

G.Bienvenu
bienvenu@lal.in2p3.fr

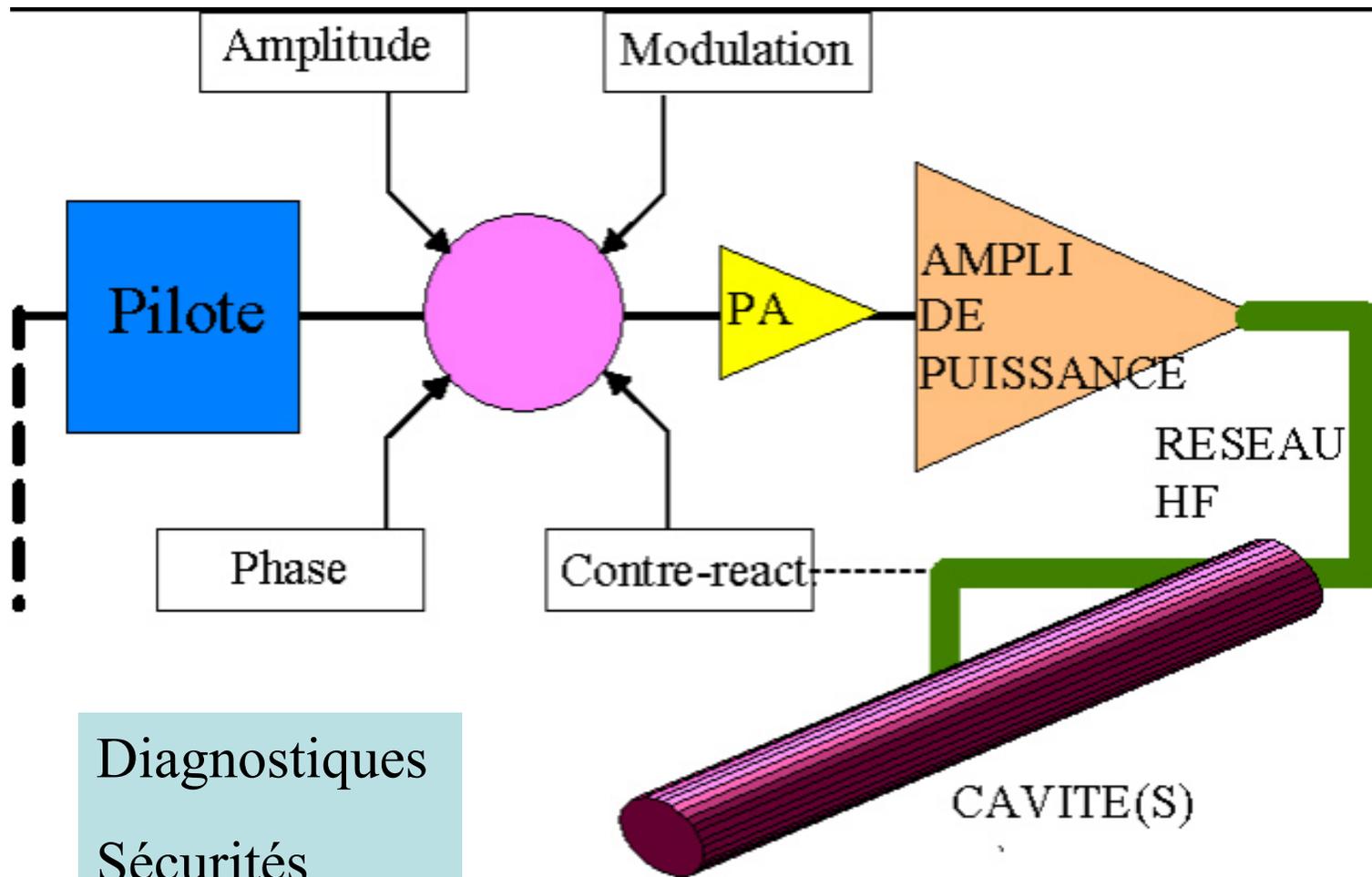
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
IN2P3-CNRS & Université Paris Sud
UMR 8607

