

technique

LE POMPAGE DES TUBES À VIDE

F6FRA, Henri BONSOIR

Voici un article écrit par André LE BORGNE, Ingénieur E.E.M.I, et publié dans le magazine *Ingénieurs et Techniciens* (revue mensuelle des progrès techniques dans l'industrie, organe de l'Association Française des Ingénieurs et Techniciens), de janvier 1950...

De nos jours, un certain nombre de radioamateurs utilisent des tubes, soit dans des équipements anciens, soit dans des amplificateurs de puissance. Ils seront certainement intéressés par ce qui suit. En effet, l'auteur décrit les procédés de pompage des tubes électronique utilisés à cette époque, afin d'y faire le vide.

Les deux principaux éléments de tout groupe de pompage sont la pompe à palettes et la pompe à condensation, qui sont employées à peu près universellement. Après leur description, l'auteur étudie les différents stades de l'évolution du pompage d'un tube électronique, chaque procédé pouvant être adapté à toute autre fabrication. Dans ce but, en même temps que les phénomènes, sont envisagés les appareils auxiliaires, nécessaires aux traitements de chaque partie du tube.

MATÉRIEL DE POMPAGE

Pompes à palettes

Les pompes à palettes sont destinées à créer, dans les groupes de pompage, un vide préalable nécessaire pour amorcer les pompes à condensation. Leur vide limite est de l'ordre de 10⁻³ mm de mercure. Mais, pour conserver une vitesse de pompage acceptable, on ne descend guère au-dessous de 10⁻¹ à 10⁻² mm. Leur principe de fonctionnement, basé sur la détente des gaz, apparaît à l'examen de la figure 1. Le bain d'huile assure l'étanchéité en même temps que le graissage.

Pompes moléculaires

Pompes à condensation :

Qu'elles soient à vapeur d'huile ou à vapeur de mercure, le principe de fonctionnement des pompes à condensation est toujours le même. Le pompage est assuré par entraînement moléculaire précédé d'une diffusion gazeuse (fig 3).

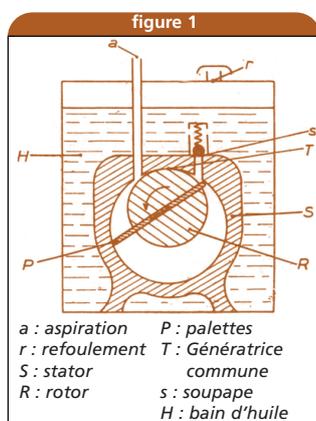


figure 1
a : aspiration P : palettes
r : refoulement T : Génératrice
S : stator commune
R : rotor s : soupape
H : bain d'huile

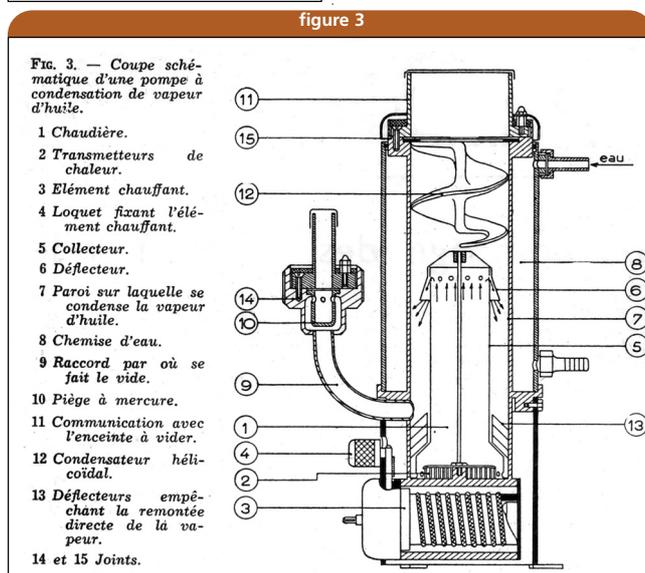


FIG. 3. — Coupe schématisée d'une pompe à condensation de vapeur d'huile.

