

# Matériaux utilisés dans la construction des tubes électroniques

par

**Jean MONTGAILLARD**

*Ingénieur de l'Ecole Spéciale de Mécanique et d'Electricité  
Chef de Service adjoint au Groupement Tubes Electroniques de la CSF*

et

**Nguyen THIEN-CHI**

*Ingénieur Civil des Mines  
Directeur technique à la CSF*

1. Généralités .....	E 220 - 2	3.3. Verres .....	E 224 - 4
1,1. Limites du sujet traité .....	— 2	4. Les getters .....	— 5
1,2. Présentation de la structure de quelques tubes électroniques typiques .....	— 2	4,1. Définition .....	— 5
1,3. Rôle et constitution des principaux éléments des tubes électroniques .....	— 2	4,2. Les getters flashés .....	— 5
1,4. Caractéristiques générales souhaitées des matériaux pour tubes électroniques .....	— 7	4,3. Les getters non flashés .....	— 7
2 à 4. Caractéristiques des principaux matériaux pour tubes électroniques .....	E 222 - 1	5. Matériaux pour émission thermoélectronique .....	— 8
2. Matériaux conducteurs pour tubes électroniques .....	— 1	5,1. Les métaux purs .....	— 8
2,01. Aciers inoxydables austénitiques Fe-Ni-Cr .....	— 1	5,2. Cathodes à film mince .....	— 8
2,02. Antimoine .....	— 2	5,3. Cathodes à couche d'oxydes alcalino-terreux épaisse .....	— 9
2,03. Argent .....	— 2	5,4. Cathodes à couche de thorine .....	— 9
2,04. Alliages d'argent .....	— 2	6. Les gaz et les générateurs de gaz .....	— 10
2,05. Brasures .....	— 2	6,1. Les gaz .....	— 10
2,06. Césium .....	— 3	6,2. Les générateurs de gaz .....	— 11
2,07. Copper-clad : Dumet .....	— 4	6,3. Les réservoirs de gaz .....	— 11
2,08. Cuivre .....	— 4	7. Poudres luminescentes .....	— 11
2,09. Alliages de cuivre faiblement alliés .....	— 5	8 à 12. Mise en œuvre de quelques matériaux .....	E 226 - 1
2,10. Alliages cupro-nickels .....	— 5	8. Mise en forme des éléments métalliques .....	— 1
2,11. Alliages du type Monel .....	— 7	8,1. Hobbing .....	— 1
2,12. Fer .....	— 8	8,2. Procédés de mise en forme photochimiques et électrochimiques .....	— 1
2,13. Alliages ferro-nickels .....	— 10	8,3. Usinage par électro-érosion (étincelage) ...	— 2
2,14. Alliages ferro-chromes .....	— 10	9. Méthodes d'assemblage des pièces métalliques ..	— 2
2,15. Alliages fer-nickel-cobalt .....	— 10	9,1. Brasage .....	— 2
2,16. Alliages fer-nickel-chrome soudables aux verres tendres .....	— 12	9,2. Soudage électrique par points .....	— 2
2,17. Alliages fer-nickel-chrome résistants à l'oxydation. Inconel .....	— 13	9,3. Soudage argon-arc et soudage par bombardement électronique .....	— 2
2,18. Graphite .....	— 13	10. Méthodes de scellement de pièces en verre entre elles, avec les métaux et les céramiques .....	— 3
2,19. Molybdène et alliages molybdène-titane, molybdène-rhénium et molybdène-tungstène .....	— 14	11. Méthodes de scellement céramique-métal .....	— 4
2,20. Nickel non allié .....	— 17	11,1. Modes d'accrochage d'un corps conducteur sur une céramique .....	— 4
2,21. Nickels faiblement alliés pour cathodes à oxydes .....	— 18	11,2. Principaux procédés de scellement .....	— 4
2,22. Nickels carbonés pour anodes .....	— 18	11,3. Choix des céramiques, des métaux et des brasures à associer .....	— 5
2,23. Alliages nickel-manganèse .....	— 18	12. Réalisation d'écrans de tubes à rayons cathodiques .....	— 5
2,24. Niobium .....	— 19	12,1. Caractéristiques désirables d'un écran de T. R. C. .....	— 5
2,25. Tantale .....	— 19	12,2. Constitution d'un écran .....	— 5
2,26. Titane .....	— 20	12,3. Principes de fabrication .....	— 5
2,27. Tungstène non allié .....	— 21	12,31. Modes de dépôt de la poudre fluorescente .....	— 5
2,28. Tungstène faiblement dopé .....	— 22	12,32. Etallement d'un film de collodion (ou de méthacrylate de méthyle) .....	— 6
2,29. Alliages tungstène-rhénium .....	— 22	12,33. Métallisation .....	— 6
2,30. Zirconium .....	— 22	INDEX BIBLIOGRAPHIQUE .....	— 6
3. Matériaux isolants .....	E 224 - 1	PAGES FORMULAIRES .....	Form. E 228
3,1. Céramiques .....	— 1		
3,2. Micas .....	— 3		

