

Radartutorial

Chapitre 5 : Tubes à modulation de vitesse

Partie B : Tubes à champs croisés

(Éditeur: Christian Wolff, traduction en langue française et révision:
Pierre Vaillant, Version 29 février 2012)

Sommaire

INTRODUCTION	1
INVENTION DU MAGNETRON	2
COMPOSANTES DU MAGNETRON	3
FONCTIONNEMENT DE BASE DU MAGNETRON	4
1. Production et accélération du faisceau d'électrons	4
2. Modulation de la vitesse des électrons	4
3. Formation de zone radiale de charge	5
4. Transfert de l'énergie électrique potentielle au champ de courant alternatif.....	5
PHASE DE L'ONDE	5
MODES D'OSCILLATION	6
BRIDES DE JONCTION	6
METHODES DE TRANSFERT DE L'ONDE PRODUITE	6
AJUSTEMENT EN FREQUENCE DU MAGNETRON	7
AMPLIFICATEUR A CHAMPS CROISES (AMPLITRON)	8
FONCTIONNEMENT	8
UTILISATION.....	9
AVANTAGES	9

Introduction

Dans un radar pseudo-cohérent, la source de l'impulsion est un auto-oscillateur. Ce dernier reçoit le signal du modulateur qui définit le début et la fin de l'impulsion et l'utilise pour générer une impulsion puissante. Différents tubes à vides, diodes ou transistors peuvent être utilisés à cette fin (voir le tableau) mais le plus commun est le magnétron. Ce sont des auto-oscillateurs où les électrons émis par une cathode se dirigent vers l'anode mais sont déviés par un champ magnétique perpendiculaire au champ électrique. De conception relativement simple, ils permettent une émission d'ondes à haute puissance et sont utilisés dans les radars pulsés ou à ondes continues. Ils peuvent donner des fréquences allant de 600 à 30 000 MHz, selon la géométrie retenue. Les magnétrons ont cependant le désavantage d'émettre avec une phase aléatoire et à une fréquence fixe.



Figure 1 : Magnétron VMX1090 du radar PAR-80 de contrôle aérien. On peut voir également ses aimants permanents et le guide d'ondes de sortie.

Invention du magnétron

Comme dans toutes les innovations, le magnétron n'est pas la découverte d'un seul homme mais le résultat d'un processus impliquant plusieurs acteurs. Il serait très long de relater l'histoire complète de l'appareil et souvent les sources sont partiales. Cependant, les principaux jalons sont :

1912 : Pour tenter de mesurer le rapport de la charge à la masse des électrons, le physicien suisse **Heinrich Greinacher** utilise un tube à diode ayant une anode et une cathode en forme de cylindres concentriques dont l'axe est parallèle à un champ magnétique. L'expérience ne réussit pas parce que le vide dans le tube n'était que partiel ce qui empêcha un flux suffisant d'électrons d'être émis par la cathode. Cependant, Greinacher fut capable d'en tirer la formule mathématique de la trajectoire d'un électron en mouvement dans un champ magnétique.

1921 : **Albert W. Hull** chez General Electric expérimente avec un tube à vide pour trouver la trajectoire des électrons dans un champ magnétique uniforme. Son but était de développer un relais contrôlé magnétiquement ou un amplificateur afin que GE puisse concurrencer la triode à grille de contrôle de Western Electric. Un autre but était d'enquêter sur la possibilité de produire une onde de radiofréquence.

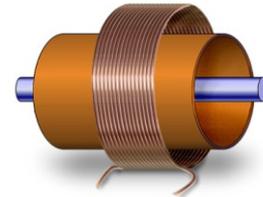


Figure 2 : Modèle du magnétron de Hull

Il développe l'appareil de la Figure 2 où on retrouve une cathode au centre entouré par une anode cylindrique. Le tout est plongé dans un champ magnétique, produit par un solénoïde, parallèle à l'axe de la cathode. Le champ magnétique permet de courber le faisceau d'électrons émis par la cathode et il note qu'il est possible de contrôler le flux d'électrons vers l'anode en le variant. En utilisant les bons réglages, il peut même rendre la courbure parallèle aux parois de l'anode et se rend alors compte qu'il obtient une oscillation. Il en déduit que cela serait utile à ses buts mais n'arrive pas à stabiliser le flux. Hull donne le nom de « [magnétron](#) » à son invention.