SYSTEMES HAUTE FREQUENCE

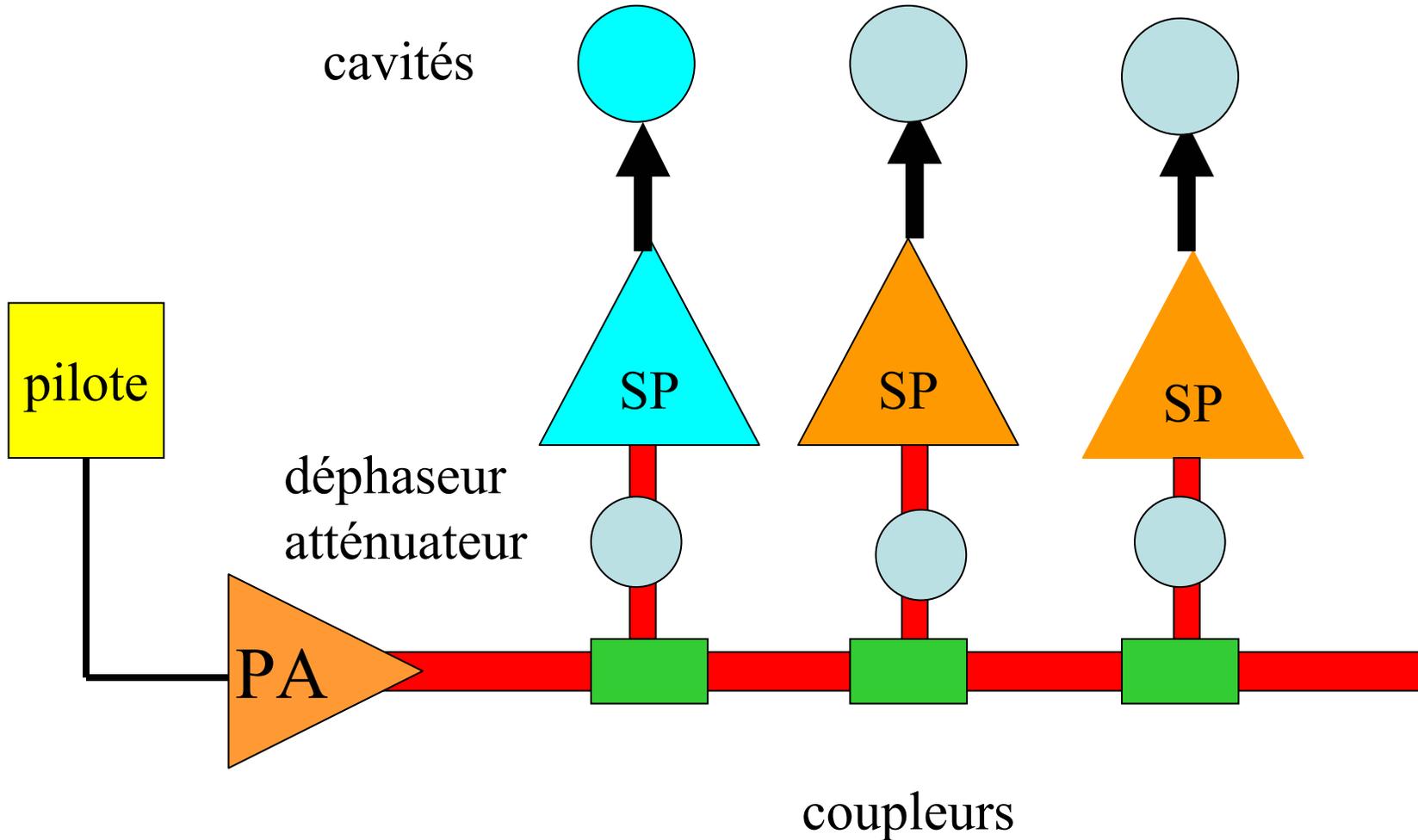
Pour structures accélératrices

Ecole IN2P3 des Accélérateurs
Centre de l'Agelonde
La Londe les Maures Nov. 2007

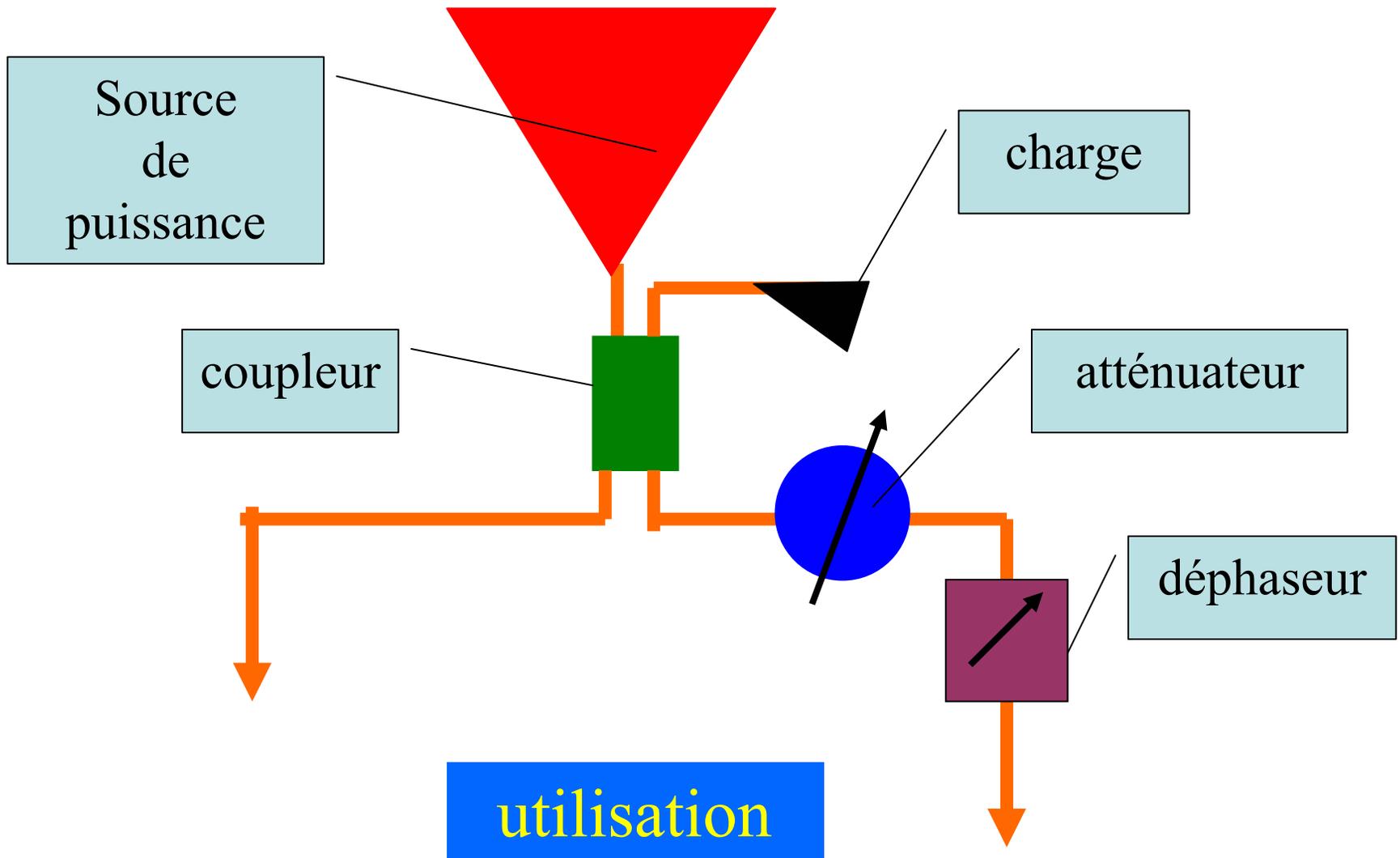
Bloc diagramme



Bloc diagramme (2)



Bloc diagramme (3)



Besoins en sources HF

- Fréquence : qq 10 MHz 12 GHz (30 GHz envisagé)
- Stabilité de phase
- Stabilité d'amplitude
- Fiabilité, Rendement
- Fréquence fixe ou bande étroite (généralement)
- Puissance :

Continue (CW)	qq kW	1 MW
Pulsée	qq 10 MW	100 MW

Amplificateurs de Puissance

- Amplificateurs non résonants

Tube à vide, Ampli à état solide, TPO

- Amplificateurs résonants

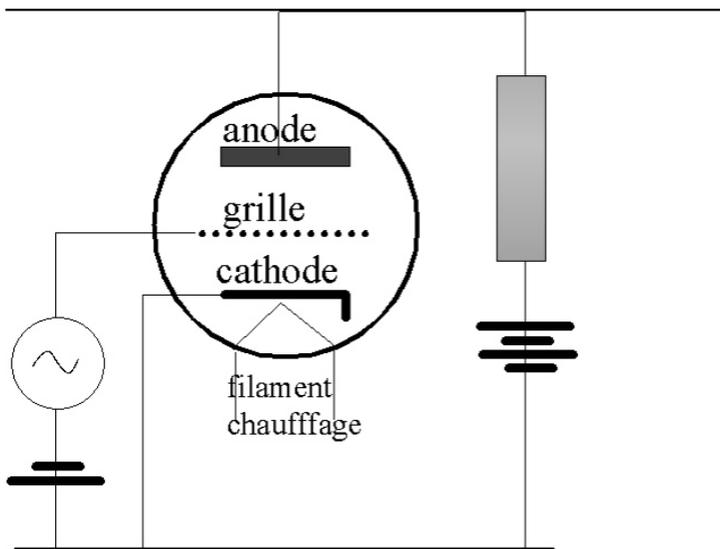
Klystrons, Magnétron, IOT, Gyroklystron

Tubes à vide

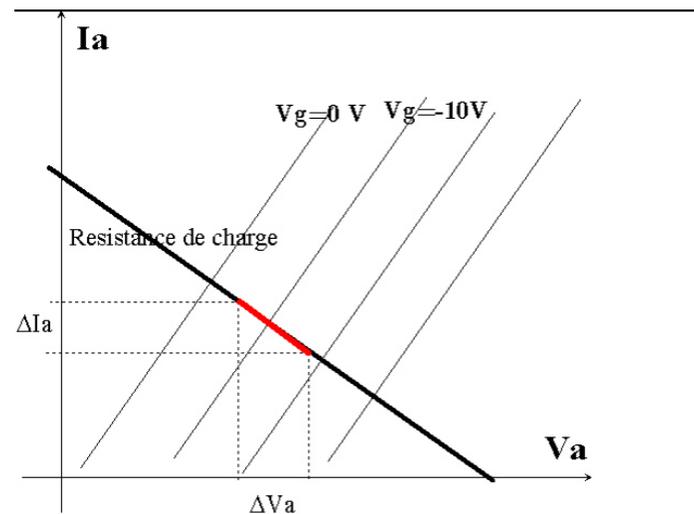
- Triode
- Tétrode

Triode en amplification

- Schéma basique



Caractéristique $I_a = f(V_g)$



Résistance interne : $r_i = \delta V_a / \delta I_a$

Gain : $\mu = \delta V_a / \delta V_g$

Lee de Forest 1907

Equations de la triode (petits signaux)

$$V_p = r_i I_p - \mu V_g$$

Coef. d'amplification :

$$V_p / V_g = \mu R / (R + r_i)$$

Triode en amplification

Classes d'Amplification

La classe d'amplification correspond à l'ouverture de l'angle de conduction (réglé par la valeur de polarisation de la grille)

Classe A

(ouverture 360° Pt de fonc. au centre de la droite de charge)

Très faible taux d'harmoniques Rendement $\eta = 50\%$

Classe B

(ouverture 180° Pt de fonc. à $I_a = 0$ + effet de résonance $\sim 270^\circ$)

Harmoniques Rendement $\eta = 80\%$

Classe C (ouverture $< 180^\circ$ Pt de fonc. au delà du cut-off)

Harmoniques  Rendement $\eta = 90\%$

Triode en amplification

LIMITATIONS

Tubes de faible puissance :

Fréquence limitée à 6 GHz

Tubes de forte puissance

Puissance limitée à 5 kW (500 MHz CW)

Fréquence limitée à 1 GHz

Capacités parasites, Temps de transit

Dissipation de l'anode

Courant grille

Triode en amplification

Limitations ex : Temps de transit

Tension cathode plaque : $V = 10 \text{ kV}$

Distance grille plaque : $g = 1 \text{ cm}$

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = e V$$

$$t = \frac{g}{v}$$

$$v = \left[\frac{2ev}{m_0} \right]^{1/2}$$

$$t = \frac{10^{-2}}{6^{-7}} = 16 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

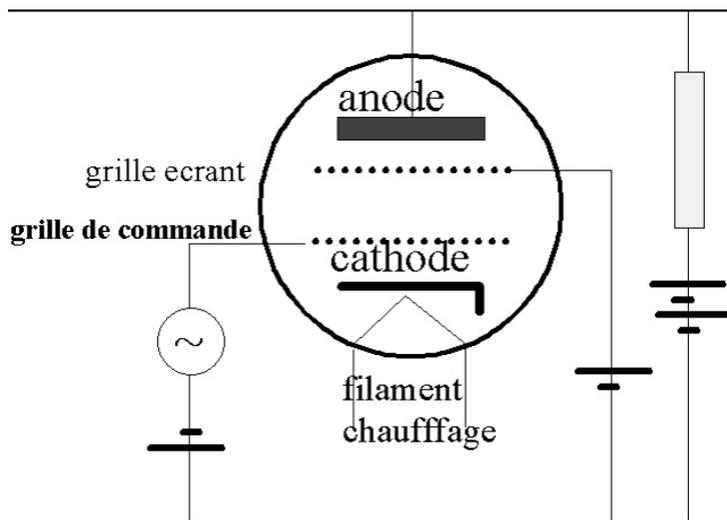
$$v = \left[\frac{2 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 10 \cdot 10^3}{9 \cdot 10^{-31}} \right]^{1/2} = 6 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$$

$$f_M = \frac{1}{t} \times \frac{1}{2\pi}$$

$$f_M = \frac{1}{16 \cdot 10^{-9}} \times \frac{1}{2\pi} \approx 100 \text{ MHz}$$