# 1. GÉNÉRALITÉS

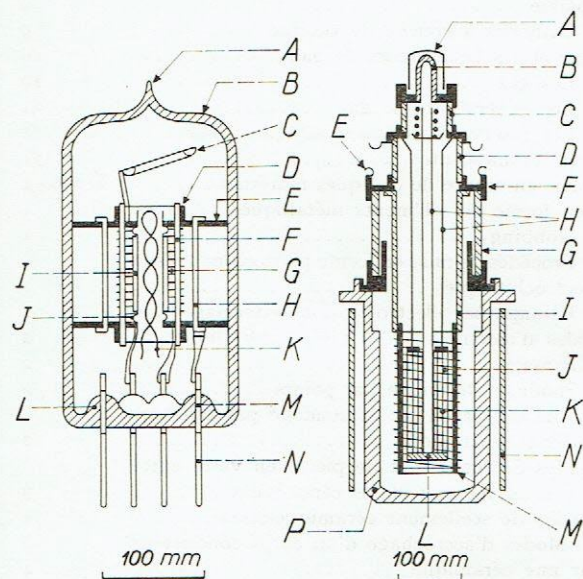
## 1.1. LIMITES DU SUJET TRAITÉ

L'électronique emploie un grand nombre de matériaux dont certains sont communs à d'autres industries (l'électrotechnique en particulier) et font l'objet d'articles séparés.

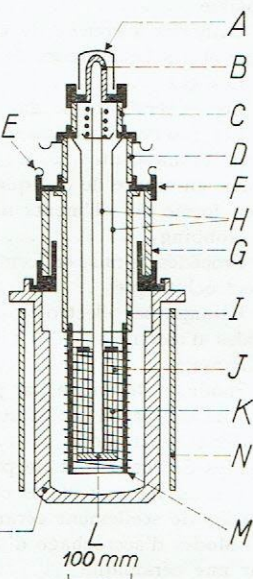
Le présent article traitera seulement des matériaux utilisés dans la fabrication des tubes électroniques à vide ou à gaz. Il faut remarquer à ce sujet que certains d'entre eux se retrouvent dans la fabrication des semiconducteurs et des composants électroniques, voire dans les équipements du génie nucléaire.

## 1.2. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE DE QUELQUES TUBES ÉLECTRONIQUES TYPIQUES

La figure 1 présente une coupe en élévation de quatre types de tubes utilisés actuellement et bien connus. La triode de réception miniature (fig. 1 a) et le magnétron (fig. 1 c) sont de conception assez ancienne alors que la triode de puissance (fig. 1 b) et le klystron (fig. 1 d) sont nettement plus modernes.



- A emplacement du queusot
- B ballon en cristal
- C getter flashable au Ba
- D butée de grille en nickel
- E entretoise en mica
- F montant de grille en nickel-manganèse
- G fil de grille en molybdène doré
- H anode en nickel carboné
- I oxydes alcalinoterreux
- J cathode en nickel
- K filament en tungstène recouvert d'alumine
- L pied en cristal
- M passage en copper-clad
- N broche en nickel



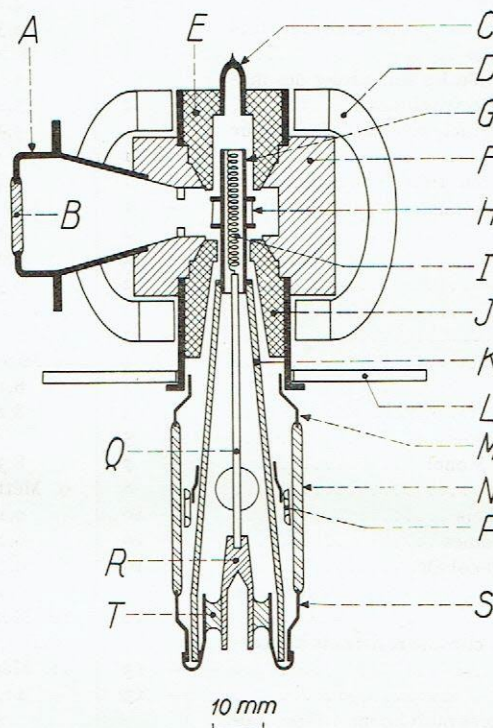
- A cache-queusot
- B queusot en cuivre
- C isolateur de filament en alumine
- D isolateur filament-grille en alumine
- E répartiteur de champ en cuivre
- F connexion grille en cuivre
- G isolateur grille-anode en alumine
- H supports de filaments en molybdène
- I support de grille en cuivre ou en tantale
- J fil de grille en molybdène recouvert de platine
- K filament en tungstène thorié
- L support de filament en molybdène
- M montant de grille en molybdène
- N chemise d'anode en cuivre
- P anode en cuivre

⑥ Triode d'émission de grande puissance à enceinte céramique-métal

## 1.3. ROLE ET CONSTITUTION DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DES TUBES ÉLECTRONIQUES

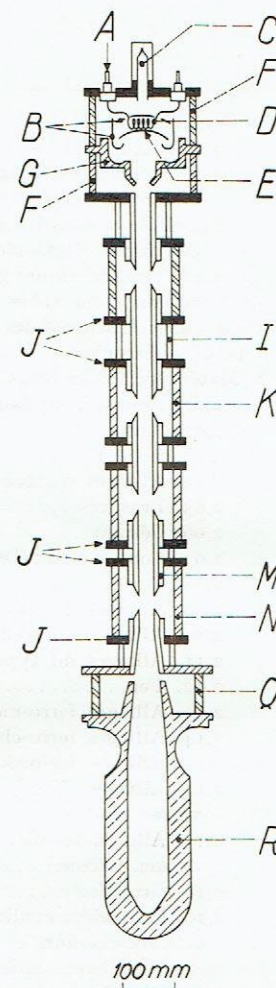
### 1.31. Enveloppe.

