les deux précédents mais il ne fonctionne pratiquement qu'à l'ouverture. De plus il faut remplacer la partie détruite après chaque opération.

7-6 - Particularités des montages :

Les montages doivent présenter des caractéristiques différentes de celles qui sont recherchées dans la technologie des champs magnétiques intenses. Entre autres :

Les bobinages étant le siège de variations de flux importantes, lors de la décharge, il peut apparaître des tensions élevées ainsi que des courants induits importants dans les masses conductrices avoisinantes. En conséquence les spires supraconductrices (s'il s'agit d'un bobinage constitué de spires) doivent être électriquement isolées entre elles. De même si le bobinage est constitué par plusieurs couches ou par plusieurs enroulements (enroulements primaire, secondaire... etc.) les couches ou les enroulements doivent être convenablement isolés.

L'utilisation de carcasses métalliques ou de frettages métalliques, qui se comporteraient comme des spires en court-circuit couplées au circuit de stockage et seraient le siège de courants de Foucault importants, est à rejeter. De même des précautions sont à prendre en ce qui concerne le cryostat qui entoure le bobinage, s'il est métallique ou s'il comporte des parties métalliques ou métallisées. On peut être conduit soit à utiliser des matériaux de résistivité électrique élevée, convenablement disposés de façon à réduire au minimum le couplage avec le dispositif de stockage, soit à utiliser des matériaux électriquement isolants. Cela interdit donc en particulier certains des procédés de "stabilisation" actuellement utilisés pour l'obtention des champs magnétiques permanents.

Les matériaux magnétiques actuellement connus se trouvent tous saturés au voisinage de 25 KG. Il s'avère donc intéressant d'une façon générale de ne pas utiliser de circuit magnétique. Cela oblige alors à prendre des précautions pour obtenir un bon couplage magnétique entre enroulements (par exemple primaire et secondaire). On y parvient en utilisant des

bobinages présentant un grand diamètre devant l'épaisseur des enroulements.
On peut aussi utiliser des enroulements enchevêtrés suffisamment isolés.

Dans le cas des décharges rapides on peut encore être amené
à prendre des précautions spéciales pour réduire "l'effet de peau" sur
les conducteurs.

BIBLIOGRAPHIE

- /86/- Cette idée est due à LOUP (P.)
- /87/- PROST (G.), SOLE (J.) .- Procédé pour la libération d'une énergie électrique et dispositif de mise en oeuvre dudit procédé .- Demande de brevet d'invention déposée par le C.E.A. , n° P.V. , 37 843 du 9 Novembre 1965 .
- /88/- HANRAHAN (D.J.) .- The role of inductance in superconducting energy storage systems .- Proceedings Letters , January 1966 pp. 67-68 .
- /89/- PROST (G.), SOLE (J.) .- Procédé de déclenchement d'un interrupteur supraconducteur et interrupteurs en comportant application .- Demande de brevet d'invention déposée par le C.E.A. , n° P.V. 54.574 du 22 Mars 1966 .
- /90/- STEKLY (Z.J.J.) .- Theoretical and experimental study of an unprotected superconducting coil going normal. - Avco-Everett Research Lab .- Research report 135 BSD - TDR - 62 - 116 , May 1962 .
- /91/- DONADIEU (L.) .- Propagation du blocage thermique dans les bobinages supraconducteurs .- Bulletin de la Société Française des Electriciens .- 8^e série Tome 5 n° 58 , Octobre 1964 , pp. 644 - 650 .
- /92/- SOLE (J.) .- Procédé de libération de l'énergie électrique emmagasinée dans un circuit supraconducteur et dispositif de mise en oeuvre de ce procédé.- Demande de brevet d'invention déposée par le C.E.A. , n° P.V. 69.216 du 12 Juillet 1966 .
- /93/- AMEEN (D.L.), WIEDERHOLD (P.R.) .- Fast acting superconducting power switches .- The Review of Scientific Instruments .- Vol. 35 n° 6 June 1964 pp. 733-737.

- /94/- LUCAS (E.J.), STEKLY (Z.J.J.), FOLDES (A.), MILTON (R.) .- Avco Everett Research Lab . - The use of superconducting coils as energy storage elements in pulsed system operations. - International Conference on Magnetism Washington D.C. - April 1967 .
- /95/- PROST (G.) .- Travaux non publiés .
- /96/- QUINN (D.J.) , ITINER (W.B.) .- Resistance in a superconductor .- Journal of Applied Physics .- Vol 33 n° 2 , February 1962 , pp. 748 - 749 .
- /97/- SOLE (J.) .- Travaux non publiés.

8 - QUELQUES APPLICATIONS ACTUELLEMENT POSSIBLES:

L'utilisation des supraconducteurs pour le stockage et la décharge de l'énergie électrique étant toute nouvelle, il n'existe pas encore de réalisations industrielles. Cependant les possibilités sont nombreuses, depuis la simple substitution aux dispositifs traditionnels de décharge d'énergie, jusqu'aux nouvelles utilisations de l'énergie que les propriétés particulières des supraconducteurs rendent maintenant possibles.

En particulier rappelons que les supraconducteurs permettent :

- de stocker des énergies très élevées (§ 6-7), ce qui prolonge les applications actuelles des dispositifs conventionnels de stockage d'énergie électrique ;
- d'obtenir des densités d'énergie électrique stockée très élevées (§ 6-7), ce qui conduit à des encombrements réduits ;
- d'obtenir des décharges très rapides (§ 7-3-1) et par conséquent des puissances élevées ;
- d'alimenter des impédances d'utilisation de valeurs très diverses, plusieurs circuits d'utilisation pouvant même être alimentés simultanément au moyen d'enroulements secondaires classiques (§ 7-2) ;
- d'engendrer des courants ou des tensions très élevés (§ 7-2) ;
- d'obtenir des rendements élevés, le dispositif supraconducteur offrant de nouvelles possibilités d'adaptation d'impédance, et de parvenir ainsi à des décharges amorties sur les impédances d'utilisation dissipatives (§ 7-3-1) ;
- et encore, de stocker de l'énergie à des températures très basses.

Dans ce qui suit on pourra distinguer, au passage, entre :

- les décharges "rapides", lorsque l'on cherche principalement à obtenir soit des temps de libération très courts, soit des puissances importantes ;
- les décharges "lentes", lorsque l'on s'intéresse principalement à la durée possible d'utilisation de l'énergie qui a été stockée.

Dans l'avenir l'utilisation combinée de ces deux types de décharges peut-être envisagée dans certains cas.

8-1- Décharges dans les gaz :

La décharge dans un gaz engendre la création d'un plasma par suite de l'ionisation des molécules du gaz. Suivant la pression du gaz initial on peut obtenir différents types de décharges [98]. L'énergie et le degré d'ionisation des particules constituant le plasma sont liés au champ électrique dans la décharge ; le nombre de ces particules est principalement lié au courant. Dans la décharge les particules ionisées sont en mouvement et leur distribution spatiale peut évoluer au cours du temps. Cette évolution peut même entraîner une déformation du plasma (le phénomène de striction, bien connu, en est un exemple) ou un mouvement d'ensemble (c'est par exemple le cas lors de l'éjection du plasma par un canon à plasma (§ 8-1-5)). Le plasma peut être considéré dans son ensemble comme un circuit déformable entraînant, dans sa déformation, une modification dans la distribution spatiale du champ magnétique. Il en résulte une variation de flux et la force contre électromotrice correspondante est donnée par le terme $\frac{d L_u(t)}{dt} i(t)$ de l'équation (86). A cette force contre électromotrice correspond une énergie exprimée par le terme $\frac{d L_u(t)}{dt} i^2(t) dt$, de l'équation (87), qui comme on l'a vu (§ 7-3-4) se répartit, en quantités égales, en énergie magnétique et en travail.

8-1-1- Réalisation pratique de l'alimentation :

8-1-1-1- Décharges entre électrodes :

On peut connecter les électrodes, entre lesquelles on veut effectuer la décharge, directement aux bornes A et B du circuit de stockage comme représenté sur la figure 25.

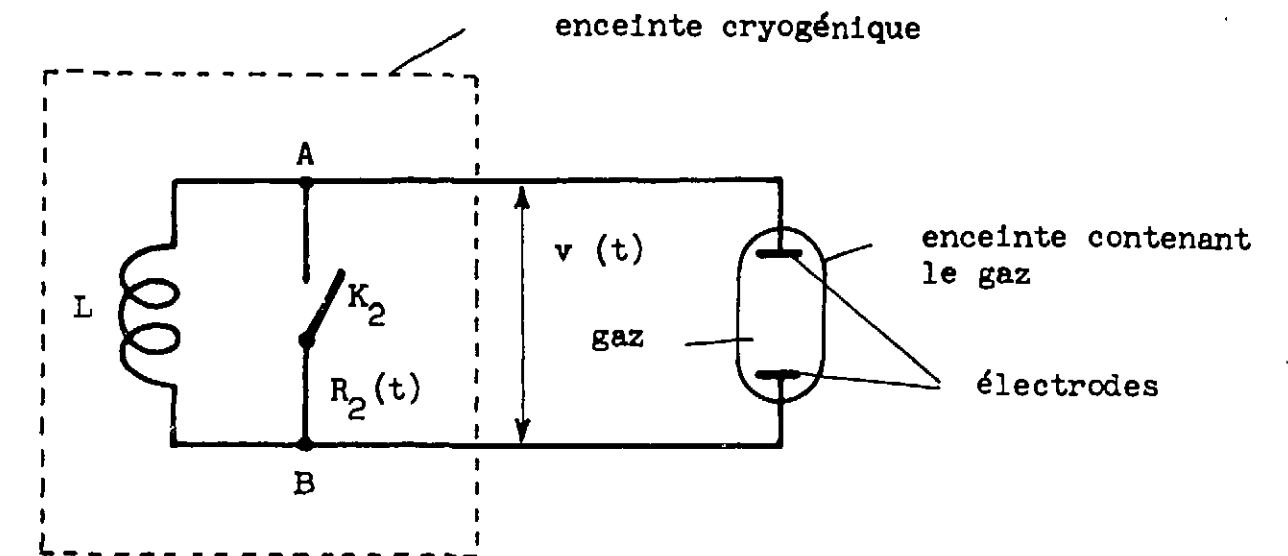


Figure 25

La self supraconductrice L ayant été chargée sous un courant continu I_0 , lorsque l'on ouvre l'interrupteur K_2 il apparaît entre les points A et B une différence de potentiel $v(t)$ donnée par la relation (29) (dans laquelle il suffit de remplacer $R(t)$ par la résistance $R_2(t)$ de l'interrupteur) tant que la décharge dans le gaz n'est pas amorcée :

$$(128) \quad v(t) = R_2(t) I_0 e^{-\frac{1}{L} \int_0^t R_2(t) dt}$$

On a vu (§ 7-3-1) que cette différence de potentiel était croissante (jusqu'à un maximum). Par conséquent dès que la tension de disruption est atteinte dans le gaz (§ 9) la décharge s'amorce dans le gaz.

Les connexions des électrodes aux points A et B sont effectuées au moyen de conducteurs normaux (par exemple cuivre ou aluminium). Ces conducteurs peuvent constituer une ligne, par exemple une ligne coaxiale si cela est nécessaire, etc... Pour éviter pendant la décharge les inconvénients d'une transition accidentelle de la self supraconductrice de stockage, on peut doubler le supraconducteur qui la constitue d'un conducteur normal (par exemple aluminium ou cuivre) auquel sont alors reliées les connexions des électrodes de décharge [87/. On peut aussi alimenter ces électrodes au moyen d'un enroulement secondaire, constitué par un conducteur normal, couplé par induction au circuit de stockage (§ 7-2).

Si l'on veut abaisser la tension initiale de la décharge on peut ioniser préalablement le gaz en utilisant l'un quelconque des procédés classiques bien connus. On peut aussi en utilisant plusieurs circuits secondaires couplés au circuit de stockage séparer nettement les fonctions :

- amorçage de la décharge, nécessitant une tension élevée mais peu d'énergie ;
- alimentation en énergie de la décharge proprement dite, nécessitant un courant élevé .

La figure 26 donne un exemple d'une telle réalisation .

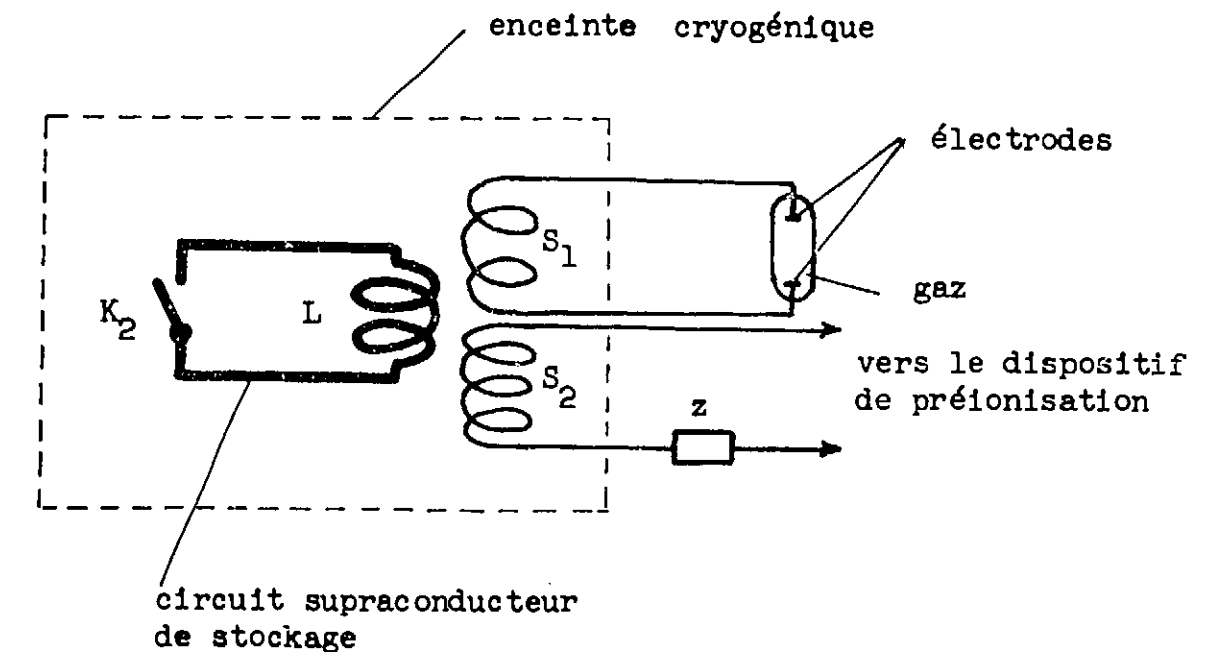


Figure 26

L'enroulement secondaire S_2 est uniquement destiné à fournir la tension initiale nécessaire pour alimenter le dispositif de préionisation du gaz. Suivant le procédé utilisé (non représenté), on peut être amené à disposer en série avec l'enroulement S_2 une impédance z (qui peut être une résistance, une capacité, etc...) de façon à limiter la puissance débitée par ce circuit. Au contraire l'enroulement S_1 est prévu pour alimenter la décharge en y transférant, une fois la préionisation effectuée, la majeure partie de l'énergie initialement stockée. Dans le cas de la figure 26 on peut directement utiliser comme interrupteur de décharge la self supraconductrice L (§ 7-5-1-3-2).

8-1-1-2- Décharges par induction :

On peut amorcer et alimenter la décharge dans le gaz uniquement par induction électromagnétique, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des électrodes. Pour cela il suffit de disposer le gaz, contenu dans une enceinte isolante, de façon qu'une fois ionisé, c'est à dire lorsqu'il est devenu conducteur, il constitue lui-même un circuit conducteur couplé par induction au circuit de stockage (§ 7-2) .

L'ionisation du gaz peut être amorcée directement par le champ électrique qui apparaît lors de l'ouverture du circuit de stockage, ou bien elle peut être provoquée par un moyen extérieur indépendant ou lui-même alimenté par un circuit secondaire supplémentaire tel que S_2 sur la figure 26 .

8-1-2- Utilisation pour les recherches sur la fusion nucléaire contrôlée :

Jusqu'à maintenant, et d'une façon universelle les "machines" utilisées pour les recherches sur la fusion nucléaire contrôlée /99/ /100/ /101/ étaient alimentées en énergie à partir de batteries de condensateurs. Malgré les graves inconvénients que nous allons rappeler les condensateurs ont constitué le seul moyen pratiquement disponible dans l'état de la technique, pour alimenter en énergie les expériences effectuées dans les laboratoires du monde entier durant les seize années de recherches qui viennent de s'écouler depuis la mise en place du premier programme important (le projet Sherwood, en 1951 aux Etats-Unis).

D'une part les énergies que pouvaient stocker les condensateurs étaient très limitées. Quelques mégajoules constituent encore pratiquement une limite. L'encombrement(en partie responsable des impédances parasites pour les décharges rapides) et le prix des

condensateurs sont déjà considérables pour des énergies de quelques mégajoules et croissent proportionnellement à l'énergie stockée /54/. On peut difficilement envisager de les multiplier par un facteur important. Le stockage d'énergies beaucoup plus élevées dans des condensateurs, sans qu'interviennent des progrès considérables dans leur technologie, ne paraît donc pas réalisable dans l'immédiat.