- 1 Chaudière.
- 2 Transmetteurs de chaleur.
- 3 Élément chauffant.
- 4 Loquet fixant l'élément chauffant.
- 5 Collecteur.
- 6 Déflecteur.
- 7 Paroi sur laquelle se condense la vapeur d'huile.
- 8 Chemise d'eau.
- 9 Raccord par où se fait le vide.
- 10 Piège à mercure.
- 11 Communication avec l'enceinte à vider.
- 12 Condensateur hélicoïdal.
- 13 Déflecteurs empêchant la remontée directe de la vapeur.
- 14 et 15 Joints.

Un jet de vapeur débouche par le déflecteur pour aller se condenser sur le corps de pompe. Il y a d'abord diffusion du gaz dans la vapeur et vice-versa. La vapeur est condensée en grande partie. Le gaz à pomper, entraîné par choc avec les molécules de vapeur, est ensuite absorbé par la pompe à palettes qui "tire" sur la pompe à condensation.

Le vide limite ainsi obtenu est de 10⁻⁶ et 10⁻⁷ mm de mercure. La vitesse de pompage peut être très élevée et atteindre 150 litres/s pour les pompes industrielles.

Il existe actuellement, dans l'industrie, des opinions diverses en faveur de la pompe à vapeur de mercure ou de la pompe à vapeur d'huile.

L'inconvénient majeur de la première réside dans la forte tension de vapeur du mercure à la température ambiante (de

mm de mercure).

Pour obtenir rapidement une pression d'amorçage correcte, il faut disposer en série une pompe à palettes et une pompe à vapeur de mercure avant la pompe à vapeur d'huile.

La figure 4 représente le schéma général d'un groupe de pompage, avec pompe à condensation de mercure.

L'existence de la réserve de vide amène une forte inertie dans les variations du vide primaire et permet l'arrêt de la pompe à palettes pendant des temps variant avec l'importance des dégagements. Le desséchant (en général de l'anhydride phosphorique), évite l'absorption de vapeur d'eau par l'huile de la pompe à palettes.

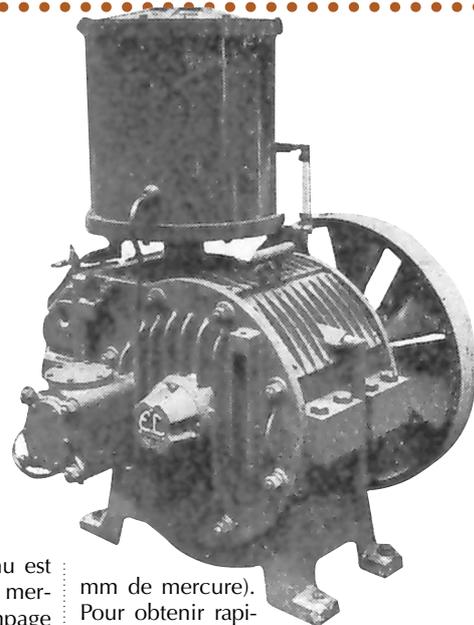
Pompes moléculaires mécaniques :

Leur principe repose sur l'entraînement dynamique des molécules de gaz à l'aide d'une paroi mobile se déplaçant très rapidement devant une paroi fixe.

Pratiquement, elles sont constituées (type Holweck) par un tambour lisse tournant à grande vitesse (5000 à 6000 t/mn) dans un stator strié par un canal hélicoïdal. L' "entrefer" est de l'ordre de 0,02 mm.

Si ces pompes ont l'avantage de ne pas apporter de tension de vapeur comme les pompes à condensation, elles sont très fragiles et d'un faible débit.

Leur usage est limité à quelques laboratoires et à certains cas très précis.



