

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Auteur(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 193.-195.
Nombre de volumes	125
Cote	CNAM-BIB P 1329-B et P 1329-C
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Note	La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77
Notice complète	https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&RELTYPE=NT
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C
LISTE DES VOLUMES	
	N°25 (1936)
	N°26 (1937)
	N°27 (1937)
	N°28 (1937)
	N°29 (1938)
	N°30 (1939)
	N°31 (1936)
	N°32 (1938)
	N°33 (1938)
	N°34 (1938)
	N°35 (1938)
	N°36 (1938)
	N°37 (1938)
	N°38 (1938)
	N°39 (1938)
	N°40 (1939)
	N°41 (1939)
	N°42 (1939)
	N°43 (1939)
	N°44 (1939)
	N°45 (1938)
	N°46 (1940)
	N°47 (1940)
	N°48 (1940)
	N°49 (1940)
	N°50 (1940)
	N°51 (1941)
	N°52 (1941)
	N°53 (1941)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	N°54 (1941)
	N°55 (1942)
	N°56 (1942)
	N°57 (1942)
	N°59 (1942)

	N°60 (1941)
	N°61 (1942)
	N°62 (1943)
	N°64 (1943)
	N°65 (1943)
	N°66 (1943)
	N°68 (1943)
	N°69 (1943)
	N°70 (1943)
	N°71 (1943)
	N°72 (1944)
	N°73 (1943)
	N°74 (1944)
	N°75 (1944)
	N°78 (1944)
	N°79 (1944)
	N°80 (1944)
	N°81 (1944)
	N°82 (1944)
	N°83 (1944)
	N°84 (1944)
	N°85 (1944)
	N°86 (1945)
	N°87 (1945)
	N°88 (1945)
	N°89 (1945)
	N°90 (1945)
	N°91 (1945)
	N°92 (1945)
	N°93 (1945)
	N°94 (1945)
	N°95 (1946)
	N°96 (1946)
	N°97 (1946)
	N°98 (1944)
	N°99 (1945)
	N°100 (1945)
	N°101 (1946)
	N°102 (1946)
	N°103 (1946)
	N°104 (1946)
	N°105 (1946)
	N°106 (1946)
	N°107 (1947)
	N°108 (1947)
	N°109 (1947)
	N°110 et 111 (1947)
	N° 112 (1947)
	N° 113 (1947)
	N° 114 (1947)
	N° 115 (1947)
	N° 116 (1947)
	N° 117 (1947)
	N° 118 (1948)
	N° 119 (1948)
	N° 120 (1948)
	N° 121 (1948)
	N° 122 (1947)

	N° 123 (1948)
	N° 124 (1948)
	N° 125 (1948)
	N° 126 (1948)
	N° 127 (1948)
	N° 128 (1948)
	N° 129 (1948)
	N° 130 (1949)
	N° 131 (1949)
	N° 132 (1949)
	N° 133 (1948)
	N° 134 (1949)
	N° 135 (1948)
	N° 136 (1949)
	N° 137 (1950)
	N° 138 (1950)
	N° 139 (1950)
	N° 140 (1950)
	N° 141 (1950)
	N° 142 (1948)
	N° 143 (1950)
	N° 144 (1950)
	N° 145 (1951)
	N° 146 (1951)
	N° 147 (1951)
	N° 148 (1951)
	N° 149 (1951)
	N° 150 (1951)
	N° 151 (1951)
	N° 152 (1951)
	N° 153 (1952)
	N° 154 (1952)
	N° 155 (1952)


NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Volume	N°54 (1941)
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1941
Collation	1 vol. (19 p.) : ill. ; 22 cm
Nombre de vues	24
Cote	CNAM-BIB P 1329-B (30)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Anglais Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	07/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039014541
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B.30

P1329-B

8° Hu. 107 (34)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LABORATOIRE D'ESSAIS



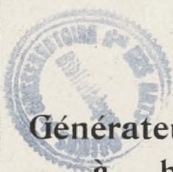
**GÉNÉRATEURS
DE COURANT CONTINU
A HAUTE TENSION**
*UTILISANT DES REDRESSEURS
A CUIVRE — OXYDE DE CUIVRE*

PUBLICATION N° 54

(Extrait de la R.G.E.)