D'autre part les rendements de transfert d'énergie au plasma étaient très faibles. En effet les décharges obtenues étaient oscillantes, ne s'amortissant que sur un certain nombre de périodes, obligeant quelquefois, pour éviter les perturbations que cela apportait au plasma, à utiliser des montages du type "crow-bar". Ces oscillations étaient dues au fait que la self parasite des condensateurs et de leurs connexions au plasma n'était pas négligeable devant les capacités importantes (se chiffrant en microfarads) nécessaires pour stocker l'énergie.

Le but poursuivi est de "chauffer" le plasma, c'est à dire de lui faire absorber une certaine puissance électrique active. Or précisément ces oscillations inévitables sont caractéristiques d'une mauvaise absorption de l'énergie par le plasma, c'est à dire d'un mauvais rendement de transfert de l'énergie stockée au plasma. C'est ainsi que les recherches sur la fusion contrôlée se sont trouvées devant une impasse en voulant fournir des énergies importantes au plasma.

Actuellement divers projets sont en étude pour substituer aux batteries de condensateurs des génératrices électromécaniques susceptibles de convertir en énergie électrique l'énergie cinétique emmagasinée dans un volant en rotation /102/ /103/. Ces machines

ne pouvant libérer l'énergie qu'à une vitesse limitée par l'accélération maximum correspondante compatible avec leur résistance mécanique, seraient utilisées pour charger des selfs dont l'énergie, ainsi emmagasinée, serait ensuite déchargée plus rapidement dans le plasma au moyen d'interrupteurs convenables. L'interrupteur constitue alors un point délicat du projet.

Heureusement nous avons vu (§ 8) que les supraconducteurs permettent, dans des volumes relativement réduits, de stocker directement, puis de libérer, des énergies très élevées (§ 6-7), supérieures de plusieurs ordres de grandeurs à celles stockées jusqu'ici avec des condensateurs. L'encombrement et le prix de ces dispositifs supraconducteurs croissent moins rapidement que l'énergie stockée, ce qui les rend d'autant plus intéressants que l'énergie à stocker est plus élevée /54/. Ils fournissent directement des décharges très rapides /55/ (des décharges telles que celle schématisée par la figure 11 sont d'un grand intérêt) ainsi qu'un meilleur rendement de transfert de l'énergie au plasma, la self parasite des connexions n'introduisant pas d'oscillations (§ 7-3-4 et 7-3-1) et l'ordre de grandeur des capacités parasites des connexions étant trop faible. De plus, dans le domaine de la fusion contrôlée, ils ouvrent le champ à de nouvelles expériences que l'on ne pouvait pas envisager avec les dispositifs de stockage d'énergie habituels /104/.

8-1-3- Alimentation de sources de neutrons :

Il existe de nombreux types de sources de neutrons. Il est ici question de celles qui mettent en jeu des réactions de fusion soit dans un plasma soit par bombardement d'une cible au moyen de particules accélérées. Il s'avère possible à l'heure actuelle d'une part d'alimenter au moyen de circuits supraconducteurs de très faible encombrement les sources jusqu'ici alimentées par des condensateurs, d'autre part d'envisager l'alimentation de sources plus intenses.

8-1-4- Alimentation de tubes "éclair"

8-1-4-1- Pompages de lasers :

Il est maintenant possible d'alimenter avec les supraconducteurs les tubes "éclair" utilisés pour pomper les lasers. Cela permet :

- de réduire l'encombrement des sources d'énergie alimentant les lasers actuels ;
- d'envisager l'alimentation de lasers de très grandes puissances

De telles expériences ont été effectuées /105/ avec succès, à faible puissance en utilisant des énergies successivement de 500 joules et de 2 kilojoules, les montages effectués correspondant respectivement :

- au schéma de la figure 25 pour les essais sans préionisation du gaz ;
- au schéma de la figure 27 pour les essais avec une préionisation obtenue à partir d'un circuit extérieur : un condensateur C préalablement chargé maintenait à un potentiel continu, élevé par rapport aux électrodes de décharges, l'électrode de déclenchement du tube (constituée par quelques mailles d'un mince fil métallique extérieur du tube) ;
- au schéma de la figure 28 ou à celui de la figure 26 pour les essais avec préionisation obtenue directement à partir du circuit de stockage.

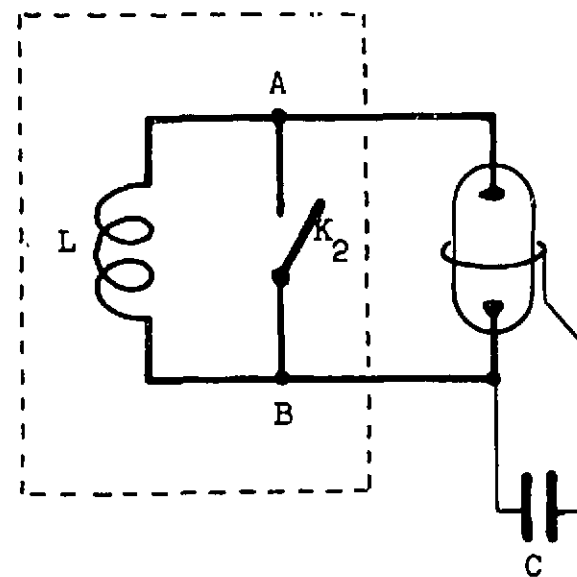


Figure 27

Dans ces montages seul le circuit formé par l'enroulement L et l'interrupteur K_2 peut être supraconducteur. Les autres enroulements sont constitués avec des conducteurs normaux. Au paragraphe 9 on trouvera un exemple de détermination d'une telle alimentation.

Les supraconducteurs se prêtent encore à la réalisation de dispositifs de configurations nouvelles pour alimenter des tubes "éclair" et pomper des lasers [104/].

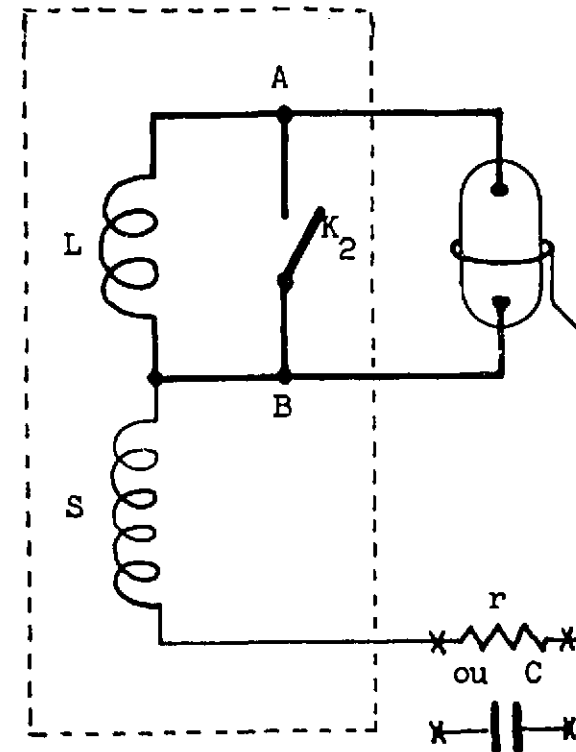


Figure 28

8-1-4-2- Alimentation de tubes générateurs d'éclairs pour la photographie

Dans les mêmes conditions que ci-dessus on peut envisager d'alimenter des tubes générateurs d'éclairs lumineux, de très grandes puissances, pour la photographie.

8-1-4-3- Alimentation de tubes générateurs de rayons X

On peut encore envisager d'alimenter des tubes générateurs de rayons X au moyen des impulsions à très haute tension que peuvent délivrer les dispositifs supraconducteurs.

8-1-5- Alimentation de canons à plasmas

Le canon à plasma permet d'éjecter des ions à des vitesses très élevées. Ces ions peuvent être obtenus directement par ionisation du gaz qui alimente le canon. Un tel canon peut alors s'avérer extrêmement intéressant pour la propulsion spatiale. En effet il faut obtenir dans ce cas des vitesses d'éjection de matière aussi élevées que possible de façon à recueillir, à partir de la matière éjectée, la quantité de mouvement maximum, ce qui en fin de compte permet d'embarquer au départ la masse minimum de matière destinée à être utilisée comme projectile.

Jusqu'à l'heure actuelle la seule source d'énergie possible pour créer et propulser ces ions était représentée par les condensateurs. Mais leur poids et leur volume enlevaient à ce type de canon le principal de ses avantages : sa légèreté. Dès maintenant on peut envisager de remplacer ces condensateurs par des sources supraconductrices bien plus légères, bien moins volumineuses et plus puissantes. L'entretien des basses températures nécessaires ne soulève pas de problèmes de principe ; à l'heure actuelle des microréfrigérateurs de faible puissance sont déjà utilisés à bord de satellites pour maintenir des circuits électroniques à très basses températures.

8-2- Décharges dans les liquides

Alimentation d'essais de rigidités diélectriques

Les impulsions de tensions très élevées que l'on peut obtenir au moyen des dispositifs supraconducteurs peuvent être utilisées pour l'étude de la rigidité diélectrique de liquides isolants.

8-3- Décharges dans les solides

8-3-1- Alimentation d'essais de rigidités diélectriques

Des essais de rigidités diélectriques de solides peuvent être alimentés dans les mêmes conditions que précédemment.

8-3-2- Explosions de fils

A l'heure actuelle de nombreuses recherches sont effectuées sur les explosions de fils [106/ et ont déjà donné lieu à quelques applications. Les appareillages utilisés sont alimentés uniquement au moyen de condensateurs. Il est possible de leur substituer maintenant les supraconducteurs.

Parmi les applications des explosions de fils nous citerons les suivantes :

8-3-2-1- Création d'ondes de choc

L'explosion du fil dans un milieu matériel crée une onde de choc qui peut être utilisée soit pour effectuer de l'emboutissage mécanique (explosion dans l'eau ou dans l'huile), soit pour déclencher des réactions chimiques (détonateurs à fils), etc...

8-3-2-2- Amorçage d'arcs de grandes puissances :

Certaines souffleries, utilisées pour les études aéronautiques, sont alimentées par décharge d'énergie électrique dans un gaz sous pression. Les durées de décharge sont de l'ordre d'une fraction de seconde. Or la loi de Paschen (voir par exemple [98/]) montre que pour amorcer une décharge électrique dans un gaz sous pression il faut une tension initiale d'autant plus élevée que la pression du gaz est plus grande.

Pour éviter l'utilisation de tensions initiales trop élevées, on préionise alors le gaz en provoquant l'explosion d'un fil conducteur préalablement connecté entre les deux électrodes de décharge.

Un tel dispositif pourrait très simplement fonctionner à partir d'une alimentation supraconductrice (par exemple selon un schéma du type de la figure 29). Dans ce cas on pourrait envisager de mettre en jeu des énergies considérables par rapport à celles qui étaient disponibles jusqu'à maintenant.

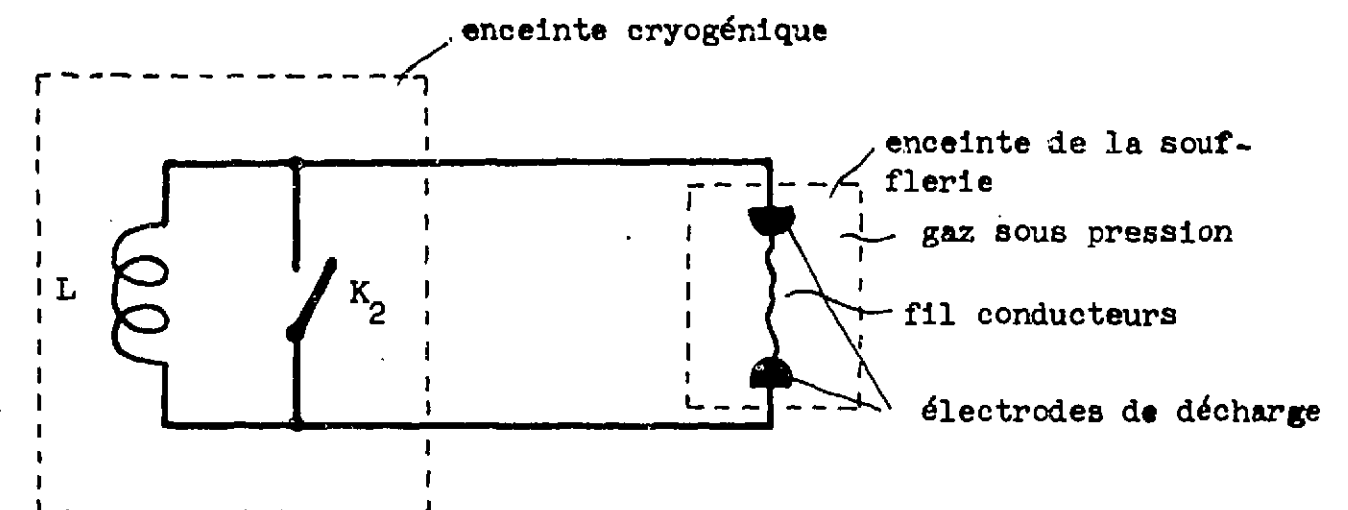


Figure 29

8-3-2-3- Métallisations :

Certaines métallisations sont effectuées par explosion d'un fil métallique. L'énergie électrique nécessaire pourrait être délivrée par un dispositif supraconducteur.

8-3-3- Soudage par points :

Les électrodes de certains appareils de soudage par points sont alimentées par décharge de condensateurs. On peut envisager, avec les supraconducteurs, d'atteindre des puissances de soudage par points très supérieures à celles jusqu'ici réalisées.

8-3-4- Alimentation de circuits cryogéniques :

Dans les dispositifs à basses températures où l'on a besoin d'utiliser de l'énergie électrique, on peut envisager de remplacer les condensateurs ou les accumulateurs électrochimiques classiques par des dispositifs supraconducteurs incorporés dans la partie froide. On évite ainsi d'introduire des connexions électriques entre les parties froides et chaudes de l'appareil. Par contre, il peut être plus facile d'introduire, à partir de l'extérieur, l'énergie nécessaire dans le dispositif supraconducteur de stockage (§ 4).

8-4- Alimentation d'autres circuits :

8-4-1- Mémoires supraconductrices :

Nous ne parlerons pas de cette application des supraconducteurs, bien connue, qui consiste à remplacer les mémoires magnétiques des ordinateurs par des micro-circuits de stockage et de décharge d'énergie, servant à maintenir à l'état normal ou à l'état supraconducteur des micro-interrupteurs supraconducteurs à transition

désignés sous le nom général de cryotrons /6/. Les énergies mises en jeu dans de tels circuits sont extrêmement faibles ; par exemple elles peuvent être inférieures à 10^{-10} joules par commutation.

8-4-2- Alimentation d'accélérateurs de particules

A l'heure actuelle, pour alimenter par exemple les électro-aimants des synchrotrons à protons il faut commuter de façon périodique des énergies de l'ordre de plusieurs mégajoules à des périodes de l'ordre de la seconde. Pour cela on utilise couramment des machines tournantes qui emmagasinent l'énergie sous forme cinétique pendant la demi-période où l'énergie doit être sous-tirée à l'électro-aimant. Mais ces machines ont une endurance limitée /107/ /109/.

P.E. SMITH /107/, ayant alors envisagé de remplacer de telles machines par des dispositifs supraconducteurs, a trouvé que pour des énergies de l'ordre de 1000 mégajoules un système supraconducteurs serait bien meilleur marché que tout autre système actuellement en usage ou proposé (ce résultat ne nous étonnera évidemment pas /54/) et il a proposé un système de stockage possible pour un accélérateur de 300 GeV en projet, dont la valeur de crête du champ accélérateur pourrait mettre en jeu une énergie de 300 mégajoules.

8-4-3- Alimentation électrique de fusées :

Des dispositifs supraconducteurs sont envisagés /108/ /109/ pour assurer l'alimentation des circuits électriques de fusées en cours de vol.

8-4-4- Alimentation électrique de véhicules

L'intérêt d'alimenter des véhicules, tels que voitures automobiles, à partir d'énergie électrique stockée dans des circuits supraconducteurs, jouant le rôle d'accumulateurs, avait été souligné /110/ .

8-4-5- Stockage d'énergie réactive

A l'heure actuelle des études sont effectuées par certains organismes sur le stockage d'énergie réactive dans les réseaux de transport et distribution d'énergie électrique. Mais il s'agit là d'un problème assez différent de ceux que nous avons examinés.

