

## 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](http://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](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 possible 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	<a href="https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&amp;RELTYPE=NT">https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL ?PPN=261820893&amp;RELTYPE=NT</a>
Permalien	<a href="https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C</a>
<b>LISTE DES VOLUMES</b>	
	<a href="#">N°25 (1936)</a>
	<a href="#">N°26 (1937)</a>
	<a href="#">N°27 (1937)</a>
	<a href="#">N°28 (1937)</a>
	<a href="#">N°29 (1938)</a>
	<a href="#">N°30 (1939)</a>
	<a href="#">N°31 (1936)</a>
	<a href="#">N°32 (1938)</a>
	<a href="#">N°33 (1938)</a>
	<a href="#">N°34 (1938)</a>
	<a href="#">N°35 (1938)</a>
	<a href="#">N°36 (1938)</a>
	<a href="#">N°37 (1938)</a>
	<a href="#">N°38 ( 1938)</a>
	<a href="#">N°39 (1938)</a>
	<a href="#">N°40 (1939)</a>
	<a href="#">N°41 (1939)</a>
	<a href="#">N°42 (1939)</a>
	<a href="#">N°43 (1939)</a>
	<a href="#">N°44 (1939)</a>
	<a href="#">N°45 (1938)</a>
	<a href="#">N°46 (1940)</a>
	<a href="#">N°47 (1940)</a>
	<a href="#">N°48 (1940)</a>
	<a href="#">N°49 (1940)</a>
	<a href="#">N°50 (1940)</a>
	<a href="#">N°51 (1941)</a>
	<a href="#">N°52 (1941)</a>
	<a href="#">N°53 (1941)</a>
<b>VOLUME TÉLÉCHARGÉ</b>	<a href="#">N°54 (1941)</a>
	<a href="#">N°55 (1942)</a>
	<a href="#">N°56 (1942)</a>
	<a href="#">N°57 (1942)</a>
	<a href="#">N°59 (1942)</a>

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

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

<b>NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ</b>	
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	<a href="#">N°54 (1941)</a>
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	<a href="https://www.sudoc.fr/039014541">https://www.sudoc.fr/039014541</a>
Permalien	<a href="https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B.30">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B.30</a>

## **Note de présentation du ....**

---

...

P1329-B

8<sup>e</sup> Rue 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<sup>e</sup>)**