TETRODE

En ajoutant une nouvelle grille entre la grille de commande et l'anode, on réalise un écran électrostatique qui réduit la capacité G_c/A



Tétrode 4CM400

En classe AB1

450 kW a 110 MHz

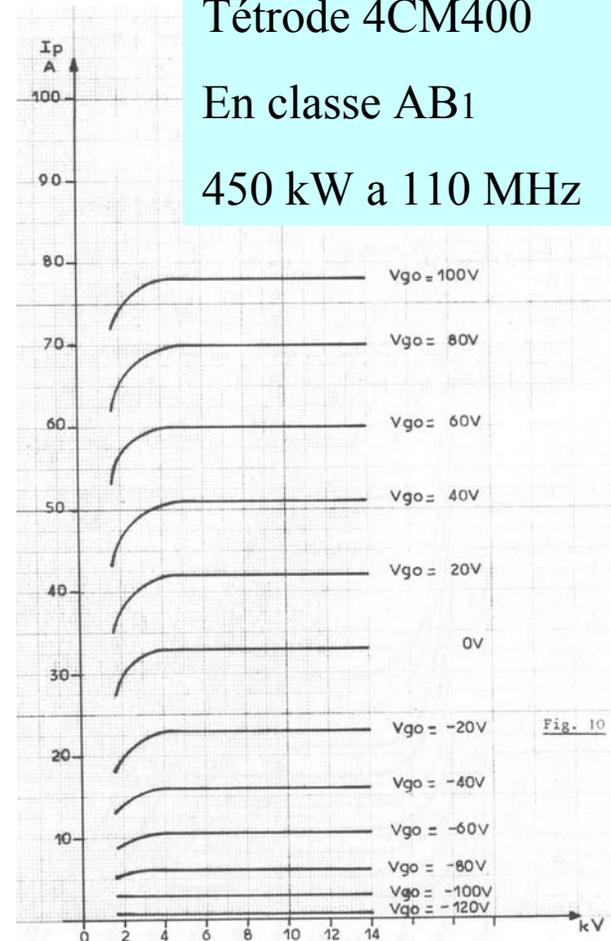
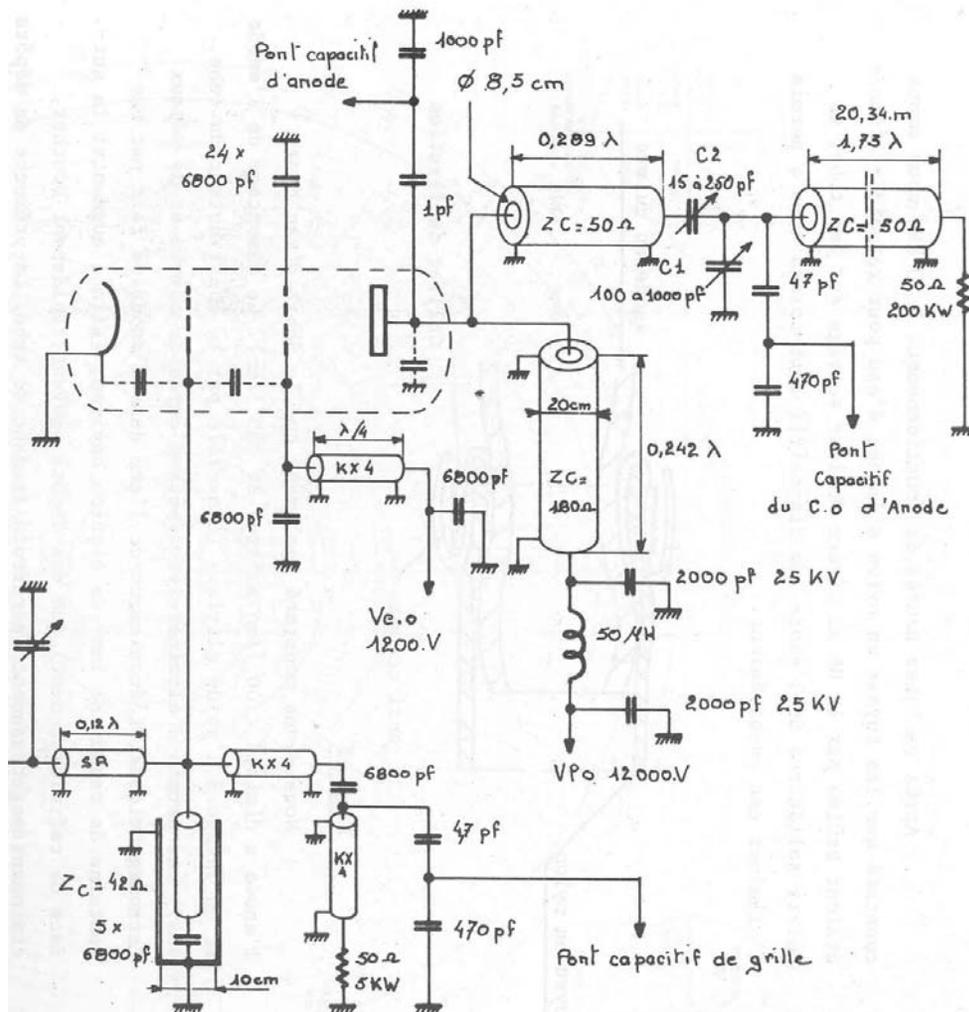


Fig. 10

Exemple d'Amplificateur de Puissance utilisant une Tétrode



Fréquence : 25 MHz

Puissance : 350 KW

Régime continu

Refroidissement par eau

Tétrode RCA 4647

(En fait, ce tube intègre 24 tétrodes dans la même enceinte)

Amplificateurs à état solide

1960 Transistors Si bipolaires HF de puissance (75 W)

1980 Module HF de puissance
(200W / 2GHz)
Bipolaire
AsGa

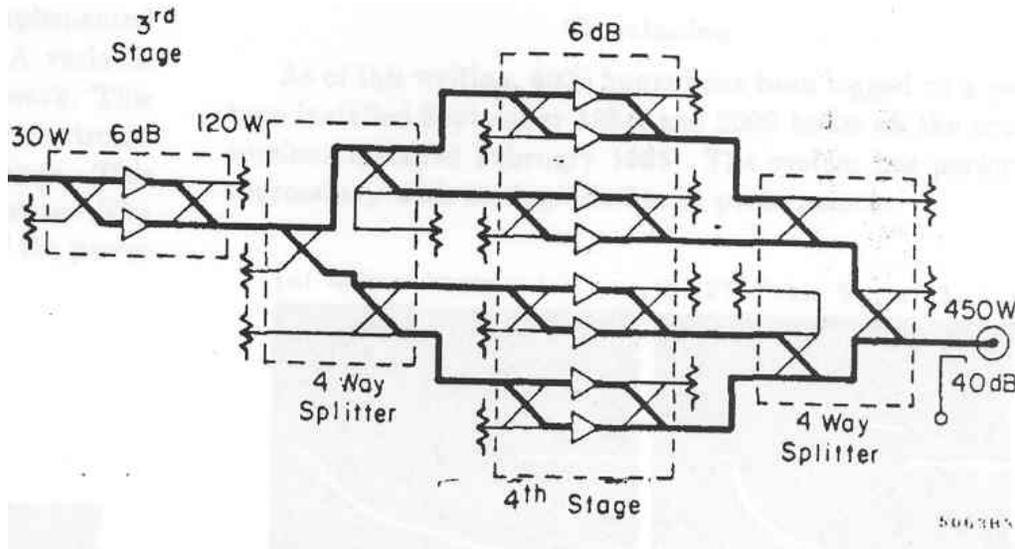
2000 GaN 100 GHz

Ampli avec composants discrets

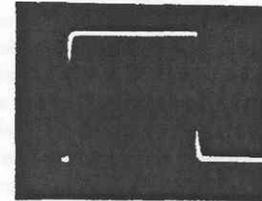
Prè-amplificateur destiné à exciter un klystron bande S

450 W 100 μ s cycle utile 0,1

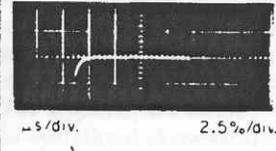
2 X 4 Transistors Si bipolaires 60 W 6 dB