BIBLIOGRAPHIE

- /98/- PENNING (F.M.) .- Décharges électriques dans les gaz .- Bibliothèque Technique Philips .- Dunod Paris .
- /99/- DAVID (J.) , ROSE, MELVILLE CLARK .- Plasmas and controlled fusion .- The M.I. T. Press, Cambridge, Massachussetts .
- /100/- WILLIAM (P.) ALLIS .- Nuclear fusion .- D. Van Nostrand Company Inc, Princeton, New Jersey .
- /101/- SAMUEL GLASSTONE, RALPH (H.) LOVBERG .- Controlled thermonuclear reactions D. Van Nostrand Company Inc, Princeton, New Jersey.
- /102/- RIOUX (C.) .- Etude et réalisation d'une dynamo unipolaire à régime impulsionnel ne comportant pas de matériaux ferromagnétiques (Thèse). Annales de Physique Tome 9 , n° 11 et 12 , 1964 , pp. 729 - 765 .
- /103/- REEUT (P.H.), TOROSSIAN (A.) .- Production of pulsed high magnetic fields with asynchronous generators .- 4th Symposium on Engineering Problems in Thermonuclear Research .- May 1966 , Frascati .
- /104/- SOLE (J.) .- Procédé pour transférer une énergie à un milieu conducteur et appareil pour la mise en oeuvre de ce procédé.- Demande de brevet d'invention déposé par le C.E.A. , n° P.V. 75 599 du 7 septembre 1966 .
- /105/- PROST (G.) , SOLE (J.) .- Expériences, non publiées, effectuées au laboratoire (1964 - 1965)
- /106/- CHACE (W.G.), HOWARD , MOORE (K.) .- Exploding wires .- Plenum Press, Inc. New York Vol. 1, 2, 3 .

/107/- SMITH (P.F.) .- (Rutherford Lab, Chilton, Berkshire) .- 2nd International Conference on Magnet Technology, Oxford, July 1967.

/108/- X . - Avco Everett Research Lab, Everett, Massachusetts
2nd International Conference on Magnet Technology, Oxford, July 1967.

/109/- Superconducting coils for science .- New Scientist .- Vol. 35, n° 554, July 20 1967, p. 144.

/110/- HEMEL (A.) .- Cryogenic inductors may become power source . - Electronics, November 10, 1961 .- pp. 96 - 98.

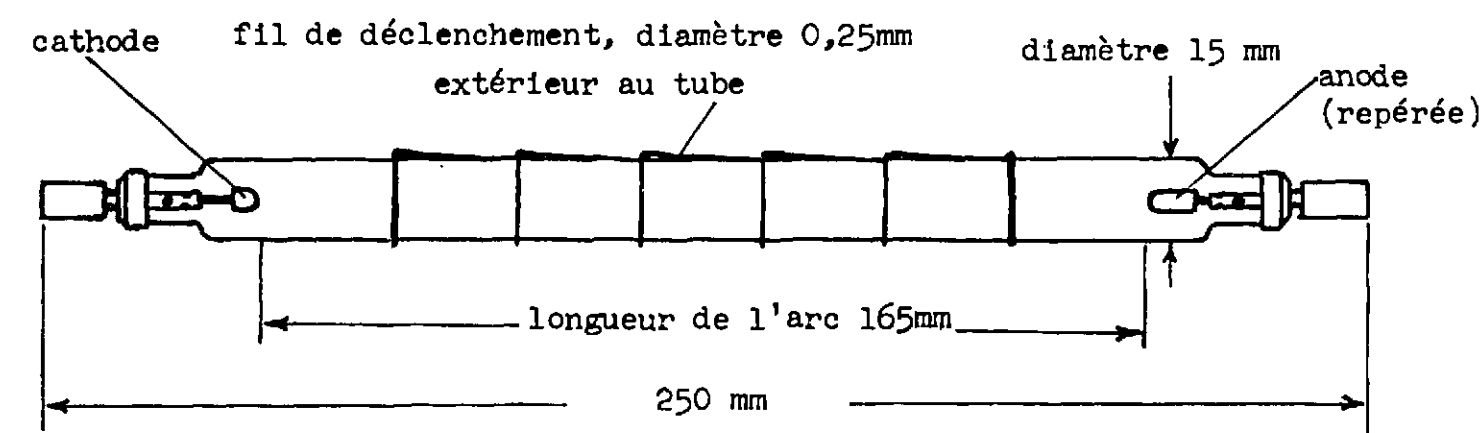
9 - EXEMPLES DE PREDETERMINATIONS SIMPLIFIEES D'ENSEMBLES DE STOCKAGE ET DECHARGE D'ENERGIE

9-1- Alimentation d'un tube éclair pour laser

Les caractéristiques du tube à alimenter, qui a été choisi comme exemple, sont données au paragraphe 9-1-1 et la détermination de l'alimentation supraconductrice correspondante est effectuée dans les paragraphes qui suivent :

9-1-1- Caractéristiques du tube à alimenter

Il s'agit d'alimenter un tube éclair type F X 47 construit par E.G. et G. (Etats Unis) pour le pompage de lasers et constitué par deux électrodes situées dans une atmosphère de Xénon sous une enveloppe transparente de quartz . Schéma et dimensions du tube sont indiqués figure 30.



Tube éclair F X 47

Figure 30

Self de choc

Dimensions (supports compris) : 23 x 23 x 12 cm
 Volume total : 13 dm³
 Poids de la self : 7,8 kg

Circuit de déclenchement

Volume total : quelques dm³

Chargeurs :

Les chargeurs utilisés pour charger les condensateurs ne seront pas examinés.

9-1-1-3- Données relevées expérimentalement

Les données du constructeur, fournies pour faire fonctionner le tube dans des conditions bien déterminées et à partir de condensateurs, sont insuffisantes pour permettre de définir l'alimentation dans des conditions très différentes de celles prévues. Il a fallu par conséquent relever expérimentalement les données qui manquaient. Ce relevé a été effectué en alimentant le tube à partir de sa batterie de condensateurs et a permis de préciser les points suivants :

- La nature de l'impédance présentée par le tube au cours de la décharge peut être considérée en première approximation comme principalement dissipative (§ 7-3-1) .
- La résistance équivalente relevée est représentée en fonction du temps, pour les tensions de charge des condensateurs 2kV, 1,5 kV et 1 kV, par les courbes de la figure 32. Elle est par exemple de l'ordre de 0,4 Ω à 0,8 Ω .

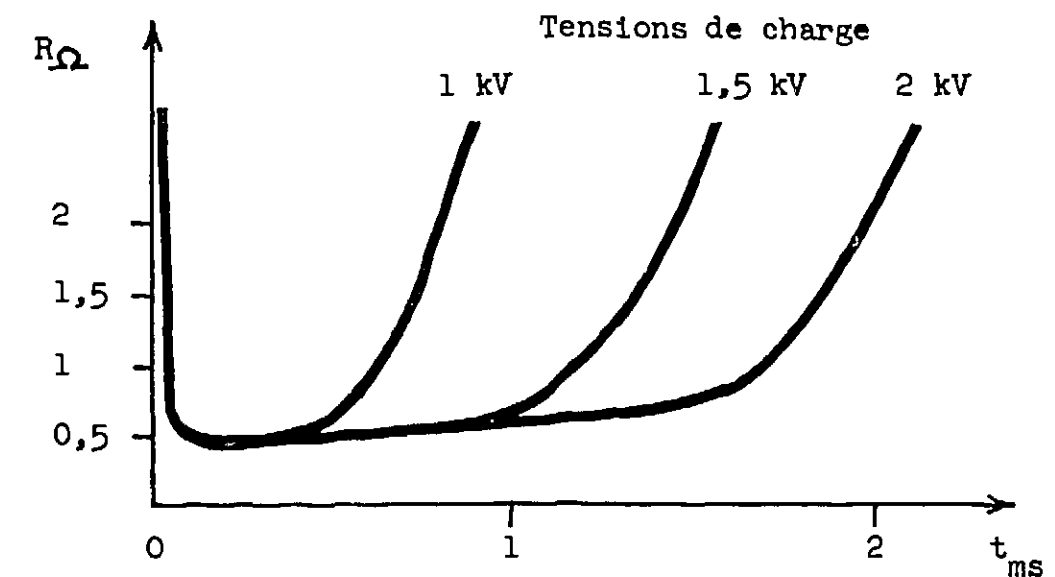


Figure 32

De même les courbes représentant la résistance du tube en fonction du courant ont été tracées. Elles montrent que, pour un courant donné, la résistance du tube dépend des valeurs antérieures du courant. En fait pour simplifier les calculs qui vont suivre on peut retenir l'ordre de grandeur de la résistance initiale du tube lorsqu'il est amorcé, la majeure partie de l'énergie étant mise en jeu au début de la décharge (ceci ne représente qu'une première approximation car les expériences effectuées [105] en alimentant de tels tubes par des dispositifs supraconducteurs montrent qu'en fait c'est l'ordre de grandeur de la tension de décharge que l'on pourrait considérer comme constant. Voir le calcul correspondant au § 9-3). Cependant dans le calcul qui suit on assimilera le tube, lorsqu'il est amorcé, à une résistance pure de 0,5 Ω .

9-1-2- Données de départ du calcul

En tenant compte des limitations et des résultats qui précèdent nous allons par exemple envisager le cas de fonctionnement défini dans le tableau 3 .

La constante de temps propre τ_2 du circuit de stockage est choisie très inférieure à la constante de temps τ de la décharge pour permettre un bon rendement de transfert d'énergie (§ 7-4-1) .

Le temps de montée t_1 du courant n'a pas été choisi plus bref pour limiter à priori la puissance de l'onde de choc dans le tube.

TABLEAU 3

: Désignation de la grandeur :	: Symbole et valeur donnée :	: Relation qui sera utilisée :	:
: Energie utile :	: $W_u(\infty) = 2\ 000$ joules :	: (58) :	:
: Constante de temps de la décharge :	: $\tau = 4 \times 10^{-3}$ s. :	: (50) :	:
: Constante de temps propre du circuit de stockage :	: $\tau_2 = 10^{-1} \tau$:	: (43) :	:
: Temps de montée du courant :	: $t_1 = 10^{-1} \tau$:	: (44) :	:
: Résistance du tube :	: $R_u = 0,5 \Omega$:	: :	:

9-1-3- Détermination des caractéristiques de l'alimentation

Pour alléger les calculs nous supposons négligeable l'impédance des connexions (§ 7-3-1-1.) .

On déduit de (50) :

$$(129) \quad L = 2 \times 10^{-3} \text{ henry}$$

On déduit de (43) et (50)

$$(130) \quad R_m = 5 \Omega$$

En résolvant en k l'équation transcendante (44) on obtient :

$$(131) \quad k = 2,4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

Au moyen de (59-10) on peut calculer l'énergie initiale W_0 qu'il faut stocker pour que soit transférée l'énergie donnée $W_u(\infty)$ entre les instants zéro et l'infini. Le calcul donne successivement :

d'après (56) :

$$(132) \quad a = 1,1$$

d'après (59) :

$$(133) \quad b = 0,208$$

d'après (59-1)

$$(134) \quad \alpha = -1,9811$$

d'après (59-2)

$$(135) \quad \beta = -0,811$$

d'après (59-10)

$$(136) \quad W_u(\infty) = W_o \times 0,208 \times (0,1)^{-0,0189} (3,35 + 0,36 + 0,14 + 0,07 + \dots) \\ = W_o \times 0,85$$

On en déduit :

$$(137) \quad W_o = 2360 \text{ boules}$$

d'où le courant à piéger, obtenu à partir de (1) :

$$(138) \quad I_o = 1540 \text{ ampères.}$$

Nous pouvons encore calculer successivement :

la valeur de la résistance de l'interrupteur à l'instant t_1 où le courant est maximum, d'après (46) :

$$(139) \quad R_2(t_1) = 3,05 \Omega$$

la pente à l'origine de la fonction $R_2(t)$, d'après (41) :

$$(140) \quad \left(\frac{d R_2(t)}{dt} \right)_{t=0} = R_m k = 1,2 \times 10^4 \Omega / s$$

la pente à l'origine du front de montée du courant dans R_u , d'après (49) :

$$(141) \quad \left(\frac{d I_u(t)}{dt} \right)_{t=0} = 3,7 \times 10^7 \text{ A/s}$$

Remarque 1

En fait, avant que la décharge s'amorce dans le tube, seule la résistance $R_2(t)$ de l'interrupteur se trouve branchée aux bornes de la self de stockage L. La tension qui apparaît aux bornes du tube est alors donnée par la relation (29) dans laquelle il faut remplacer $R(t)$ par la résistance unique $R_2(t)$ donnée par l'équation (41),

avec les constantes numériques obtenues en (130) et (131). On obtient alors :

$$(142) \quad v(t) = R_m I_o e^{\frac{1}{k Z_2}} (1 - e^{-kt}) e^{-\frac{1}{k Z_2} (kt + e^{-kt})}$$

La dérivée de cette fonction par rapport à t a pour expression :

$$(143) \quad \frac{dv(t)}{dt} = R_m I_o e^{\frac{1}{k Z_2}} e^{-\frac{1}{Z_2} (kt + e^{-kt})} \left[k e^{-kt} - \frac{1}{Z_2} (1 - e^{-kt})^2 \right]$$

Le facteur hors crochets est positif et différent de zéro sauf pour t infini. Le facteur entre crochets s'annule en changeant de signe pour une valeur de t et une seule lorsque t croît de zéro à l'infini. Par conséquent la fonction $v(t)$ est d'abord croissante, passe par un maximum pour la valeur de t qui annule le crochet dont nous venons de parler, puis décroissante. D'ailleurs il est inutile de recalculer la valeur de t qui correspond au maximum de $v(t)$ puisque nous avons vu (§ 7-3-1-1-1) que cette valeur de t était indépendante de la valeur constante de R_u , que l'on a supposée ici infinie tant que le tube n'est pas amorcé. Par conséquent le maximum de $v(t)$ (équation (142)) a bien lieu pour la valeur $t = t_1$ déjà donnée par l'équation (44). (On peut facilement le vérifier sur l'équation (143)). En fait il faudra réaliser le montage (§ 9-1-4) de façon que le tube s'amorce avant que $v(t)$ ait atteint son maximum, ceci pour deux raisons :

- pour éviter le risque que le tube ne s'amorce pas ;
- pour transférer le maximum d'énergie dans le tube au cours de la décharge.

Le calcul numérique de la valeur maximum de $v(t)$, obtenue en portant dans l'équation (142) la valeur de t_1 donnée dans le tableau 3, donne :

$$(144) \quad v(t_1) = 3340 \text{ volts}$$

(On vérifie aussi que cette tension est inférieure à la borne supérieure que l'on obtiendrait en multipliant la valeur $R_2(t_1)$, donnée par (139), par le courant I supposé constant et égal à I_0 , ce qui donnerait : $I_0 R_2(t_1) = 4630$ volts).

Dès que la décharge dans le tube est amorcée, la relation (142) cesse d'être valable et il faut reprendre la relation (29) en faisant intervenir la résistance R_u comme cela a été fait dans le calcul qui précède cette remarque.

Remarque 2

Dans l'expression (136) le facteur multipliant W_0 n'est autre que le rendement (§ 7-4-1-1). Ce rendement aurait été plus élevé si l'on avait adopté (tableau 3) un temps t_1 de montée du courant plus bref. A la limite, pour un temps de montée négligeable devant τ , la relation (89) donnerait :

$$(145) \quad W_u(\infty) = W_0 \frac{1}{1 + 0,1} = W_0 \times 0,91$$

Pour augmenter encore le rendement il faudrait diminuer τ_2 (relation (89)), ce qui obligerait à augmenter la valeur de R_m (relation (43)).

9-1-4- Détermination du montage électrique

Suivant la façon dont on veut effectuer la charge et la décharge de l'énergie, ainsi que suivant la façon dont on veut déclencher la décharge diverses solutions se présentent. Nous allons les examiner brièvement. Les schémas des montages correspondants sont rassemblés sur les figures 33 à 45.

1ère Solution :

Dans notre exemple particulier la tension maximum disponible de 3340 volts, pouvant apparaître aux bornes du tube, donnée par relation (144), est supérieure à la tension de 3000 volts d'auto-amorçage d'un tube qui a déjà fonctionné (§ 9-1-1-2). On peut donc alimenter directement un tel tube à partir d'un schéma de montage du type représenté par la figure 25. C'est le cas de la figure 33 : les électrodes de décharge du tube sont directement connectées aux bornes A et B de la self de stockage supraconductrice. Le calcul /97/ montre d'ailleurs que l'on peut toujours obtenir, aux bornes du circuit supraconducteur, une tension supérieure à la tension d'auto-amorçage du tube, quelle qu'elle soit, à condition de choisir en conséquence R_m et $K\tau_2$.

La self L pourra être réalisée au moyen d'un matériau supraconducteur stabilisé par exemple par du cuivre ou de l'aluminium. Les connexions du tube seront alors directement reliées aux extrémités du conducteur de stabilisation, celui-ci étant exclu de l'interrupteur K_2 /87/. Les valeurs numériques à donner aux principaux éléments du circuit sont celles qui ont été calculées au § 9-1-3.

La charge de l'énergie dans la self L sera effectuée par un générateur extérieur capable de débiter les 1540 ampères nécessaires (relation (138)). Pour effectuer cette charge on pourra utiliser momentanément les connexions du tube sans avoir à débrancher celui-ci, les tensions mises en jeu (§ 3) étant trop faibles pour l'amorcer. Il faudra par contre que ces connexions aient été prévues pour pouvoir supporter le courant nécessaire pendant toute la durée de la charge (§ 4-1).

