

# Radartutorial

## Chapitre 5 : Tubes à modulation de vitesse

### Partie A – Tubes à faisceaux linéaires

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

#### Sommaire

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>KLYSTRON</b> .....	<b>3</b>
FONCTIONNEMENT .....	3
<i>Klystron à deux cavités</i> .....	4
<i>Klystron à réflecteur</i> .....	4
DIVERS.....	4
<b>TUBE A ONDES PROGRESSIVES</b> .....	<b>5</b>
STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES TOP .....	5
CARACTERISTIQUES DES TOP .....	6
TYPES .....	6
<i>Hélice à pas variable</i> .....	7
<i>Barre d'anneaux interconnectés</i> .....	7
<i>Boucle d'anneaux</i> .....	7
<i>Cavités couplées</i> .....	7
<b>KLYSTRON À INTERACTION ÉLARGIE (KIE)</b> .....	<b>8</b>
<b>OSCILLATEUR A INTERACTION ÉLARGIE (OIE)</b> .....	<b>9</b>
<b>CARCINOTRON</b> .....	<b>9</b>

## Introduction

Le courant continu passant dans un tube à micro-ondes est converti en fréquence micro-onde. Le transfert de puissance entre ces deux modes s'accomplit par une modulation de la vitesse des électrons et une cavité résonnante à faible perte dans le tube. Les cavités résonnantes, ou résonateurs, remplacent les circuits oscillants conventionnels à haute fréquence. La Figure 1 montre comment une cavité cylindrique est en fait formée d'une infinité de segments de sections de lignes de transmission ayant un quart d'onde de longueur et réunies en leur centre.

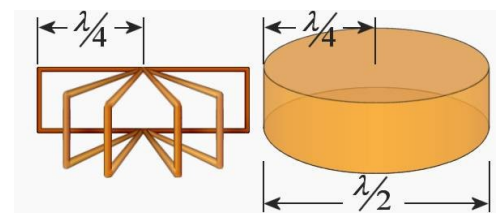
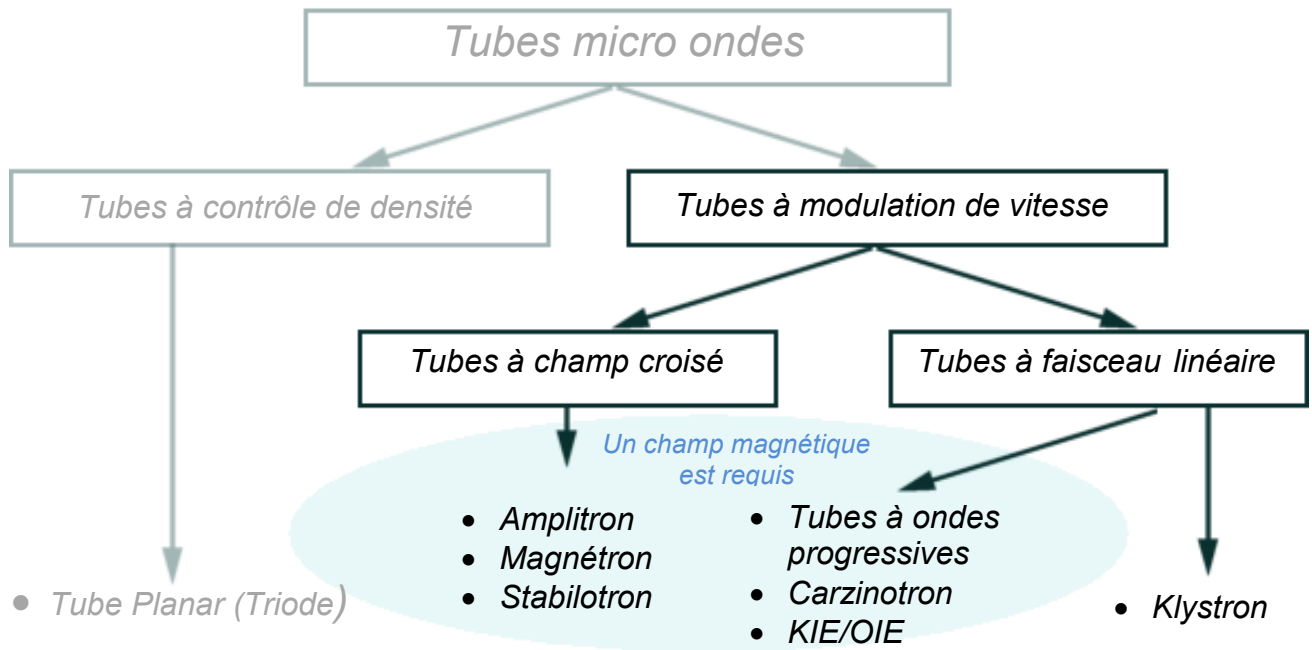