1924 : Le concept du magnétron, mais à haute fréquence, est indépendamment expérimenté par le physicien allemand **Erich Habann**, à l'université d'Iéna, et le professeur tchèque **Napsal August Zázek** de Prague. Habann prédit correctement les conditions pour qu'une résistance négative apparaisse dans l'instrument, un pré-requis pour éliminer les pertes par amortissement dans un circuit oscillant. Contrairement à Hull, Habann utilisa un champ magnétique constant, comme dans les magnétrons modernes, et varia le potentiel entre l'anode et la cathode (Figure 3). Son appareil utilisait une anode fendue qui lui permit d'obtenir des oscillations de l'ordre de 100 MHz. Zázek utilisa une anode faite d'un cylindre solide et put générer des fréquences jusqu'à 1 GHz.

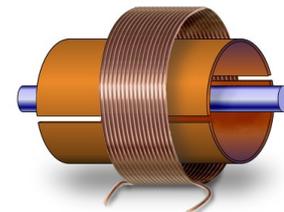


Figure 3 : Modèle du magnétron à anode fendue de Habann.

1929 : La percée dans le domaine de la génération d'ondes centimétriques se produit en 1929 quand **Kinjiro Okabe**, un étudiant du professeur Hidetsugu Yagi à l'université de Tohoku de Sendai au Japon, expérimenta sur un magnétron à anode fendue. Il produisit une onde de fréquence de 5,35 GHz. Ces longueurs d'onde seront largement utilisées plus tard dans les radars. Cette découverte fit le tour de la communauté scientifique mais à cause de problèmes de stabilité de la fréquence émise, cet appareil ne fut pas immédiatement utilisé en télécommunication.

1935 : **Hans Erich Hollmann** soumit le 27 novembre 1935 un brevet pour un magnétron à multi-cavités (Figure 4). Le brevet américain (2,123,728) lui fut décerné le 12 juillet 1938. Ce type de magnétron deviendra par la suite le standard dans le domaine à cause de la grande puissance de l'onde qu'il peut émettre. Hollmann utilisa une anode à quatre fentes à laquelle il adjoignit un cylindre de résonance à chaque fente.

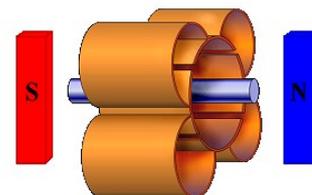


Figure 4 : Modèle du magnétron à multiple cavité de

1940 : **John Randall** et **Henry Boot** sont souvent cités comme les inventeurs du magnétron à cavités mais ils sont plutôt ceux qui ont réussi à améliorer l'invention de Hollmann et d'en faire un émetteur à haute puissance. Leur invention était de conception simple et robuste en creusant les cavités dans la paroi de l'anode. Le nombre de cavités passa de quatre cavités à six ou plus. Un prototype à huit cavités, comportant un système de

refroidissement à l'eau, fut assez compact et léger pour être utilisé dans un transmetteur de radiofréquences de 3 GHz ayant une puissance de 15 kW.

À cause de la longueur d'onde centimétrique produite par ces magnétrons, l'antenne pouvait être de petit diamètre (D) par rapport aux longueurs d'onde plus grandes utilisées antérieurement, tout en conservant un fort gain. En effet, ce dernier étant inversement proportionnel à la longueur d'onde au carré ($G \rightarrow D/\lambda^2$). La puissance du transmetteur et le gain de l'antenne permettaient ainsi de repérer les cibles d'une grande distance avec une bonne précision grâce à la résolution angulaire verticale et azimutale du faisceau.

Ces améliorations permirent de développer des radars aéroportés. Dès le milieu de 1940, des B-17 en furent équipés et ces derniers furent cruciaux dans la chasse aux sous-marins allemands durant la Seconde guerre mondiale.

Il est à noter que le 8 mai 1940, soit juste avant la chute de la France, Maurice Ponte de la *Compagnie générale de la télégraphie sans fils* amena en Grande-Bretagne les résultats des recherches d'Henri Gutton sur les cathodes à oxyde dans un magnétron à fentes multiples. Ceux-ci furent incorporés plus tard dans le magnétron de Randall et Boot pour remplacer la cathode de tungstène, ce qui diminua la température d'opération et augmenta la durée de vie de l'appareil. Le tout fut apporté dans les bagages de la Mission Tizard, qui cherchait l'aide américaine dans la production de guerre, et permit de produire massivement le magnétron pour l'usage des Alliés.

De leur côté, les Allemands, bien qu'ayant poursuivi les recherches d'Hollmann sur le magnétron de leur côté, préférèrent le klystron dont la fréquence et la phase étaient plus stables.

Composantes du magnétron

Le magnétron est classé comme une diode car il n'a pas de grille. L'anode prend la forme d'un cylindre de cuivre solide entourant la cathode et le filament placés dans un espace vide au centre. Ces derniers sont supportés par des bornes qui ont un diamètre suffisant et sont assez rigides pour maintenir la cathode et le filament en place afin de les empêcher de toucher à l'anode. La cathode est faite d'un matériau qui peut émettre facilement des électrons lorsqu'elle est chauffée indirectement par le filament.