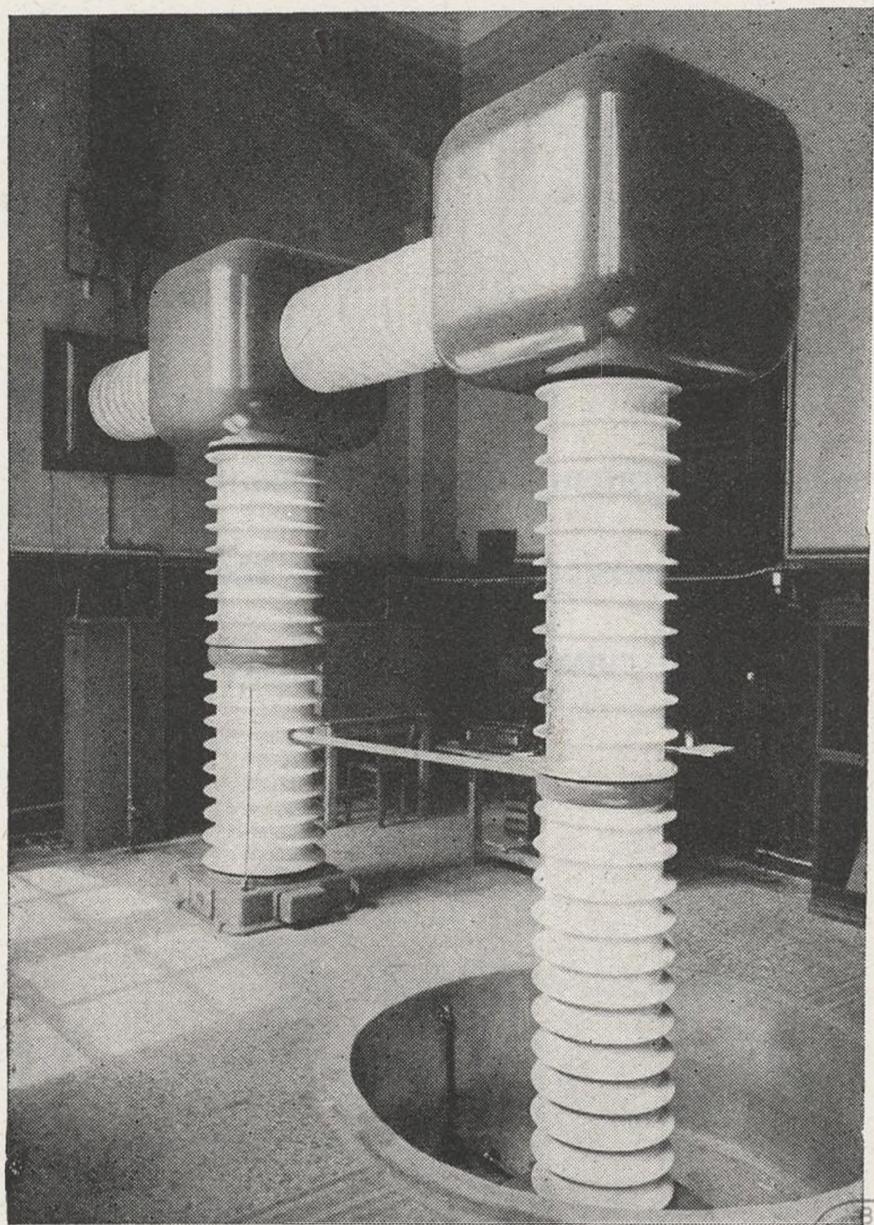
1941

ANNALES DE PHYSIQUE  
ET DE CHIMIE  
Sous la Direction de M. LAMARCK  
PARIS, 1802.

✓



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



Bib.  
CNAM

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

# 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

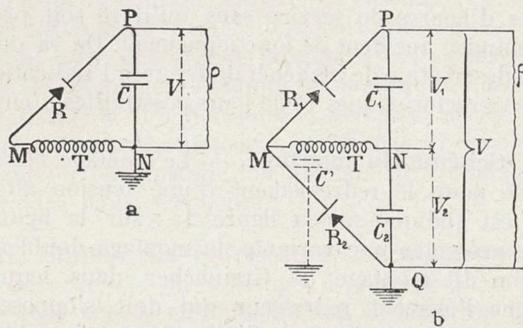


Fig. 1. — Schémas du montage des redresseurs pour hautes tensions : 1a, utilisation d'une demi-période du courant alternatif pour charger un condensateur C; 1b, utilisation des deux demi-périodes avec deux redresseurs  $R_1$  et  $R_2$  chargeant chacun un condensateur  $C_1$  et  $C_2$ .

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 (<sup>1</sup>) 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 2 V 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

(<sup>1</sup>) 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. xlvi, 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 soupe 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'isolation ; 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 soupe 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 isolation 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, éléver 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.

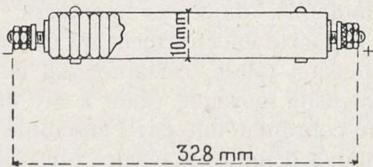


Fig. 2. — Croquis d'une baguette composée d'un certain nombre de pastilles redressantes montées en série.