T. L - P. 294-299 - Novembre 1941)





**Générateurs de courant continu
à haute tension
utilisant des redresseurs
à cuivre-oxyde de cuivre**



ÉDITEUR
12, Place de Laborde, 12
PARIS (VIII^e)

1941

Le présent document est soumis à la
révision de la Commission
des études et de la culture



1954



**Générateurs de courant continu
à haute tension utilisant des redresseurs
à cuivre-oxyde de cuivre**

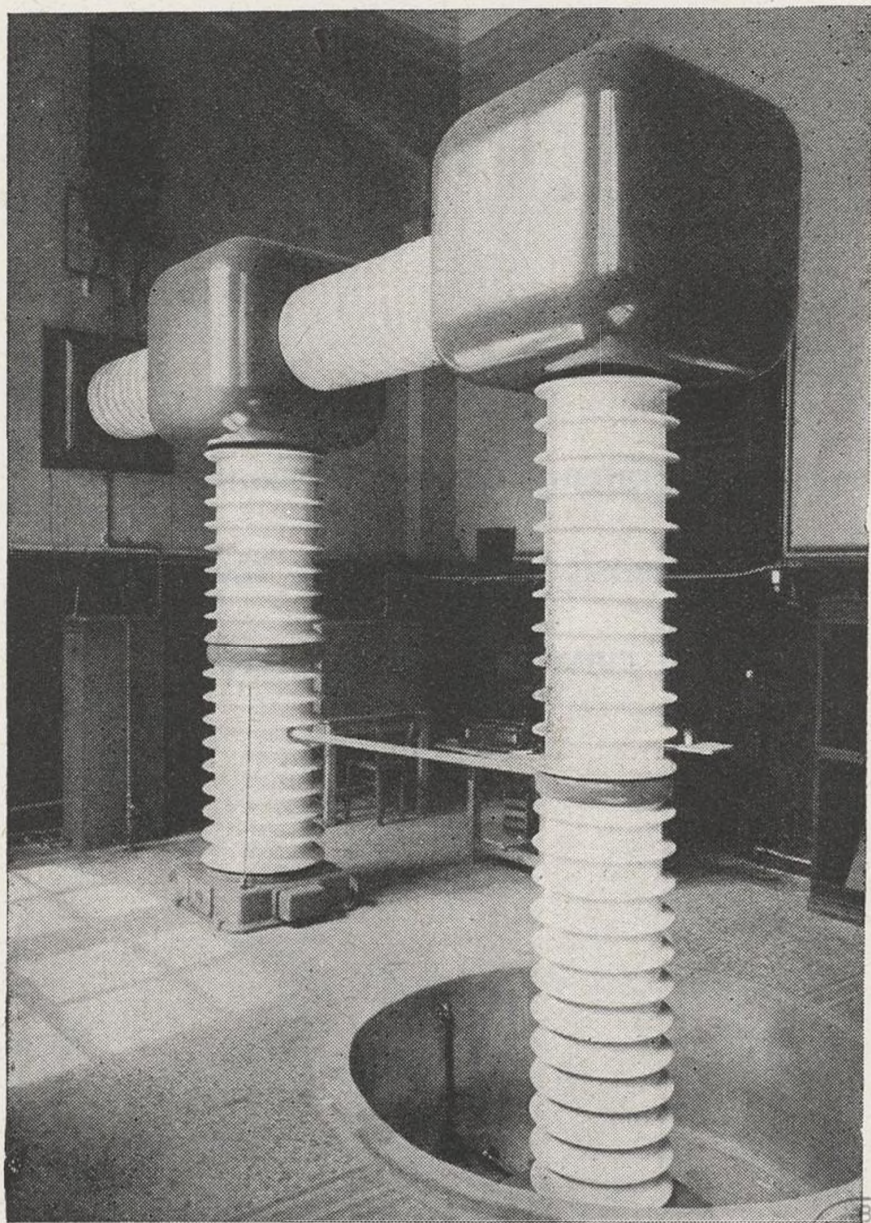


Fig. 6. — Vue d'ensemble du générateur à 500 kv
à redresseurs à cuivre-oxyde de cuivre.

Bib.
CNAM

Générateurs de courant continu à haute tension utilisant des redresseurs à cuivre-oxyde de cuivre

I. Introduction. — En vue de la production de rayons X très pénétrants, le Laboratoire d'essais du Conservatoire national des Arts et Métiers projetait, au début de 1937, la construction d'un générateur de courant continu à haute tension, ayant les caractéristiques suivantes : le pôle positif étant relié au sol, il devait débiter un courant d'une intensité d'au moins 10 ma sous une tension de 500 kv, la tension redressée ne devant pas avoir de fluctuations supérieures à 1 à 2 pour 100 en pleine charge. D'autre part, ce générateur étant destiné surtout à des essais industriels devait être robuste, de manœuvre aisée, de mise en route

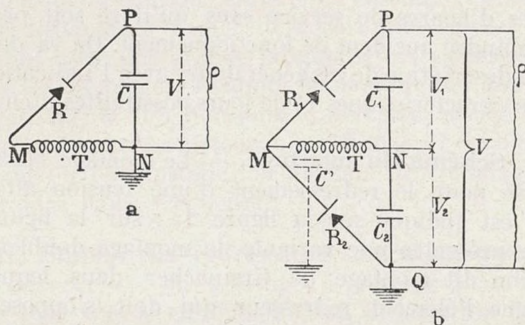


Fig. 1. — Schémas du montage des redresseurs pour hautes tensions : 1a, utilisation d'une demi-période du courant alternatif pour charger un condensateur C ; 1b, utilisation des deux demi-périodes avec deux redresseurs R_1 et R_2 chargeant chacun un condensateur C_1 et C_2 .

rapide et d'un fonctionnement sûr. Enfin, la préférence devait naturellement aller à la solution la plus économique, non pas tant au point de vue du rendement énergétique qu'au point de vue de l'amortissement et des frais de première installation.