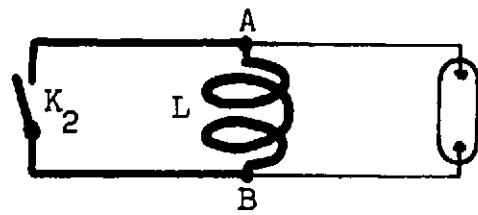


Figure 33

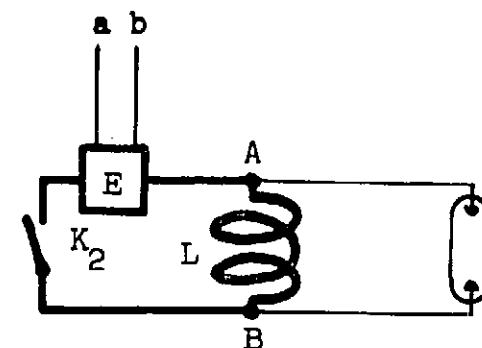


Figure 34

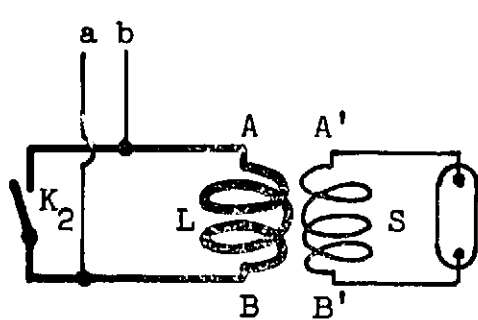


Figure 35

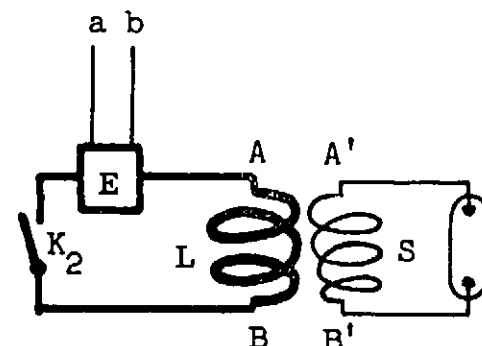


Figure 36

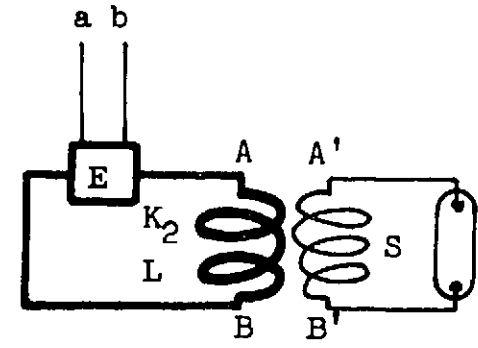


Figure 37

Les parties supraconductrices
sont représentées en traits forts

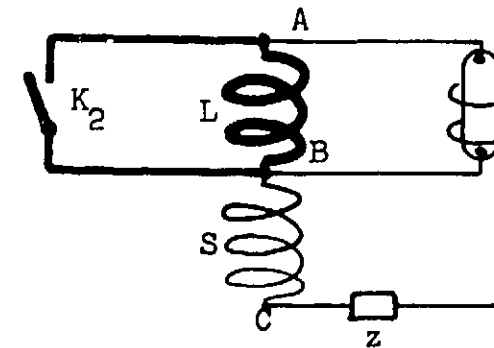


Figure 38

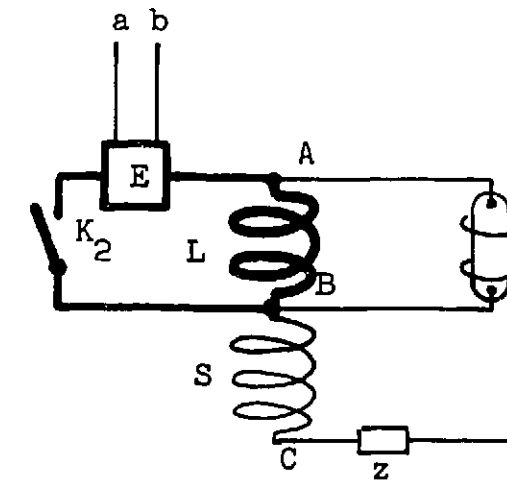


Figure 39

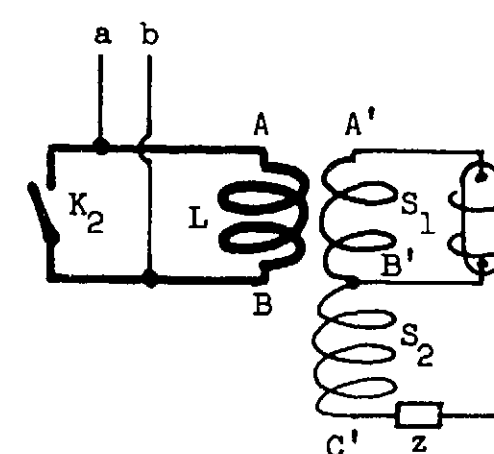


Figure 40

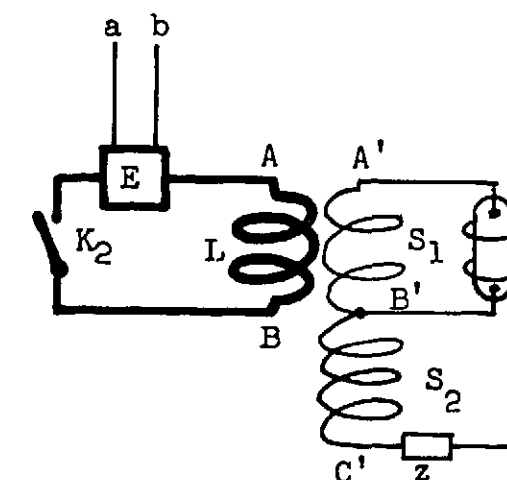


Figure 41

Les parties supraconductrices
sont représentées en traits forts.

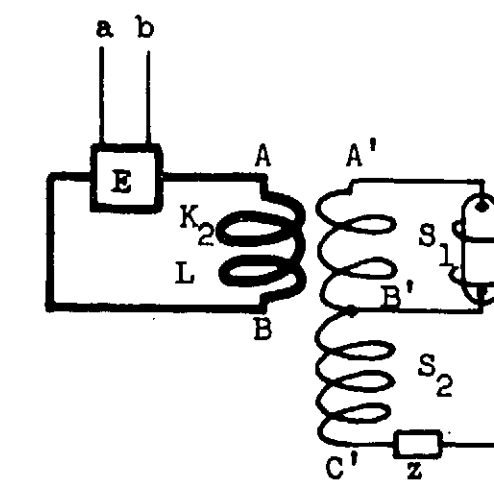


Figure 42

- Les parties supraconductrices sont représentées en traits forts.
- Tr signifie Transformateur

Figure 43

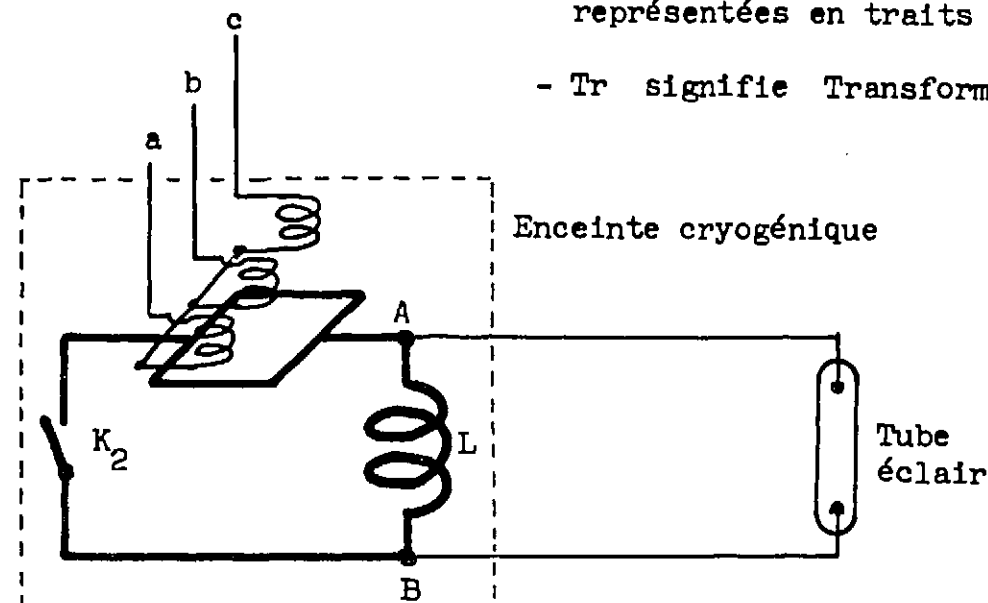


Figure 44

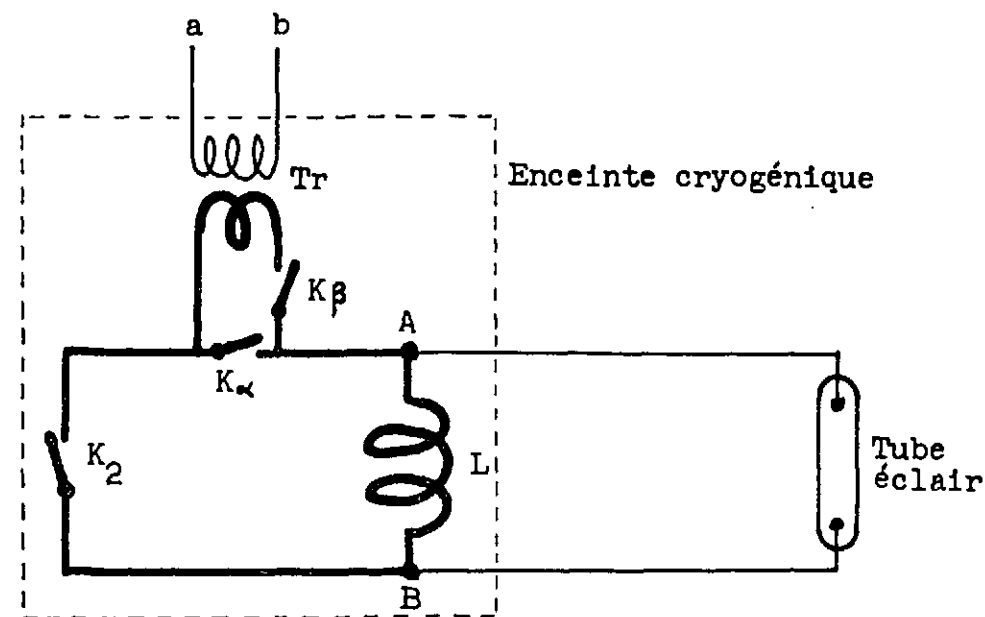
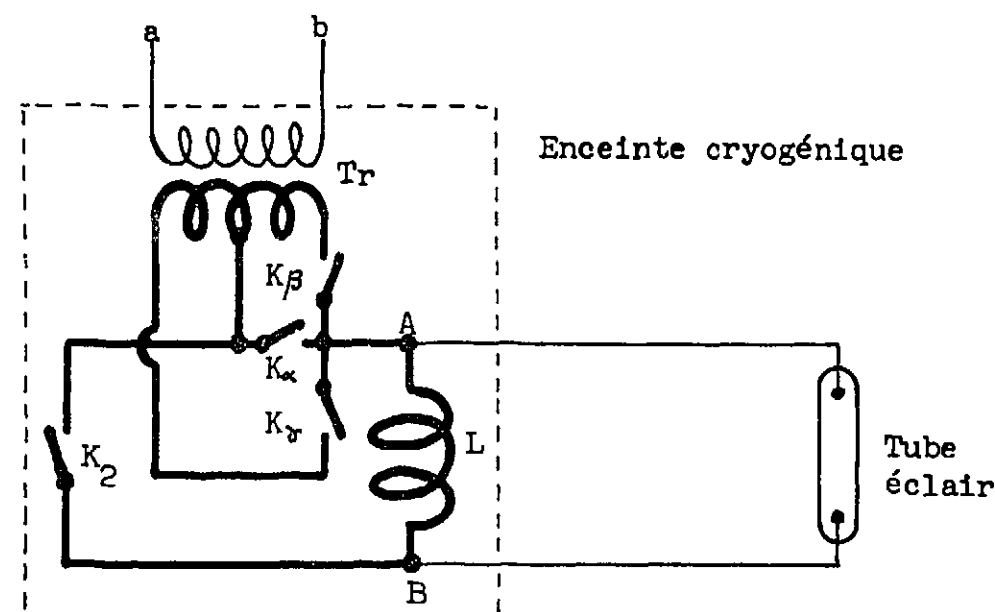


Figure 45



2^{ème} Solution :

Suivant les conditions d'utilisation, les connexions nécessitées par la solution 1 peuvent introduire dans le cryostat des pertes d'énergie importantes. Dans ce cas les 1540 ampères nécessaires seront engendrés à l'intérieur du circuit supraconducteur au moyen d'un transformateur d'énergie tel que représenté par le symbole E sur la figure 34. Ce transformateur d'énergie sera par exemple :

- une dynamo supraconductrice (§ 4-2) ;
- une pompe à flux (§ 4-3) : la figure 43 représente le montage alimenté par une pompe à flux statique à trois inducteurs à partir des amenées de courant a, b, c ;
- ou si l'on veut éviter la dégradation de l'énergie $\angle 70/$, un transformateur statique (§ 4-4) fonctionnant dans des conditions bien déterminées : la figure 44 représente le montage alimenté par un tel transformateur à partir des amenées de courant a et b $\angle 70/ \angle 70 \text{ bis}/ \angle 72/$ et la figure 45 le montage alimenté par un transformateur symétrique à partir des amenées de courant a et b $\angle 70/ \angle 70 \text{ bis}/$

Pour les détails de fonctionnement on se reportera au § et aux références cités.

La dynamo sera actionnée mécaniquement de l'extérieur du cryostat au moyen d'un arbre de transmission qui pourra être d'autant moins massif que la puissance à fournir sera plus réduite (durée de charge plus longue) et que sa vitesse de rotation sera plus élevée. La pompe à flux ou le transformateur pourront être alimentés au moyen de courants très faibles sous des tensions d'autant plus élevées que la puissance à fournir sera plus élevée. On peut avoir une idée de la puissance moyenne qu'il y aura lieu d'introduire dans le

cryostat en se basant sur l'énergie à introduire par exemple : 2360 Joules (relation (137)) dans le cas où il n'y a pas dégradation d'énergie pendant la charge (§ 4-4), et le taux maximum de répétition : un éclair toutes les quatre minutes (§ 9-1-1-1-1), ce qui donne :

$$\frac{2360 \text{ Joules}}{4 \times 60 \text{ secondes}} < 10 \text{ watts}$$

Cette puissance peut-être introduite dans le cryostat par exemple au moyen d'un courant de 10 ampères sous une tension de 1 volt, ou bien au moyen d'un courant de 44 milliampères sous une tension de 227 volts ... ce qui ne pose aucun problème.

Les connexions du tube éclair ne sont parcourues par le courant que pendant la durée de la décharge (constante de temps 4×10^{-3} s, tableau 3) ; l'effet Joule est donc très limité dans le temps et elles n'ont pas besoin d'être aussi fortes que si elles devaient supporter le courant pendant toute la durée de la charge. De toutes façons on aura intérêt à les "optimiser" en fonction de la température dans leur traversée du cryostat, la résistance électrique des matériaux conducteurs pouvant devenir très faible aux très basses températures [1/]. Par exemple à 4° K la résistance électrique du cuivre pur peut devenir 300 fois plus faible qu'à la température ambiante et celle de l'aluminium très pur 2000 fois plus faible. Ceci permet de réduire, d'un facteur du même ordre, la section correspondante des connexions.

3ème groupe de solutions :

Le circuit supraconducteur de stockage d'énergie peut être rendu matériellement indépendant du circuit d'alimentation du tube. Le couplage électrique entre ces deux circuits est alors effectué par induction. C'est le cas schématisé par les figures 35 à 37 .

Le circuit S d'alimentation du tube n'étant parcouru par

le courant que pendant la durée de la décharge est constitué par un conducteur normal. Sa résistance électrique doit être suffisamment faible devant celle équivalente au tube amorcé (ici 0,5Ω) pour ne pas diminuer le rendement (§ 7-4-1). En maintenant ce circuit à basse température on peut profiter dans ces conditions de la faible résistivité des matériaux conducteurs [1/ et si l'on choisit un matériau peu magnétorésistant cela permet de n'en utiliser qu'une quantité totale très réduite.

L'ensemble des circuits couplés L et S ne comporte pas de circuit magnétique, les matériaux magnétiques actuellement connus étant tous saturés aux inductions que permettent les supraconducteurs.

Figure 35, le courant est introduit dans le circuit supraconducteur de stockage par des connexions directes .

Figure 36, on utilise un dispositif transformateur d'énergie, désigné par E, pour charger le circuit supraconducteur. Cela permet de stocker l'énergie sous un courant que l'on peut choisir indépendamment du courant de charge et du courant d'alimentation du tube.

Figure 37, l'interrupteur K_2 a été supprimé. En fait c'est la self de stockage d'énergie qui est utilisée comme interrupteur (§ 7-5-1-3-2).