Figure 1 : Cavité résonnante cylindrique formée de deux sections quart d'onde.

Le faisceau d'électrons, émis par la cathode chauffée, est focalisé par des électrodes où règne un champ magnétique intense. Il est ensuite accéléré par une tension d'accélération appliquée sur la cathode. L'anode de contrôle permet de moduler le faisceau en intensité et détermine donc le courant du faisceau. Le faisceau traverse une première cavité résonnante. Cette cavité est reliée à la source à amplifier et est excitée par celle-ci. Cette excitation génère un champ électrique variable dans la cavité, dirigé parallèlement à la direction des électrons. Selon le moment où les électrons traversent la cavité, certains sont accélérés et d'autres sont ralentis. La vitesse des électrons est alors modulée en traversant la cavité. Cette modulation de vitesse se transforme en une modulation de densité, c'est-à-dire en une modulation de courant.



Ce tableau compare les caractéristiques de différents tubes à modulation de vitesse que l'on retrouve dans les radars. Même si le tube Planar n'est pas à modulation de vitesse, il a été inclus pour agir comme tube-témoin.

	<b>Klystron</b>	<b>Tubes à ondes progressives</b>	<b>Klystron à interaction élargie (KIE)</b>	<b>Magnétron</b>	<b>Oscillateur à onde régressive (Carcinotron)</b>	<b>Tube Planar</b>
<b>Fréquence</b>	jusqu'à 35 GHz	jusqu'à 95 GHz	jusqu'à 280 GHz	jusqu'à 95 GHz	jusqu'à 5 GHz	jusqu'à 1.5 GHz
<b>Bande passante</b>	2 - 4 %	10 - 20 %	0,5 - 1%	De 1 à des centaines de MHz	2 GHz	30 - 50%
<b>Puissance d'amplification</b>	jusqu'à 50 MW	jusqu'à 1 MW	jusqu'à 1 kW	jusqu'à 10 MW	1 W	up to 1 MW
<b>amplification</b>	jusqu'à 60 dB	jusqu'à 50 dB	40 - 50 dB	-	-	jusqu'à 20 dB
<b>Usage</b>	Amplificateur de puissance pour bande passante restreinte	Amplificateur de voltage pour large bande passante, faible bruit	Amplificateur et oscillateur	Oscillateur de grande puissance à fréquence unique	Oscillateur à induction de fréquence	Amplificateur, oscillateur

Tableau 1 : Comparaison de divers tubes à modulation de vitesse.

## Klystron

Le klystron est un tube à vide amplificateur de haute puissance utilisant des cavités résonantes spéciales. Le signal haute fréquence en entrée d'un klystron est amplifié de manière cohérente grâce à un faisceau d'électrons, produit par un filament chauffé, qu'il modulera en vitesse lors de son passage à travers une série de cavités résonantes.

### Fonctionnement

Le faisceau d'électrons, émis par la cathode chauffée, est focalisé par des électrodes où règne un champ magnétique intense. Il est ensuite accéléré par une tension d'accélération appliquée sur la cathode. L'anode de contrôle permet de moduler le faisceau en intensité et détermine donc le courant du faisceau.

Le faisceau traverse une première cavité résonante. Cette cavité est reliée à la source à amplifier et elle est excitée par celle-ci. Cette excitation génère un champ électrique variable dans la cavité, dirigé parallèlement à la direction des électrons. Selon le moment où les électrons traversent la cavité, certains sont accélérés et d'autres sont ralentis. La vitesse des électrons est alors modulée en traversant la cavité. Cette modulation de vitesse se transforme en une modulation de densité, c'est-à-dire en une modulation de courant.



Figure 2 : Klystron à réflecteur, ou réflex, K-806.