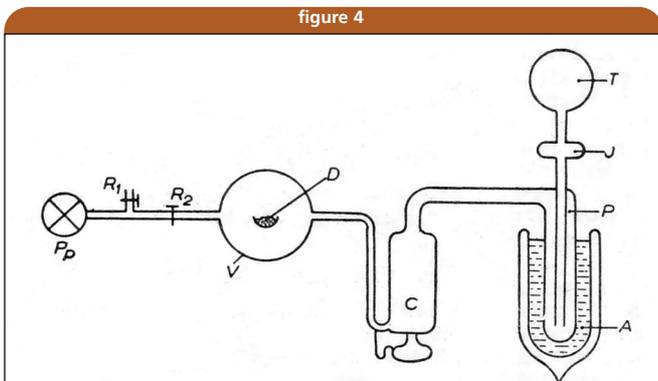


FIG. 4. — Schéma d'un groupe de pompage.

- Pp Pompe à palettes.
- R₁ Robinet de sortie d'air.
- R₂ Robinet d'isolement du groupe de pompage.
- V Réserve de vide préliminaire.
- D Desséchant.
- C Pompe à condensation de mercure.
- P Piège d'Hopkins.
- A Azote liquide.
- J Jauge de mesure de vide.
- T Tube à pomper.

TECHNIQUES DE POMPAGE

Le degré de vide à réaliser dans un tube dépend en particulier de trois facteurs :

- le nombre des électrons émis par seconde par la cathode, c'est-à-dire le courant cathodique,
- la distance anode-cathode,
- la tension de fonctionnement du tube.

On considère, en général, que la pression dans un tube à vide est suffisamment basse quand l'ionisation produite par le choc des électrons avec les molécules de gaz résiduels conserve une bonne stabilité dans les caractéristiques de la lampe et ne produit pas de phénomènes secondaires nuisibles. Nous allons donner ici les principes fondamentaux pour l'obtention d'un très bon vide dans un tube et sa conservation durant la vie de ce tube. Il faut non seulement que le tube possède un bon vide à sa sortie de pompe, mais aussi que, par la suite, les électrodes et l'ampoule ne dégagent pas de gaz en quantité importante. Or, on sait que tout corps possède des gaz occlus par absorption et par adsorption.

Rappelons que l'adsorption diffère de l'absorption par réaction chimique, telle que nous la rencontrons fréquemment en physique " classique ", par le

fait que les molécules de gaz sont liées aux molécules du corps uniquement à la surface de celui-ci. L'adsorption est régie par plusieurs lois :

- elle est proportionnelle à l'aire exposée au gaz,
- elle augmente en même temps que la pression gazeuse maintenue en contact avec le solide, à température constante, suivant une loi non linéaire,
- la quantité de gaz adsorbée par un solide est d'autant plus faible que la température est plus élevée, un corps réadsorbant donc des gaz au refroidissement,
- la masse de gaz adsorbée par tel solide, dans des conditions déterminées, dépend de la nature du gaz.

Le dégazage des électrodes avant montage s'avère donc nécessaire car, dans un tube monté, il est difficile de porter ensemble toutes les électrodes à haute température.

De plus, de gros dégagements gazeux en cours de pompage sont souvent gênants car ils peuvent provoquer l'empoisonnement de certaines substances (cathodes, dépôts photoélectriques, etc...).

Dégazage des pièces avant montage

Les matières premières servant à la confection des pièces sont

choisies principalement en tenant compte de leurs fonctions et des modalités de fabrication du tube, telles que le dégazage.

Les pièces sont tout d'abord soigneusement dégraissées, par exemple par trempage dans le trichloréthylène.

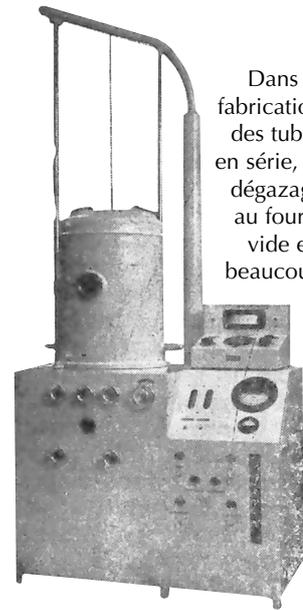
Pour dégazer les électrodes, il faut les amener, sous vide, à une température élevée. Un dégazage complet ne peut être obtenu qu'à la fusion du corps. Ceci n'est évidemment pas possible dans la plupart des cas. On se contente de se rapprocher de cette température sans qu'il y ait déformation des pièces, ni changement néfaste de l'état physique du corps.