1,310. On sait que le fonctionnement correct des tubes électroniques nécessite le maintien d'une atmosphère gazeuse bien définie autour des éléments actifs et sur le trajet des électrons. Cette ambiance peut être le vide, aussi bon que possible (des pressions résiduelles de l'ordre de  $1,33 \cdot 10^{-7}$  Pa, soit  $10^{-9}$  torr, sont couramment obtenues) ou certains gaz neutres ou réducteurs : xénon, argon, vapeur de mercure, hydrogène, etc. à des pressions très variables, pouvant aller de  $1,33 \cdot 10^{-4}$  à  $13,3$  Pa ( $10^{-6}$  à  $10^{-1}$  torr), parfois au-delà.



- A support de sortie HF en Fe-Ni-Co
- B fenêtre HF en verre
- C queusot en cuivre
- D aimant Ticonal
- E pièce polaire en acier
- F bloc anodique en cuivre
- G fourreau de cathode en molybdène
- H cathode en nickel poreux
- I filament en tungstène revêtu d'alumine
- J pièce polaire en acier
- K support de cathode en molybdène
- L plateau de fixation
- M support de pied en Fe-Ni-Co
- N isolateur en verre anode-cathode
- P getter flashable au Ba
- Q support de filament en molybdène
- R connexion filament en Fe-Ni-Co
- S connexion cathode en Fe-Ni-Co
- T isolateur filament-cathode en verre

③ Magnétron de moyenne puissance à enceinte verre-métal



- A connexion filament
- B écrans de cathode en tantale
- C queusot en cuivre et cache-queusot
- D filament en tungstène
- E cathode type LEVI
- F isolateur en alumine
- G focalisateur en cuivre
- I entretoise de maintien
- J connexions de résonateur en cuivre
- K isolateur de résonateur en alumine
- M tube de glissement en cuivre
- N isolateur de résonateur en oxyde de béryllium
- Q isolateur d'anode en alumine
- R anode en cuivre

④ Klystron amplificateur de grande puissance à enceinte céramique-métal

Fig. 1. — Quatre types de tubes.

La qualité de l'ambiance gazeuse influe considérablement sur les caractéristiques électroniques d'un tube; aussi, tout au long de l'existence de ce dernier, doit-elle rester aussi constante que possible.

**1,311. Fonction d'étanchéité de l'enveloppe. Valeurs admissibles.**

— La nécessité précédente s'obtient en enfermant la partie active des tubes dans une *enveloppe* dite *étanche* qui empêche l'immixtion de l'atmosphère extérieure.

Cette étanchéité n'est pas absolue. Il peut y avoir *rentrée de gaz par porosité*: les gaz diffusent plus ou moins à travers toute paroi matérielle en fonction de la dimension de leurs atomes et de leur niveau d'ionisation; l'hélium puis l'hydrogène à l'état ionisé sont ceux qui diffusent le mieux.

Il peut également y avoir *pénétration des gaz par combinaison chimique* avec les éléments de l'enveloppe à partir de leur surface, de sorte que les gaz les traversent et gagnent leur surface interne; la combinaison chimique se détruit en présence du vide et régénère le gaz qui a ainsi *traversé* l'enveloppe.

Il est admis arbitrairement qu'une enveloppe destinée à un tube électronique ne doit pas permettre une rentrée de gaz supérieure à celle qui ferait passer le vide interne de  $1,33 \cdot 10^{-7}$  Pa à  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Pa ( $10^{-9}$  torr à  $10^{-6}$  torr) pendant deux ans (en l'absence de getter).

Une enceinte de grand volume s'accommodera donc d'une rentrée de gaz plus importante qu'une enceinte de petit volume; la valeur moyenne admise pour cette *fuite* est de  $10^{-11}$  litre sous la pression de  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Pa par seconde ( $10^{-11}$  lusec).

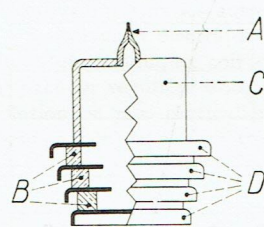
**1,312. Autres fonctions de l'enveloppe. — Ce sont :**

— assurer l'isolement électrique et quelquefois thermique entre les passages conducteurs de courant qui relient les circuits extérieurs du tube aux éléments internes;

— permettre par des passages conducteurs appropriés la circulation de courants électriques, qu'ils soient continus, à basse ou à haute fréquence.

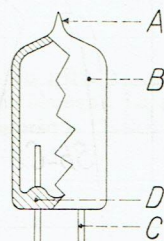
**1,313. Matériaux constitutifs des enveloppes. —** Le tableau I indique les matériaux utilisés le plus couramment pour la réalisation des enveloppes (à l'exception des brasures).