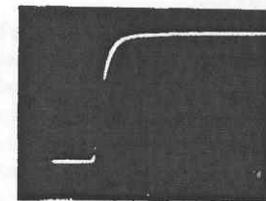
(a) Detected Pulse



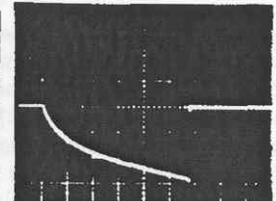
(b) Pulse Flatness



(c) Rise Time



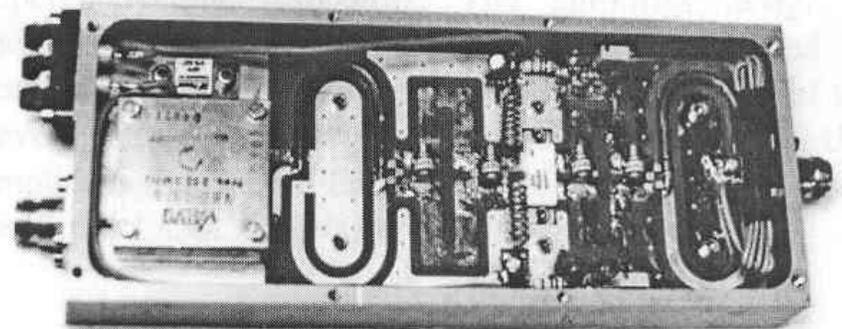
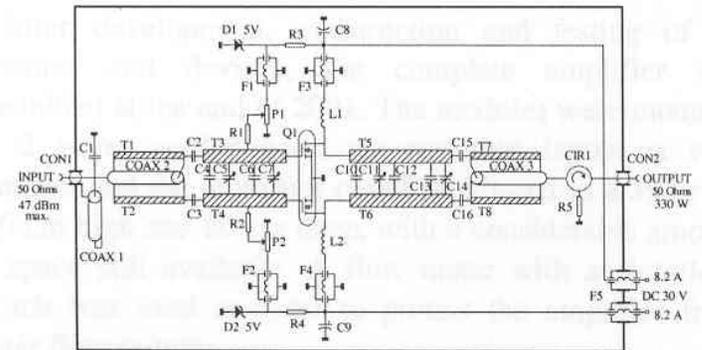
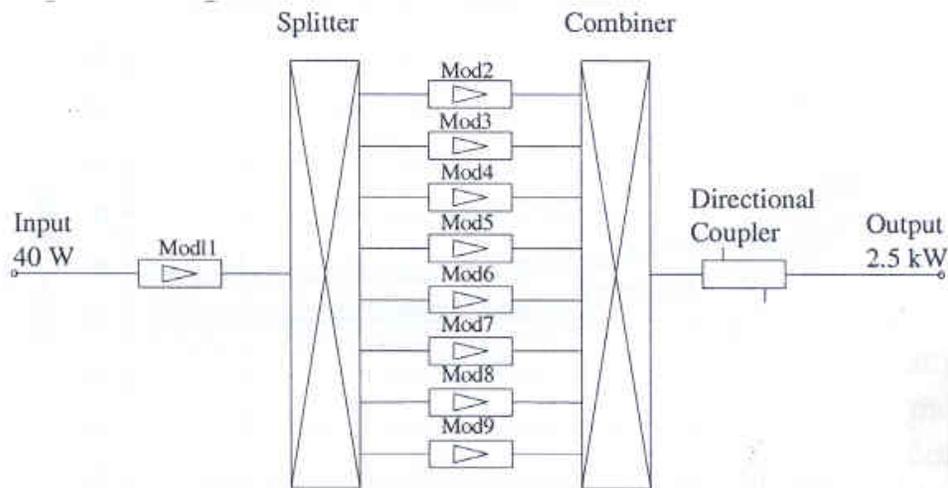
(d) Phase Shift



Ampli avec modules

Amplificateur de puissance 2,5 kW 352 MHz CW

8 modules MOSFET 330 W 9,5 dB



Klystrons

- Rusell et S. Varian 1937
- Principe
- Klystron mono faisceau
- Klystron multi-faisceaux
- Klystron à grille
- Klystron relativiste



The Varian brothers and their early associates with the first Klystron tube, now used in linear accelerators.

KLYSTRON principe

Tube amplificateur HF de classe A à fort gain (50 dB)

Fréquence : 0,35 à 14 GHz

Puissance : qq kW à 1MW CW 150 MW pulsé

Rendement : $\approx 45\%$

$$I_K = \mu V^{3/2}$$

$$P_K = \mu V^{5/2}$$

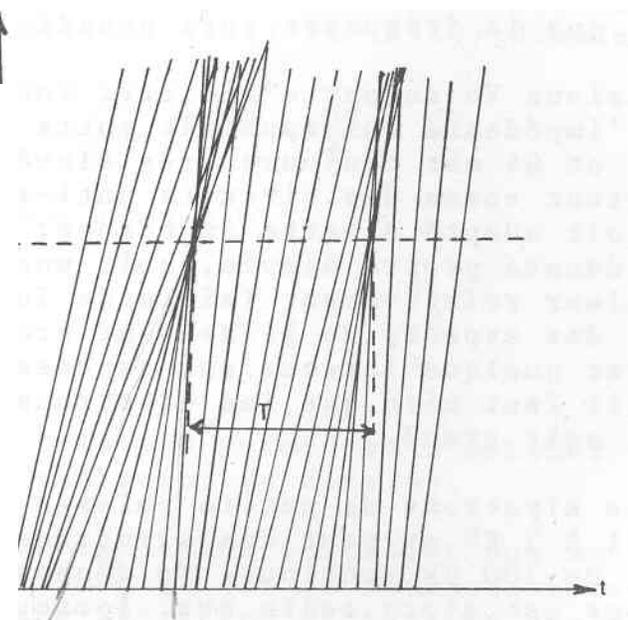
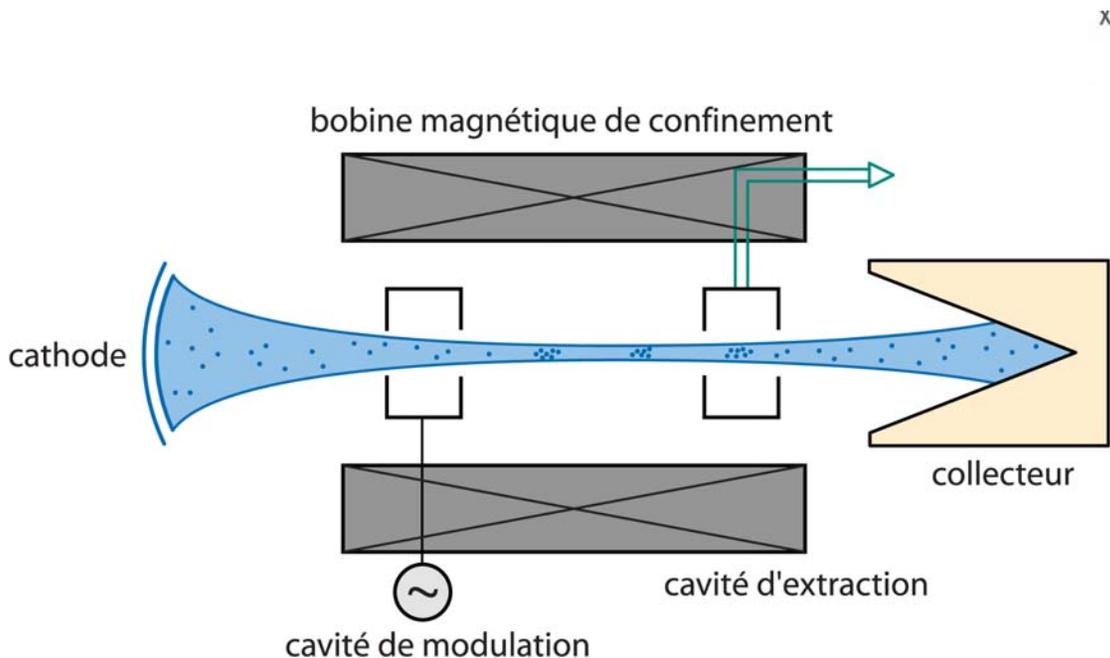


Diagramme d'Applegate

KLYSTRON multi-faisceaux

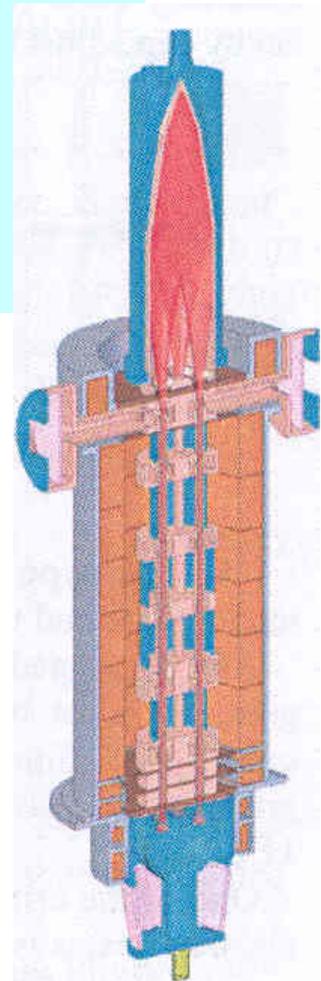
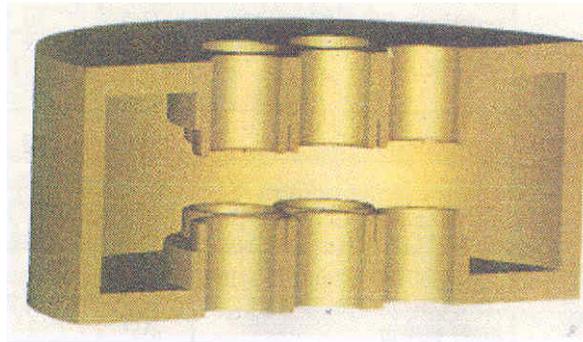
Le rendement d'un klystron est de la forme : $\eta = A \times \mu$