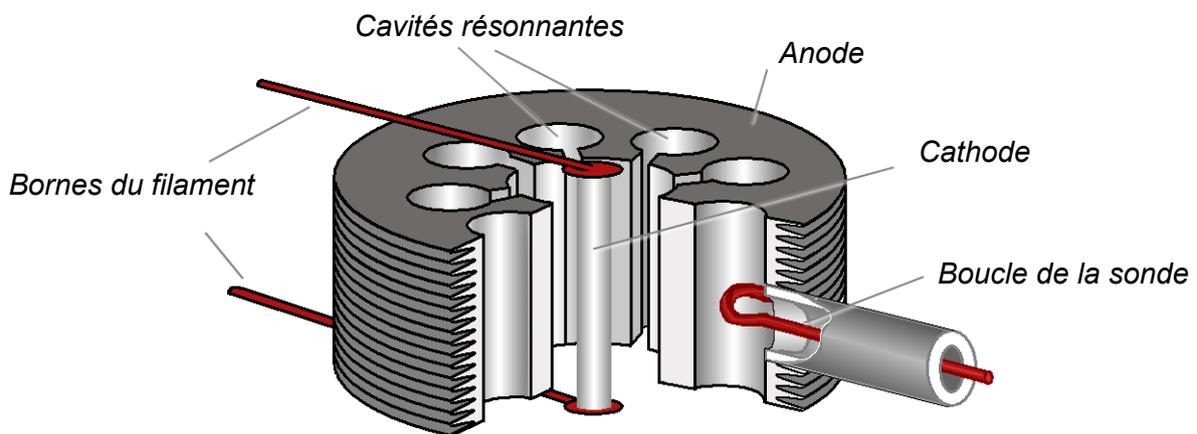


Figure 6 : Vue en coupe d'un magnétron.

L'anode est creusée de 8 à 20 trous autour de sa circonférence. Ceux-ci servent de cavités résonnantes et s'ouvrent sur le trou central par de minces fentes divisant le tube en autant de sous-sections. Les caractéristiques et le nombre de cavités déterminent la fréquence émise par le magnétron.

Le vide entre l'anode et la cathode est appelé « l'espace d'interaction » car c'est là que circulent les électrons selon une trajectoire déterminée par l'interaction des champs électriques et magnétiques, ce dernier provenant d'un aimant permanent placé de telle façon que le champ soit parallèle à l'axe de la cathode.

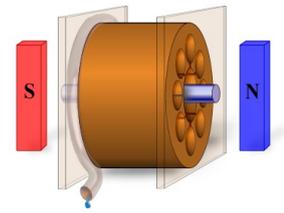


Figure 5 : Modèle du magnétron à cavité de Randall et Boot.

Les formes des cavités d'un magnétron sont variées comme la Figure 7 le montre :

- a) Fentes;
- b) Pointes de tarte;
- c) Rayons de soleil;
- d) Trous circulaires avec ouverture en fente.

La sortie du signal produit par le magnétron est habituellement est capté par une sonde ou une boucle de fil dans une des cavités. La sonde est reliée à un câble coaxial ou à un guide d'onde à l'extérieur du magnétron.

Fonctionnement de base du magnétron

Comme pour tous les tubes à [modulation de vitesse](#), la production d'une onde électromagnétique par un magnétron se passe en quatre étapes :

1. [Étape 1](#) : Production et accélération du faisceau d'électrons;
2. [Étape 2](#) : Modulation de la vitesse des électrons;
3. [Étape 3](#) : Formation de zone « radiale » de charge;
4. [Étape 4](#) : Transfert de l'énergie électrique potentielle au champ de courant alternatif.

1. Production et accélération du faisceau d'électrons

La cathode du magnétron est chauffée et produit des électrons libres qui se dirigent directement vers l'anode qui est chargée positivement comme la flèche bleue de la Figure 8 l'indique. Dès qu'on applique un champ magnétique perpendiculairement à la trajectoire du faisceau d'électrons, ceux-ci subissent une force latérale qui dévie leur trajectoire.

Lorsque le champ magnétique est faible, la courbure du faisceau est plus grande que celle de l'anode et les électrons finissent quand même par atteindre cette dernière, comme avec la flèche verte. Il y a donc encore un fort courant qui passe de la cathode à l'anode. En augmentant le champ, la courbure devient de plus en plus prononcée jusqu'à ce que la trajectoire du faisceau devienne tangentielle à l'anode, comme avec la trajectoire rouge. Le courant cesse à ce moment entre la cathode et l'anode. En augmentant le champ magnétique, la trajectoire peut même revenir vers la cathode mais comme sa charge est négative, elle prendra la forme de la flèche jaune.