Les figures 2 et 3 schématisent la forme des enveloppes d'un tube *miniature* et d'un tube d'émission, et indiquent la nature des éléments constitutifs.



A queusot  
B ballon en verre  
C passage conducteur en copper-clad  
D pied en verre

Fig. 2. — Enveloppe verre-métal d'un tube miniature.



A queusot  
B céramiques d'isolement  
C anode extérieure en cuivre  
D sorties conductrices

Fig. 3. — Enveloppe céramique-métal d'un tube d'émission.

**1,32. Cathode.**

La cathode est la source d'électrons des tubes. Les quatre types d'émission électronique connus actuellement sont employés à des degrés divers.

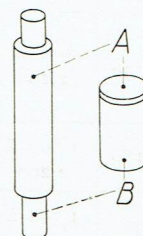
L'émission thermoélectronique est la plus utilisée, suivie, dans l'ordre décroissant, par l'émission photoélectrique, l'émission secondaire et enfin l'émission de champ.

A chaque processus correspond, bien entendu, des cathodes de structures très différentes dont un aperçu est donné § 1,321 à 1,324.

**1,321. Cathodes pour émission thermoélectronique. —** Plusieurs modèles existent, ils sont choisis d'après la densité et le régime d'émission désirés (en continu, en oscillations ou en impulsions), la durée de vie recherchée, la puissance de chauffage disponible; de nombreuses autres variantes qui débordent le cadre de ce chapitre sont également influentes.

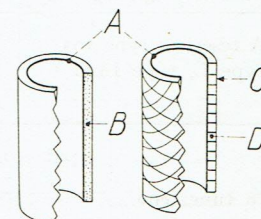
Le tableau II, p. 3 résume très approximativement les caractéristiques des différents modèles et leurs domaines d'utilisation; à noter que de nombreuses exceptions existent.

Les figures 4 à 7 indiquent la structure des cathodes à émissions thermiques les plus usuelles.



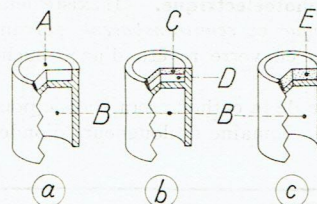
A couche émissive en oxydes alcalino-terreux  
B support en nickel

Fig. 4. — Cathodes à oxydes à support lisse.



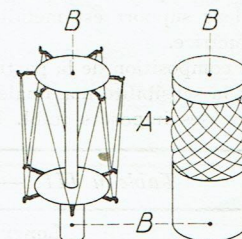
A support  
B couche en nickel poreux imprégné d'oxydes alcalino-terreux  
C grillage  
D oxydes alcalino-terreux

Fig. 5. — Cathodes à oxydes à support poreux ou grillagé.



A comprimé de tungstate de baryum et d'aluminium  
B supports en molybdène ou en tantale  
C tungstène poreux  
D oxydes alcalino-terreux  
E tungstène poreux imprégné d'aluminate de baryum  
Ⓐ type 103 Ⓑ type L Ⓒ type LEVI

Fig. 6. — Cathodes à réserve.



A fils émissifs  
B supports

Fig. 7. — Cathodes en tungstène pur ou en tungstène thorié à chauffage direct.

Tableau I. — Matériaux constitutifs des enveloppes.

Enveloppes verre-métal		Enveloppes céramique-métal	
Verres tendres Cristal Verres au plomb	Fe Copper-clad Alliage Fe-Ni Cuivre aminci Alliages Fe-Ni-Cr	Alumine 93 à 99,9 % Saphir Glucine (BeO)	Alliages Fe-Ni-Co Cu Ti Mo Aciers inoxydables
Verres durs Borosilicates	Alliages Fe-Ni-Co Mo W	Forstérite	Ti Alliages Fe-Ni
Quartz	W Mo		

Tableau II. — Cathodes thermoélectroniques.

Type de cathode	Valeurs moyennes		Température de fonctionnement Brillance °C	Durée de vie (1) h	Tendance à la contamination	Résistance aux hautes tensions	Résistance aux ions rapides	Utilisations	
	Densité d'émission (en continu) A/cm <sup>2</sup>	Puissance de chauffage W/cm <sup>2</sup>							
A oxydes alcalino-terreux à support lisse (nickel ou tungstène)	0,01 à 0,30	1,75 à 3,5	720 à 850	1 000 à 10 000	forte	mauvaise	mauvaise	Tubes de réception Tubes à rayons cathodiques Tubes à faible bruit haute et basse fréquence	
				50 000 à 100 000				Tubes pour répéteurs	
A oxydes alcalino-terreux à support poreux (nickel) ou grillagé	0,05 à 0,30	2,5 à 50	800 à 900	1 000 à 3 000	forte	moyenne	moyenne	Tubes d'émission de puissance à fréquence moyenne Magnétrons } toutes puissances Klystrons }	
A réserve : type 103, type L, type LEVI	1 à 10	30 à 150	900 à 1 200	1 000 à 10 000	moyenne	bonne	bonne	Tubes d'émission de faible puissance et de longue durée Tubes hyperfréquences	
En tungstène	pur	0,01 à 0,30	70 à 180	1 800 à 2 200	30 000	très faible	très bonne	très bonne	Tubes d'émission de grande puissance et de très longue durée
	thorié	0,05 à 0,50	15 à 40	1 500 à 1 800	20 000	moyenne	bonne	moyenne	

(1) La durée de vie des cathodes thermoélectroniques peut varier de façon très importante suivant les conditions d'emploi et les critères définissant la fin de durée de vie ; en effet, une cathode peut ne plus être utilisable alors que son émission semble encore abondante : aussi les valeurs du tableau n'indiquent-elles qu'un ordre de grandeur valable pour des conditions moyennes.