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 mm<sup>2</sup>. 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 134 412 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-

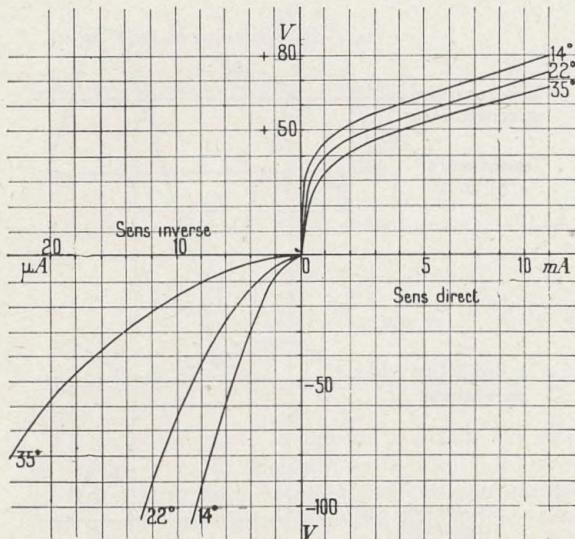


Fig. 3. — Courbes caractéristiques des redresseurs secs.  
Noter le changement d'échelle pour les intensités de courant entre le sens direct et le sens inverse.

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-

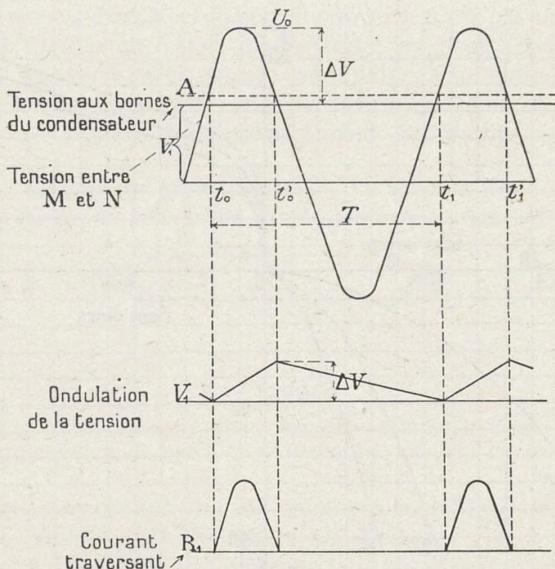


Fig. 4. — Courbes relatives à la tension et à ses ondulations suivant les points entre lesquels elle est prise.

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

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

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

done

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

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

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

Donc l'équation d'équilibre est

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

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

$$v_{\text{volts}} = 6600 + 121000 i_{\text{ma}}.$$

Pour  $U_0 = 70000$  v, on trouve  $v = 106000$  v, alors qu'à vide on atteint 140000 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 1200 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

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

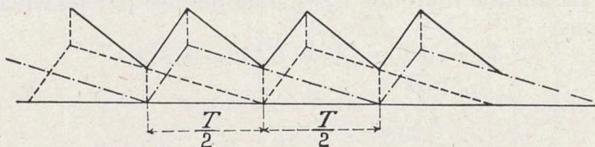


Fig. 5. — Courbes montrant les ondulations successives de la tension : en trait interrompu, courbe de l'ondulation de la tension  $V_1$ ; en trait semi-interrompu, courbe de l'ondulation de la tension  $V_2$ ; en trait plein, courbe de l'ondulation de la tension totale  $V$ .

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

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

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<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> 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  $\theta$ , 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  $\theta$ . Par exemple, pour une variation de 45°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  $77 \times 176$  éléments cuivre-oxyde de cuivre de la société Westinghouse, d'un diamètre de 7 mm, deux condensateurs de 0,16  $\mu$ 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  $381 \times 176$  éléments cuivre-oxyde de cuivre, et deux condensateurs de 0,02  $\mu$ 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 <sup>(1)</sup>.