En ajustant les champs magnétiques et électriques à la valeur critique pour obtenir la trajectoire tangentielle, le passage du faisceau d'électron engendrera un courant induit dans les cavités qui résultera en une oscillation aux fréquences micro-ondes.

2. Modulation de la vitesse des électrons

Le champ électrique dans le magnétron est complexe. Il y a d'abord le champ continu qui est créé par la différence de potentiel entre l'anode et la cathode. Ensuite, il y a le courant alternatif causé par l'induction de courant autour des cavités par le faisceau d'électrons passant à proximité de la discontinuité de leur fente. En effet, l'anode est chargée positivement et l'approche d'un électron devrait repousser les électrons dans l'anode vers l'extérieur. La présence d'une cavité crée au contraire une circulation autour de celle-ci, les électrons faisant le tour depuis le côté de la fente d'où vers l'électron vers le côté opposé.

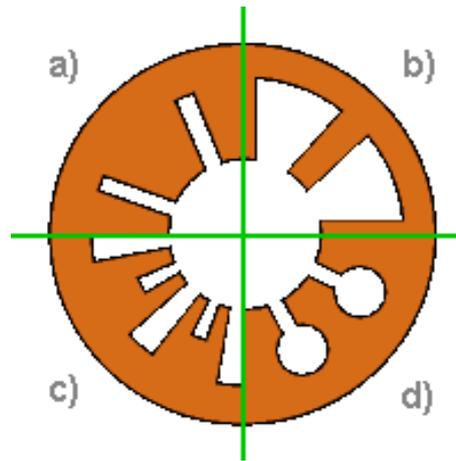


Figure 7 : Différents types de cavités pour un magnétron.

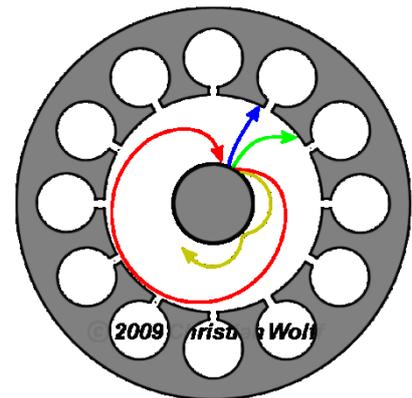


Figure 8 : La trajectoire des électrons sous l'influence de quatre champs magnétiques différents.

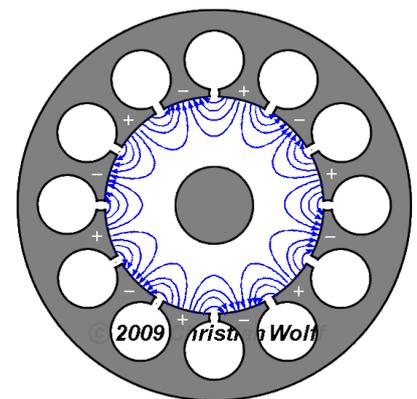


Figure 9 : Champ électrique alternatif créé par l'oscillation haut fréquence.

L'intensité du champ induit est montrée à son maximum dans la Figure 9 lors d'une oscillation de radiofréquence des cavités. Celui-ci varie constamment car le courant va dans un sens à l'approche de l'électron et de l'autre quand il s'éloigne.

Le champ alternatif accroît ou décroît le champ permanent. Les électrons qui s'approchent d'une cavité au moment où le champ total est plus positif subissent une accélération tangentielle et ceux qui le font lorsque le champ est plus négatif sont décélérés. Il en résulte une variation de la vitesse des électrons dans le faisceau.

3. Formation de zone radiale de charge

Cette variation conduit à une modulation de la densité tangentielle des électrons. À cela s'ajoute le fait que les électrons ralentis vont prendre une trajectoire retournant vers la cathode selon ce qu'on a vu antérieurement. Le tout donne des zones radiales entre l'anode et la cathode où les électrons se regroupent comme dans la Figure 10.

Cette « roue à rayon de charge » est également en rotation autour de la cathode à une vitesse angulaire de 2 segments d'anode par cycle du champ alternatif. En effet, la présence d'une concentration d'électrons influence le champ alternatif dans les cavités qu'elle approche ce qui fait constamment varier ce champ en rétroaction. Après un certain temps d'ajustement cette vitesse angulaire se stabilise et cette relation de phase permet à la concentration d'électrons de générer une oscillation de radiofréquence continue.