Dès le début, on a été amené à étudier, puis à adopter une solution nouvelle, tout au moins en France, dans

laquelle la transformation d'une haute tension alternative en haute tension continue est obtenue par l'intermédiaire de redresseurs secs cuivre-oxyde de cuivre. Avant d'entreprendre la construction du générateur de 500 kv dont il vient d'être question, il a semblé prudent d'éprouver le principe adopté en l'appliquant à la réalisation d'un appareil capable de fournir 100 kv et 10 ma. Ce premier modèle, commencé en 1937, a été terminé et installé en mai 1938. Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une note préliminaire ⁽¹⁾ destinée à établir la priorité du Laboratoire dans ce domaine de recherches et ils étaient assez encourageants pour faire décider la construction immédiate du générateur définitif. Ce dernier était terminé en mars 1939 mais ses essais furent soudainement interrompus par la mobilisation. Actuellement, les deux générateurs sont en service au Laboratoire d'essais et celui de 100 kv, qui sert à l'alimentation d'un poste de rayons X et d'un poste de diffraction électronique, a déjà fourni plusieurs centaines d'heures de service sans qu'il se soit produit le moindre incident de fonctionnement. On va donner ici la description de ces générateurs avec l'indication de leurs caractéristiques et de leurs possibilités d'emploi.

II. Schéma du montage. — Le montage classique utilisé pour le redressement d'une tension alternative est indiqué sur la figure 1a; sur la figure 1b est représentée une variante, le montage doubleur de tension dit montage de Greinacher dans lequel R désigne l'élément redresseur qui doit s'opposer au passage de l'onde inverse. Si V est la tension obtenue, le redresseur doit supporter une tension inverse égale à $2V$ dans le cas a, et V dans le cas b.

Donc, pour le générateur projeté avec le montage de Greinacher, il fallait prévoir un redresseur pouvant supporter une onde inverse d'au moins 500 kv. Or, les redresseurs habituellement employés dans les installations à haute tension, par exemple les soupapes

⁽¹⁾ G.-A. BOUTRY et R. ZOUCKERMANN; L'emploi de redresseurs secs par la production de hautes tensions continues. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 19 septembre 1938, t. CCVII, p. 491, résumé dans *Revue générale de l'Électricité*, 21 janvier 1939, t. XLV, p. 22D.

électroniques, soit à vide (kénotrons), soit à vapeur de mercure, ne peuvent, au maximum, supporter que des tensions inverses de 300 kv. Pour une tension supérieure, il se produit une émission d'électrons par l'anode et la soupape ne fonctionne plus correctement. Les montages simples 1a et 1b ne peuvent donc plus être utilisés ; on peut mettre deux tels ensembles en série, le second sous tension étant alimenté par un transformateur d'isolement ; l'installation est donc compliquée. Une solution plus élégante consiste à employer le montage dit « en cascade » qui ne met en jeu qu'un seul transformateur, mais une suite de condensateurs et de valves. Chacun de ces éléments ne supportant qu'une fraction de la tension totale obtenue, on arrive ainsi à obtenir des tensions de plusieurs millions de volts avec des soupapes et des condensateurs de construction courante ; toutefois, dans ces montages, si chaque soupape ne supporte effectivement qu'une même fraction de la tension totale, certaines ont à débiter un courant d'intensité moyenne égale à des multiples de l'intensité du courant débité par l'ensemble et des courants instantanés d'intensité encore plus élevée : il se produit donc une grande fatigue de ces valves ; enfin, dans ces montages, l'emploi de nombreuses soupapes travaillant à des tensions différentes nécessite de nombreux transformateurs de chauffage à grand isolement ou une installation délicate de chauffage par courant à haute fréquence.

III. Emploi des redresseurs secs à cuivre-oxyde de cuivre. — On a songé à revenir à un montage assez simple en abandonnant le kénotron comme élément redresseur et en utilisant le redresseur cuivre-oxyde de cuivre. Ces redresseurs sont d'un emploi courant pour la production de basses tensions continues. Un élément redresseur (que ce soit une pastille cuivre-oxyde de cuivre ou sélénofer), ne supporte qu'une tension inverse de l'ordre de quelques volts. Si plusieurs éléments redresseurs sont en série, les tensions se répartissent également entre chacun d'eux, à condition toutefois qu'ils soient rigoureusement identiques, et la tension qu'on peut redresser est multipliée par le nombre d'éléments. Donc, pour parvenir à des tensions très élevées, on est conduit à employer

un nombre extrêmement grand d'éléments redresseurs ; mais nous arrivons à ce résultat qu'il n'y a plus, comme avec les valves électroniques, de limite théorique à la valeur de la tension qu'on peut redresser. D'autre part, en augmentant les dimensions de chaque élément redresseur, on peut, à volonté, élever la limite du courant admissible. Mais, par opposition aux valves électroniques, la résistance au courant direct d'un redresseur sec est grande et le courant inverse n'est pas nul. Il va être montré que, malgré cela, on peut arriver avec un rendement encore acceptable à obtenir de hautes tensions à l'aide de redresseurs secs et en utilisant des appareils d'encombrement admissible.