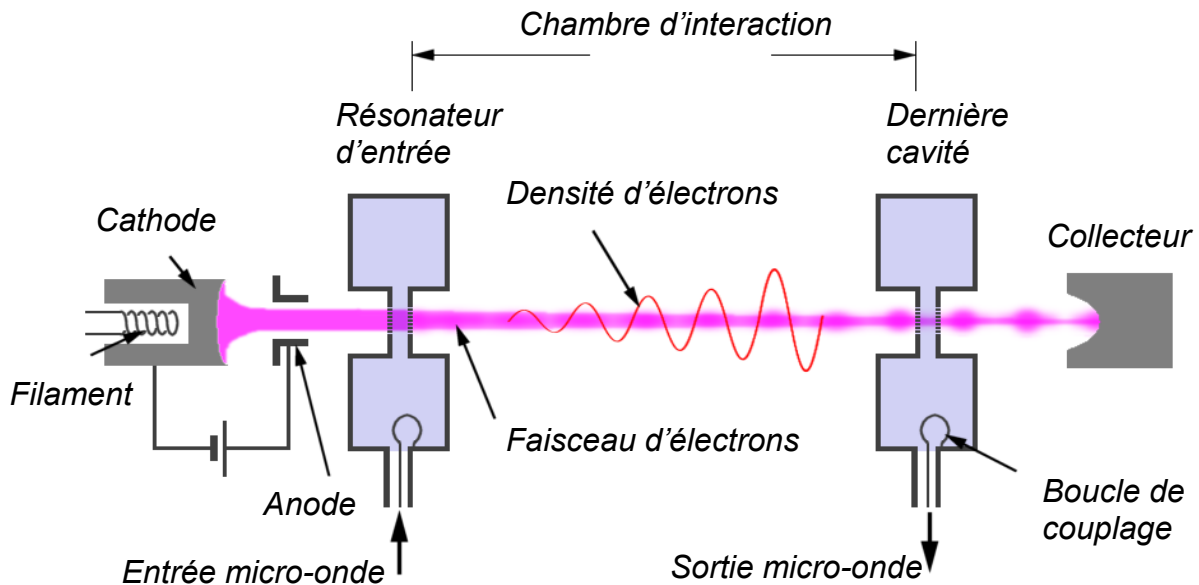


Figure 3 : Diagramme des composantes d'un klystron.

Le faisceau traverse ensuite d'autres cavités résonantes. Celles-ci sont excitées par les variations de courant du faisceau. Lors du passage du faisceau dans ces cavités, le phénomène de modulation de la vitesse du faisceau est amplifié selon le même fonctionnement que dans la première cavité. Ce mécanisme se poursuit jusqu'à la cavité de sortie. Tout au long du parcours, le faisceau est focalisé grâce à des bobines d'électroaimants.

Dans la dernière cavité, les électrons cèdent partiellement leur énergie cinétique sous forme de rayonnement électromagnétique, qui est cette fois-ci récupérée grâce à une sonde ou une boucle de couplage reliée à la cavité. L'onde induite dans la sonde varie comme l'onde initiale mais son amplitude est plus grande, d'où l'amplification.

Les klystrons se divisent en différents types, selon le nombre de cavités résonantes :

- Klystron de puissance à multiple cavités résonantes
- Klystron à réflecteur

## Klystron à deux cavités

Un klystron utilise des cavités résonantes spéciales pour moduler le champ électrique le long de l'axe du faisceau d'électrons. Au milieu de ces cavités, il y a une grille qui contrôle le passage des électrons. La première cavité est appelée « résonateur d'entrée » et la seconde, ou dernière cavité, est parfois appelée « cavité réceptrice ».

La direction et l'intensité du champ électrique varie dans le résonateur d'entrée avec la fréquence de l'onde à amplifier. Cela accélère ou décélère les électrons qui passent ensuite par la grille. Dans l'espace inter-cavités, ou **chambre d'interaction**, les électrons ont le temps de s'assembler en « paquets », les plus rapides rattrapant les plus lents.

La cavité réceptrice est placée à une distance où les paquets d'électrons sont devenus stables, là où elle peut absorber leur énergie grâce à l'induction de courant qu'ils produisent dans ses parois. La distance entre ces cavités dépend de la fréquence de résonances du résonateur d'entrée et de la cavité réceptrice, les deux étant identiques. L'onde amplifiée sera captée par une sonde, ou une boucle de fil électrique, dans les parois de cette cavité. Le faisceau d'électron termine son trajet dans un collecteur où le reste de son énergie se dissipe en chaleur et en rayons X.