4. Transfert de l'énergie électrique potentielle au champ de courant alternatif

La perte de vitesse graduelle des électrons dans ce mouvement permet de transférer l'énergie potentielle du champ électrique continu en énergie oscillatoire du champ alternatif. La trajectoire individuelle d'un électron peut être représentée par la Figure 11. En ajustant correctement les paramètres de champs électriques et magnétiques, ainsi que le flux d'électrons de la cathode, ce transfert progressif d'énergie peut donner une efficacité jusqu'à 80% au processus.

Phase de l'onde

Après la mise sous tension de l'anode, aucune onde de radiofréquence n'est encore disponible. Comme mentionné antérieurement, le passage de l'électron près de la fente d'une cavité laisse une partie de leur énergie en induisant un courant dans les parois de celle-ci (similairement au son produit par l'air passant près d'un trou dans une flûte). Ce courant entre en résonance à la fréquence naturelle qui dépend des dimensions de la cavité et crée une rétroaction avec le champ électrique alternatif. Cette onde de radiofréquence est d'abord de faible amplitude et débute le processus des étapes 2 à 4. Cependant, la phase initiale de cette oscillation ne peut être prédite et les impulsions successives auront donc une phase aléatoire. Le magnétron est donc un transmetteur incohérent.

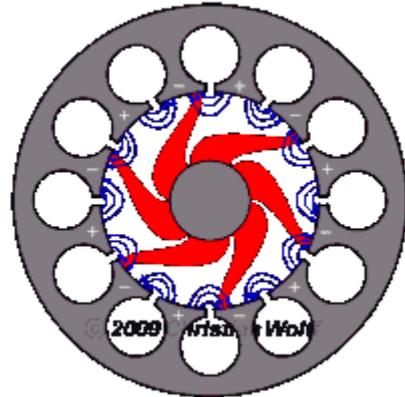


Figure 10 : Rayons de charge en rotation autour d'un magnétron à douze cavités résonnantes et son action sur les charges de l'anode.

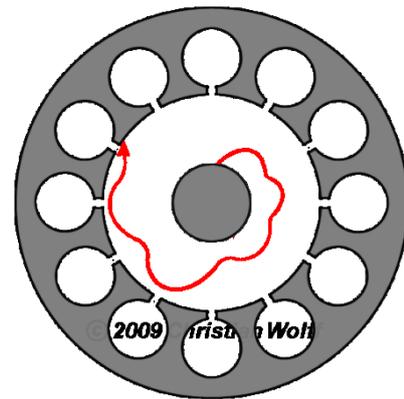


Figure 11 : Trajectoire d'un seul électron sous l'influence du champ électrique de radiofréquence.

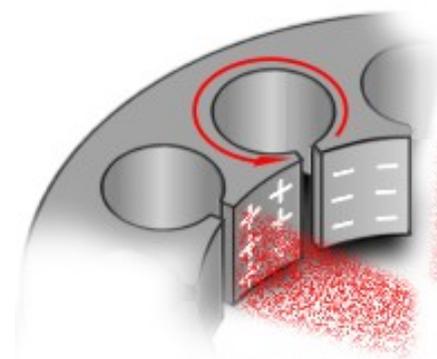


Figure 12: Interaction entre la cavité résonnante et la « roue de charge ».

Modes d'oscillation

La fréquence d'opération dépend du type et des dimensions des fentes, ainsi que de l'interaction entre l'anode et la cathode. Les cavités sont également couplés les unes avec les autres par la distance qui les sépare. En conséquence, il y a plusieurs fréquences de résonance possible pour un système donné. Par exemple, la Figure 13 montre deux de quatre ondes qui peuvent être produites par un magnétron à 8 cavités. Il existe de nombreuses autres modes ($3/4\pi$, $1/2\pi$, $1/4\pi$) d'oscillation mais le mode π donne la plus grande puissance et il est de ce fait le plus utilisé.