On dispose à cet effet de diverses sources de chauffage, qu'on choisit suivant les possibilités :

- étuvage (pour les isolants),
- effet Joule (pour les électrodes en fils),
- induction à haute fréquence, bombardement ionique,
- bombardement électronique,
- rayonnement.

Les deux dernières ne sont guère utilisées que dans les tubes montés. Pour les isolants, l'étuvage est le seul moyen possible.

On utilise à cet effet, ainsi d'ailleurs que pour le premier dégazage des pièces métalliques, des fours à vide (fig. 6) à grande vitesse de pompage. Les pièces sont mises sous vide et étuvées pendant un temps assez long (une heure environ à température de régime).



Dans la fabrication des tubes en série, le dégazage au four à vide est beaucoup

trop long. On emploie alors des fours à hydrogène ; les pièces y sont portées à haute température dans un courant d'hydrogène.

Certains oxydes sont réduits, les gaz occlus sont dégagés, mais il y a adsorption d'hydrogène au refroidissement.

On ne peut donc véritablement appeler cette opération un dégazage ; mais les pièces sont propres et saturées d'hydrogène, gaz moins néfaste que certains autres, pour les cathodes à oxydes en particulier, que les pompes à condensation évacuent rapidement. Les pièces pourront être conservées sous la pression atmosphérique sans crainte d'adsorption d'autres gaz. Pour les pièces métalliques, on peut se permettre des températures beaucoup plus élevées, donc les dégazer plus à fond.

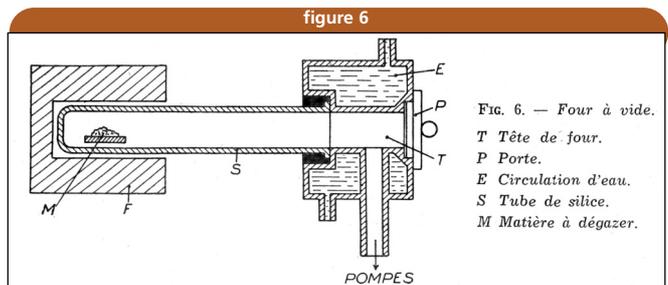


FIG. 6. — Four à vide.
T Tête de four.
P Porte.
E Circulation d'eau.
S Tube de silice.
M Matière à dégazer.

La température maximum atteinte avec ces fours est de l'ordre de 1200° C, à cause de la porosité de la silice pour des valeurs supérieures.

Le chauffage par induction en haute fréquence utilise les pertes par courants de Foucault apparaissant dans une pièce soumise à un champ magnétique alternatif.

technique

technique

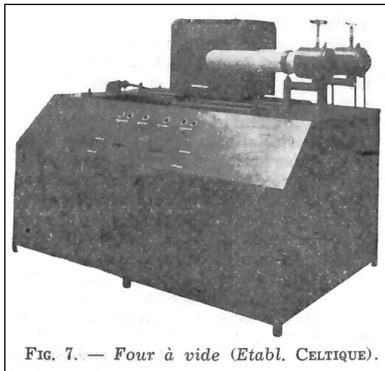


FIG. 7. — Four à vide (Etabl. CELTIQUE).

On utilise pour cela un générateur H F fonctionnant à une fréquence de 500 kc/s environ et alimentant une self. C'est le champ magnétique créé par cette self qui chauffe la pièce maintenue sous vide dans une ampoule de verre (fig. 8). Les pièces peuvent être facilement conservées sous vide par scellement de l'ampoule après dégazage.

électrodes.

Quant au bombardement électronique, il utilise l'énergie dissipée par l'arrivée d'électrons sur une électrode servant d'anode pour l'échauffer.