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

<sup>(1)</sup> 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

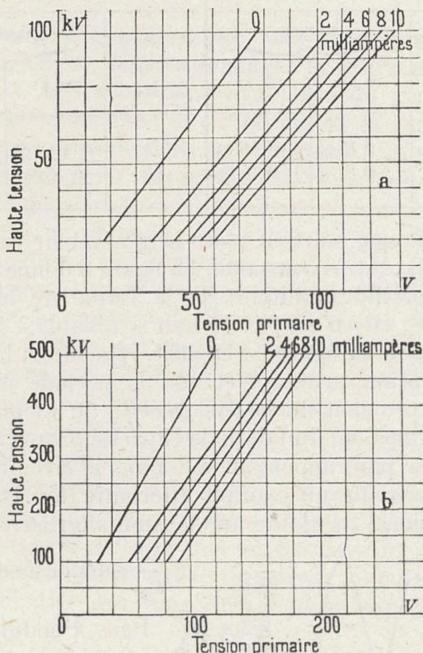


Fig. 7. — Courbes de la tension du courant continu obtenu en fonction de l'intensité du courant primaire et de la tension alternative : a, pour le générateur de 100 kv ; b, pour le générateur de 500 kv.

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'ondulement du courant a été mesurée grâce à un oscillographie 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 100 KV			GÉNÉRATEUR A 300 KV		
INTENSITÉ du courant en ma	TENSION		INTENSITÉ du courant en ma	TENSION	
	20 kv	400 kv		400 kv	400 kv
5	± 0,5 %	± 0,15 %	4	± 1,2 %	± 0,4 %
10	± 0,8 %	± 0,3 %	10	± 3 %	± 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' C<sub>2</sub> circule un courant alternatif (fig. 4b) ; donc, à la tension V<sub>2</sub> s'ajoute une tension alternative égale à

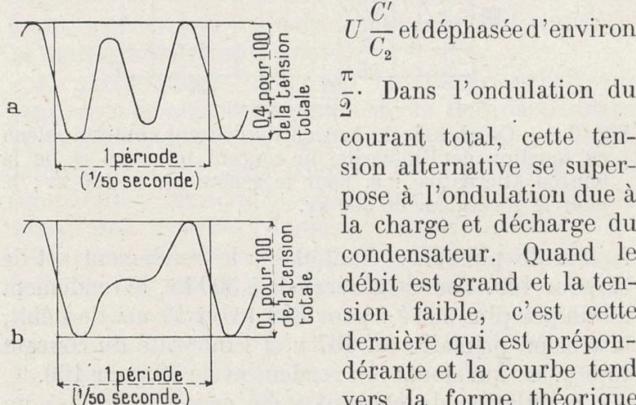


Fig. 8 — Courbes des courants redressés relevées à l'oscillographe : (a) générateur de 100 kv,  $i = 2 \text{ mA}$ ,  $V = 92 \text{ kv}$ ; (b) générateur de 100 kv,  $i = 8 \text{ mA}$ ,  $V = 68 \text{ kv}$ .

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

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 kénotróns, 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<sup>(1)</sup>.

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<sup>(2)</sup>. L'inconvénient principal de ces générateurs est leur grande résistance interne, si bien que pour obtenir une

(<sup>1</sup>) R. PLANOL; Emploi des redresseurs secs pour la production de hautes tensions continues. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 4<sup>e</sup> août 1938, t. ccvii, p. 323-324, reproduit dans *Revue Générale de l'Électricité*, 22 octobre 1938, t. xliiv, p. 522.

(<sup>2</sup>) 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 multiplicativeurs 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. I, p. 294-299.*