L'amplification d'un klystron, puissance du signal de sortie et efficacité, peut être augmentée en ajoutant des cavités intermédiaires. Celles-ci servent à augmenter la concentration des électrons ce qui augmente l'énergie transférable à la sortie.

## Klystron à réflecteur

Un autre type de klystron est celui à réflecteur, aussi appelé klystron réflex à cause de la réflexion interne du faisceau d'électrons. Le résonateur d'entrée sert à moduler la vitesse des électrons dans le faisceau afin de former des paquets. Cependant, dans ce cas, le klystron comporte une plaque appelée le réflecteur au lieu de la cavité réceptrice.

Après être sorti du résonateur, le faisceau se dirige vers la plaque en s'organisant en paquets mais il est repoussé vers le résonateur en arrivant près de la plaque qui est chargée négativement. Cela allonge son trajet et donc la concentration des électrons. Il repasse donc une seconde fois dans le résonateur où il transfère son énergie, et l'onde amplifiée, à une sonde.

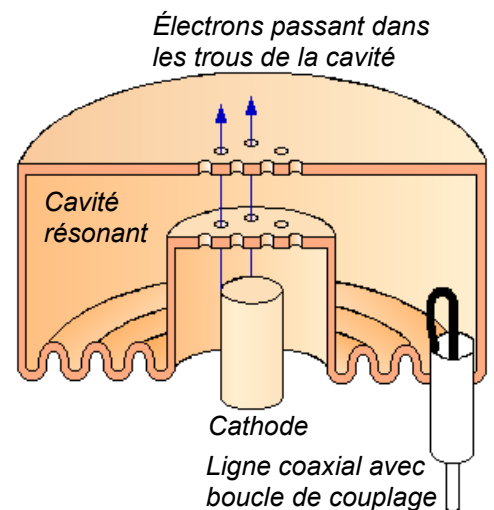


Figure 4 : Cavité d'un klystron à réflecteur.

## Divers

Trois sources d'alimentation électriques sont nécessaires au fonctionnement d'un klystron :

1. Courant pour le filament de la cathode ;
2. Tension positive pour le résonateur, souvent appelée tension du faisceau, pour accélérer les électrons à travers la grille de la cavité résonante;
3. Tension négative pour la plaque de réflexion.

Les électrons sont concentrés en un faisceau par le champ électrostatique créé par le résonateur ( $V_2$ ) dans le corps du tube à vide.

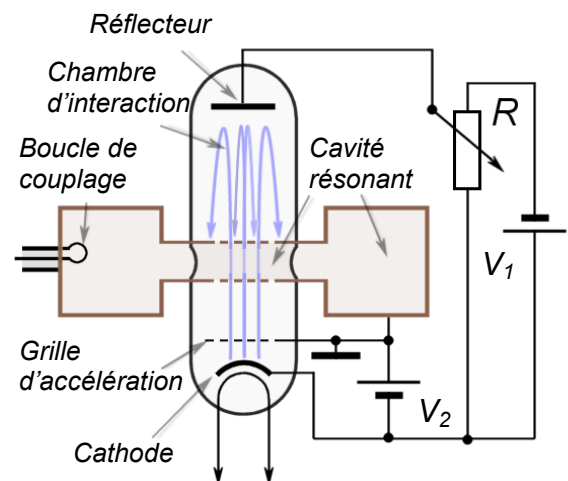


Figure 5 : Diagramme d'un klystron réflex.