Précautions à prendre pour le stockage et le montage

Les pièces doivent être conservées sous vide autant que possible.

Le minimum de précautions consiste à les déposer dans un dessiccateur.

Sauf le cas de dégazage à l'hydrogène, les pièces doivent être utilisées dans le plus bref délai ; sinon elles réadsorbent des gaz en quantités croissantes en fonction du temps.

Au montage, le contact des mains leur fait toujours adsorber du gaz carbonique et de l'oxyde de carbone, sans compter la vapeur d'eau due à la

Pour éviter cette poussière, l'air soufflé est filtré. De plus, les ateliers de montage doivent être propres et exempts de toute vapeur nocive. Toutes les pièces sont soudées électriquement. Elles sont fixées, soit à l'ampoule par des piquages et des passages assurant les amenées de courant, soit sur un pied et, le plus souvent, les deux modes sont employés sur le même tube. La soudure des passages et du pied s'effectue avant de mettre le tube sur pompe, à l'aide de machines convenant à chaque type de tube. Nous n'entrerons pas ici dans les traitements du verre. Nous dirons simplement qu'il faut chauffer le moins possible les électrodes et pour cela, en écarter la soudure au maximum. De plus, pour éviter l'oxydation, on opère le plus souvent dans un courant de gaz neutre, tel que l'azote.

Pompage :

Une fois le tube monté, on procède à sa fermeture. La seule communication avec l'extérieur est alors le queusot de pompage. Pour obtenir un pompage correct, ce queusot doit être le plus gros possible, mais son diamètre est limité par le danger de rentrée d'air au scellement, puisque c'est par ce tube que l'ampoule sera scellée en fin de pompage par ramollissement du verre.

Le tube étant soudé sur la pompe, la pompe à palettes est mise en route, puis la pompe à condensation. Quand la pression atteinte est jugée satisfaisante, on commence à étuver le tube.

La montée de la température doit être lente, de manière à éviter tout dégât dans la canalisation et sur le tube. Cette lenteur permet aussi l'évacuation des gaz sans remontée de pression trop importante.

Jusqu'à 150° C, on évacue surtout la vapeur d'eau condensée sur l'ampoule et sur les électrodes.

De 150° C à 300° C, on évacue la vapeur d'eau et l'hydrogène dissous à la surface du verre,

tandis que commence le dégazage des électrodes.

Entre 300 et 500° C, toutes les pièces se dégazent, mais en particulier le verre commence à se décomposer car on atteint le premier point de transformation (caractéristique de chaque verre). C'est ce point qui détermine la température d'étuvage du tube, car celle-dépasse, le verre commencerait à se ramollir et l'ampoule à s'aplatir sous l'effet de la pression atmosphérique.

Dans le cas d'une pompe à vapeur de mercure, on peut alors mettre de l'air liquide sous le piège. Refroidir le piège avant d'avoir atteint la température maximum conduit, en effet, à une condensation massive de vapeur d'eau dans celui-ci et freine considérablement le pompage.

La durée d'étuvage du tube à cette température dépend de son volume et de la nature des matériaux entrant dans sa construction. En particulier, le graphite adsorbe, avant pompage, de telles quantités de gaz qu'il est très long à dégazer correctement. Un dégazage, avant montage, d'un tube contenant une quantité importante de cette substance, est assez illusoire et sans effet appréciable sur les volumes de gaz à extraire ultérieurement.

Lorsque la pression se maintient à une valeur constante, peu élevée, on peut dire que l'ampoule est dégazée.