IV. Calcul du générateur. — Le schéma des deux générateurs de 100 et 500 kv est celui de la figure 1 b.

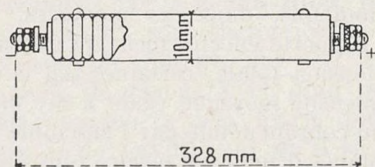


Fig. 2. — Croquis d'une baguette composée d'un certain nombre de pastilles redressantes montées en série.

Les redresseurs qui ont été employés sont des redresseurs cuivre-oxyde de cuivre. D'après les règles de construction employées en basse tension, il ne faut pas dépasser une tension inverse de l'ordre de 8 v par pastille ; donc, le nombre de pastilles nécessaires au générateur 100 kv est environ 12 500 pour chaque redresseur R_1 et R_2 , soit 25 000 en tout. En fait, dans l'appareil réalisé, se trouvent 154 baguettes de 176 pastilles chacune (27 100 pastilles). La surface de ces pastilles, pour l'intensité de 10 ma qu'on voulait atteindre, est de 38 mm². Chaque baguette (fig. 2) a un poids de 130 g (longueur 33 cm, diamètre 1 cm) ; le poids total du redresseur est donc de 20 kg. Pour le générateur à 500 kv, on a employé 134 112 pastilles, ce qui conduit au poids de 100 kg pour l'ensemble des redresseurs.

Une des conditions à réaliser pour obtenir le bon fonctionnement des redresseurs à oxyde de cuivre est leur bon refroidissement ; la chaleur dégagée par effet

Joule est en effet très grande et la température de la pastille ne doit ni dépasser 20°C au-dessus de la température ambiante, ni 50°C de façon absolue. Pour un générateur important, le système de refroidissement joue donc un rôle essentiel et est volumineux.

Une courbe donnant la tension aux bornes d'un élément redresseur de 176 pastilles en fonction du cou-

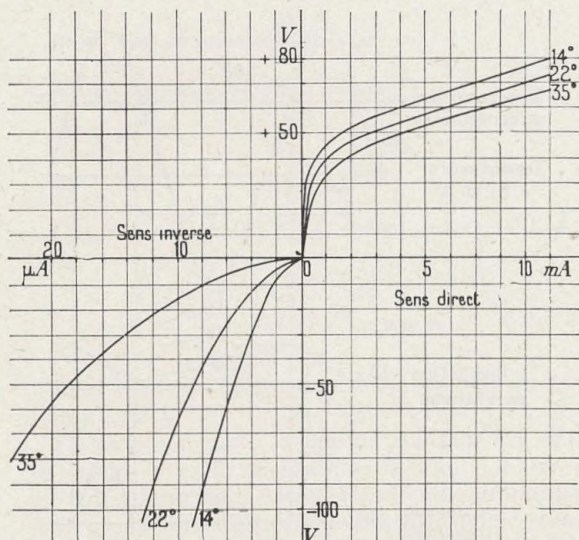


Fig. 3. — Courbes caractéristiques des redresseurs secs. Noter le changement d'échelle pour les intensités de courant entre le sens direct et le sens inverse.

rant est reproduite sur la figure 3. D'un élément à l'autre, cette courbe peut d'ailleurs avoir des variations notables ; d'autre part, comme le montre la figure, les propriétés des pastilles d'oxyde de cuivre sont très sensibles à la température. On peut schématiser la caractéristique de la façon suivante : le courant est très faible tant que la tension appliquée est négative ou plus petite que A , il croît linéairement quand la tension dépasse A . On admettra donc que la courbe est, en première approximation, représentée par l'équation

$$\begin{aligned} v &= A + B i \text{ pour } v > A \\ v &= 0 \text{ pour } v < A \end{aligned} \quad (1)$$

Appliquons entre M et N (fig. 1b) une tension sinusoïdale $U_0 \sin \omega t$. On va calculer la tension moyenne V_1 aux bornes d'un des condensateurs. En première approximation on la considérera comme constante (ses fluctuations ne dépassent pas 1 pour 100) Soit i le courant débité : tant que la tension en M est inférieure à la tension en P augmentée de A , c'est-à-