4ème groupe de solutions :

Si l'on veut que le tube éclair puisse s'amorcer dès le début de la décharge du circuit supraconducteur on a la ressource d'alimenter son électrode de déclenchement au moyen d'un circuit secondaire S directement couplé par induction au circuit supraconducteur. La charge du courant de stockage peut s'effectuer soit directement par les connexions du tube, c'est le cas de la figure 38, soit par l'intermédiaire d'un dispositif transformateur d'énergie,

désigné par E sur la figure 39, du type par exemple de ceux qui ont été détaillés sur les figures 43 à 45.

Le secondaire S se détermine très simplement :

Supposons que nous désirions voir le tube s'amorcer dès que la tension à ses bornes atteint 1,5 kV, et qu'il suffise pour cela d'appliquer à cet instant une tension de 25 kV sur l'électrode de déclenchement.

Avant que la décharge dans le tube soit amorcée l'ensemble des circuits L et S (figure 38 ou 39) se comporte comme un autotransformateur à vide : si l'on veut obtenir 25 kV aux bornes de S lorsque l'on a 1,5 kV aux bornes de L il suffit de réaliser un rapport de transformation égal à :

$$(145) \quad \frac{\text{tension à vide aux bornes de S}}{\text{tension à vide aux bornes de L}} = \frac{e_s}{e_L} = \frac{25_{\text{kV}}}{1,5_{\text{kV}}} \approx 17$$

Dès que la tension aux bornes de la self supraconductrice L atteindra 1,5 kV on aura alors 25 kV aux bornes de S et la décharge s'amorcera dans le tube. Cette décharge se trouvera alimentée par l'énergie qui était stockée dans L. Si la résistance R_u équivalente au tube est pratiquement constante, la constante de temps de la décharge aura pour valeur : $\tau = \frac{L}{R_u}$. Le circuit S qui aura joué son rôle pour déclencher la décharge dans le tube ne participera plus à celle-ci, étant relié à une électrode extérieure au tube. D'ailleurs il pourra comporter, par mesure de sécurité, pour limiter le courant maximum possible, une impédance de protection z. Comme on l'a vu (§ 8-1-4-1), cette impédance pourra être constituée en particulier par une capacité C, ne laissant passer qu'une impulsion au début de la décharge du circuit supraconducteur, ou par une résistance r. Dans ce dernier cas un calcul élémentaire montre que, pour

que l'énergie maximum transmise par le circuit S, en cas de court-circuit, soit négligeable devant l'énergie stockée il suffit que :

$$(146) \quad \frac{S}{r} \ll \frac{L}{R_u}$$

S désignant le coefficient de self induction de l'enroulement désigné par le même symbole.

Dans le cas qui vient d'être envisagé le déclenchement du tube est donc commandé par le déclenchement de l'interrupteur K_2 .

5ème groupe de solutions :

Le circuit supraconducteur de stockage d'énergie peut être rendu matériellement indépendant des circuits de déclenchement et d'alimentation du tube. Le couplage électrique entre ces circuits est alors effectué par induction. C'est le cas schématisé par les figures 40 à 42.

Le circuit S_1 est l'analogue du circuit S des figures 35 à 37 et le circuit S_2 est l'analogue du circuit S des figures 38 et 39.

Figure 40, le courant est introduit dans le circuit supraconducteur de stockage par des connexions directes.

Figure 41, le courant introduit par l'intermédiaire d'un transformateur d'énergie désigné par E.

Figure 42, l'interrupteur K_2 a été supprimé. En fait c'est la self de stockage d'énergie qui est utilisée comme interrupteur (§ 7-5-1-3-2).

De même que dans les solutions précédentes, la détermination des circuits S_1 et S_2 ne soulève aucune difficulté.

9-1-5- Réalisation pratique

De nombreuses possibilités s'offrent alors suivant :

- le montage électrique choisi ;
- le matériau supraconducteur utilisé ;
- la forme géométrique du circuit que l'on adopte (cylindrique, torique ...) ;
- "l'optimisation" que l'on veut faire (§ 6-6) : poids minimum, encombrement minimum, prix de revient minimum ...

Nous allons envisager quelques unes des possibilités en fonction du montage électrique choisi. Dans chaque cas le montage devra satisfaire aux conditions indiquées au § 7-6 .

9-1-5-1- Décharges utilisant des connexions directes :

9-1-5-1-1- La charge s'effectue par des connexions directes :

C'est le cas de la figure 33 (§ 9-1-4- 1ère solution) si l'amorçage est assuré par le circuit de décharge, ou de la figure 38 (§ 9-1-4- 4ème solution) s'il est assuré par un circuit distinct.

Le circuit supraconducteur doit stocker l'énergie directement sous le courant nécessaire au tube, c'est à dire ici 1540 ampères, d'après (138). Il doit satisfaire aux conditions particulières indiquées au § 7-6 . Sa stabilisation résultera de l'utilisation d'un matériau lui même "stabilisé" (§ 6-3).

Pour fixer les idées nous allons donner les résultats concernant un exemple, parmi une infinité possible (97/, déterminé à partir des caractéristiques critiques (courant critique en fonction de l'induction critique à la température constante de 4,2 ° K) de différents matériaux actuellement dans le commerce, en utilisant la méthode de détermination de la self de stockage proposée par Hassel (84/.

Bobinage de stockage :

Bobinage cylindrique (figure 46) réalisant une self de 2×10^{-3} henry (relation (129))

rayon moyen : $r = 10$ cm

hauteur : $h = 10$ cm

épaisseur totale (isolants compris): $e = 2,5$ cm

matériau utilisé : câble stabilisé référence C S 8670 (111/, isolé, dont les caractéristiques et la constitution de la section droite ont été reportées sur la figure 47 .

nombre de spires du câble : $n_L = 105$ spires (en 5 couches de 21 spires)

induction au centre du bobinage : $B_0 = 0,97$ tesla

induction maximum sur le fil : $B_m \neq 1$ Tesla (voir figure 46) .

Connexions du tube éclair :

Supposons que la liaison du tube éclair au dispositif de stockage d'énergie nécessite un câble de 5 mètres de longueur . Si l'on veut éviter une perte d'énergie appréciable dans ce câble il faudra que sa résistance totale R_3 soit très inférieure à celle du tube une fois amorcé (§ 7-4-1-1). On prendra par exemple :

$$(147) \quad R_3 < \frac{R_u}{100}$$

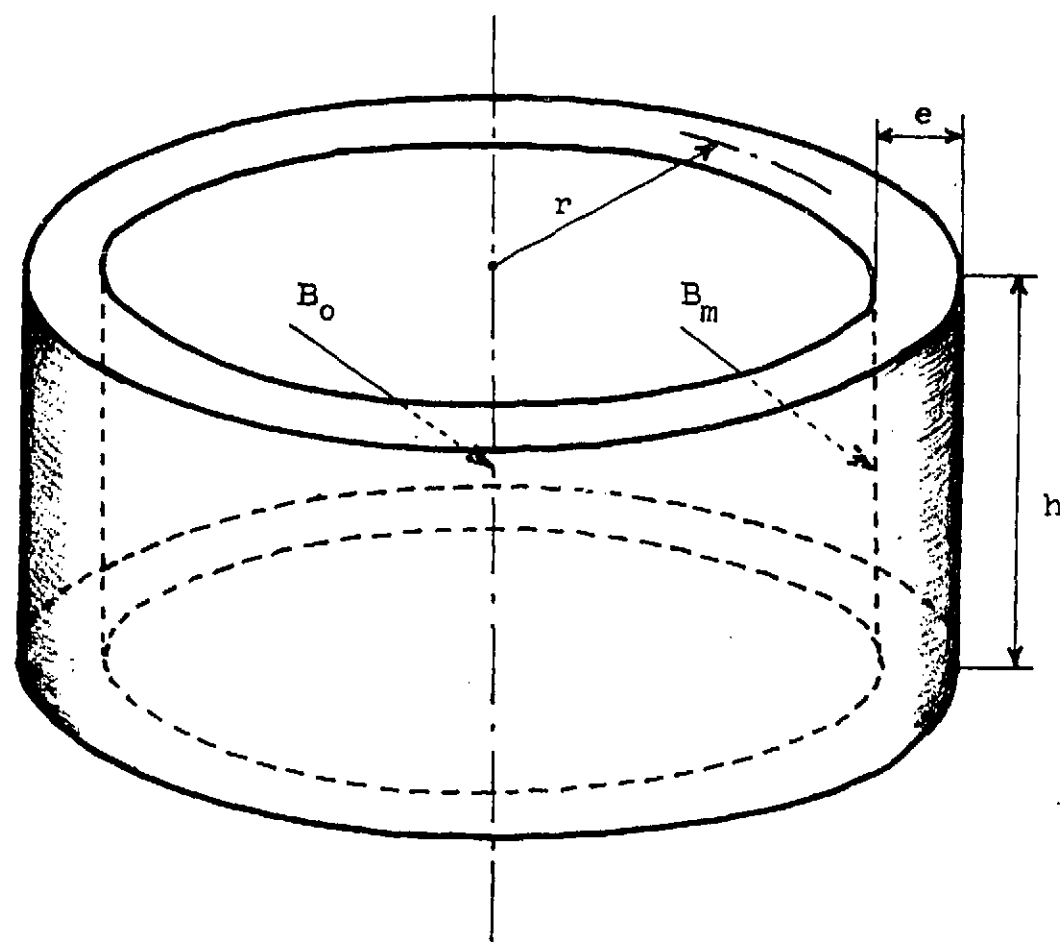


Figure 46

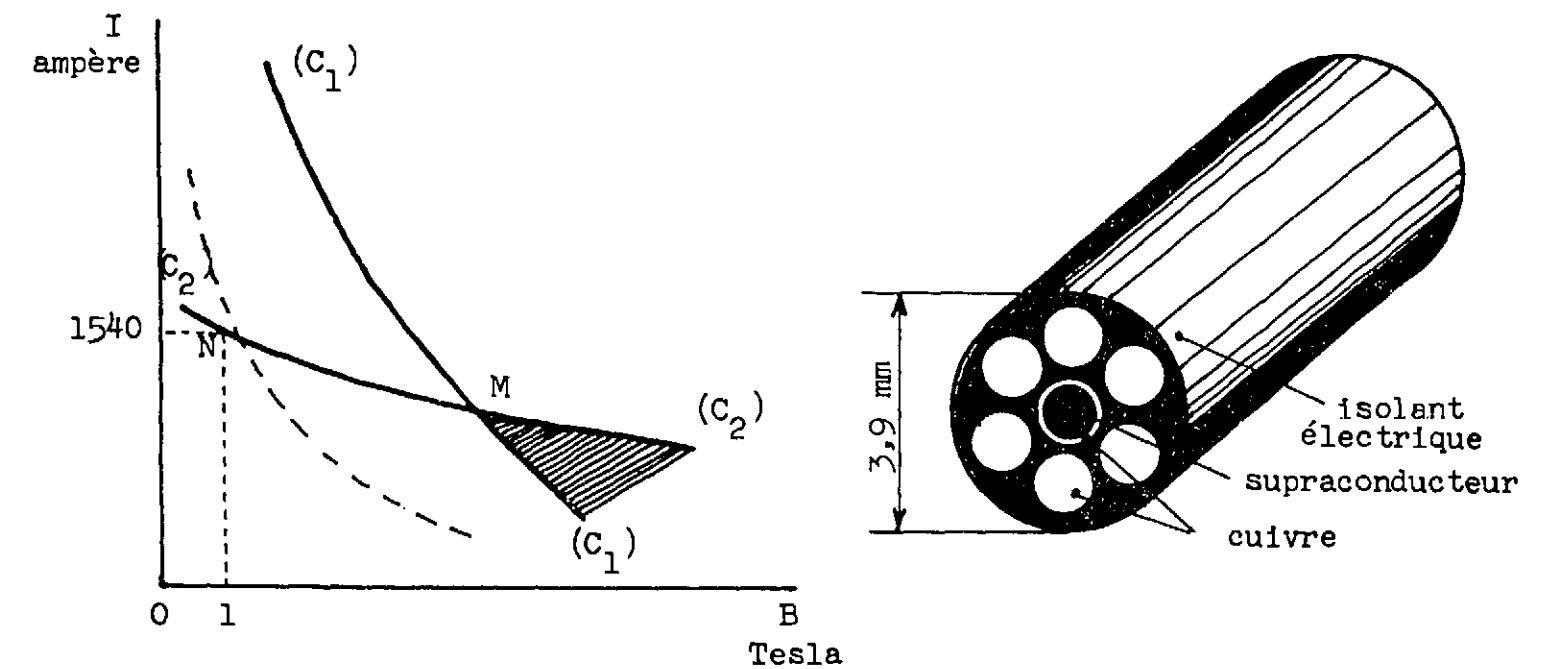


Figure 47 : Caractéristiques du câble C S 8670 (Atomics International)

Caractéristique de l'âme supraconductrice seule : courbe (C_1) (voir § 1)

- au dessus de la courbe (C_1) le matériau est à l'état normal ;
- au dessous de la courbe (C_1) et très près de la courbe seul un "échantillon court" est supraconducteur ; à cause de la dégradation, un bobinage n'est supraconducteur que suffisamment en dessous de (C_1) .

Caractéristique du cuivre de stabilisation seul : courbe (C_2) (pour une dissipation de 0,4 watt par cm^2 de surface extérieure) :

- au dessus de la courbe (C_2) il y a échauffement ;
- au dessous de la courbe (C_2) il y a une température d'équilibre.

Caractéristique de l'ensemble :

- au dessus de (C_1) il n'y a pas de fonctionnement possible ;
- au dessous de (C_1) et (C_2) il n'y a ni instabilité ni transition (le courant, qui ne produit pas de pertes s'il passe dans le supraconducteur, peut être acheminé par le cuivre si le supraconducteur vient à transiter).
- entre les deux courbes, dans la zone hachurée, l'âme n'est pas supraconductrice de façon stable ;
- entre les deux courbes, dans la zone non hachurée, il y a possibilité de fonctionnement (mais le matériau ne revient à l'état supraconducteur en cas de transition accidentelle que si l'on abaisse momentanément le courant au dessous de la courbe (C_2)).

C'est au voisinage de M, au dessous des deux courbes, que le câble est le mieux utilisé (aussi bien en ce qui concerne l'âme supraconductrice que le cuivre qui lui est adjoint) car dans ce cas un bobinage se comporte comme "l'échantillon court". Le cas § 9-1-5-1-1, par exemple, est représenté par le point N : il y a mauvaise utilisation de l'âme supraconductrice dont on pourrait diminuer la section (courbe en pointillés sur la figure).

c'est à dire :

$$(148) \quad R_3 < 0,005 \Omega$$

Comme la longueur totale des conducteurs constituant le câble est égale à 2 x 5 mètres cela conduit à une section minimum s , pour chacun de deux conducteurs du câble, égale à :

$$(149) \quad s = 36 \text{ mm}^2$$

Interrupteur :

-matériau utilisé : alliage Nb, Ti, référence T 48 /112/, en fil de 0,254 mm de diamètre, non gainé de cuivre.

-nombre de fils en parallèle : le courant total à véhiculer étant de 1540 ampères, on est conduit à utiliser 32 fils en parallèle si l'on veut ne pas dépasser un courant de 50 ampères par fil (un tel fil supporte plus d'une centaine d'ampères à quelques kilogauss). Ces fils, non isolés entre eux, seront réunis pour constituer un câble.

-longueur du câble : pour obtenir une résistance à l'état normal $R_m = 5 \Omega$ (relations (41) et (130)) il faut 13,5 mètres de câble , la résistivité du matériau étant de l'ordre de $60 \mu \Omega \text{ cm}$. Ce câble sera disposé de façon à posséder un coefficient de self induction L_2 négligeable devant L , par exemple :

$$(150) \quad L_2 < \frac{L}{100}$$

c'est à dire

$$(151) \quad L_2 < 2 \times 10^{-5} \text{ henry}$$

-déclenchement de l'interrupteur : ce déclenchement sera effectué par un procédé thermo-magnétique (§ 7-5-1-2). On réalisera

dans l'équation (41) la valeur de k voulue (relation (131)) en agissant sur la température de préchauffage de l'interrupteur et sur la vitesse de montée et l'amplitude de l'impulsion magnétique de déclenchement .

Circuit de déclenchement du tube :

Ce circuit, qui n'existe que dans le cas de la figure 38, comprendra n_s spires déterminées par la relation (valable pour un transformateur à vide) :

$$(152) \quad \frac{e_s}{e_L} = K \sqrt{\frac{S}{L}} = K \frac{n_s}{n_L} \quad K \text{ étant le coefficient de couplage .}$$

ce qui donne $n_s = 2500$ spires pour $e_s = 25 \text{ kV}$, $e_L = 1,5 \text{ kV}$, $n_L = 105$ spires et $K = 0,7$.

Ces spires seront constituées au moyen d'un fil de cuivre très fin (par exemple de 0,05 mm de diamètre donnant à la température de l'hélium liquide une résistance de l'ordre de 80Ω). Cela représente une très faible quantité de cuivre (au maximum deux couches sur le bobinage en tenant compte de l'isolant du fil). Il n'est pas nécessaire de réaliser avec le circuit de stockage un bon couplage de cet enroulement qui ne doit mettre en jeu qu'une énergie négligeable et s'il le faut on peut facilement augmenter la valeur de n_s dans la relation (152). Par contre il faut assurer à cet enroulement un bon isolement.