Si $\mu \uparrow$ pb de charge d'espace $\Rightarrow V \uparrow \Rightarrow$ claquages

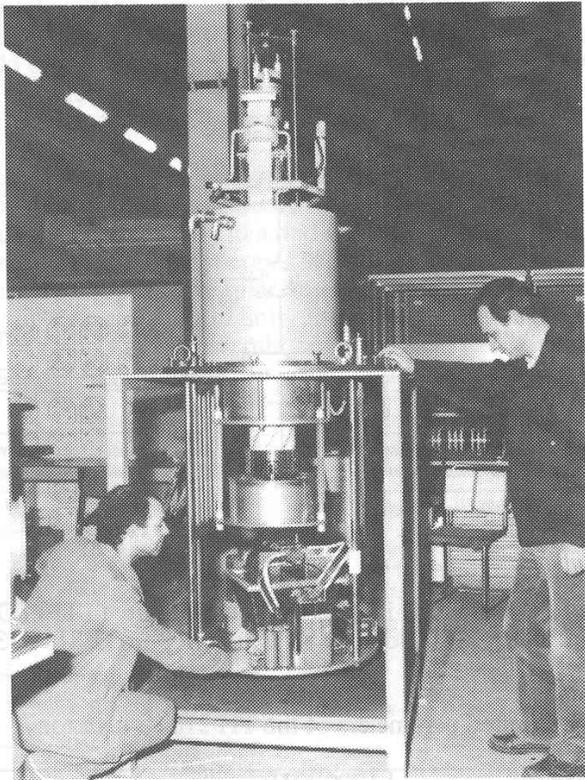
Solution :

DIVISER ! Mise en parallèle de faisceaux à faible μ

$$\eta = 65 \%$$



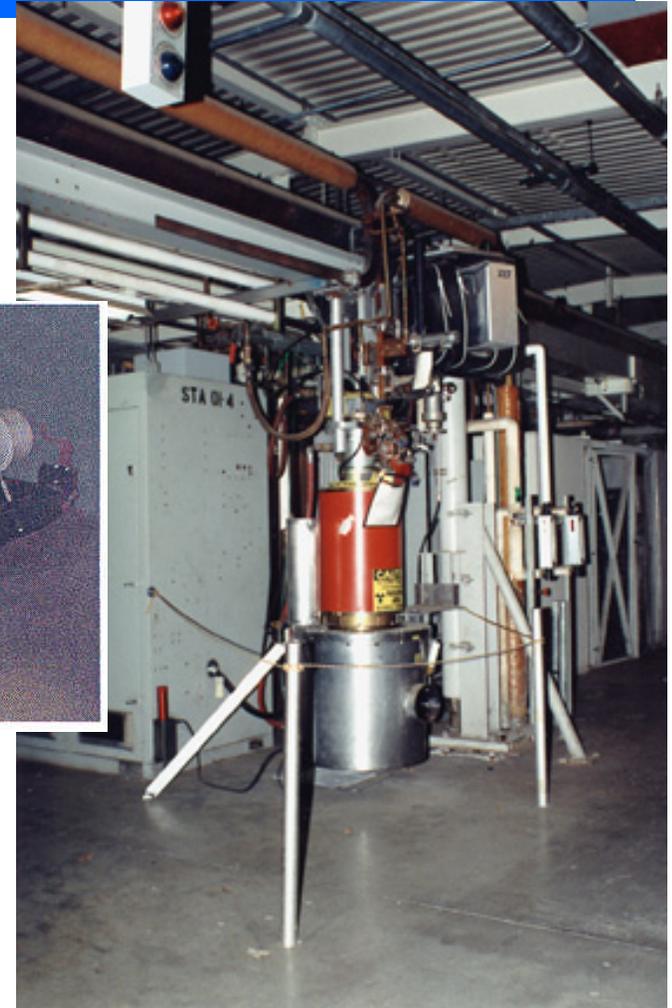
Exemples de klystrons



Klystron 35 MW pulsé VALVO



Klystron 1 MW CW

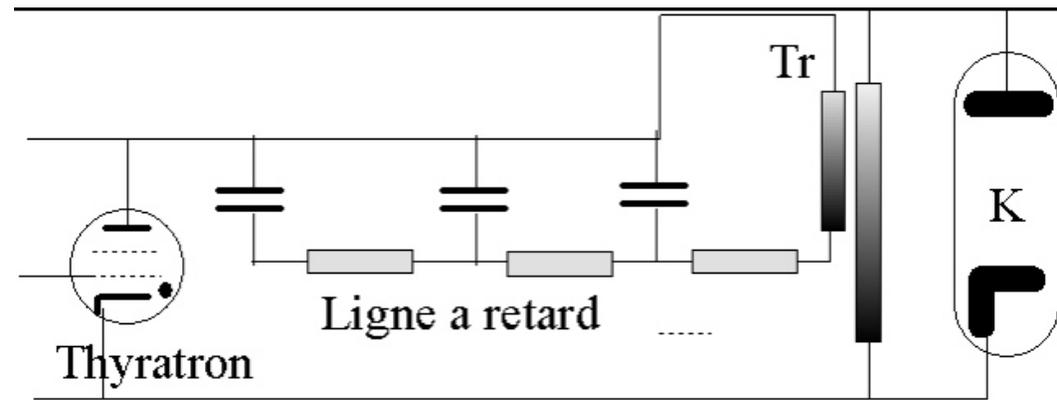
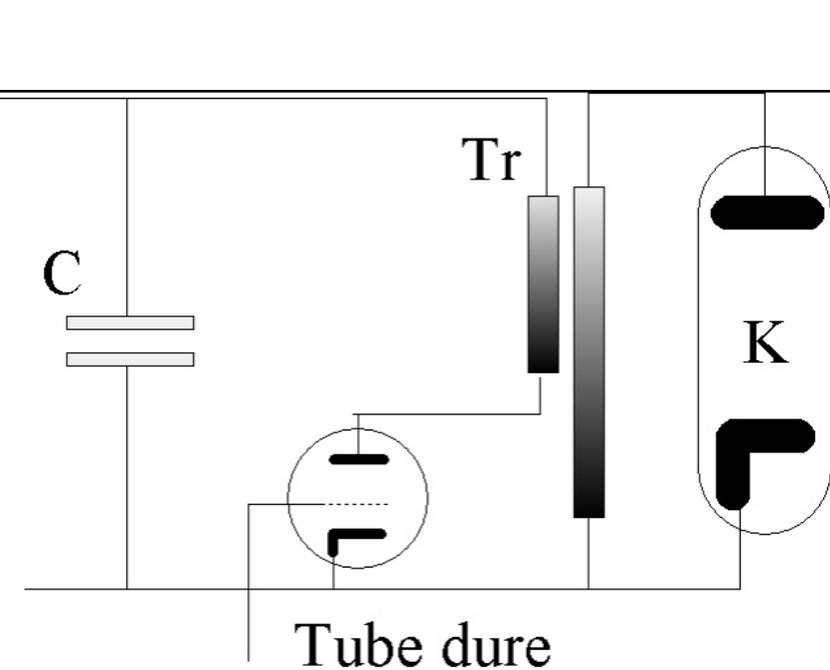


Gallerie des klystrons SLAC

KLYSTRON modulateur

- Principe : stocker de l'énergie pendant un temps long, puis la restituer dans une impulsion brève

Deux solutions : - Réservoir capacitif- Ligne à retard



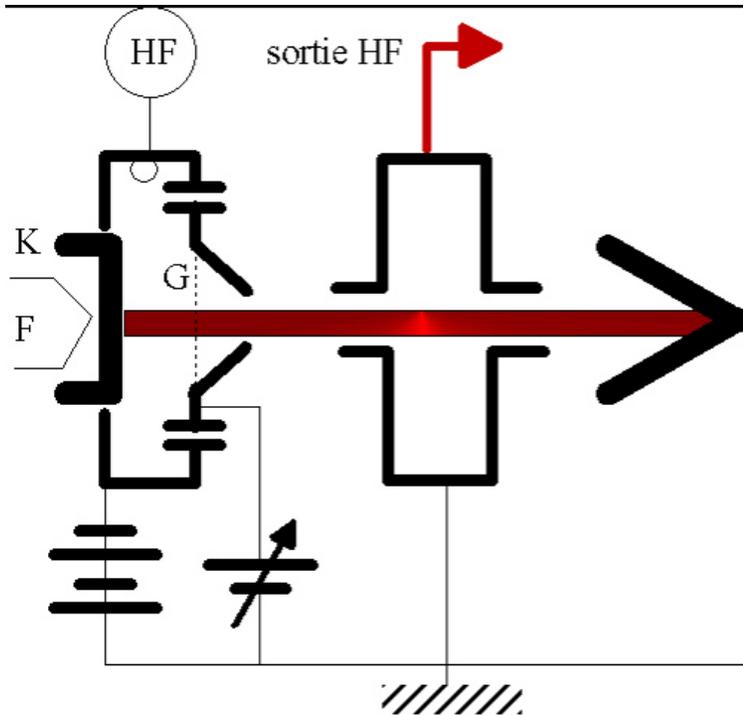
Autres tubes HF de puissance

- Tube à sortie inductive IOT
- Magnétron
- Gyrotron (introduction au gyroklystron)
- Gyroklystron
- TOP (O & M)
- Schéma à deux faisceaux (klystron relativiste réparti)