## Tube à ondes progressives

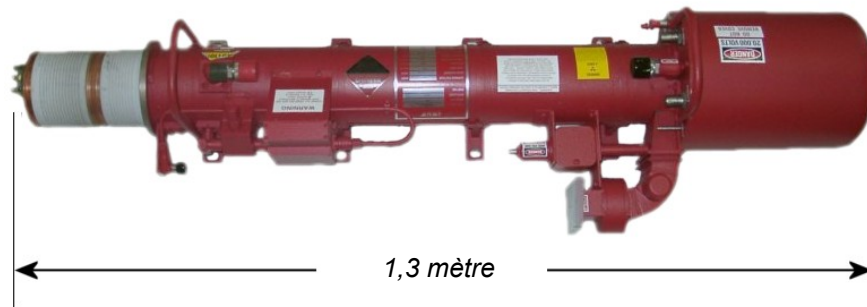


Figure 6 : TOP de puissance, le VTR 572B

Les tubes à ondes progressives (TOP) sont des amplificateurs à large bande passante qui occupent une place spéciale dans les amplificateurs par modulation de vitesse des électrons. Ils introduisent très peu de bruit au signal à amplifier ce qui permet de les utiliser également dans les récepteurs de radiofréquences.

Un tube à ondes progressives peut donner un gain de plus de 40 dB avec une bande passante de plus d'une octave (une octave représentant une variation de fréquence du simple au double). Certains TOP ont été conçus pour des fréquences aussi basses que 300 MHz et aussi élevées que 50 GHz.

Il y a deux groupes différents de TOP :

- **Les TOP à faible puissance pour les récepteurs :**  
utilisés dans des récepteurs très sensibles au bruit et qui nécessitent une large bande passante.
- **Les TOP de puissance pour transmetteurs :**  
utilisés comme préamplificateurs.

### Structure et fonctionnement des TOP

Un tube à ondes progressives (TOP) comporte trois parties : le **canon à électrons**, la **structure à retard** et le **collecteur**. La Figure 7 montre ces composants.

Dans le **canon à électrons**, les électrons sont émis par une cathode chauffée, focalisés par des électrodes (Wehnelt) ainsi que des aimants permanents, et accélérés vers l'anode. Le tout permettant de régler le courant du faisceau d'électrons.

La **structure à retard** est constituée d'une hélice en cuivre à pas variable et de faible impédance, le long de laquelle se propage une onde électromagnétique. L'onde parcourt un plus long trajet dans la structure à retard et donc sa vitesse de phase est un peu moins rapide que celle du faisceau d'électrons qui lui se propage en ligne droite au milieu de l'hélice.

Le champ électrique de cette onde tend à freiner les électrons du faisceau qui se regroupent en paquets et cèdent alors de l'énergie à l'onde électromagnétique d'où son amplification.

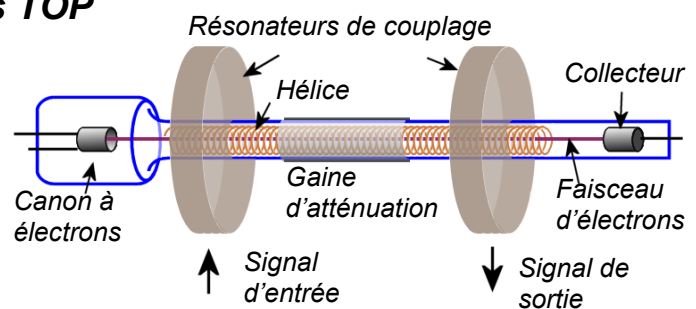


Figure 7 : Diagramme des composants d'un TOP.

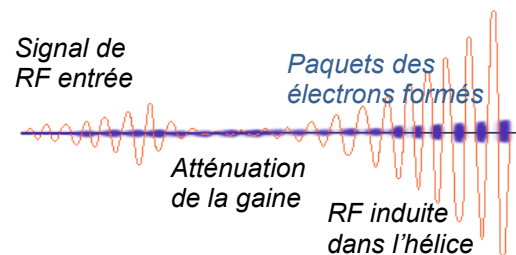


Figure 8 : Signal amplifié par l'hélice.

Le **collecteur** est chargé de recueillir les électrons qui sortent de l'hélice et récupère une partie de leur énergie initiale puisqu'ils n'en ont cédé que 10 à 20 pour cent à l'onde RF (radiofréquence).

L'onde radiofréquence à amplifier est introduite dans l'hélice grâce à un guide d'onde et le résultat est évacué de la même façon. Une gaine d'atténuation entoure l'hélice pour éviter toute réflexion interne de l'onde qui interférerait avec la propagation.

La Figure 9 montre que le champ électrique dans l'hélice est parallèle au faisceau d'électrons dans le tube et qu'il alterne d'une spirale à l'autre permettant de ralentir ou d'accélérer alternativement les électrons du faisceau et donc de former des « paquets ».