---



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115  
116  
117  
118  
119  
120  
121  
122  
123  
124  
125  
126  
127  
128  
129  
130  
131  
132  
133  
134  
135  
136  
137  
138  
139  
140  
141  
142  
143  
144  
145  
146  
147  
148  
149  
150  
151  
152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171  
172  
173  
174  
175  
176  
177  
178  
179  
180  
181  
182  
183  
184  
185  
186  
187  
188  
189  
190  
191  
192  
193  
194  
195  
196  
197  
198  
199  
200  
201  
202  
203  
204  
205  
206  
207  
208  
209  
210  
211  
212  
213  
214  
215  
216  
217  
218  
219  
220  
221  
222  
223  
224  
225  
226  
227  
228  
229  
230  
231  
232  
233  
234  
235  
236  
237  
238  
239  
240  
241  
242  
243  
244  
245  
246  
247  
248  
249  
250  
251  
252  
253  
254  
255  
256  
257  
258  
259  
260  
261  
262  
263  
264  
265  
266  
267  
268  
269  
270  
271  
272  
273  
274  
275  
276  
277  
278  
279  
280  
281  
282  
283  
284  
285  
286  
287  
288  
289  
290  
291  
292  
293  
294  
295  
296  
297  
298  
299  
300  
301  
302  
303  
304  
305  
306  
307  
308  
309  
310  
311  
312  
313  
314  
315  
316  
317  
318  
319  
320  
321  
322  
323  
324  
325  
326  
327  
328  
329  
330  
331  
332  
333  
334  
335  
336  
337  
338  
339  
340  
341  
342  
343  
344  
345  
346  
347  
348  
349  
350  
351  
352  
353  
354  
355  
356  
357  
358  
359  
360  
361  
362  
363  
364  
365  
366  
367  
368  
369  
370  
371  
372  
373  
374  
375  
376  
377  
378  
379  
380  
381  
382  
383  
384  
385  
386  
387  
388  
389  
390  
391  
392  
393  
394  
395  
396  
397  
398  
399  
400  
401  
402  
403  
404  
405  
406  
407  
408  
409  
410  
411  
412  
413  
414  
415  
416  
417  
418  
419  
420  
421  
422  
423  
424  
425  
426  
427  
428  
429  
430  
431  
432  
433  
434  
435  
436  
437  
438  
439  
440  
441  
442  
443  
444  
445  
446  
447  
448  
449  
450  
451  
452  
453  
454  
455  
456  
457  
458  
459  
460  
461  
462  
463  
464  
465  
466  
467  
468  
469  
470  
471  
472  
473  
474  
475  
476  
477  
478  
479  
480  
481  
482  
483  
484  
485  
486  
487  
488  
489  
490  
491  
492  
493  
494  
495  
496  
497  
498  
499  
500  
501  
502  
503  
504  
505  
506  
507  
508  
509  
510  
511  
512  
513  
514  
515  
516  
517  
518  
519  
520  
521  
522  
523  
524  
525  
526  
527  
528  
529  
530  
531  
532  
533  
534  
535  
536  
537  
538  
539  
540  
541  
542  
543  
544  
545  
546  
547  
548  
549  
550  
551  
552  
553  
554  
555  
556  
557  
558  
559  
550  
551  
552  
553  
554  
555  
556  
557  
558  
559  
560  
561  
562  
563  
564  
565  
566  
567  
568  
569  
570  
571  
572  
573  
574  
575  
576  
577  
578  
579  
580  
581  
582  
583  
584  
585  
586  
587  
588  
589  
580  
581  
582  
583  
584  
585  
586  
587  
588  
589  
590  
591  
592  
593  
594  
595  
596  
597  
598  
599  
590  
591  
592  
593  
594  
595  
596  
597  
598  
599  
600  
601  
602  
603  
604  
605  
606  
607  
608  
609  
610  
611  
612  
613  
614  
615  
616  
617  
618  
619  
620  
621  
622  
623  
624  
625  
626  
627  
628  
629  
630  
631  
632  
633  
634  
635  
636  
637  
638  
639  
640  
641  
642  
643  
644  
645  
646  
647  