L'enroulement sera protégé par une résistance pure r en série ayant par exemple pour valeur, d'après la relation (146) :

$$(153) \quad r = 100 \frac{S}{L} R_u = 100 \frac{(2500)^2}{(105)^2} 0,5 = 28 \ 000 \ \Omega$$

Lorsque la tension de 25 kV sera atteinte cette résistance limitera donc le courant maximum débité à une valeur de l'ordre de 1 ampère.

Si l'énergie ainsi disponible s'avèrait trop faible pour amorcer la décharge on diminuerait cette valeur de r .

9-1-5-1-2- La charge s'effectue par un transformateur d'énergie :

C'est le cas des figures 34 et 43 à 45 (§ 9-1-4- 2° solution) si l'amorçage est assuré par le circuit de décharge, ou de la figure 39 (§ 9-1-4- 4° solution) s'il est assuré par un circuit distinct.

Comme dans le paragraphe précédent le circuit supraconducteur doit stocker l'énergie directement sous le courant de 1540 ampères nécessaire au tube. Les circuits sont les mêmes, la seule différence réside dans le fait que l'on peut charger l'énergie à partir d'un courant de valeur différente.

9-1-5-2- Décharge utilisant un circuit couplé :

9-1-5-2-1- La charge s'effectue par des connexions directes :

C'est le cas de la figure 35 (§ 9-1-4- 3^{ème} groupe de solutions) si l'amorçage du tube est assuré par le circuit de décharge, ou de la figure 40 (§ 9-1-4 - 5^{ème} groupe de solutions) s'il est assuré par un circuit distinct.

Bobinage de stockage :

Le circuit supraconducteur stocke dans ce cas l'énergie sous un courant nécessairement relativement faible,

compatible avec les possibilités des aménagements de courant. D'après la deuxième relation (20) le coefficient de self induction du bobinage nécessaire est d'autant plus élevé que le courant de stockage est plus faible, mais la quantité totale de matériau utilisé reste pratiquement indépendante de la valeur de ce courant (§ 6-2). Le bobinage a donc pratiquement les mêmes cotes qu'au § 9-1-5-1-1 à l'encombrement des enroulements secondaires près (voir ci-dessous).

En désignant par I'_0 la nouvelle valeur du courant de stockage, le nombre de spires nécessaires n'_L résulte immédiatement de la relation (21) :

$$(154) \quad n'_L = n_L \frac{I_0}{I'_0} = 105 \frac{1540}{I'_0}$$

Le matériau utilisé sera choisi en fonction du courant I'_0 , l'induction B_0 au centre du bobinage et l'induction maximum B_m sur le fil étant les mêmes qu'au § 9-1-5-1-1 d'après le § 6-2.

Enroulement secondaire S :

Cet enroulement doit véhiculer le courant $I_0 = 1540$ ampères nécessaire au tube pendant la décharge. Il résulte toujours de (21) qu'il doit comprendre un nombre de spires n_s égal à celui de l'enroulement de stockage du § 9-1-5-1-1, c'est à dire :

$$(155) \quad n_s = 105 \text{ spires}$$

Le matériau utilisé sera un conducteur normal à faible résistivité, de façon que la résistance R'_3 de l'enroulement soit faible devant celle du tube amorcé (§ 7-4-1-1-).

Si l'on veut par exemple réaliser la condition

$$(156) \quad R'_3 < 0,005 \, \Omega$$

analogue à la relation (148), la longueur totale du conducteur constituant l'enroulement étant égale à 66 mètres cela conduit, pour une résistivité de $3 \times 10^{-9} \, \Omega \times \text{cm}$, à une section minimum s du conducteur égale à :

$$(157) \quad s = 0,4 \, \text{mm}^2$$

Cela représente une très faible quantité d'aluminium (au maximum une couche complète en tenant compte de l'isolant du fil). En fait, cet enroulement étant destiné à véhiculer toute l'énergie stockée, on aura intérêt à le coupler au maximum au circuit de stockage en intercalant ses spires avec celles de ce circuit. Il faudra alors dans ce cas veiller aux isollements.

Connexions du tube éclair :

Réalisées de la même façon qu'au § 9-1-5-1-1 elles sont reliées aux bornes du secondaire S.

Interrupteur :

Si on le réalise par exemple avec le même matériau qu'au § 9-1-5-1-1 utilisé dans les mêmes conditions (50 ampères par fil), le nombre n de fils à mettre en parallèle est égal à :

$$(158) \quad n = \frac{I'_0}{50}$$

Pour conserver la constante de temps propre τ_2 (tableau 3) la longueur de câble à utiliser est celle qui permet d'atteindre une résistance à l'état normal R'_m vérifiant la relation :

$$(159) \quad \tau_2 = \frac{L'}{R'_m}$$

Cette relation (§ 7-5-1-3-3) conduit finalement à utiliser la même quantité de supraconducteur qu'au § 9-1-5-1-1. Le déclenchement de l'interrupteur s'effectuera de la même façon.

Circuit de déclenchement du tube :

Ce circuit, qui n'existe que dans le cas de la figure 40 (enroulement S_2), doit posséder exactement le même nombre de spires qu'au § 9-1-5-1-1.

L'enroulement S_1 ayant été réalisé en aluminium il peut être préférable de faire de même pour S_2 dans le but de diminuer les risques de corrosion en cas de condensation de vapeur d'eau lors des descentes et les montées en température.

9-1-5-2-2- La charge s'effectue par un transformateur d'énergie :

C'est le cas de la figure 36 (§ 9-1-4- 3^{ème} groupe de solutions) si l'amorçage du tube est assuré par le circuit de décharge, ou de la figure 41 (§ 9-1-4- 5^{ème} groupe de solutions) s'il est amorcé par un circuit distinct.

Les circuits S, S_1 , S_2 sont identiques à ceux du

§ 9-1-5-2-1 . Le circuit de stockage peut avoir un coefficient de self induction quelconque, compatible avec le dispositif de charge utilisé. Ce cas permet de réaliser des circuits de stockage de très faible coefficient de self induction, stockant l'énergie sous des courants très élevés. Ces circuits de stockage peuvent n'être constitués que par quelques spires supraconductrices ou même par une seule spire § 74 bis/. On peut ainsi réaliser des circuits possédant une excellente stabilité (§ 6-3) .

9-1-5-2-3- L'interrupteur supraconducteur est confondu :

C'est le cas de la figure 37 (§ 9-1-4- 3^{ème} groupe de solutions) si l'amorçage du tube est assuré par le circuit de décharge, ou de la figure 42 (§ 9-1-4- 5^{ème} groupe de solutions) s'il est assuré par un circuit distinct.

Les circuits S, S₁, S₂ sont identiques à ceux du § précédent.

Le circuit de stockage pourra comporter un nombre de spires quelconque, mais il s'avèrera particulièrement intéressant par sa stabilité lorsqu'il sera constitué par quelques spires ou même par une seule spire (§ 6-3). Nous allons donc envisager le cas d'une seule spire.

En conservant le même matériau et la même densité de courant (10⁵ A/cm²) que ceux adoptés pour l'interrupteur au § 9-1-5-1-1. le calcul donne une épaisseur e=1,6 mm pour un circuit constitué par une seule spire de rayon moyen r=10 cm et de hauteur h=10 cm (figure 46).

Le coefficient de self-induction de ce circuit est alors :

$$(160) \quad L'' = 2 \times 10^{-7} \text{ henry}$$

et le courant à piéger :

$$(161) \quad I_0'' = 154.000 \text{ ampères}$$

La résistance de cette spire à l'état normal est :

$$(162) \quad R_n'' = 2,25 \times 10^{-3} \Omega$$

On obtiendrait donc, si l'on faisait transiter toute la spire, une constante de temps propre τ_{2n} ayant pour valeur :

$$(163) \quad \tau_{2n} = \frac{L''}{R_n''} = 0,89 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Cette constante de temps est trop faible si l'on veut conserver la valeur τ_2 donnée au départ dans le tableau 3. On obtiendra la constante de temps τ_2 en ne faisant transiter qu'une fraction de la circonférence totale de la spire égale à :

$$(164) \quad \frac{R_m''}{R_n''} = \frac{\tau_{2n}}{\tau_2} = \frac{0,89 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} = 0,22$$

Ce qui représente un peu moins du quart de la circonférence totale de la spire.

Si l'on ne s'était pas imposé la valeur de la constante de temps propre τ_2 (tableau 3) le fait de faire transiter toute la spire de stockage d'énergie améliorerait

le rendement sans augmenter la quantité de supraconducteur intervenant dans le montage. En particulier, pour un temps t_1 de montée du courant négligeable devant τ la relation (89) donnerait un rendement limite de 0,98 au lieu de 0,91 (relation (145)).

9-1-5-3- Dispositif cryogénique :

Vu les faibles dimensions du montage (§ 9-1-5-1-1) un cryostat classique (§ 2) peut être utilisé.

9-1-6- Densités d'énergie stockées:

Nous allons calculer respectivement, dans le cas du § 9-1-5-2-3, la densité d'énergie moyenne stockée dans le diélectrique intérieur au bobinage ainsi que la densité d'énergie stockée par unité de volume de matériau supraconducteur (figure 46).

Dans le diélectrique on obtient $\frac{1}{54}$ pour une induction moyenne de 1 Tesla (§ 9-1-5-1-1) :

$$(165) \quad w_d = 0,4 \text{ kJ/litre}$$

Par unité de volume de matériau supraconducteur utilisé on obtient une densité d'énergie :

$$(166) \quad w_s = \frac{W_o}{2\pi r e h} = 25 \text{ kJ/litre}$$

Bien que très supérieures aux densités d'énergie que l'on obtient avec les condensateurs $\frac{1}{54}$, ces valeurs sont très faibles par rapport à celles que l'on peut obtenir avec les supraconducteurs.

Cela résulte des faibles valeurs de l'induction et de la densité de courant (§ 6-4) qui ont été utilisées ainsi que de la faible valeur de l'énergie totale stockée $\frac{1}{54}$.

On peut remarquer que, par opposition aux condensateurs, ici aucun circuit n'est sous tension en dehors de l'intervalle de temps pendant lequel a lieu la décharge.

9-2- Alimentation d'un arc de grande puissance

Les caractéristiques de l'arc à alimenter (§ 8-3-2-2), qui a été choisi comme exemple, sont données au paragraphe 9-2-1 et la détermination de l'alimentation supraconductrice est effectuée dans les paragraphes qui suivent.

9-2-1- Caractéristiques de l'arc à alimenter

Il s'agit d'alimenter un arc, amorcé par explosion d'un fil comme indiqué sur la figure 29, les caractéristiques de cet arc étant les suivantes :

- Energie dans l'arc : 20 Mégajoules
- Résistance de l'arc : l'arc est essentiellement dissipatif et l'ordre de grandeur de sa résistance reste sensiblement constant pendant la décharge et de l'ordre de $0,03 \Omega$ pour un courant de l'ordre d'une centaine de milliers d'ampères (En fait c'est plutôt l'ordre de grandeur de la tension d'arc qui reste à peu près constant, quand le courant varie. Voir la fin du § 9-1-1-3 et le § 9-3).
- Durée de l'arc : 0,1 seconde
- Taux de répétition maximum : 1 décharge toutes les 4 heures.

9-2-2- Schéma du montage

Le schéma du montage est représenté par la figure 48. Il correspond à celui de la figure 45. De la même façon les parties supraconductrices sont représentées en traits forts. Un éclateur de protection a été connecté en parallèle sur l'utilisation. Il sert à limiter la différence de potentiel qui apparaîtrait aux bornes du circuit supraconducteur au cas où l'arc ne s'amorcerait pas dans la chambre d'utilisation. Ce cas peut se produire par exemple si l'on a oublié de mettre en place le fil d'amorçage représenté sur la figure 48. En temps normal l'éclateur de protection n'intervient pas.

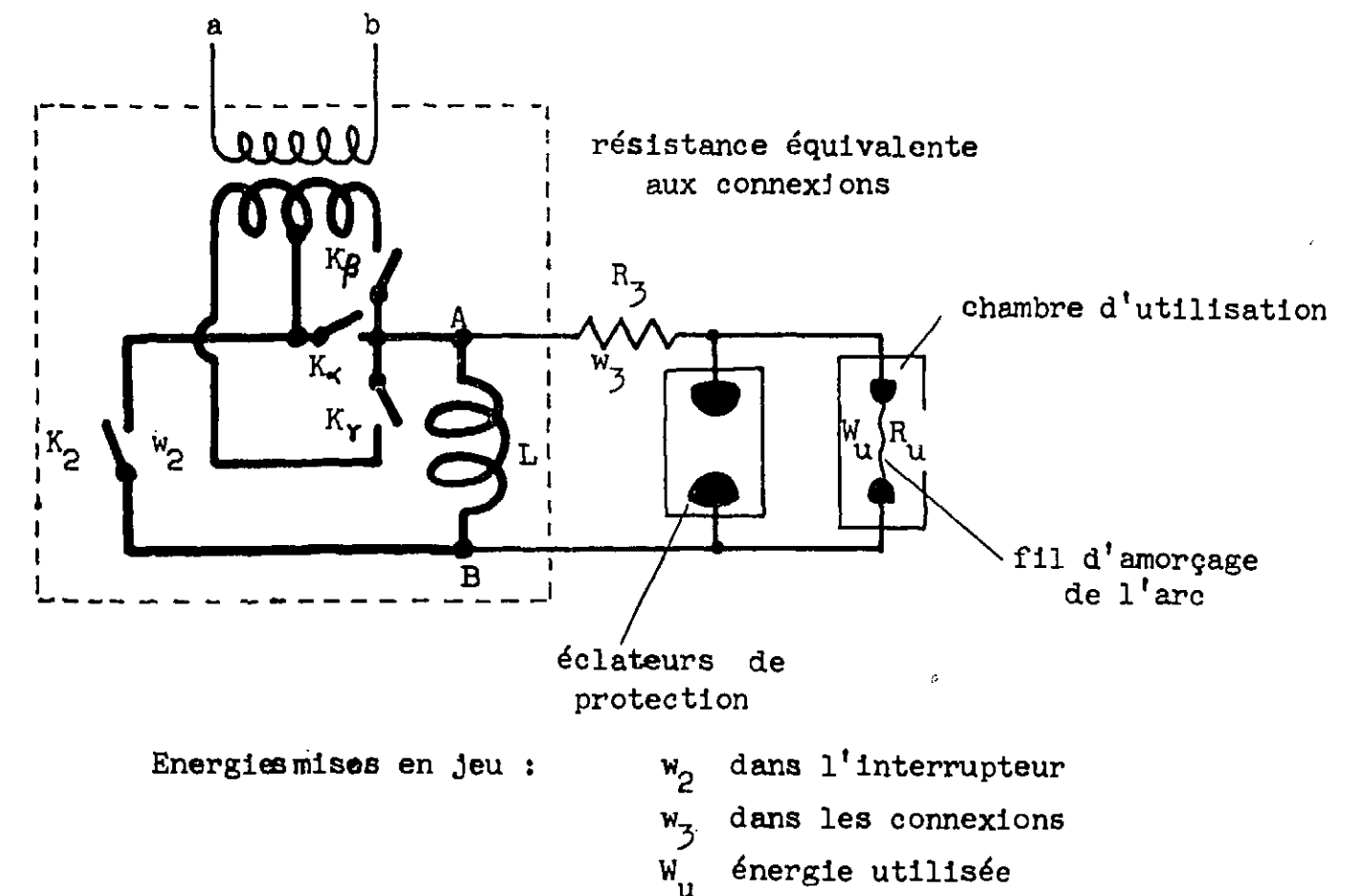


Figure 48

9-2-3- Données de départ du calcul

L'énergie mise en jeu étant élevée on va limiter la valeur maximum des pertes que l'on peut tolérer dans l'interrupteur, correspondant à une énergie calorifique dissipée dans le dispositif cryogénique lors de la transition, ainsi que la valeur maximum de l'énergie perdue par effet joule dans les connexions.

Dans ces conditions on va envisager le cas de fonctionnement défini dans le tableau 4 :

Tableau 4

Désignation de la grandeur	Symbole et valeur donnée	Relation qui sera utilisée
Energie dans l'arc	$W_u = 20 \text{ MJ}$	(50) modifiée
Constante de temps de la décharge	$\tau = 0,1 \text{ s}$	
Pertes tolérées :		
dans l'interrupteur supra-conducteur	$w_2 \leq 0,15 W_u$	
dans les connexions	$w_3 = 0,10 W_u$	
Résistance de l'arc	$R_u = 0,03 \Omega$	

9-2-4- Détermination des caractéristiques de l'alimentation

Les données du tableau 4 permettent de déterminer successivement les grandeurs suivantes :

Résistance des connexions relation (89-6)

$$(167) \quad R_3 = 0,10 \quad R_u = 0,003 \Omega$$

Self de stockage relation (50) dans laquelle on remplace R_u par $R_u + R_3$

$$(168) \quad L = 0,1 (R_u + R_3) = 0,0033_H$$

Valeur minimum du rendement

$$(169) \quad \begin{aligned} W_o &= W_u + w_2 + w_3 \\ &\leq W_u + 0,15 W_u + 0,10 W_u \end{aligned}$$

d'où :

$$(170) \quad \eta = \frac{W_u}{W_o} \geq 0,80$$

Valeur minimum de R_m relation (90)

$$\frac{R_u R_m}{(R_u + R_3)(R_u + R_3 + R_m)} \geq 0,80$$

d'où :

$$(171) \quad R_m \geq 0,242 \Omega$$

Pour $R_m = 0,242 \Omega$ la valeur du rendement $\eta = 0,80$ n'est rigoureusement atteinte que si la vitesse de transition de l'interrupteur est infinie (§ 7-4-1-1). En fait nous avons vu (§ 7-4-1-1-expression (90-1)) que cette valeur limite du rendement était pratiquement atteinte dans le cas où b' était petit devant l'unité. Pour conserver plus de possibilités dans la suite nous allons adopter pour R_m une valeur supérieure à $0,242 \Omega$, par exemple :

$$(172) \quad R_m = 0,3 \Omega$$

Dans ces conditions nous allons calculer la valeur exacte du rendement.