**1,322. Cathodes pour émission photoélectrique.** — Il existe deux types principaux de cathodes, *opaque* et *semitransparent*, suivant que leur support est métallique ou en verre revêtu d'une couche conductrice.

La composition de la partie active de la cathode sera choisie pour avoir la sensibilité maximale pour le domaine de longueurs d'ondes lumineuses imposées (tabl. III).

Tableau III. — Cathodes photoélectriques.

Nature de la partie active	Longueur d'onde du maximum de sensibilité (1) nm	Utilisation habituelle
Antimoine/césium (2)	420 (4 200 Å)	Supericonoscope, photomultiplicateurs, tube caméra TV orthochromatique, image orthicon.
Argent/bismuth/césium (2)	400 et 530 (4 000 et 5 300 Å)	Tube caméra TV panchromatique.
Argent/césium (2)	800 (8 000 Å)	Iconoscope, transformateur d'image infrarouge (TTI), cellules photoélectriques infrarouges.

(1) La sensibilité de l'œil humain est maximale vers 550 nm (1 nm = 1 nanomètre = 10<sup>-9</sup> m = 10 Å).

(2) La figure 8 donne les sensibilités relatives des 3 types de cathodes du tableau, en fonction de la longueur d'onde. La partie hachurée indique la zone de sensibilité de l'œil humain.

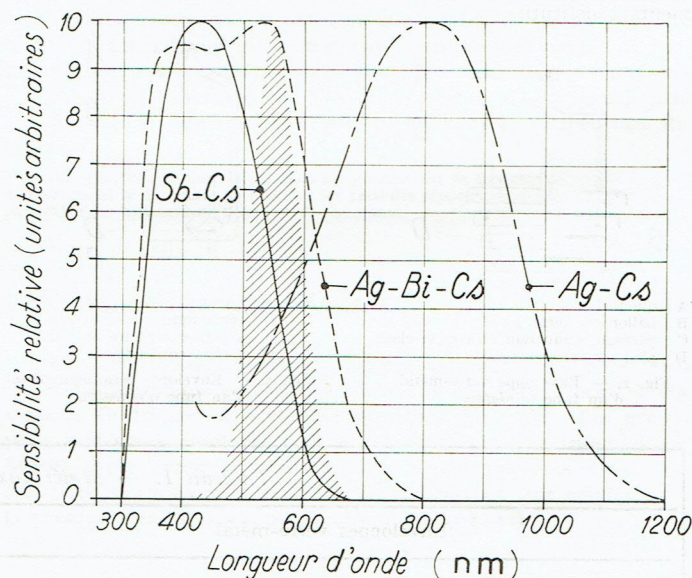


Fig. 8. — Sensibilités relatives en fonction de la longueur d'onde de trois types de cathodes photoélectriques.

**1,323. Cathodes pour émission secondaire.** — Du fait que l'émission secondaire est celle qui prend naissance à partir d'une substance soumise à un bombardement d'électrons primaires, la qualité d'une cathode à émission secondaire est caractérisée par le rapport du courant électronique secondaire au courant électronique primaire (coefficient d'émission secondaire) ainsi que par la constance de ce rapport tout au long de la vie de cette cathode.

Ce dernier point explique que les matériaux à coefficients d'émission secondaire élevés ne soient pas utilisés en général (oxydes

et halogénures alcalino-terreux), car ils résistent mal au bombardement électronique primaire.

Les cathodes pour émission secondaire les plus employées sont constituées par des alliages d'argent à 2 % de magnésium, ou de cuivre à 2 % de béryllium ; les coefficients d'émission secondaire peuvent atteindre respectivement 15 et 12 mais, pour conserver une bonne stabilité, il faut réduire l'énergie des électrons primaires et se contenter d'un coefficient voisin de 4. Les cathodes à émission secondaire sont utilisées principalement pour la réalisation de tubes photomultiplicateurs.

**1,324. Cathodes pour émission de champ.** — Cette forme d'émission est très peu employée. La surface émissive a la forme d'une pointe (ou d'une série de pointes) très fine : l'arrondi à l'extrémité de la pointe peut avoir un rayon d'environ  $0,1 \mu$  ; il est aisément compréhensible qu'en dépit d'une densité d'émission élevée par unité de surface émissive (quelques milliers d'A/cm<sup>2</sup>), les courants obtenus soient faibles.

La matière utilisée est généralement du tungstène.