Tube à sortie inductive IOT

Mariage d'une triode avec un klystron (Klystrode)

Puissance 250 kW CW 1 MW pulsé $\eta = 70 \%$ gain = 20 dB



IOT 30 kW CW
Bande L

Magnétron

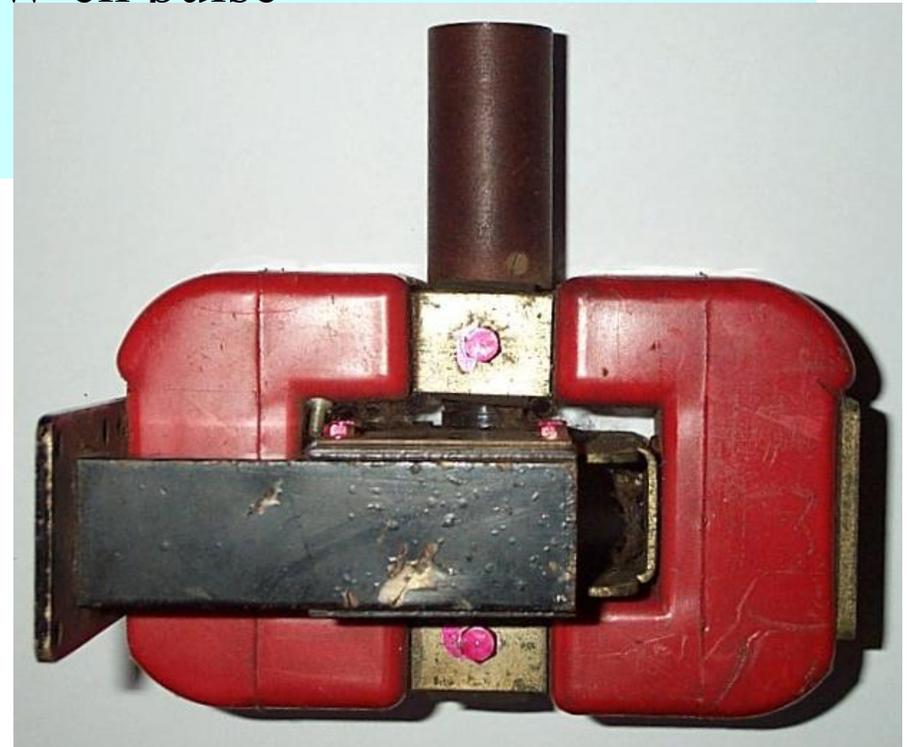
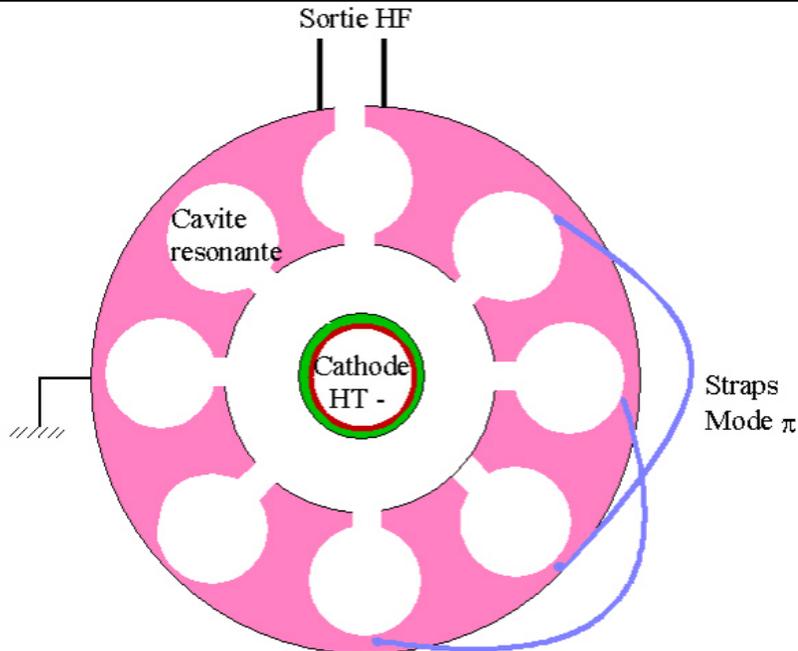
Tube auto-oscillateur à champs croisés (A. Wallace Hull 1921)

Operationel : J. Randall & H. Randall 1940

Fréquence : qq 0.1 GHz à 35 GHz,

Puissance : qq KW CW à qq MW en pulsé

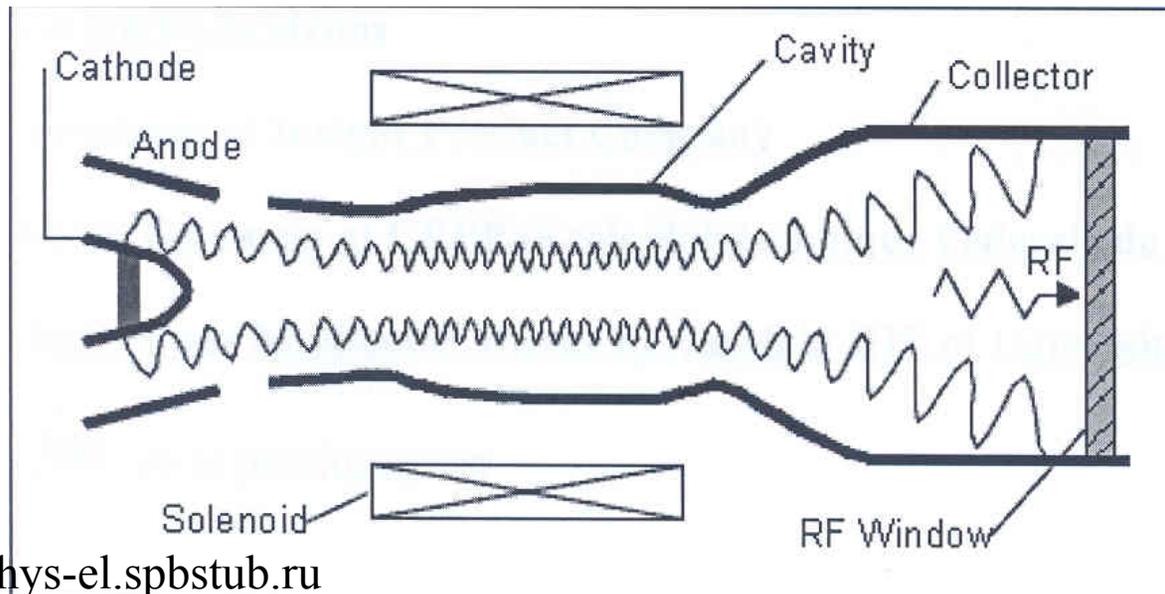
$\eta : 70 \%$



Gyrotron

Sous l'action combinée du champ magnétique et du champ électrique accélérateur, les électrons spiralent à la fréquence cyclotronique et cèdent leur énergie sous forme d'une radiation E.M. La fréquence est accordée par une cavité résonante.