Valeur exacte du rendement

Dans ces conditions :

- la valeur maximum du rendement est, d'après la relation (90) :

$$(173) \quad \eta_{\max} = \frac{0,03 \times 0,3}{0,033 \times 0,333} = 0,82$$

- la valeur exacte du rendement est donnée par la relation (90-1) dans laquelle on a :

$$(174) \quad a' = \frac{R_m + R_u + R_3}{R_m} = \frac{0,333}{0,3} = 1,11$$

$$(175) \quad b' = \frac{2(R_u + R_3)}{kL} = \frac{2 \times 0,033}{10^3 \times 0,0033} = 0,02$$

pour

$$(176) \quad k = 10^3 \text{ s}^{-1} \quad (\text{valeur sur laquelle nous allons revenir})$$

d'où :

$$(177) \quad \alpha' = b' \frac{a'-1}{a'} - 2 = 0,00198 - 2 \neq -2$$

(l'erreur introduite dans le calcul par cette approximation est totalement négligeable)

$$(178) \quad \beta' = \frac{b'}{a'} - 1 = -0,972$$

La relation (90-1) donne alors :

$$(179) \quad \eta = \frac{0,03}{0,033} \times 0,02 \times (0,11)^{-0,00198} \times (44,00+0,47+0,16+0,08+ \dots) = 0,818$$

En comparant cette valeur à la limite maximum donnée par la relation (173) on voit que la valeur de k choisie en (176) est suffisamment élevée et que l'on ne gagnerait pratiquement rien en l'augmentant davantage.

A cette valeur de k correspondent les valeurs de t_1 et I_m calculées dans ce qui suit.

Energie initiale à stocker

$$(180) \quad W_o = \frac{W_u}{\eta} = \frac{2 \times 10^7}{0,818} = 2,45 \times 10^7 \text{ joules}$$

Courant de stockage

$$(181) \quad I_o = \sqrt{\frac{2W_o}{L}} = 122.000 \text{ ampères}$$

Valeur maximum du courant de décharge

Cette valeur maximum est donnée par la relation (62-9) à l'instant t_1 défini par la relation (44). Nous allons donc calculer t_1 . Pour cela il nous faut calculer d'après (43) :

$$(182) \quad \tau_2 = \frac{L}{R_m} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ s}$$

d'où l'on déduit, d'après (44) :

$$(183) \quad t_1 = 2,58 \times 10^{-3} \text{ s}$$

et d'après (55)

$$(184) \quad y_1 = 0,0774$$

La relation (62-9) donne alors :

(185)

$$I_m = 122.000 \times (0,11)^{-0,00198} \times (1-0,0774) \times (1,11-0,0774)^{0,00198-1} \times (0,0774)^{-0,009}$$

$$\neq 122.000 \times \frac{0,923}{1,033} \times 1,022$$

$$= 112.000 \text{ ampères}$$

A titre de vérification on peut maintenant faire le calcul qui suit:

Energie dissipée dans l'interrupteur

La relation (62-6) dans les différents termes de laquelle il faut remplacer R_u par $R_u + R_z$ donne :

(186)

$$\begin{aligned} w_2(\infty) &= 24,5 \times \frac{0,033}{0,3} \times 0,02 \times (0,11)^{-0,00198} \times (45,10+0,71+0,33+0,20+0,13+0,09+\dots) \\ &= 24,5 \times \frac{0,033}{0,3} \times 0,02 \times 1,004 \times 46,6 \\ &= 2,5 \text{ Mégajoules} \end{aligned}$$

Energie utile

Des relations (89-7) et (169) on déduit :

$$(187) \quad W_u = (W_o - w_2) \frac{R_u}{R_u + R_z}$$

d'où :

$$(188) \quad W_u = (24,5 - 2,5) \frac{0,03}{0,033} = 20 \text{ Mégajoules}$$

Energie dissipée dans les connexions

La relation (89-6) donne immédiatement :

$$(189) \quad w_3 = 20 \frac{0,003}{0,03} = 2 \text{ Mégajoules}$$

Les caractéristiques de l'alimentation ainsi déterminée sont rassemblées dans le tableau 5.

Tableau 5

	Résistance	Self	Constante de temps	Courant max.	Energie mise en jeu
Circuit d'utilisation	$R_u = 0,03 \Omega$	0	$\tau = 0,1 s$	$I_m = 112.000 A$ (à $t_1 = 2,58 \times 10^{-3} s$)	$W_u = 20 MJ$
Circuit de stockage	0	$0,0033 H$	∞	$I_o = 122.000 A$	$W_o = 24,5 MJ$
Interrupteur	$R_m = 0,3 \Omega$ ($k=10^3 s^{-1}$)	0	$\tau_2 = 1,1 \times 10^{-2} s$	$I_o = 122.000 A$	$w_2 = 2,5 MJ$
Connexions	$R_z = 0,003 \Omega$	0		$I_m = 112.000 A$	$w_3 = 2 MJ$

$$\text{Rendement : } \eta = \frac{W_u}{W_o} = 0,82$$

9-2-5- Réalisation pratique

De même qu'au paragraphe 9-1-5 de nombreuses possibilités de réalisations se présentent. Nous n'allons en donner qu'un exemple. Le calcul du bobinage de stockage a été effectué selon la méthode, déjà signalée (§ 9-1-5-1-1), proposée par Hassel [84/ (voir figure 46)

Bobinage de stockage

rayon moyen	$r = 75 \text{ cm}$
hauteur	$h = 75 \text{ cm}$
épaisseur totale	$e = 15 \text{ cm}$
matériau utilisé : alliage Nb-0,48 Ti sous forme de fils noyés dans une matrice de cuivre de très haute pureté.	
nombre de spires	$n_L = 49 \text{ spires}$
densité de courant dans le supra-conducteur :	$\delta = 10^5 A/cm^2$

section utile de l'alliage supraconducteur	1,22 cm ²
poids total de l'alliage supraconducteur	160 kg
poids total du cuivre de stabilisation	3000 kg
induction au centre du bobinage	B ₀ = 4,4 Tesla
induction maximum sur le supraconducteur	B _m < 5 Tesla

Connexions:

La partie extérieure au cryostat sera réalisée par exemple avec du cuivre de très forte section, les descentes dans le cryostat avec du cuivre de très haute pureté, permettant d'abaisser leur résistivité électrique d'un facteur de l'ordre de 200 à 4°K. Ces descentes seront utilisées en même temps comme canalisations permettant la récupération de l'hélium gazeux provenant de la vaporisation de l'hélium liquide contenu dans le cryostat et seront ainsi fortement refroidies. La section utile du cuivre décroîtra progressivement vers leurs extrémités situées dans la région à très basse température où elles seront directement raccordées aux extrémités de l'enroulement de cuivre servant à la stabilisation du bobinage de stockage d'énergie [87/].

Les sections de cuivre utilisées pour réaliser ces connexions seront choisies de façon à :

- obtenir une résistance totale $R_3 = 0,003 \Omega$ (tableau 5) ;
- ne dissiper pendant la décharge, dans un tronçon quelconque du circuit constitué par ces connexions, qu'une énergie inférieure à l'énergie qui provoquerait une élévation de température dangereuse pour les isolants utilisés. En désignant par r la résistance en ohm d'un tronçon quelconque du circuit constituant les connexions, l'énergie w exprimée en joule dissipée dans ce tronçon pendant la décharge est donnée

dans les conditions envisagées par la relation immédiate :

$$(190) \quad w_{\text{joule}} = \frac{r}{0,003 \Omega} 2 \times 10^6$$

(car cette énergie dissipée est proportionnelle à la résistance et on doit avoir $w = w_3$ pour $r = R_3$ (tableau 5)).

Interrupteur

Il sera du type à transition (§ 7-5-1), constitué à partir du même alliage supraconducteur que le bobinage de stockage, mais isolé électriquement et stabilisé thermiquement par exemple au moyen d'un oxyde métallique à forte conductivité thermique.

Si l'interrupteur est réalisé sans self (§ 7-5) et si l'on prend la précaution de ne pas le disposer dans le champ du circuit de stockage, le champ magnétique au voisinage du supraconducteur qui le constitue pourra rester très faible (par exemple quelques dixièmes de Tesla au maximum). Dans ces conditions le courant critique du matériau supraconducteur sera plus élevé [112/ et on pourra réaliser l'interrupteur en conservant la même section utile supraconductrice que dans le bobinage de stockage, c'est à dire 1,22 cm².

On en déduit :

- la longueur l de supraconducteur à utiliser (relation(99)) sachant que la résistivité du matériau après transition est de $70 \mu \Omega \times \text{cm}$ [113/ :

$$(191) \quad l = \frac{0,3 \times 1,22}{70 \times 10^{-6}} = 5250 \text{ cm}$$

- le volume s_1 de supraconducteur à utiliser :

$$(192) \quad s_1 = 5250 \times 1,22 = 6400 \text{ cm}^3$$

c'est à dire $6,4 \text{ dm}^3$; ce résultat se déduit aussi de (101) ;

- l'énergie dissipée lors de la décharge, par unité de volume de supraconducteur :

$$(193) \quad \frac{w_2}{s_1} = 390 \text{ joules / cm}^3$$

c'est à dire 93 calories/cm^3 ce qui correspond à peu près à 15 calories par gramme de supraconducteur.

L'ordre de grandeur de l'élévation maximum de température correspondante restera très faible comparée par exemple à la valeur de la température ambiante.

Pour limiter la quantité d'hélium vaporisé l'interrupteur sera disposé dans un compartiment cryogénique ne contenant qu'une faible quantité de liquide, cet hélium liquide pouvant d'ailleurs être préalablement chassé par injection de gaz sous pression.

Dispositif de charge de l'énergie

La charge sera effectuée au moyen d'un transformateur comme indiqué sur la figure 48. La durée de charge prévue sera de l'ordre de 20 minutes (commutations non comprises).

Les interrupteurs K_α , K_β , K_γ encore du type à transition seront constitués avec le même matériau que l'interrupteur précédent. Leurs caractéristiques sont alors déterminées comme suit :

Vitesse de variation du courant de charge :

$$(194) \quad \frac{I}{t} = \frac{122.000 \text{ A}}{20 \times 60 \text{ s}} = 100 \text{ A/s}$$

Tension maximum aux bornes de la self de stockage :

$$(195) \quad V = L \frac{dI}{dt} = 0,0033 \times 100 = 0,33 \text{ volts}$$

On tolère dans chacun des interrupteurs une dissipation d'énergie totale pendant la charge égale à 10^5 joules (valeur faible devant les $2,5 \times 10^6$ joules dissipés dans l'interrupteur K_2 pendant la décharge). On en déduit dans ces conditions les grandeurs suivantes :

Résistance normale R_m de l'interrupteur :

$$(196) \quad R_m = \frac{(0,33)^2}{10^5} \times 20 \times 60 = 1,3 \times 10^{-3} \Omega$$

Courant correspondant dans l'interrupteur normal :

$$(197) \quad I = \frac{V}{R_m} = \frac{0,33}{1,3 \times 10^{-3}} = 230 \text{ ampères}$$

Puissance dissipée dans l'interrupteur normal :

$$(198) \quad P = \frac{10^5}{20 \times 60} < 84 \text{ watts}$$

(il faut remarquer que cette puissance n'est plus dissipée dans l'hélium liquide à partir de l'instant où l'interrupteur n'est plus en contact avec cet hélium).

Longueur du supraconducteur (la section étant toujours de $1,22 \text{ cm}^2$) :

$$(199) \quad l = \frac{1,3 \times 10^3 \times 1,22}{70 \times 10^{-6}} = 23 \text{ cm}$$

Dispositif cryogénique

Le cryostat sera construit autour du bobinage de stockage d'énergie comme l'indique la figure 49. Il aura donc la

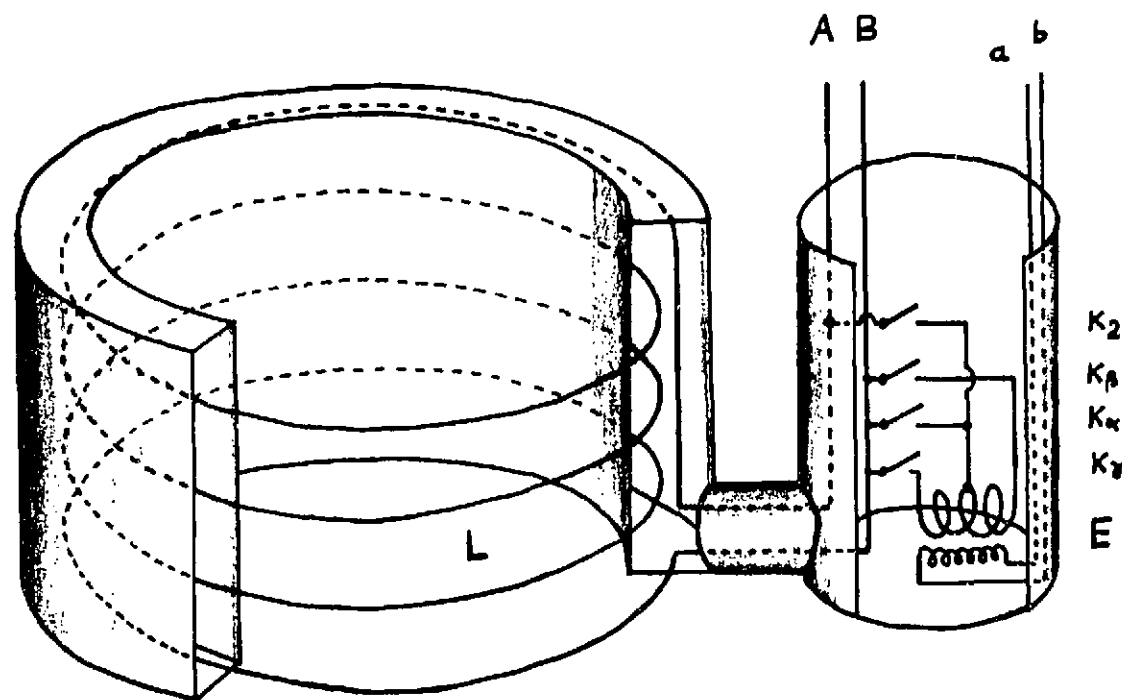


Figure 49

forme d'un tore. Les écrans thermiques qu'il comportera intérieurement seront interrompus de façon à ne pas constituer de spire fermée couplée par induction à l'enroulement de stockage. Le cryostat lui-même sera constitué par de la tôle d'acier inoxydable à haute résistivité électrique de façon à réduire l'effet joule résultant des courants induits pendant la décharge.

On peut évaluer une limite supérieure de la force électromotrice maximum $\mathcal{E}_m$ induite dans le cryostat lors de la décharge : sachant que le bobinage de stockage comporte 49 spires et que la force électromotrice maximum dont il est le siège pendant la décharge est égale à $R_u I_m = 0,03 \times 112.000 = 3360$ volts, la force électromotrice maximum développée dans le cryostat étant inférieure (mauvais couplage du cryostat au bobinage de stockage) à celle développée dans une spire du bobinage on aura :

$$(200) \quad \mathcal{E}_m < \frac{3360}{49} < 70 \text{ volts}$$

Connaissant la résistance électrique du circuit fermé constitué par le cryostat on en déduira facilement une limite supérieure de l'énergie correspondante dissipée pendant la décharge.

Le transformateur de charge d'énergie ainsi que les interrupteurs K_2 , K_x , K_p , K_y seront situés dans un second cryostat relié au précédent par sa partie froide et situé à proximité dans une région de l'espace soumise à une faible valeur du champ magnétique, comme indiqué par la figure 49.

La mise en froid de l'ensemble du dispositif, son maintien en froid, la commande thermique des interrupteurs, puis à la fin des expériences la remontée en température seront assurés par un réfrigérateur fonctionnant en circuit fermé avec tout l'ensemble.

Densité d'énergie utile stockée

La densité d'énergie utile stockée par unité de volume de matériau supraconducteur se déduit immédiatement du tableau 4 et de la relation (192) :

$$(201) \quad \frac{W_u}{sl} = \frac{2 \times 10^7}{6400} = 3100 \text{ joules/cm}^3$$

Cette densité d'énergie utile stockée est supérieure à celle que l'on pourrait aujourd'hui envisager d'obtenir avec des explosifs chimiques, or cette application des supraconducteurs est encore toute nouvelle, les supraconducteurs eux-mêmes sont en pleine évolution et la densité d'énergie que l'on peut obtenir est d'autant plus élevée que le dispositif de stockage est plus important $\frac{54}{/}$.