La température est alors abaissée lentement pour ne pas créer de tensions dangereuses dans le verre, compte tenu des forces résultant de la pression atmosphérique. C'est le dernier recuit de l'ampoule. Il est ensuite procédé, pendant que celle-ci est encore chaude (200° C environ), au dégazage simultané de toutes les électrodes, car ces dernières ont réadsorbé des gaz pendant le montage et la fermeture, et la température d'étuvage n'est pas suffisante. Dans ce but, les électrodes sont portées à la plus haute température compatible

figure 8

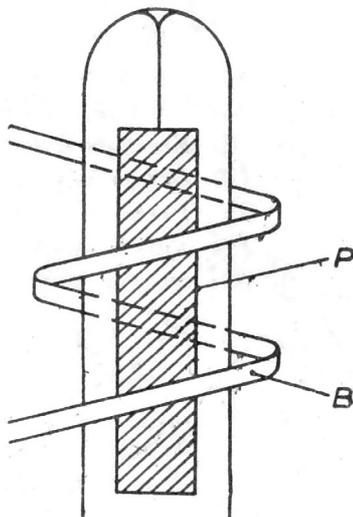


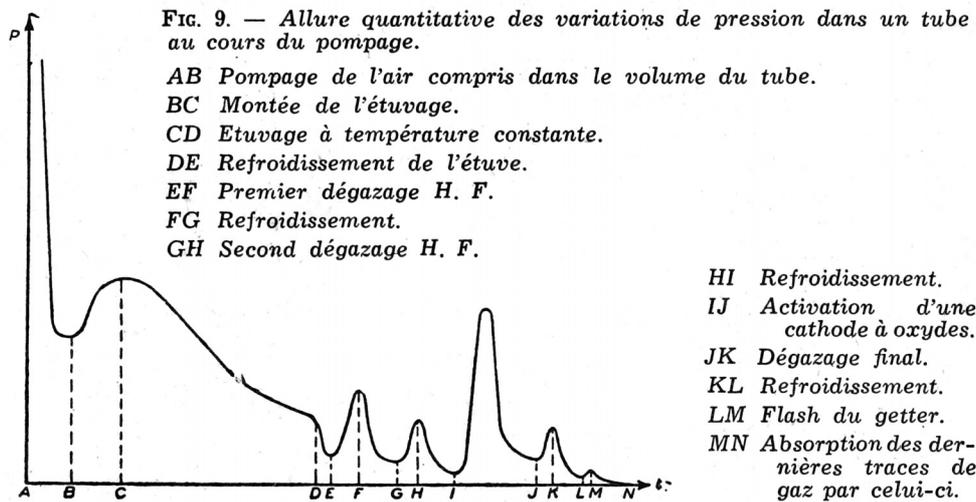
FIG. 8. — Four H. F.
P Pièce à dégazer.
B Bobine.

On utilise aussi quelquefois le bombardement ionique. Deux électrodes sont montées dans une ampoule et mises sous vide. On applique alors une différence de potentiel élevée entre les deux électrodes. Les électrons émis produisent une ionisation et les électrodes sont soumises à un bombardement d'ions qui arrache les molécules adsorbées à la surface des

transpiration. Il faut donc monter les pièces à l'aide de calibres inoxydables, en évitant le plus possible le contact des mains, ou se servir de gants protecteurs.

Le montage des tubes est toujours effectué à l'abri de la poussière, dans de petites cages claires, et parfois, pour les tubes spéciaux, dans des chambres à surpression.

figure 9



avec les conditions déjà citées. Le dégazage par bombardement électronique ne peut se faire qu'après activation de la cathode, opération qui n'entre pas dans les techniques générales de pompage. C'est un traitement particulier à chaque tube et qui doit s'effectuer à pression faible, sinon la cathode se trouve soumise à un bombardement ionique qui la détruit ; d'autre part, elle peut alors se trouver en présence de quantités importantes de gaz dénommés poisons parce qu'ils ont pour effet d'annuler ou de réduire l'émission de la cathode. On doit donc agir avec prudence et augmenter lentement la température de l'anode. Dans tous les cas, il faut proportionner les dégagements gazeux au débit du groupe de pompage, par élévation progressive de la température des pièces, afin de ne pas modifier leur état physique en les chauffant en présence des gaz. Quand on ne peut maintenir toutes les électrodes à haute température, il faut les chauffer l'une après l'autre et recommencer le cycle plusieurs fois, jusqu'à ce que la pression devienne suffisamment basse. Pendant toutes ces opérations, les parois restent à une tempé-