### 1,33. Filaments.

**1,331. Rôle des filaments.** — Le rôle des filaments est de porter à leur température de fonctionnement les cathodes pour émission thermoelectronique. Il faut bien noter que certains filaments peuvent être utilisés comme cathodes émissives et cette possibilité est largement employée en particulier pour les tubes types triodes, tétrodes, pentodes de grande puissance. Ces filaments souvent nommés *cathodes à chauffage direct* peuvent avoir l'aspect indiqué fig. 7 ; ils sont généralement en tungstène ou en tungstène thorié ; mais des filaments en nickel ou en tungstène revêtus d'oxydes alcalino-terreux (tableau II) existent également.

**1,332. Filaments pour cathodes à chauffage indirect (cathodes équipotentielles).** — Lorsque les fonctions de chauffage et d'émission doivent être séparées, il faut isoler électriquement filaments et cathodes tout en assurant la meilleure transmission de chaleur possible des uns vers les autres.

Cet isolement électrique est obtenu soit à l'aide de pièces réfractaires en céramique, soit en déposant puis en frittant une couche d'épaisseur régulière isolante à la surface du filament. La première solution est plus particulièrement employée lorsque l'isolement filament-cathode doit être très bon, s'il y a une grande différence de

potentiel électrique entre filament et cathode, si la température du filament est très élevée ( $> 1\ 500^\circ\text{C}$ ), et enfin lorsque le fil constituant le filament est trop gros (par exemple diamètre  $> 0,7 \text{ mm}$ ). La seconde solution est utilisée dans les autres cas, car elle est moins onéreuse.

La figure 9 indique quelques types de filaments pour cathodes équipotentielles, utilisés couramment. Le métal employé pour ces filaments doit obligatoirement être réfractaire, car il fonctionne à des températures allant de 1 000 à 1 500 °C ; cette dernière limite peut être quelquefois dépassée, mais généralement au détriment de la longévité ; en outre, le métal doit encore conserver à chaud une résistance mécanique suffisante pour qu'il ne se déforme pas de façon permanente exagérée, et ne pas donner lieu à des combinaisons chimiques avec l'atmosphère dans laquelle il fonctionne ni avec les matériaux d'isolement avec lesquels il est en contact.

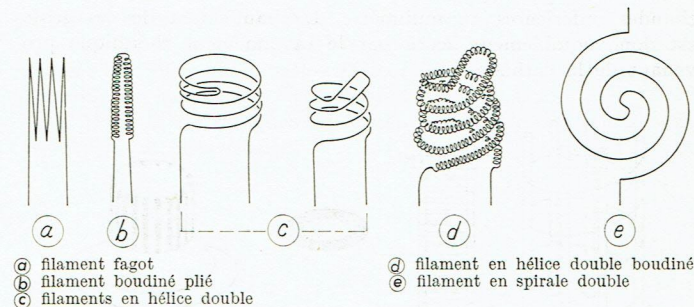


Fig. 9. — Filaments chauffants pour cathodes équipotentielles.

Le métal le plus employé est le tungstène, mais il existe aussi des filaments en alliage molybdène-tungstène et, maintenant, en alliage tungstène-rhénium.

Les isolateurs placés entre filaments et cathodes sont le plus souvent en céramique à base d'alumine (95 à 99,9 %), mais quelquefois en glucine (BeO).

Lorsque l'isolement est obtenu par une couche frittée, celle-ci est constituée par de l'alumine en poudre fine, déposée sous forme de peinture sur le filament ; quelquefois, de la magnésie et de la glucine sont ajoutées en faible quantité.

Il y a plusieurs méthodes de dépôt, parmi lesquelles : électrophorèse, trempé, pistolet à peinture, et maintenant pyrolyse.

Le tableau IV compare certains avantages et inconvénients des matériaux cités.

Tableau IV. — Matériaux pour filaments chauffants.

	Matériaux	Avantages	Inconvénients
Fils conducteurs	Tungstène	Point de fusion le plus élevé	Prix plus élevé que Mo-W
	Alliages Mo-W à 50 % et à 80 % de Mo	Facilité de mise en forme Coefficient thermique de résistance plus faible que pour W Résistivité plus forte que pour W	Manque de rigidité à chaud
	Alliages W-Re de 3 à 26 % de Re	Les mêmes que pour Mo-W Plus grande résistance mécanique	Prix très élevé
Isolants	Alumine	Ensemble de qualités satisfaisantes Prix modéré	
	Glucine	Point de fusion plus élevé que $\text{Al}_2\text{O}_3$ Forte conductibilité thermique	Prix plus élevé que l'alumine Résistance mécanique plus faible Très toxique dans certaines conditions

## 1.34. Rôle des autres électrodes.

**1.341. Grilles.** — Les grilles (fig. 10) sont des électrodes qui, placées sur le trajet des électrons, permettent de faire varier le flux de ces derniers. Ces grilles doivent être conductrices, aussi transparentes que possible aux électrons dont aucun ne devrait les heurter. Ce dernier point n'est pas toujours réalisable, aussi les grilles peuvent-elles être soumises à un bombardement électronique ayant deux conséquences principales graves :

- création d'émission électronique secondaire perturbatrice,
- échauffement du métal des grilles, ce qui amoindrit la résistance mécanique et risque d'engendrer une émission thermoélectronique.