Puissance utile

Pendant la décharge, la puissance utile est de l'ordre de :

$$(202) \quad \frac{W_u}{\Delta t} = \frac{20 \text{ MJ}}{0,1_s} = 200 \text{ Mégawatts}$$

C'est l'ordre de grandeur de la puissance que délivre sur le réseau une centrale électrique d'Electricité de France.

9-3 Remarques

Remarque 1

Lorsque les conditions ci-dessous sont réalisées :

- tension d'arc V_{arc} pratiquement constante pendant la décharge (à partir de l'instant $t_{amorçage}$ où l'arc s'est amorcé) ;

- impédance $R_u(t)$ de l'arc essentiellement dissipative (et cette fois, par conséquent, fonction du temps) ;
- impédance des connexions négligeable ;
- interrupteur K_2 aselfique ;

n obtient les résultats suivants (figure 50) :

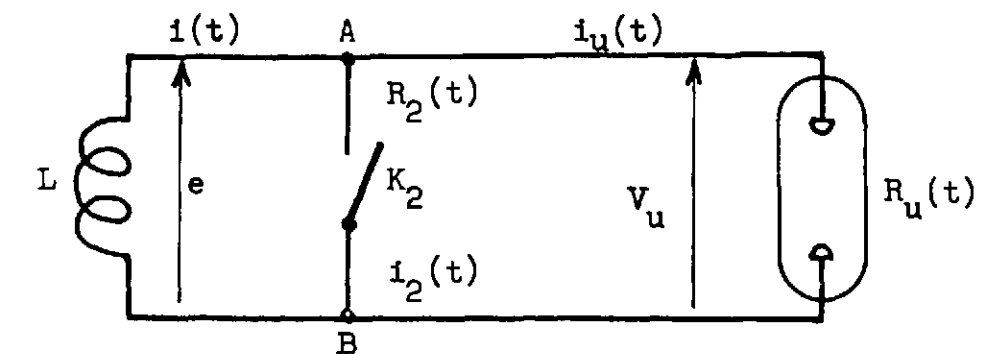


Figure 50

Avant l'amorçage de l'arc

Tout se passe comme si le circuit d'utilisation n'était pas connecté et il apparaît entre les bornes A et B du circuit de stockage une différence de potentiel donnée par la relation (29) dans laquelle il faut remplacer la résistance $R(t)$ par l'unique résistance $R_2(t)$ alors dans le circuit. (Lorsque la tension $V_{amorçage}$ d'amorçage de l'arc sera atteinte, l'arc s'amorcera. La valeur $i_u(t_{amorçage})$ du courant dans la self de stockage sera alors donnée par la relation (28), dans laquelle $R(t)$ a déjà été remplacé par $R_2(t)$ et où t sera remplacé par $t_{amorçage}$)

Après l'amorçage de l'arc

La tension d'arc se fixera par hypothèse à la valeur constante V_{arc} (inférieure à $V_{\text{amorçage}}$) et les équations de Kirchhoff appliquées au circuit de la figure 50 permettront d'écrire

$$(203) \quad i(t) = i_u(t) + i_2(t)$$

$$(204) \quad e = -L \frac{di(t)}{dt} = R_2(t) i_2(t) = R_u(t) i_u(t) = V_{\text{arc}}$$

Des relations (204) on déduit :

$$(205) \quad i(t) = i(t_{\text{amorçage}}) - \frac{V_{\text{arc}}}{L} [t - t_{\text{amorçage}}]$$

et en tenant compte de la relation (203) on obtient le courant dans l'arc :

$$(206) \quad i_u(t) = i(t_{\text{amorçage}}) - \frac{V_{\text{arc}}}{L} [t - t_{\text{amorçage}}] - \frac{V_{\text{arc}}}{R_2(t)}$$

Dans le cas où, pour $t \geq t_{\text{amorçage}}$, la résistance $R_2(t)$ de l'interrupteur est suffisamment élevée pour que le dernier terme de l'équation (206) soit négligeable, le courant $i_u(t)$ dans l'arc est une fonction linéaire décroissante du temps, qui peut être schématisée par la figure 51.

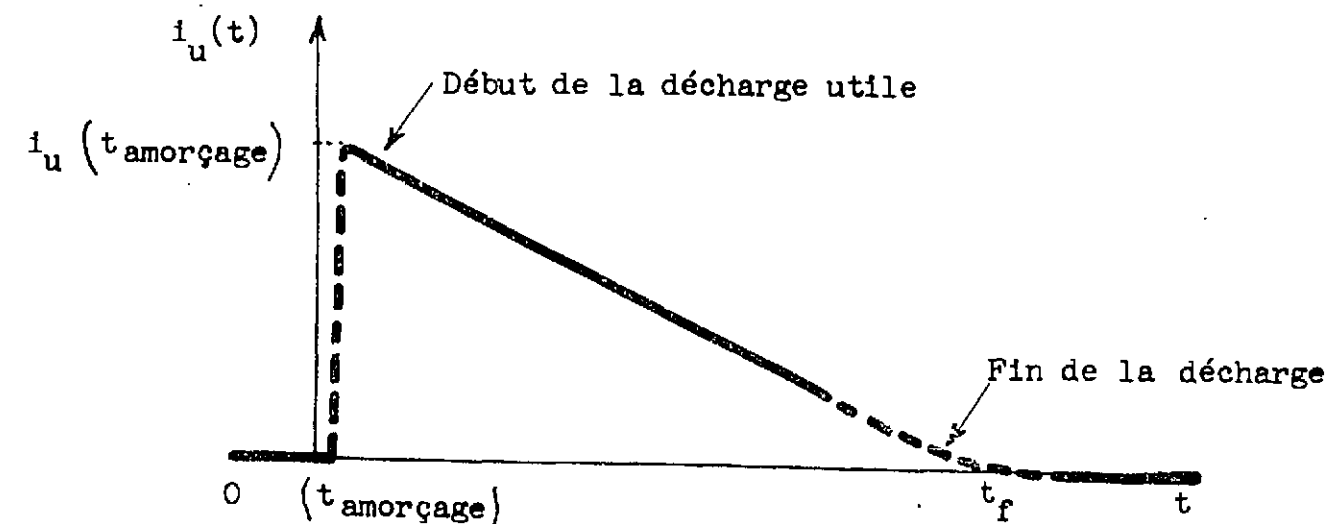


Figure 51

Dans ces conditions la dernière relation (204) permet de calculer la fonction $R_u(t)$:

$$(207) \quad R_u(t) = \frac{V_{\text{arc}}}{i_u(t)}$$

où le courant $i_u(t)$ est donné par la relation (206). Il en résulte que si la tension V_{arc} est constante, la résistance $R_u(t)$ de l'arc est nécessairement variable et augmente au cours du temps. (On peut rapprocher ce résultat des courbes expérimentales rassemblées sur la figure 32).

Puis à la fin de la décharge l'arc s'éteindra progressivement (en pointillés sur la figure 51).

On peut calculer :

- L'énergie transférée dans l'arc :

$$(208) \quad W_u = V_{\text{arc}} \int_0^{\infty} i_u(t) dt$$

le courant $i_u(t)$ étant donné par la relation (206) et restant nul après l'instant t_f où il s'annule dans la relation (206).

- L'énergie dissipée dans l'interrupteur :

$$(209) \quad W_2 = V_{\text{arc}}^2 \int_0^{t_f} \frac{dt}{R_2(t)}$$

Il est alors possible de calculer le rendement de transfert d'énergie en procédant de la même façon qu'au § 7. Nous n'entrerons pas davantage dans les détails.

Il faut enfin remarquer que le fait de considérer pendant la décharge la tension d'arc comme constante ne constitue qu'une approximation.

Remarque 2

Les deux exemples de réalisations qui viennent d'être envisagés dans les paragraphes 9-1 et 9-2 concrétisent aujourd'hui une application révolutionnaire et d'avant-garde des supraconducteurs. Mais ces deux exemples sont basés sur les matériaux actuels, tels qu'ils sont aujourd'hui. En tant qu'exemples ils sont condamnés d'ici quelques années à faire figure de monstres et d'ancêtres dès que les matériaux actuels vont laisser la place à des supraconducteurs bien étudiés et bien adaptés à notre problème.

- BIBLIOGRAPHIE -

- /111/ - Atomics International .- 8900 De Soto Avenue, Canoga Park, Calif. U.S.A.
- /112/ - National Research Corporation .- Supercon Division
9 Erie Drive, Natick, Massachusetts , U.S.A.
- /113/ - Mesures effectuées par BISCAREL (J.)

10 - REMARQUES RELATIVES AU MATERIAU SUPRACONDUCTEUR ET CONCLUSION

C'est la perspective d'utiliser les supraconducteurs pour la production de champs magnétiques intenses qui a été, depuis 1960, constamment à l'origine des recherches et des progrès effectués. Ces progrès se sont traduits par :

- l'apparition sur le marché d'un certain nombre de matériaux, tels que les alliages Nb-Zr, Nb-Ti, le composé Nb₃ Sn, actuellement élaborés sous forme de fils, câbles, rubans...
- l'élimination à priori des matériaux supraconducteurs qui ne pouvaient pratiquement pas être élaborés sous ces formes ;
- l'obtention, pour les matériaux élaborés, d'inductions critiques maxima aussi élevées que possible, au point qu'il semble maintenant difficile de voir dans un avenir immédiat les inductions critiques de ceux-ci augmenter de facteurs importants (ainsi on ne voit pas encore comment on pourrait par exemple multiplier par 10 l'induction critique de l'un de ces matériaux, induction déjà très proche des limites prévues par la théorie actuelle ; cependant des combinaisons entre matériaux différents [85/ ne sont pas à exclure).
- la mise au point de techniques efficaces de "stabilisation" du matériau ainsi que du bobinage.

Mais par contre, on peut constater que les courants critiques obtenus par exemple avec des matériaux de même nature, mais d'origines différentes, ou bien utilisés aux mêmes inductions mais dans des conditions expérimentales différentes, différent parfois d'un facteur très supérieur à 10. Cela n'a rien d'étonnant si l'on remarque que la caractéristique primordiale du matériau, pour la production de champs magnétiques intenses, est de posséder l'induction critique la plus élevée possible. par contre nous avons vu que pour le stockage et la décharge de l'énergie électrique c'était le courant critique qui intervenait principalement.

En effet, si l'on multiplie par exemple seulement par 10 la densité de courant critique J_c d'un matériau donné, il en résulte que :

- d'après la relation (24), on multiplie par $(10)^{3/2}$, c'est à dire 31,6 l'énergie stockée, tandis que si l'on voulait multiplier par 10 l'induction critique B_c (ce qui n'est d'ailleurs théoriquement pas réalisable à l'heure actuelle) on ne multiplierait que par $(10)^{1/2}$, c'est à dire 3,16, l'énergie stockée ;
- d'après la relation (102) il serait possible de multiplier par 10 la résistance R_m de l'interrupteur pour la même masse de matériau supraconducteur utilisé, ou bien de diviser par 10 la masse de l'interrupteur pour une même valeur de la résistance R_m .

Or, si l'on note que les ordres de grandeurs des densités de courants actuellement obtenues expérimentalement sont très inférieurs aux ordres de grandeurs des densités de courants théoriques maxima possibles [113/, une amélioration des densités de courants critiques tendant à les rapprocher de ces limites aurait des conséquences révolutionnaires pour notre application.

Que ce soit par exemple pour réaliser des valeurs maxima du produit $J_c \sqrt{B_c}$ (relation (24)) ou du produit ρJ_c^2 (relation (102)) ou seulement un compromis entre ces conditions il ne semble pas que des études aient été entreprises jusqu'à ce jour aussi bien sur la nature des matériaux à retenir que sur les traitements à leur faire subir ou la façon de les mettre en forme.

En ce qui concerne la nature des matériaux une étude prospective systématique reste à faire sur tous les supraconducteurs connus pour déterminer ceux qui peuvent avantageusement être utilisés pour constituer tout ou partie des circuits de stockage et décharge d'énergie ; de même la recherche de matériaux nouveaux reste à entreprendre dans ce sens.

En ce qui concerne la structure et la forme des matériaux, des études sur les couches minces par exemple ou sur les circuits massifs possédant une

anisotropie (supraconductivité dans une direction et non dans les deux directions perpendiculaires), telles que les lignes de courant piégées soient "figées" dans le matériau et dans le circuit, restent à faire. Dans cette voie nos idées semblent rejoindre celles d'Abrikosov [10] qui prévoit un avenir plus certain pour les couches d'épaisseurs 10^{-5} à 10^{-6} cm que pour les fils tels qu'ils sont actuellement utilisés dans les bobinages.

De même une étude de propriétés particulières, par exemple la propriété intéressante qu'ont certains matériaux de posséder des courants critiques plus élevés pour des inductions supérieures à une certaine valeur [114] / [85], reste à faire.

La possibilité d'utiliser des circuits massifs (anisotropes ou non), ou des circuits en couches, etc... en court-circuit sur eux-mêmes n'avait semble-t-il jamais été envisagée. A part dans la réalisation des cryotrons, l'utilisation de couches minces pour obtenir des densités de courants critiques élevées c'est à dire en conséquence des résistances à l'état normal élevées ne semble pas avoir été mise en oeuvre. Au contraire l'utilisation des supraconducteurs pour engendrer des champs magnétiques avait conduit, à l'opposé de la condition (102), à mettre au point des matériaux possédant des résistivités électriques équivalentes aussi faibles que possible. De même on recherchait, dans un bobinage, à atteindre tout l'opposé de ... transitions rapides, homogènes et totales ! La possibilité de réaliser des circuits constitués par des couches fermées sur elles-mêmes possédant ainsi une bonne stabilité à l'état supraconducteur, une faible inertie thermique et un accès facile pour une pénétration homogène de l'induction magnétique lors de la transition, enfin une résistivité relativement élevée à l'état normal, ne semble pas avoir été utilisée.

Peut être n'avait-on pas encore pensé à tout cela ? Il fallait bien sûr, pour avoir des chances de parvenir à un résultat intéressant, imaginer et mettre en oeuvre des solutions très différentes des solutions électrotechniques classiques auxquelles on était depuis longtemps habitué. Peut être y avait-on pensé ? Mais on ne voyait pas encore très bien comment introduire pratiquement l'énergie dans de

tels circuits, ni comment l'en extraire ; les problèmes technologiques à résoudre étaient peut être encore trop nombreux et leur nature trop inhabituelle ...

S'il se dégage de tout ceci que les caractéristiques optima que l'on demande au matériau pour le stockage et la décharge de l'énergie électrique ne sont pas les mêmes que celles que l'on lui demande pour engendrer des champs magnétiques intenses, par contre des points communs existent : par exemple la nécessité de réaliser un circuit stable et, dans les cas de fonctionnement à induction élevée, la nécessité d'obtenir du circuit (non nécessairement du matériau) une résistance mécanique suffisamment élevée pour qu'il résiste sans danger à la pression magnétique.

Etant donnée la dispersion qui existe, pour les matériaux actuels, dans les valeurs des caractéristiques les plus importantes pour notre application, et étant donné que jusqu'ici aucune étude connue n'a été faite pour orienter ces caractéristiques vers les valeurs qui nous intéressent, on peut penser qu'il est maintenant possible, ayant défini le problème, d'obtenir des améliorations importantes en peu de temps et à peu de frais.

En restant très réaliste, on est en droit d'attendre cela aujourd'hui.

BIBLIOGRAPHIE

- /113/- Souvenir d'un intéressant échange de vues avec le professeur BB. GOODMAN lors des journées internationales des états extrêmes de la matière aux très hautes et très basses températures, organisées avec le concours de la Société Française de Thermiciens à PARIS du 4 au 8 avril 1967.
- /114/- BERLINCOURT (T.G.) , HAKE (R.R.) , LESLIE (D.H.) .- Superconductivity at high magnetic fields and current densities in some Nb-Zr alloys. Physical Review Letters , Vol. 6 N^{ber} 12 June 1961 , pp. 671-674 .

Vers 1960, l'apparition des premiers matériaux à champs critiques élevés retenait l'attention de P. DELOBEAU sous la direction de qui je travaillais, et A. BRIN qui dirigeait le service avait décidé d'attacher un intérêt tout spécial aux possibilités de ces nouveaux matériaux. L'idée que j'avais eue de pouvoir les utiliser pour stocker et libérer, d'une façon utilisable, de l'énergie électrique était originale à l'époque et aussi très contestée.

P. NELSON et M. CESSENAT, attirant l'attention dès le début sur certaines difficultés possibles, avaient suscité un examen plus particulier des points correspondants.

Au travail effectué ont participé, chronologiquement :

P. GENEVEY, G. VALLEE, M.C. TAMAS, P. LOUP, P. DUPONT, G. PROST, R. DAVIT
J.L. DESCHANELS, J. BISCAREL, J.P. LOIR,

sans nommer les techniciens qui ont réalisé la partie expérimentale.

C'est à un effort coordonné et soutenu pendant plusieurs années que nous devons l'avance technique que nous possédons aujourd'hui sur les très rares travaux connus pour cette application très intéressante des supra-conducteurs.

Manuscrit reçu le 13 mars 1968

FIN