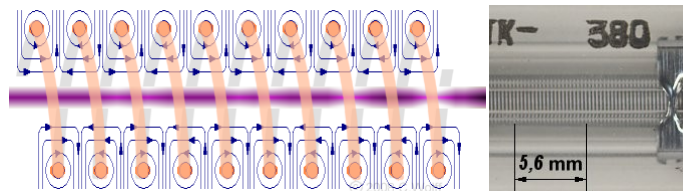


Figure 9 : Faisceau d'électrons formant des « paquets » à gauche sur une distance 20 tours de l'hélice (détails 5,6 mm de longueur de la photo de droite).

## Caractéristiques des TOP

L'**amplification en puissance** atteignable dépend des facteurs suivants :

- Les détails de construction (ex. la longueur de l'hélice);
- Le diamètre du faisceau d'électrons, ajustable par la focalisation créée par le champ magnétique dans le canon à électrons;
- La puissance fournie en entrée ( $P_{\text{entrée}}$  dans la Figure 10 ;
- Le voltage  $V_{A2}$  de l'hélice.

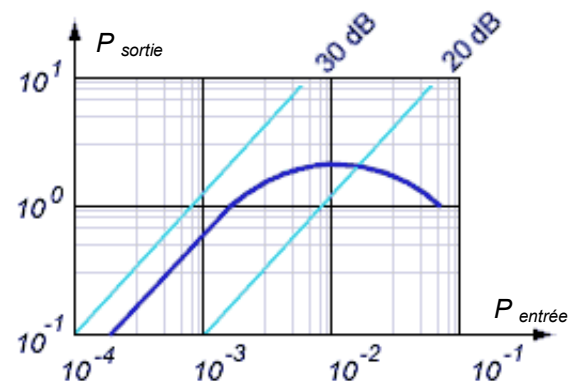


Figure 10 : Caractéristique des tubes à ondes progressives

La figure montre la puissance du signal d'entrée ( $P_{\text{entrée}}$ ) versus celui de sortie ( $P_{\text{sortie}}$ ) dans un TOP. Le gain est linéaire et d'environ 26 dB pour un signal d'entrée de faible puissance mais en augmentant la force du signal au-delà d'un certain seuil, la puissance du signal de sortie n'augmente plus proportionnellement au gain ou même diminue. L'efficacité relativement faible des tubes à ondes progressives amoindrit ses qualités de large bande passante et de fort gain. Le signal traité par un TOP, et envoyé au mélangeur, se situe donc dans une zone limitée de puissance. S'il faut une plus grande amplification, un appareil de type différent sera utilisé ensuite, le plus souvent un amplificateur à champ croisés.

Comme le gain des TOP est dû à l'interaction du faisceau d'électron et du champ électrique de la structure à retard, la réponse en fréquences de l'hélice détermine la bande passante. Celle-ci peut être de l'ordre de plusieurs gigahertz alors que le bruit du système se situe généralement entre 3 et 10 dB.

## Types

L'hélice simple peut être remplacée par un autre type de **structure à retard** comme l'hélice à pas variable, la barre d'anneaux interconnectés, la boucle d'anneaux et la structure à cavités couplées. Le choix dépend des caractéristiques recherchées pour le gain, la bande passante et la puissance.



## Hélice à pas variable

La demande d'amélioration du rendement de conversion des TOP pour les télécommunications a conduit à l'introduction d'hélices à pas (la périodicité de la spirale) variable, une réduction du pas réduisant localement la vitesse de propagation de l'onde, donc du champ électrique appliqué aux électrons, et permettant à l'onde déjà amplifiée de rester plus longtemps en phase avec les électrons ralentis car ayant cédé une partie de leur énergie.

Les tubes les plus performants emploient même une double variation de la périodicité : d'abord une augmentation du pas (donc de la vitesse de l'onde vue par les électrons) pour améliorer la formation des paquets d'électrons, suivie d'une réduction du pas pour un freinage plus efficace.

## Barre d'anneaux interconnectés

Cette structure à retard est formée d'une suite d'anneaux plats attachés entre eux par une bande alternante. Elle peut être utilisée à plus haute puissance que l'hélice conventionnelle mais sa bande passante est plus faible de 5 à 15 % et sa fréquence maximale est de 18 GHz.