Il faut noter que les grilles dites *de contrôle* se trouvent, dans certains cas, placées à des distances de la surface de cathodes chaudes, inférieures au millimètre. L'échauffement de ces grilles est donc notablement accru par le rayonnement thermique provenant de la cathode.

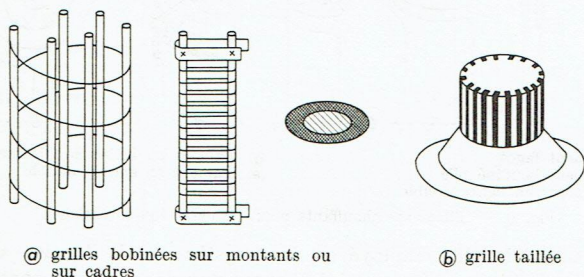


Fig. 10. — Formes usuelles des grilles.

Les métaux les plus utilisés sont :

## a) pour les grilles bobinées :

- *fils*  : molybdène ou tungstène, quelquefois revêtus d'un matériau anti-émissif (or ou platine, titane, zirconium), fil Y<sub>3</sub>,
- *montants*  : en molybdène, nickel-manganèse, *Kulgrid*, cuivre.

## b) pour les grilles taillées :

- alliages de cuivre-nickel-phosphore (*Phosnic*) ou cuivre-béryllium, ou molybdène.

**1.342. Anodes.** — Les anodes recueillent le flux des électrons qui a traversé le tube électronique à partir de la cathode (à l'exception de certains types comme les anodes de post-accélération des tubes à rayons cathodiques).

Elles sont soumises à un bombardement électronique qui peut être très intense et dégager une énergie élevée. Les anodes doivent donc dissiper des quantités de chaleur quelquefois considérables, atteignant 2 à 3 centaines de watts par cm<sup>2</sup> de surface bombardée ; leur travail de sortie électronique doit être suffisamment élevé afin d'éviter toute émission électronique parasite.

Les *principaux matériaux constitutifs* sont :

- graphite, nickel carboné ou non, fer plaqué, molybdène, niobium, tantale, pour les anodes intérieures aux enveloppes (tubes *miniature* par exemple),
- cuivre, molybdène, pour les anodes faisant partie des enveloppes (fig. 1 b, 1 c, 1 d et 3).

**1.343. Autres électrodes: Wehnelts, lentilles électrostatiques, anodes post-accélératrices.** — Ces électrodes, placées en dehors du trajet des électrons, n'ont pas à dissiper d'énergie ; cependant, elles sont souvent à proximité de champs magnétiques qu'il est important de ne pas perturber. Il est donc désirable que les matériaux employés soient amagnétiques (perméabilité < 1,05 environ).

Les alliages cupro-nickel, les aciers inoxydables, le molybdène et le cuivre sont le plus fréquemment employés pour réaliser les éléments de canons à électrons, particulièrement pour les tubes à rayons cathodiques et les tubes à ondes progressives.

## 1.35. Rôle des getters et des matériaux générateurs ou réservoirs de gaz.

**1.351. Getters.** — Le getter est un organe capable d'absorber les gaz résiduels dans des enceintes à vide. Il est ainsi possible de parfaire le vide des tubes électroniques après pompage et de le maintenir au cours de la durée de vie utile.

Les getters agissent de deux façons différentes :

- par *réaction chimique* avec les gaz (fixation de l'oxygène par oxydation, de l'hydrogène par hydruration, de l'azote par nitruration, etc.),

- par *adsorption* (fixation des atomes gazeux par insertion dans le réseau cristallin du matériau getter).

Il existe deux catégories de getters :

- les getters *flashés*, constitués par des surfaces métalliques de quelques fractions de micron d'épaisseur, obtenues par évaporation (flash) puis condensation sur une paroi froide ; ils sont constitués le plus souvent par du baryum seul ou bien associé au calcium, à l'aluminium, au magnésium, au strontium, au thorium ou au titane ; ils sont très employés dans le domaine des tubes électroniques dont la température d'enceinte reste de l'ordre de 200 °C au maximum ;

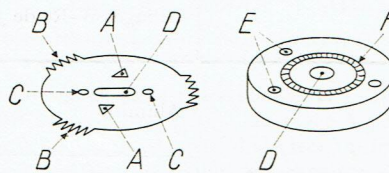
- les getters *non flashés*, constitués par des volumes métalliques compacts, ou pulvérulents frittés sur un support, et qui sont actifs à des températures allant de l'ambiante à plus de 1 000 °C ; ils comprennent des métaux tels que cérium, niobium, tantale, titane, zirconium, combinaisons aluminium-titane et cérium-thorium, et sont plus spécialement employés dans les tubes à enceintes métall-céramique à puissance volumique élevée.