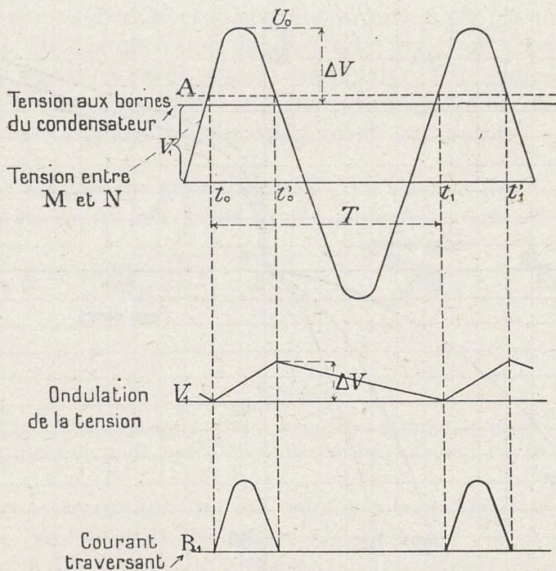


Fig. 4. — Courbes relatives à la tension et à ses ondulations suivant les points entre lesquels elle est prise.

dire pendant l'intervalle de temps $(t'_0 - t_1)$ (fig. 4) aucun courant ne traverse R_1 ; on peut, en effet, négliger le courant inverse du redresseur par rapport au courant débité par le générateur. Entre les instants t_0 et t'_0 , le redresseur laisse passer un courant qui recharge le condensateur ; en régime permanent, la quantité d'électricité traversant le redresseur est égale à la quantité d'électricité débitée par le générateur pendant une période.

Les instants t_0 et t'_0 sont définis par

$$U_0 \sin \omega t_0 = U_0 \sin \omega t'_0 = v + A$$

$$\text{Nous posons } \omega t_0 = \frac{\pi}{2} - x \text{ et } \omega t'_0 = \frac{\pi}{2} + x$$

donc

$$t'_0 - t_0 = \frac{2x}{\omega}.$$

Le courant traversant le redresseur est d'après (1)

$$\frac{U_0 \sin \omega t - (v + A)}{B}.$$

Donc l'équation d'équilibre est

$$\frac{2\pi i}{\omega} = \int_{t_0}^{t'_0} \frac{U_0 \sin \omega t - (v + A)}{B} dt = \frac{2U_0}{B} \sin x - \frac{2U_0}{B} x \cos x,$$

La tension moyenne V_1 est donc donnée par les équations

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= U_0 - [A + U_0(1 - \cos x)] \\ \frac{\pi i B}{U_0} &= \sin x - x \cos x. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Dans le cas du montage doubleur de tension, la tension $v = 2 V_1$.

En circuit ouvert, la tension continue est égale à la tension de crête diminuée de la tension d'amorçage du redresseur ; mais dès que le circuit continu débite, il se produit une forte chute de tension. Par exemple, prenons le cas du générateur de 100 kv débitant 10 ma : nous prendrons comme équation de la caractéristique du redresseur

$$v_{\text{volls}} = 6\,600 + 121\,000 i_{\text{ma}}.$$

Pour $U_0 = 70\,000$ v, on trouve $v = 106\,000$ v, alors qu'à vide on atteint 140 000 v.

On a, entre la tension à vide et la tension à pleine charge, une perte de 25 pour 100. Cette grande résistance interne est une des caractéristiques des générateurs à haute tension avec redresseurs secs. Il y a donc une partie notable de l'énergie dissipée en chaleur dans les redresseurs. Par exemple, pour le générateur à 500 kv, il faut dissiper une puissance de 1 200 w ; or nous avons déjà indiqué combien il était important pour la bonne conservation des pastilles d'assurer un refroidissement suffisant.

On va calculer maintenant les fluctuations de la tension redressée, en restant toujours dans le schéma de première approximation. La tension aux bornes de C_1 croît de l'instant t_0 à l'instant t'_0 , puis décroît de t'_0 à t_1 ; le condensateur fournissant un courant i pendant ce temps, sa chute de tension est

$$\Delta V_1 = \frac{i}{C_1} [T - (t'_0 - t_0)] = \frac{2i}{\omega C} (\pi - x).$$

D'autre part, les variations de tension de C_2 sont décalées d'une demi-période; l'ondulation de la tension totale (fig. 5) aura donc une période moitié de la période primaire, et la figure montre que sa valeur est

$$\Delta v = \Delta V_1 \left[1 - \frac{(t'_0 - t_0)}{T - (t'_0 - t_0)} \right] = \frac{2i}{C\omega} (\pi - 2x). \quad (3)$$

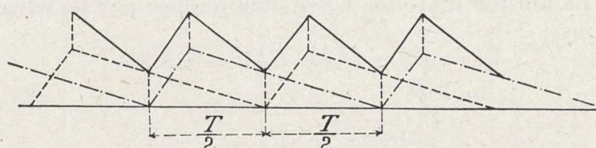


Fig. 5. — Courbes montrant les ondulations successives de la tension : en trait interrompu, courbe de l'ondulation de la tension V_1 ; en trait semi-interrompu, courbe de l'ondulation de la tension V_2 ; en trait plein, courbe de l'ondulation de la tension totale V .