Figure 11 : Structure à retard de type barre d'anneaux interconnectés.

La barre à anneaux interconnectés a une forte impédance et de faibles harmoniques. L'onde qui la parcourt peut avoir un fort gain (40 à 60 décibels sont courants) pour un tube de faible longueur, le tout se faisant à une plus haute tension et avec une réflexion dans le tube.

probabilité plus faible de produire une

## Boucle d'anneaux

La structure en boucle d'anneaux, présentée dans la Figure 12; a des caractéristiques similaires à celle de la barre d'anneaux interconnectés. Elle est facile à construire à partir du découpage d'un tube en cuivre.

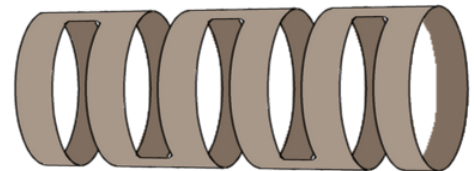


Figure 12 : Structure à retard en boucle d'anneaux.

## Cavités couplées

Cette structure à retard est en fait une série de cavités résonantes reliées les unes aux autres par une ligne de transmission. La Figure 13 montre le faisceau d'électrons (en rouge) passant par une ouverture au centre. Celui-ci est modulé en vitesse par le signal radiofréquence passant dans chaque cavité selon la large flèche bleue. Si l'espace entre les cavités est bien ajusté, la tension induite dans chacune de celles-ci par le passage du faisceau d'électron sera en phase avec ce dernier jusqu'à la sortie. Ce phasage donne l'amplification du signal comme dans les autres types de structure à retard.

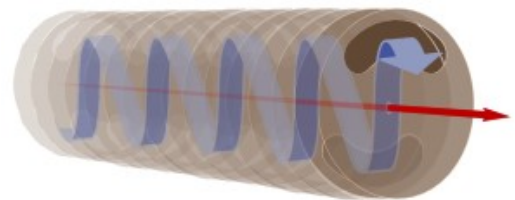


Figure 13 : Structure à retard en forme de cavités couplées.

## Klystron à interaction élargie (KIE)

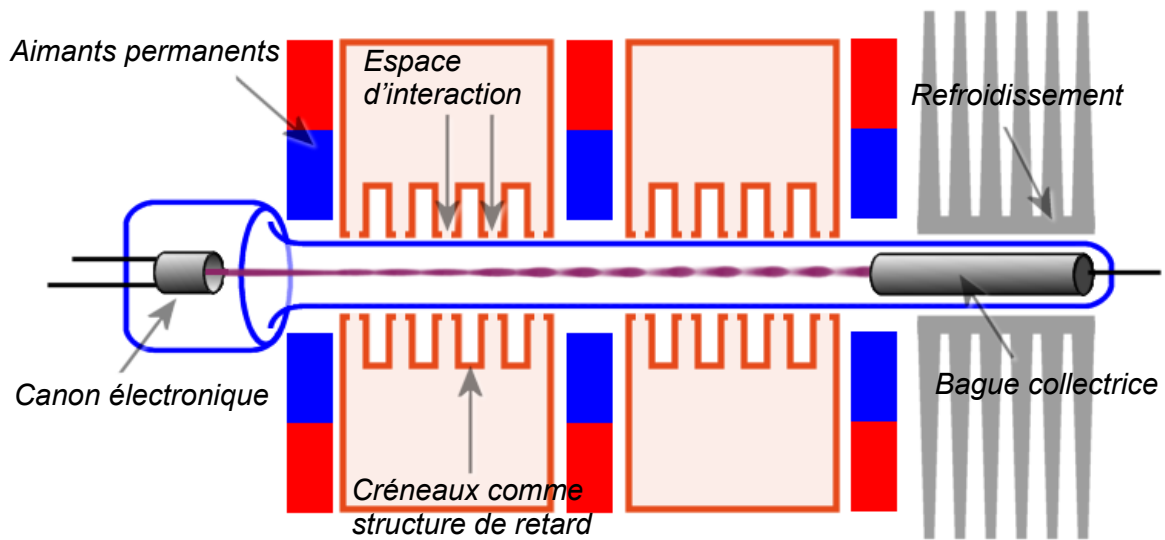


Figure 14 : Diagramme d'opération du KIE.