**1.352. Matériaux générateurs ou réservoirs de gaz.** — Certains tubes électroniques à atmosphère interne gazeuse ne fonctionnent correctement que dans certaines conditions de pression (thyatron à hydrogène, redresseurs à vapeur de mercure, convertisseurs d'énergie à vapeur de césium). Les gaz nécessaires peuvent être obtenus à partir de produits avec lesquels ils sont combinés chimiquement de façon instable ; une modification de la température de ces produits modifie l'état d'équilibre, libérant ainsi une quantité connue de gaz. La réaction est soit irréversible (cas des générateurs de mercure et de césium), soit réversible (cas des réservoirs d'hydrogène), et le gaz peut alors être libéré ou absorbé, suivant la température du réservoir.

Parmi quelques produits répondant au premier cas se trouvent le pyrophosphate de mercure et le chromate de césium ; les produits répondant au second cas sont en particulier les hydrides de titane et de zirconium.

## 1.36. Rôle des autres éléments.

**1.361. Entretoises isolantes.** — Elles assurent l'isolement électrique ou thermique entre divers éléments des tubes portés à des tensions électriques ou à des températures différentes. Les principaux matériaux employés sont le mica naturel (des Indes ou du Brésil) ou plus rarement artificiel (Micalex, Microy) et les céramiques (stéatites et alumines en particulier), et trouvent leur emploi dans la presque totalité des tubes électroniques (fig. 11).



- A trous de fixation d'anode
- B dents d'appui sur le ballon
- C trous de centrage de grille

- D trou de centrage de cathode
- E trous de pompage
- F rainure d'isolement électrique

- ⓐ en mica pour cage de triode *miniature*

- ⓑ support de cathode en céramique pour tube à rayons cathodiques

Fig. 11. — Entretoises.

Les céramiques sont plus spécialement réservées aux cas où une résistance mécanique et une bonne tenue à la température (au-dessus de 700 °C) sont requises. Les entretoises en mica sont par ailleurs nettement moins chères, et leur souplesse relative permet un coincement des éléments à entretoiser, ce qui simplifie les assemblages.

Les micas sont souvent revêtus d'une couche rugueuse de magnésie ou d'alumine dont le rôle est de rendre discontinus, donc non conducteurs, les dépôts provenant des électrodes et qui se condensent inmanquablement sur les entretoises.

**1,362. Poudres phosphorescentes.** — Ces poudres étalées et fixées sur un support transparent sont destinées à transformer l'énergie cinétique des électrons qui les heurtent en énergie lumineuse, visible par l'œil humain ou active pour les produits photographiques. Elles sont utilisées principalement dans la fabrication des tubes à rayons cathodiques (tubes pour oscilloscopes et télévision, transformateurs d'images). Elles se composent d'un élément de base, se comportant comme un semiconducteur auquel un élément de dopage procure une augmentation de luminosité et souvent un changement de la couleur émise.

Les sulfures et silicates de zinc activés au cuivre, à l'argent, ou aux terres rares (europium), les fluorures d'aluminium et de calcium sont très employés.

La télévision en couleurs utilise actuellement du vanadate d'yttrium pour le rouge, du sulfure de zinc pour le bleu et du silicate de zinc pour le vert.

**1,363. Aimants.** — La superposition de champs magnétiques au champ électrique de certains tubes électroniques modifie la trajectoire des électrons en lui conférant des propriétés intéressantes (effet *magnétron* par exemple). Les champs magnétiques permettent aussi de concentrer les faisceaux électroniques.

L'intensité suffisante et la stabilité de champ des aimants modernes a permis d'éviter l'emploi de solénoïdes, si gênants du fait des alimentations électriques indispensables.

Les aimants ont donc trouvé un domaine d'application dans la fabrication des magnétrons, carcinotrons et tubes à ondes progressives. Ils sont souvent en Ticonal ou en ferrite.

**1,364. Gaz internes.** — Certains tubes électroniques (redresseurs, thyratrons, régulateurs de tension) mettent à profit les propriétés particulières des gaz ionisés ; pour les deux premiers types de tubes, c'est surtout la faible résistance interne et l'effet de redressement qui sont mis à profit ; pour le dernier type, c'est la possibilité de faire varier dans de fortes proportions (souvent 1 à 5) l'intensité électronique sans que la tension interélectrodes varie de plus de 1 à 2 %.

La pression du gaz ionisé influant énormément sur les caractéristiques obtenues, il faut absolument la conserver à la valeur nécessaire tout au long de la vie des tubes. Cela impose donc que les gaz employés ne se combinent pas aux éléments constitutifs (électrodes, enveloppes) et ne les détériorent pas ; ils doivent aussi être extrêmement purs (exempts en particulier d'oxygène et d'halogènes).

Les gaz employés sont principalement la vapeur de mercure, l'hydrogène, le néon, le xénon ou leur mélange en proportions choisies.

#### 1,4. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES SOUHAITÉES DES MATÉRIAUX POUR TUBES ÉLECTRONIQUES

La fabrication des tubes électroniques étant une suite d'opérations délicates de mise au point difficile, l'une des qualités primordiales des matériaux sélectionnés est la constance des caractéristiques d'un lot de fourniture à un autre. Les autres qualités demandées sont aussi importantes :

- stabilité, au cours de la durée de vie utile, des propriétés initiales physiques et chimiques,
- mise en œuvre aussi aisée que possible (mise en forme, nettoyage, dégazage, etc.),
- faible pression de vapeur à la température de fonctionnement,
- prix proportionné aux services rendus.