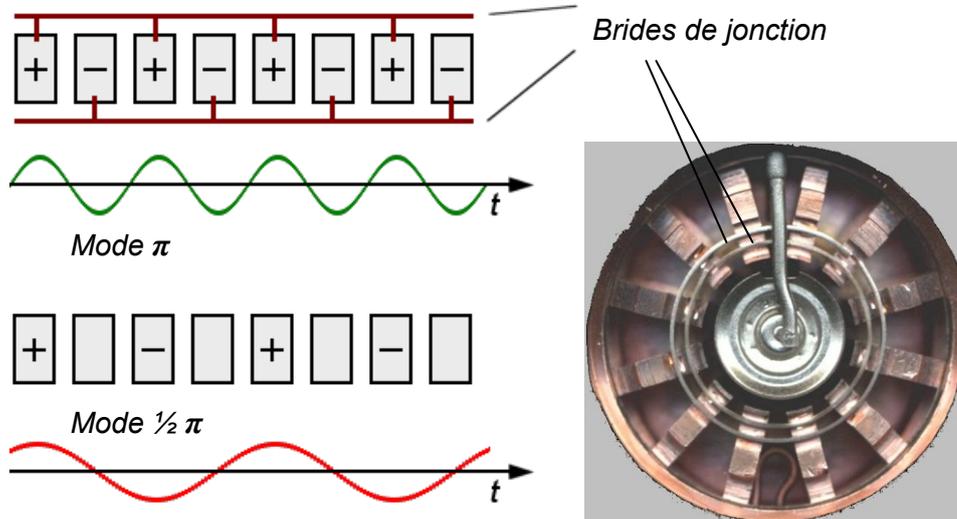


Figure 13 : Longueur d'onde d'un magnétron selon la jonction inter-cavités (Vue « dépliée » de l'anode) et vue en coupe d'un magnétron de type « pointe de tarte » montrant les fentes et les bride de jonction.

Brides de jonction

Pour obtenir un mode π stable, il existe deux méthodes :

- **Brides :** La fréquence du mode π est séparée de celle des autres modes en posant deux fils en cercle autour des cavités de telle sorte les cavités paires aient la même polarité et que celles impaires aient la polarité opposée. La tension dans un fil est donc la même tout autour du cercle mais les deux fils ont une tension opposée.

Pour les autres modes, il doit y avoir une différence de phase entre les cavités successives reliées au fil et donc il passe un courant dans ce dernier.

- **Cavités de fréquence de résonance différente :** par exemple dans le cas des cavités en « rayons de soleil », les cavités profondes et peu profondes alternent.

Méthodes de transfert de l'onde produite

L'onde électromagnétique produite par le magnétron doit être captée par une sonde afin d'être utilisée par le transmetteur. Il y a différentes méthodes pour y arriver. Dans la Figure 14, on peut voir deux dispositifs utilisant une boucle de fils reliées à un câble coaxial.

En A, le fil central du câble fait une boucle placée dans la cavité et dont l'extrémité est soudée au conducteur externe. Cette disposition peut être utilisée pour des fréquences de moins 10 000 MHz. En B, la boucle se trouve le long du mur de la cavité et permet de capter avec assez de puissance un signal de plus haute fréquence.

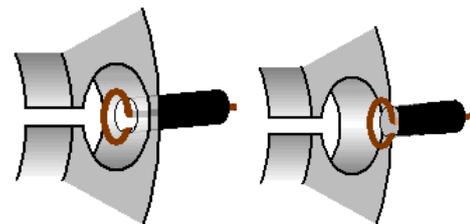


Figure 14 : Accouplements de transfert de types A et B pour un magnétron.

Dans la Figure 15 la boucle en C est placée dans l'anode entre deux cavités et intercepte le champ magnétique dû à l'induction entre celles-ci. La boucle en bande en D intercepte l'énergie entre deux segments.

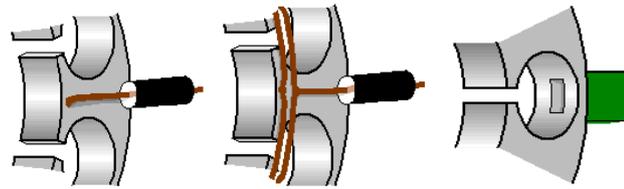


Figure 15 : Accouplement de transfert de types (C), (D) et (E).

À la sortie de ces quatre types de sondes, le câble coaxial dirige l'onde radioélectrique directement vers la section suivante du transmetteur ou indirectement par un guide d'ondes par un [joint à piège](#).

En E, c'est un guide d'onde qui est utilisé pour faire le transfert directement par une ouverture dans une des cavités.

Ajustement en fréquence du magnétron

La fréquence du magnétron est définie par ses caractéristiques mais il est possible de faire un ajustement à l'intérieur d'une bande de fréquences. En effet, ce sont les dimensions et formes des cavités résonantes qui déterminent la fréquence et on peut les changer dans une certaine mesure en y introduisant un circuit avec des inductances et capacités. Cependant, l'ajustement ne peut être varié durant l'opération du magnétron, pour obtenir un émetteur à fréquence variable, il faut le faire pour une valeur fixe.