Fréquence : 25 à 300 GHz Puissance : qq kW à qq MW



Gyroklystron

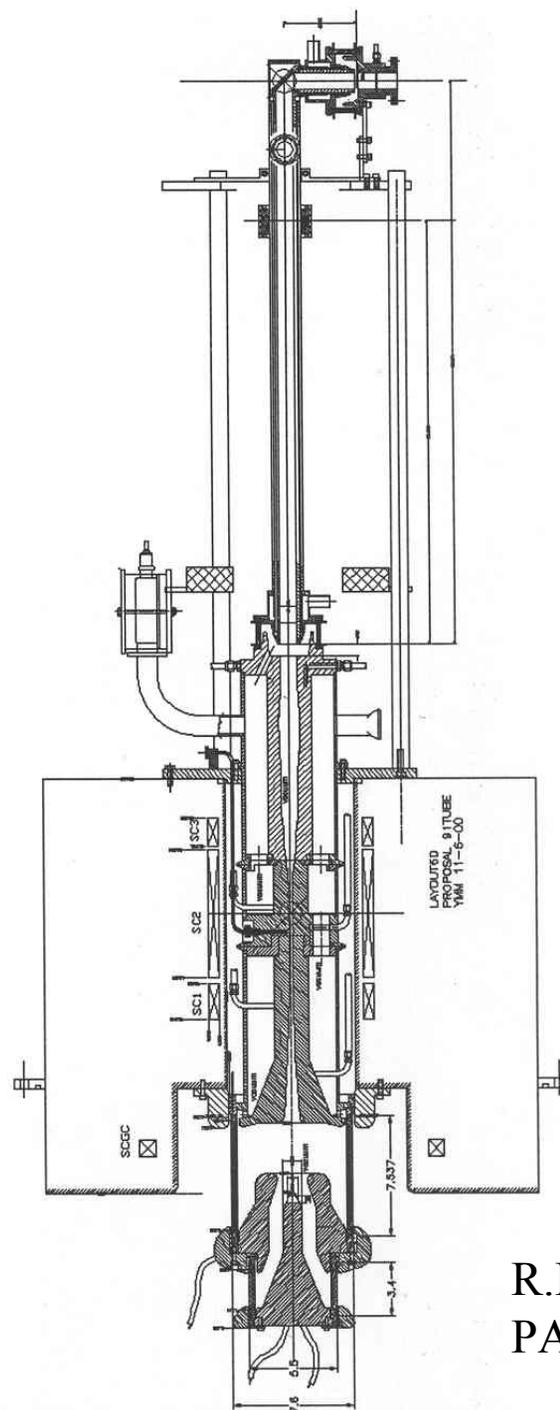
Gyrotron muni de cavités résonantes

Fréquence : 30 à 100 GHz

Puissance : qq kW à qq MW

Gain : 55 dB

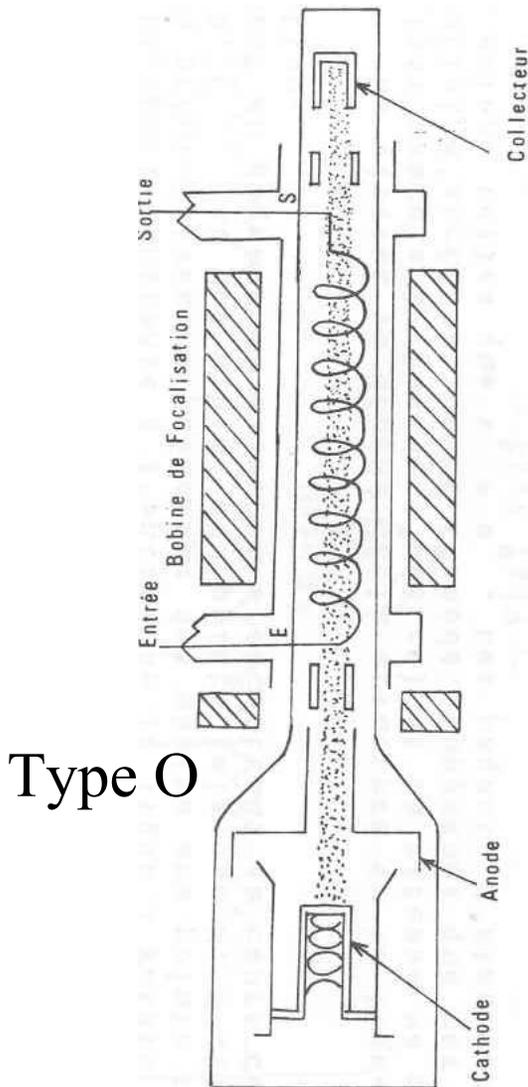
Rendement : 40 %



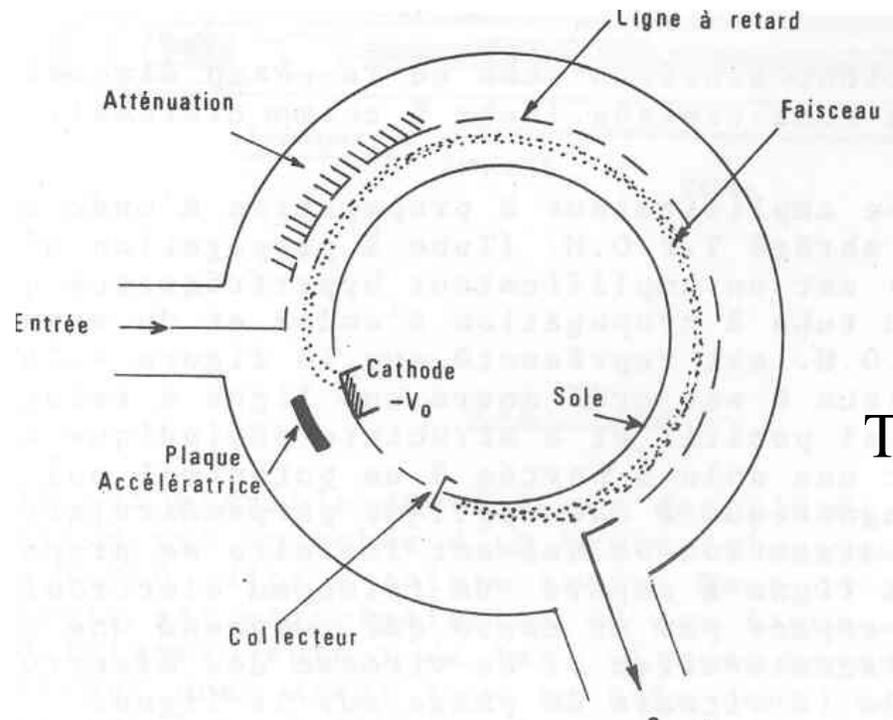
R.L. Ives and al.
PAC 03 p. 1119

Tubes à Onde Progressive

Les TPO sont des amplificateurs large bande utilisés comme amplificateurs en mesure (O) ou en puissance (M)



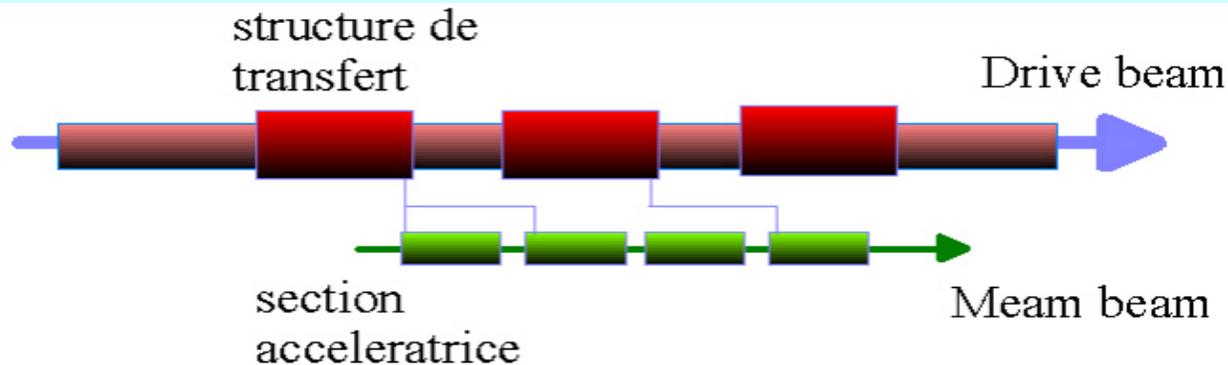
Type O



Type M

Schéma à deux faisceaux

Un faisceau de forte intensité, base énergie, cede son énergie au faisceau principal au moyen de stuctures de transfert



Analogie :
Transformateur élévateur

$$U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1$$

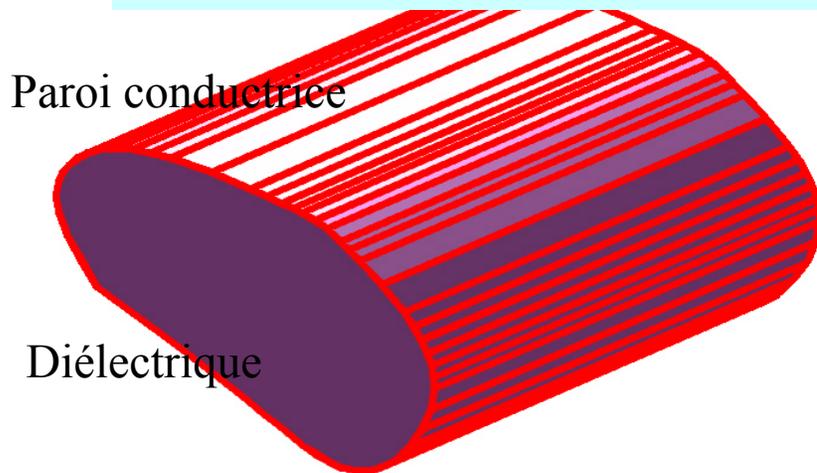
$$I_2 = \frac{n_1}{n_2} I_1$$

Eléments de réseau HF

- Alimenter
- Distribuer
- Déphaser
- Atténuer
- Absorber
- *Adapter*
- *Transformer (les modes)*

Alimenter : Guides d'ondes

Guide d'ondes : Tout tube métallique sous réserve de dimensions adaptées à la longueur d'onde à transporter