Dans l'exemple numérique du paragraphe précédent (générateur à 100 kv débitant 10 mA) avec des capacités $C_1 = C_2 = 0,16 \mu F$, on trouve

$$x = 30^\circ \text{ et } \Delta v = 840 \text{ v, soit } \frac{\Delta v}{v} = 0,8 \text{ pour } 100.$$

On voit, d'après la formule (3), que la fluctuation est environ proportionnelle à i et dépend peu de la tension, donc décroît en valeur relative quand la tension croît.

Ces calculs, très schématiques (il faudrait, entre autres, se donner la tension sinusoïdale aux bornes du primaire du transformateur et tenir compte des caractéristiques de celui-ci), donnent une idée du fonctionnement du générateur à redresseurs secs et permettent de le comparer à celui des générateurs à kénotrons.

1° Le kénotron ne produit qu'une chute de tension faible quand le générateur débite, ce qui assure un

meilleur rendement (il est vrai qu'il faut tenir compte de la puissance absorbée par le chauffage des filaments des valves).

2° Dans le générateur à redresseurs secs, le temps de charge des condensateurs est plus long (il atteint un sixième de la période pour chaque condensateur dans l'exemple numérique) si bien que, pour une même capacité, on obtient une tension plus constante.

3° Enfin, apparaissent dans les formules (2) donnant la valeur de la tension continue, les paramètres A et B de la caractéristique des éléments redresseurs ; or, ceux-ci dépendent de la température θ , si bien que, pour une valeur donnée de la tension primaire primaire et pour une intensité de courant donnée, la tension secondaire variera légèrement avec θ . Par exemple, pour une variation de 15°C dans la température ambiante, la tension du générateur 100 kv peut subir une variation atteignant 4 000 à 5 000 v. En outre, au moment de la mise en marche du générateur, la tension varie jusqu'à ce que les redresseurs aient acquis leur température de régime.

V. Description des générateurs. — Les deux générateurs à 100 et à 500 kv du Laboratoire d'essais sont construits exactement sur le même principe ; leur réalisation ne diffère que par des détails. Le générateur à 100 kv destiné à un poste de diffraction électronique comporte des capacités relativement plus grandes, de façon à ce que la tension soit plus constante ; d'autre part, dans le grand générateur, il existe une circulation d'huile pour assurer le refroidissement.

Voici les données numériques pour ces générateurs. Le générateur à 100 kv comporte un transformateur 110 v/57 000 v, deux colonnes redresseuses de 77×176 éléments cuivre-oxyde de cuivre de la société Westinghouse, d'un diamètre de 7 mm, deux condensateurs de $0,16 \mu\text{F}$, le tout plongé dans un bac plein d'huile pourvu d'ailettes. Une seule borne, isolée, correspond à la sortie du conducteur négatif.

La figure 6 montre une vue du générateur de 500 kv ; il comporte un transformateur, deux colonnes redresseuses de 381×176 éléments cuivre-oxyde de cuivre, et deux condensateurs de $0,02 \mu\text{F}$. Les condensateurs et les redresseurs plongent dans de l'huile qui circule,

d'autre part, dans un serpentin refroidi par l'eau. La circulation est maintenue par une pompe à membrane de caoutchouc synthétique insoluble dans l'huile. Aucune pièce métallique mobile susceptible de fournir de la limaille n'est en contact avec l'huile isolante.

La commande de l'un et l'autre générateur se fait par un autotransformateur à curseur placé sur le primaire du transformateur à haute tension. Le fonctionnement de ces générateurs est donc d'une très grande simplicité; la mise en marche est instantanée et la simple manœuvre du volant de l'autotransformateur permet de régler la tension d'une façon continue entre zéro et la valeur maximum.

VI. Caractéristiques des générateurs. — Pour l'essai des générateurs, on les a fait débiter sur une résistance liquide constituée par un long tube d'eau isolé formant circuit fermé et comportant un réfrigérant. La résistance de ce tube d'eau, égale à 200 mégohms quand il était rempli d'eau distillée, pouvait être abaissée par l'addition d'eau de source. La mesure de la haute tension a été effectuée avec un électromètre Abraham-Villard gradué jusqu'à 200 kv. Dans le cas du générateur à 500 kv, cet électromètre était branché entre le sol et le point milieu des condensateurs, si bien que la tension mesurée était seulement la moitié de la tension totale ⁽¹⁾.

Le graphique de la figure 7 indique les valeurs des tensions obtenues en fonction de la tension primaire et du débit : ce sont des droites sensiblement parallèles. Comme il a été déjà signalé ici, l'influence de la température est notable, ce qui diminue la reproductibilité des courbes données; toutefois, on a pu remarquer qu'elle était moins grande pour le générateur à 500 kv où, grâce à la circulation d'huile, la température des redresseurs est mieux définie; par exemple, après une heure de fonctionnement à pleine charge, la température de l'huile à la sortie de l'appareil ne s'était élevée que de 19 à 26°C.