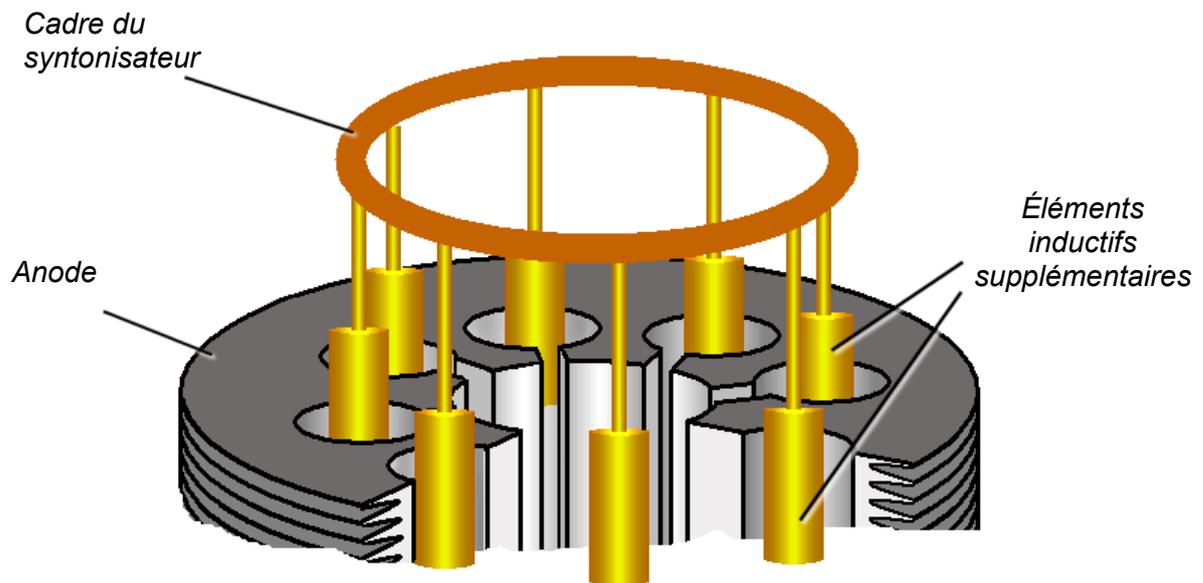


Figure 16 : Ajustement par éléments inductifs.

Amplificateur à champs croisés (Amplitron)

Les **amplificateurs à champs croisés** (ACC) sont aussi connus sous divers noms, certains historiques et d'autres comme des marques de commerces :

- **Platinotron**
- **Amplitron**¹
- **Stabilotron**

Il s'agit d'un amplificateur micro-ondes pouvant être utilisé sur un large spectre de fréquences mais qui peut aussi servir d'oscillateur indépendant (Stabilotron). Le processus utilisé est le même que pour un magnétron mais sert à amplifier à haute puissance et sans distorsion du signal fourni. La bande passante de l'ACC est généralement de 5 % la fréquence émise, toute onde tombant à l'intérieur de cette gamme de fréquences sera amplifiée. La puissance de crête (ou de pointe) est de l'ordre de plusieurs mégawatts et la puissance moyenne de l'ordre de plusieurs dizaines de kilowatts. Une efficacité d'amplification de plus de 70 % est possible avec ce genre d'appareil.

Au contraire du magnétron, cet amplificateur a un nombre impair de cavités couplées qui agissent comme des structures de retard, soit des lignes de transmission internes dont le rôle est de guider une onde électromagnétique à une vitesse de phase voisine de la vitesse des électrons du faisceau. L'onde introduite dans une des cavités se propage ainsi vers les suivantes jusqu'à la cavité de sortie tout en s'amplifiant.

Fonctionnement

Comme dans un magnétron, lorsque l'appareil est sous tension des électrons sont émis de la cathode et se dirigent vers l'anode comportant des cavités résonnantes. Les charges sont déviées par un aimant permanent dont le champ magnétique est perpendiculaire au champ électrique. Les électrons subissent donc une déviation vers la droite ce qui leur donne une trajectoire circulaire dans l'espace entre l'anode et la cathode, comme dans la Figure 18. Dans ce cas, le transfert d'électron de la cathode à l'anode génère un bruit de fond élevé à éviter.

Lorsqu'un signal haute fréquence est introduit par le guide d'ondes d'entrée dans une cavité résonnante, il y a induction d'un courant dans les parois de celle-ci. Ce courant déplace les charges dans ses parois créant un surplus de charges négatives d'un côté de la fente et un surplus positif de l'autre. Les électrons du faisceau seront accélérés en approchant des charges positives et décélérés par les charges négatives.



Figure 17 : Amplificateur à champs croisés L-4756A refroidi à l'eau dans son étui de transport.

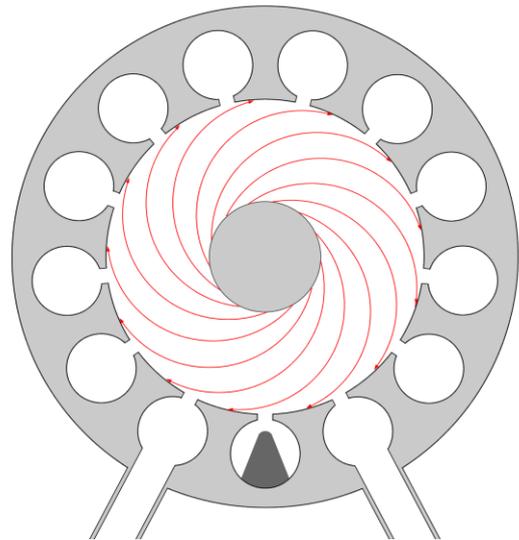


Figure 18 : Diagramme d'un amplificateur à champs croisés et trajectoire des électrons en l'absence de signal de radiofréquences.