648  
649  
650  
651  
652  
653  
654  
655  
656  
657  
658  
659  
660  
661  
662  
663  
664  
665  
666  
667  
668  
669  
660  
661  
662  
663  
664  
665  
666  
667  
668  
669  
670  
671  
672  
673  
674  
675  
676  
677  
678  
679  
680  
681  
682  
683  
684  
685  
686  
687  
688  
689  
690  
691  
692  
693  
694  
695  
696  
697  
698  
699  
690  
691  
692  
693  
694  
695  
696  
697  
698  
699  
700  
701  
702  
703  
704  
705  
706  
707  
708  
709  
710  
711  
712  
713  
714  
715  
716  
717  
718  
719  
720  
721  
722  
723  
724  
725  
726  
727  
728  
729  
720  
721  
722  
723  
724  
725  
726  
727  
728  
729  
730  
731  
732  
733  
734  
735  
736  
737  
738  
739  
730  
731  
732  
733  
734  
735  
736  
737  
738  
739  
740  
741  
742  
743  
744  
745  
746  
747  
748  
749  
740  
741  
742  
743  
744  
745  
746  
747  
748  
749  
750  
751  
752  
753  
754  
755  
756  
757  
758  
759  
760  
761  
762  
763  
764  
765  
766  
767  
768  
769  
760  
761  
762  
763  
764  
765  
766  
767  
768  
769  
770  
771  
772  
773  
774  
775  
776  
777  
778  
779  
780  
781  
782  
783  
784  
785  
786  
787  
788  
789  
790  
791  
792  
793  
794  
795  
796  
797  
798  
799  
790  
791  
792  
793  
794  
795  
796  
797  
798  
799  
800  
801  
802  
803  
804  
805  
806  
807  
808  
809  
810  
811  
812  
813  
814  
815  
816  
817  
818  
819  
810  
811  
812  
813  
814  
815  
816  
817  
818  
819  
820  
821  
822  
823  
824  
825  
826  
827  
828  
829  
820  
821  
822  
823  
824  
825  
826  
827  
828  
829  
830  
831  
832  
833  
834  
835  
836  
837  
838  
839  
830  
831  
832  
833  
834  
835  
836  
837  
838  
839  
840  
841  
842  
843  
844  
845  
846  
847  
848  
849  
840  
841  
842  
843  
844  
845  
846  
847  
848  
849  
850  
851  
852  
853  
854  
855  
856  
857  
858  
859  
860  
861  
862  
863  
864  
865  
866  
867  
868  
869  
860  
861  
862  
863  
864  
865  
866  
867  
868  
869  
870  
871  
872  
873  
874  
875  
876  
877  
878  
879  
880  
881  
882  
883  
884  
885  
886  
887  
888  
889  
880  
881  
882  
883  
884  
885  
886  
887  
888  
889  
890  
891  
892  
893  
894  
895  
896  
897  
898  
899  
890  
891  
892  
893  
894  
895  
896  
897  
898  
899  
900  
901  
902  
903  
904  
905  
906  
907  
908  
909  
910  
911  
912  
913  
914  
915  
916  
917  
918  
919  
910  
911  
912  
913  
914  
915  
916  
917  
918  
919  
920  
921  
922  
923  
924  
925  
926  
927  
928  
929  
920  
921  
922  
923  
924  
925  
926  
927  
928  
929  
930  
931  
932  
933  
934  
935  
936  
937  
938  
939  
930  
931  
932  
933  
934  
935  
936  
937  
938  
939  
940  
941  
942  
943  
944  
945  
946  
947  
948  
949  
940  
941  
942  
943  
944  
945  
946  
947  
948  
949  
950  
951  
952  
953  
954  
955  
956  
957  
958  
959  
960  
961  
962  
963  
964  
965  
966  
967  
968  
969  
960  
961  
962  
963  
964  
965  
966  
967  
968  
969  
970  
971  
972  
973  
974  
975  
976  
977  
978  
979  
980  
981  
982  
983  
984  
985  
986  
987  
988  
989  
980  
981  
982  
983  
984  
985  
986  
987  
988  
989  
990  
991  
992  
993  
994  
995  
996  
997  
998  
999  
990  
991  
992  
993  
994  
995  
996  
997  
998  
999  
1000