Aux grandes chutes de tension qui se produisent quand le générateur débite, correspond pour ce dernier

⁽¹⁾ Pour les tensions supérieures à 400 kv, on a extrapolé les caractéristiques (fig. 7) qui avaient été construites jusqu'à cette tension.

un rendement total assez faible ; pour le générateur de 100 kv, le rendement est, à pleine charge, un peu supérieur à 50 pour 100. Les valeurs suivantes ont été relevées : pour 75 000 v et 10 ma de débit, l'intensité du courant primaire absorbé est de 16 A sous 108 v : le

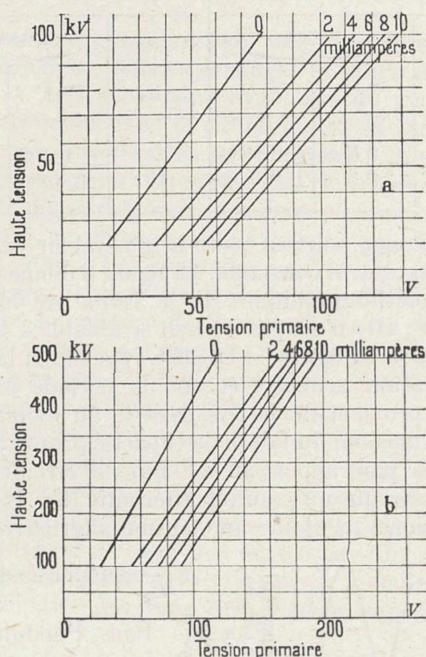


Fig. 7. — Courbes de la tension du courant continu obtenu en fonction de l'intensité du courant primaire et de la tension alternative : a, pour le générateur de 100 kv ; b, pour le générateur de 500 kv.

facteur de puissance étant 0,83, le rendement est de 52 pour 100. Pour le générateur à 500 kv, le rendement est un peu plus élevé : pour 368 kv et 10 ma de débit, la tension primaire est 157 v et l'intensité du courant 45,6 A, ce qui donne un rendement de 59 pour 100.

L'ondulation du courant a été mesurée grâce à un oscillographe branché en dérivation sur une petite partie de la résistance liquide. Le tableau I donne, en fonction du débit et de la tension, les valeurs maxima du rapport $\frac{V \text{ instantanée} - V \text{ moyenne}}{V \text{ moyenne}}$:



TABLEAU I. — Valeurs maxima
de $\frac{V_{\text{instant.}} - V_{\text{moy.}}}{V_{\text{moy.}}}$ en fonction du débit.

GÉNÉRATEUR A 400 kv			GÉNÉRATEUR A 500 kv		
INTENSITÉ du courant en ma	TENSION		INTENSITÉ du courant en ma	TENSION	
	20 kv	400 kv		400 kv	400 kv
5	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,15 \%$	4	$\pm 1,2 \%$	$\pm 0,4 \%$
10	$\pm 0,8 \%$	$\pm 0,3 \%$	10	$\pm 3 \%$	$\pm 0,8 \%$

On voit que, surtout pour le générateur de 100 kv, la tension est très constante. La figure 8 donne quelques relevés oscillographiques de la forme de la tension redressée ; elle n'est pas du tout semblable à la courbe théorique de la figure 5 ; en effet, elle admet la période de la tension primaire et non la période moitié. Ce résultat provient de la dyssymétrie du montage doubleur de tension, du fait de la capacité propre du transformateur par rapport au sol. Dans le circuit parasite T C' C₂ circule un courant alternatif (fig. 1b) ; donc, à la tension V₂ s'ajoute une tension alternative égale à

$$U \frac{C'}{C_2} \text{ et déphasée d'environ } \frac{\pi}{2}.$$

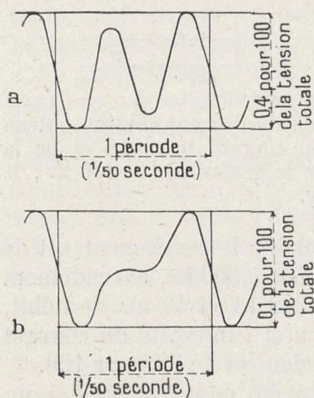


Fig. 8 — Courbes des courants redressés relevées à l'oscillographe : (a) générateur de 100 kv, $i = 2 \text{ mA}$, $V = 92 \text{ kv}$; (b) générateur de 100 kv, $i = 8 \text{ mA}$, $V = 68 \text{ kv}$.

Dans l'ondulation du courant total, cette tension alternative se superpose à l'ondulation due à la charge et décharge du condensateur. Quand le débit est grand et la tension faible, c'est cette dernière qui est prépondérante et la courbe tend vers la forme théorique de période moitié (fig. 8a). Au contraire, quand le débit est faible et la tension élevée, c'est la tension alternative qui

devient prépondérante et l'ondulation du courant redressé est presque sinusoïdale avec la période du courant primaire (fig. 8b). Des relevés oscillographiques des courants de charge respectifs de C_1 et C_2 ont confirmé la cause de cette dyssymétrie.