¹ « Amplitron » est une marque déposée de *Raytheon Manufacturing Company* pour leurs amplificateurs à champs croisés (ACC). C'est un ingénieur de cette compagnie, **William C. Brown**, qui a développé le premier ACC et choisi ce nom.

Le courant dans la cavité, variant en intensité et en direction avec l'oscillation du signal, la polarité et l'intensité des charges changent continuellement. Le tout a pour effet de ralentir certains électrons du faisceau et d'accélérer d'autres. Les plus rapides rattrapant les plus lents, cela a pour effet de regrouper les électrons dans certains secteurs entre l'anode et la cathode. Ces secteurs prennent la forme de rayons autour d'une roue, on parle alors de « rayons de charge » comme dans un magnétron.

L'oscillation est encore faible après la première cavité mais le regroupement des électrons dans le faisceau transmet le signal aux cavités subséquentes de manière synchronisée, y transférant également une partie de leur énergie. L'onde électromagnétique s'amplifie ainsi de cavité en cavité grâce à l'oscillation qu'elle y engendre. En arrivant à la cavité contenant le guide d'onde de sortie, le faisceau d'électrons atteint enfin l'anode.

Contrairement au magnétron, les rayons de charge ne peuvent poursuivre leur rotation autour de l'axe de la cathode parce que le nombre impair de cavités provoque une phase inverse de l'onde dans la dernière (celle en bas entre les deux guides d'ondes). Pour éviter une réflexion qui induirait une onde inverse, un matériau absorbant, comme le graphite, est placé dans cette cavité. Afin d'éviter les modes de résonance parasites, l'amplificateur à champs croisés comporte des brides qui relient les cavités alternativement entre elles, comme dans un magnétron.

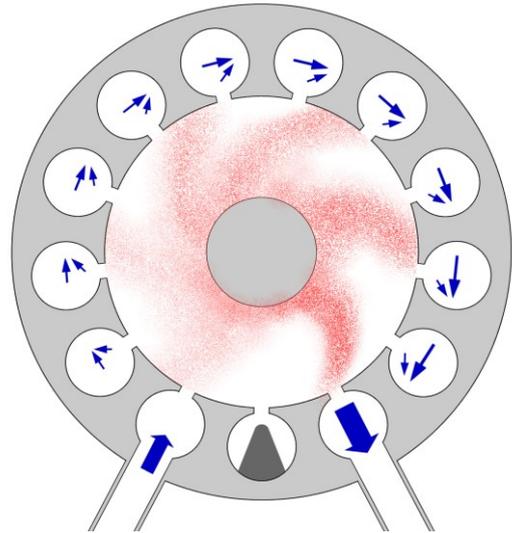


Figure 19 : Mouvement des rayons de charges dans un amplificateur à champs croisés. Remarquez l'augmentation de densité des électrons à mesure que l'oscillation se transfère d'une cavité à l'autre et sa dissipation après la sortie de l'onde amplifiée.

Utilisation

À cause de ses caractéristiques, l'ACC se retrouve dans de nombreuses applications dans les transmetteurs à micro-ondes, dont ceux des radars. En général, les premières amplifications se font par un tube à ondes progressives (TOP), ou récemment par des amplificateurs à semi-conducteurs, alors que les amplificateurs à champs croisés sont utilisés comme amplificateurs intermédiaires ou finaux pour fournir un signal de très grande intensité. Ainsi les transmetteurs à plus de trois étages d'amplification utilisent les ACC à partir du troisième niveau. Ce type d'amplificateur peut donner un gain de 3 to 20 dB.

Avantages

Les ACC, comme les tubes à ondes progressives (TOP), ont un taux d'amplification stable sur une large bande de fréquences mais sont plus puissants. Par contre, quand l'amplificateur à champs croisés n'est pas sous tension, il laisse passer un signal radiofréquence sans modification, il agit alors comme un guide d'onde. Cela permet de mettre plusieurs ACC en série mais sans avoir à tous les activer. Ainsi, si le niveau d'amplification maximal n'est pas requis, seulement certains de la série seront activés. Cela permet également un certain niveau de redondance, même si un des ACC est en panne, le signal sera quand même émis mais à plus faible intensité.