rature assez élevée du fait du rayonnement des électrodes. Nous indiquons, figure 9, l'allure de la variation de pression pour l'ensemble des opérations. On note l'élévation de pression au début de chacune d'elles suivie du retour à une pression chaque fois plus basse. Vers la fin du dégazage, on " flashe " le getter, dont nous donnerons l'utilité plus loin. Le tube est alors presque terminé. On éprouve le vide en même temps qu'on " durcit " la lampe par un dernier traitement. Un tube pompé est " dur " quand le degré de vide est très élevé. On dit, au contraire, qu'il est " mou " lorsque ce degré est tout juste acceptable. Le durcissage consiste à faire fonctionner le tube en régime statique. Les constantes de fonctionnement sont majorées dans un certain rapport de manière à porter toutes les électrodes à une température supérieure à celles qu'elles devront atteindre en fonctionnement normal. La pression ne doit pas remonter pendant ce dernier traitement si le tube est bien dégazé. On mesure à ce moment la pression en utilisant le tube comme une jauge à ionisation : il suffit,

si l'on est en présence d'un tube du type triode ou à électrodes multiples, de mesurer le courant de grille, celle-ci étant portée à un potentiel négatif. Ce courant ionique de grille est un des phénomènes secondaires dont nous avons parlé et dont la valeur fait la qualité du tube. Cependant, le courant de grille ne dépend pas uniquement du courant d'ionisation. Il peut dépendre également de la photo-émission de la grille, de son émission thermoionique, si elle est portée à une température assez haute, et du courant de fuite dans le verre. L'intensité de ces phénomènes ne dépend plus du pompage du tube, mais de traitements spéciaux ou du choix des matériaux. Le tube est alors terminé. Il reste à le sceller et à le soumettre aux essais ou à d'autres traitements tels que le vieillissement de la cathode, dans le cas d'une cathode à oxydes ou en tungstène thorié. Le getter sert à maintenir un vide élevé dans le tube après scellement. En effet, nous avons vu qu'il était impossible de dégazer complètement les électrodes. En fonctionnement, la pression remonterait donc peu à peu. Le getter sert en quelque sorte

de pompe, durant toute la vie du tube ; grâce à lui, le degré de vide s'améliore encore après scellement. Le principe du fonctionnement du getter est de fixer, par affinité chimique ou par adsorption, les traces de gaz dégagés. Pour cela il doit être constitué par un dépôt très mince et de grande surface de métal alcalin ou alcalino-terreux. Les métaux les plus employés sont le baryum, le magnésium, l'aluminium, le thorium et le zirconium. Au montage, ces métaux sont placés, sous forme de poudre agglomérée, sur une palette métallique. Vers la fin du pompage, le métal est vaporisé par chauffage par effet Joule ou H. F. ; c'est le " flash " du getter. Il faut que le jet de vapeur soit bien dirigé pour que le métal se dépose sur la paroi de l'ampoule en un endroit qui ne soit pas gênant. En effet, il ne doit pas créer une ligne de fuite entre deux passages, ni être déposé en un endroit chaud en cours de fonctionnement, auquel cas il dégagerait les gaz adsorbés et distillerait, par exemple sur une électrode qui, portée à une température suffisante donnerait naissance à une émission thermoionique secondaire nuisible. Nous n'avons exposé ici que les techniques de pompage permettant d'obtenir un vide élevé, sans nous préoccuper des traitements particuliers. La durée et la complexité des opérations que nécessite la construction d'un tube à vide justifient un prix de revient forcément élevé. Les installations indispensables sont très importantes, prennent beaucoup de place et demandent beaucoup d'entretien. Chaque appareil utilisé dans la construction des tubes spéciaux reste en service pendant un temps assez long pour chaque tube, d'où un faible rendement. Ces considérations sont encore aggravées par la rareté de la main-d'oeuvre spécialisée dans ces techniques.