VII. Possibilités d'emploi des générateurs à redresseurs secs : leurs avantages et leurs inconvénients. —

Les principaux avantages du générateur décrit ici résident dans sa simplicité et la facilité de sa manœuvre, ensuite dans sa robustesse : en effet, les redresseurs peuvent supporter des surintensités de courant et des surtensions instantanées pourvu que la température ne dépasse pas les limites permises ; au contraire, dans les kénotrons, si brève que soit la surcharge, il peut se produire des décharges qui provoquent la rupture de l'ampoule ou du filament. Enfin, les redresseurs peuvent fournir un très long service, alors que la durée moyenne d'un kénotron est seulement de 1 000 à 2 000 heures.

Il a été indiqué que, par multiplication du nombre de pastilles redresseuses, on peut atteindre des tensions continues très élevées, et également qu'en employant des pastilles de plus grandes dimensions, on peut redresser des courants importants. On a signalé déjà un générateur à oxyde de cuivre fournissant un courant de 100 ma sous une tension supérieure à 100 kv ⁽¹⁾.

Enfin, au moment où le Laboratoire d'essais a fait construire ces générateurs prototypes, leur prix de revient était bien inférieur au prix d'un générateur de mêmes caractéristiques à valves électroniques ⁽²⁾. L'inconvénient principal de ces générateurs est leur grande résistance interne, si bien que pour obtenir une

⁽¹⁾ R. PLANIOL; Emploi des redresseurs secs pour la production de hautes tensions continues. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1^{er} août 1938, t. CCVII, p. 323-324, reproduit dans *Revue Générale de l'Électricité*, 22 octobre 1938, t. XLIV, p. 522.

⁽²⁾ A titre de précision on peut signaler ici que le coût du générateur à 100 kv, 10 ma a été de 40 000 fr et que celui du générateur à 500 kv, 10 ma a été de 230 000 fr, y compris le pupitre de commande.

tension donnée en charge, il faut prévoir un transformateur susceptible de fournir des tensions bien plus élevées. D'autre part, cette influence sur la tension de l'intensité du courant débité peut avoir des inconvénients pour la stabilité de marche de certains appareils ; notamment quand on alimente avec le générateur à 100 kv un tube à rayons X, il est nécessaire de stabiliser soigneusement le courant de chauffage du filament qui commande le débit du tube, sinon les variations du débit provoqueraient de grandes variations de tension. Enfin, il a lieu de signaler qu'étant donnée l'influence de la température, il est bon de mesurer directement la tension secondaire et de ne pas se fier à une courbe d'étalonnage.

Quelles sont les limites d'application des générateurs à redresseurs secs ? On a vu comment on pouvait imaginer, en multipliant le nombre des pastilles, des redresseurs capables de supporter des tensions toujours plus élevées ; mais si l'on conserve les montages simples de la figure 1a, on sera conduit à utiliser un transformateur ayant un rapport de transformation très élevé et des condensateurs supportant de très hautes tensions. Donc, c'est la construction de ces éléments qui limitera, en fait, la tension qu'on peut obtenir par ce procédé ; d'autre part, les redresseurs secs, assez encombrants, se prêtent moins aisément que les kénotrons à des montages multiplicateurs de tension. Il est probablement peu avantageux de dépasser 1 million de volts. Par ailleurs, pour les basses tensions, les redresseurs à gaz permettent de débiter des courants très élevés avec un encombrement moindre et un meilleur rendement. La zone où les redresseurs secs paraissent particulièrement bien adaptée se situe donc entre 100 000 volts et 1 million de volts et, pour cet intervalle de tension, ils permettent plus simplement d'obtenir des courants redressés d'intensités supérieures à celles obtenues avec tout autre type de générateur.

Les générateurs de haute tension à redresseurs secs, avec leurs caractéristiques intéressantes et leur simplicité de fonctionnement, semblent donc présenter un intérêt particulier pour l'obtention de puissances notables sous les très hautes tensions nécessaires pour certaines recherches physiques ou techniques.

Le présent travail, commencé au Laboratoire d'es-

sais du Conservatoire national des Arts et Métiers par M. G.-A. Boutry a été continué par M. Zouckermann et terminé par M. A. Guinier. M. Pensa, aide technique du Centre national de la Recherche scientifique, a fourni pendant toute sa durée une collaboration matérielle très précieuse. Les éléments redresseurs ont été construits par la Société Westinghouse, qui a fait preuve de la plus grande obligeance au cours de l'exécution de ce long travail. Les transformateurs le calcul et la réalisation des montages définitifs sont l'œuvre de la Société des Transformateurs Walter.

Extrait de la REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ,
de novembre 1941, t. L, p. 294-299.