Le klystron à interaction élargie (KIE) est une technologie qui conserve la robustesse et la puissance du klystron conventionnel mais permet un raffinement sur les klystrons à deux cavités résonnantes et les tubes à onde progressive à cavités couplées. Le KIE permet de moduler en vitesse un faisceau linéaire d'électrons à haute puissance, comme le klystron, tout en ayant une bande passante plus grande que celle d'un tube à onde progressive.

Ce résultat est obtenu dans les fréquences millimétriques grâce à l'introduction de fentes successives servant de cavités résonnantes couplées. Le nombre de fentes et leur interaction peut varier selon l'application à laquelle est destiné le KIE. Un circuit de radiofréquences de type échelle a une grande efficacité et est stable thermiquement aux fréquences submillimétriques tout en opérant avec un faisceau d'électron à tension moyenne. Les KIE opèrent couramment entre 18 to 280 GHz.

La Figure 14 montre le diagramme d'un KIE. Les électrons émis par la cathode sont focalisés et accélérés par le canon à électrons à travers l'anode. L'accélération est produite par la grande différence de voltage entre la cathode et l'anode. Ils passent par de petits trous dans cette dernière. De l'autre côté, les électrons ont une vitesse initiale constante et le faisceau est confiné par le champ d'un aimant permanent pour passer au centre d'un tunnel dont les parois sont en créniaux. Chacune des fentes entre en résonance, grâce à l'induction de courant dans ses parois, et agit comme une structure de retard comme dans le cas d'un tube à onde progressive. Le rôle de cette structure est de guider une onde électromagnétique à une vitesse de phase voisine de la vitesse des électrons du faisceau. Le nombre de créniaux est choisi pour moduler la vitesse des électrons dans le faisceau et ainsi générer une onde radiofréquence stable dans les cavités résonnantes. Après avoir ainsi transféré son énergie dans le tunnel, le faisceau termine son trajet dans un collecteur à bague.

Ce circuit de radiofréquences à multiples cavités est simple, robuste et possède une impédance élevée. Il permet une modulation efficace du faisceau et l'échange entre le champ de radiofréquences et le faisceau d'électron sur une large plage de fréquences. Il donne également un fort gain par unité de longueur et permet d'utiliser des aimants permanents pour la focalisation. Le résultat est un faisceau d'électrons très compact et un appareil très peu encombrant. Dans le cas d'un système à impulsions, une électrode de focalisation avec grille est ajoutée pour servir d'interrupteur au faisceau. Une courte série de cavités en créniaux minimise les modes parasites et afin d'obtenir un signal stable avec un faible bruit.



## Oscillateur à interaction élargie (OIE)

L'oscillateur à interaction élargie (OIE) est un appareil à cavité unique avec des créneaux d'interaction qui fonctionnent comme un tube à onde progressives à cavités couplées qui aurait une très fort couplage entre ses résonateurs. Avec un faisceau à fort débit d'électrons, une oscillation soutenue est obtenue. Un réglage de la fréquence de l'ordre de 0,4% peut être obtenu grâce à la variation de la tension accélérant le faisceau.

## Carcinotron

Un **oscillateur à onde régressive**, aussi connu sous le nom de commerce **carcinotron**, est un tube à vide pour générer des ondes radioélectriques allant des micro-ondes au téra-hertz. Il appartient à la catégorie des tubes à ondes progressives (TOP) et possède une vaste gamme dynamique. Le canon à électrons émet un faisceau qui interagit avec une structure de retard, comme dans le TOP, mais l'onde électromagnétique produite se propage en direction inverse au déplacement des électrons (vitesse de groupe négative) dans ce cas. La puissance de sortie se retrouve donc près du canon à électron.

Il existe deux types principaux, le type M et le type O. Le type M, plus puissant, utilise des champs électriques et magnétiques orthogonaux pour focaliser le faisceau d'électron alors que le type O utilise seulement un champ magnétique. La fréquence du signal émit peut être varié rapidement sur une large plage de fréquences ce qui permet de l'utiliser comme émetteur de brouillage radar ou dans les récepteurs à multifréquences.

---

© 2012 Radartutorial.eu

Tous les textes sont utilisables selon les termes de la *GNU- Free Documentation Licence* et une seconde licence dans les conditions de *Creative Commons*.