$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \approx 377 \Omega \text{ dans le vide}$$

$$Z_g = Z_0 \frac{\lambda}{\lambda_g}$$

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{\varepsilon \mu}}$$

λ_c : dépend uniquement de la géométrie de la section droite

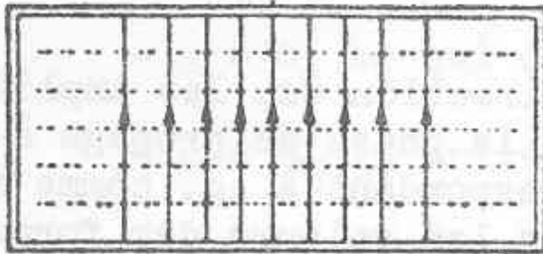
$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

$$V_g V_\phi = c^2$$

Guide rectangulaire/circulaire

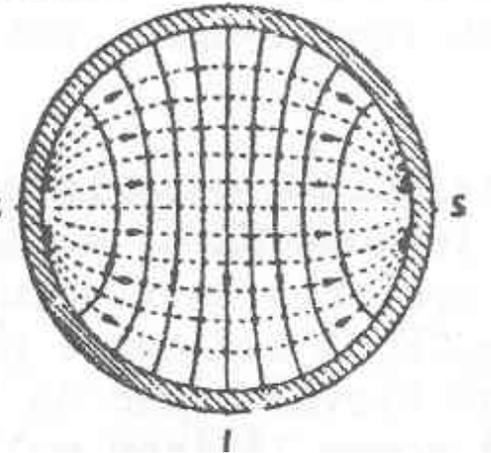
$$\lambda_c = 2a$$

TE₀₁
 $\lambda_c = 2a$



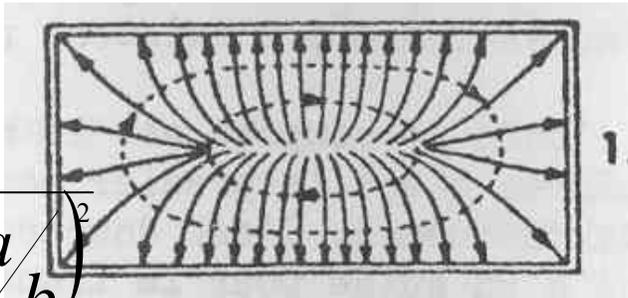
TE₁₁

1. $\lambda_c = 3,412a$



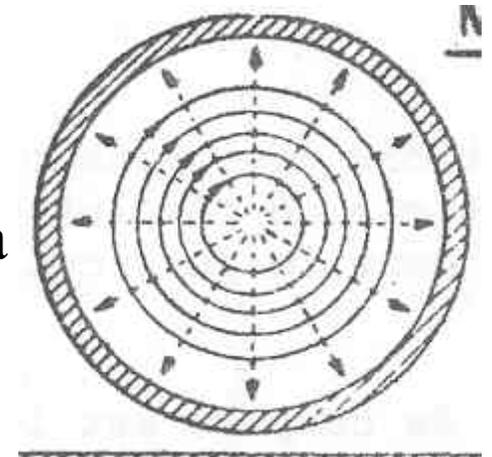
TM₁₁

$$\lambda_c = 2a / \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}$$



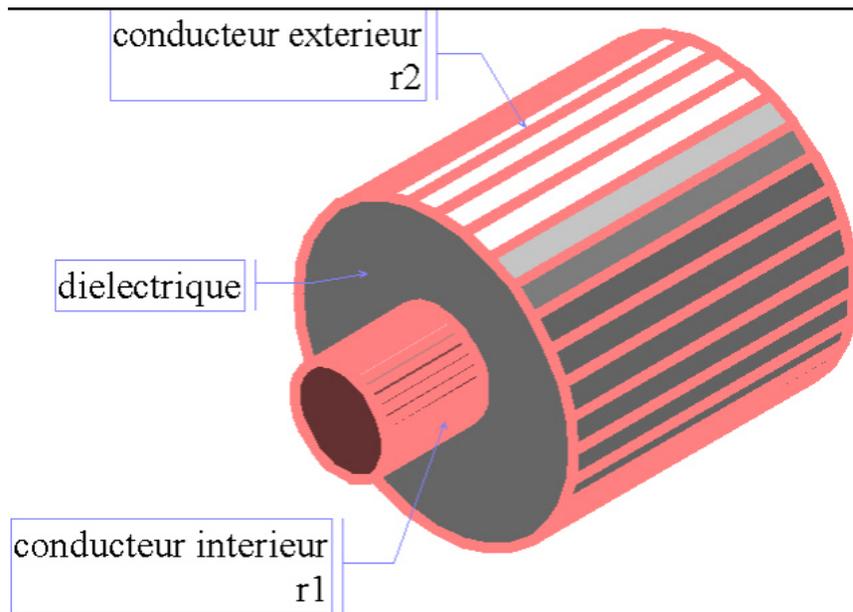
TE₀₁

$\lambda_c = 2,613a$



Guide coaxial

Passe toutes les fréquences (en principe)
en mode TEM λ_c infinie



$$\lambda = \lambda_g$$

$$TEM \Rightarrow \lambda_{\text{mini}} < \Pi(r_1 + r_2)$$

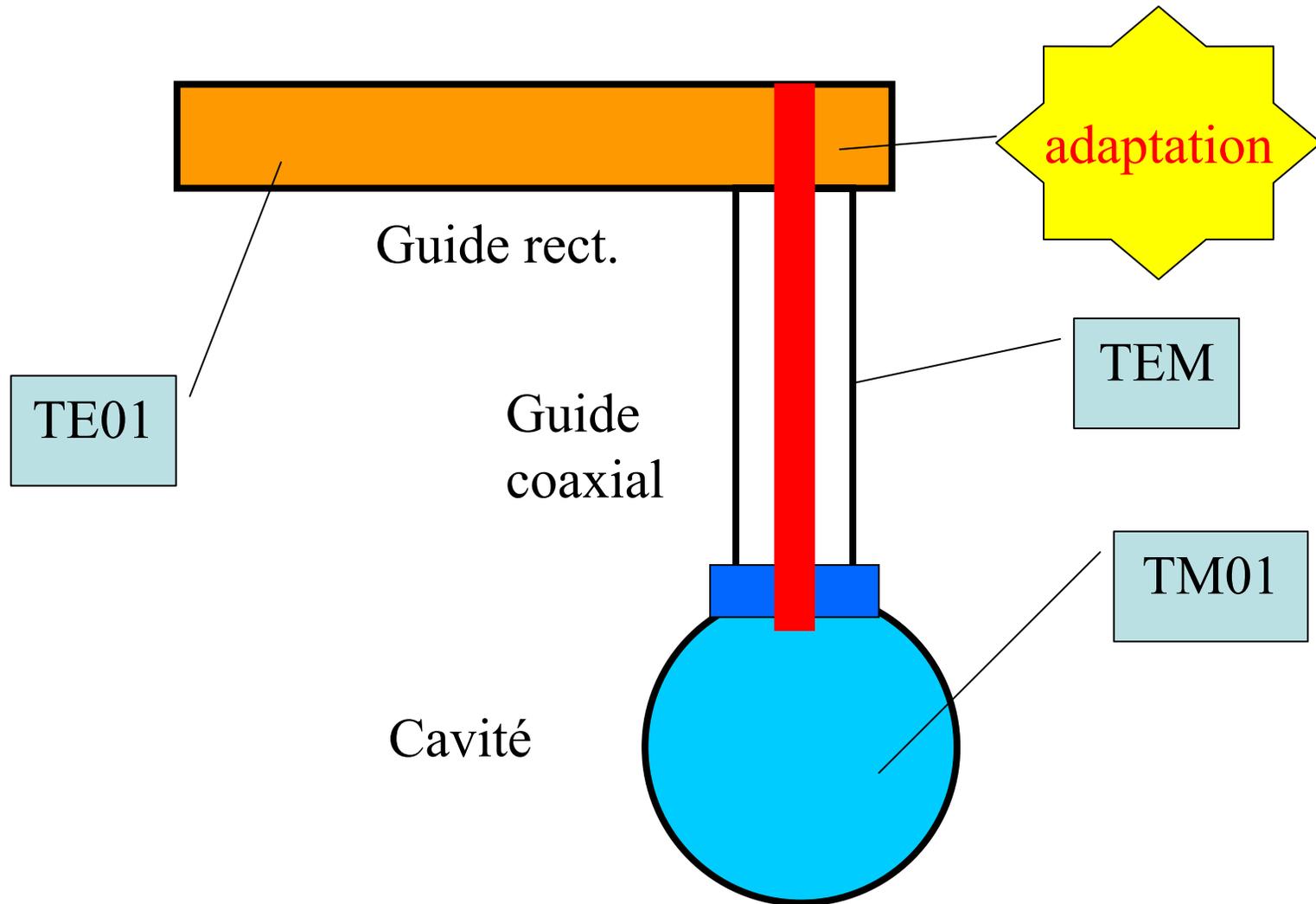
$$L = \frac{\mu}{2\Pi} \text{Ln} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$C = 2\Pi \varepsilon \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)$$

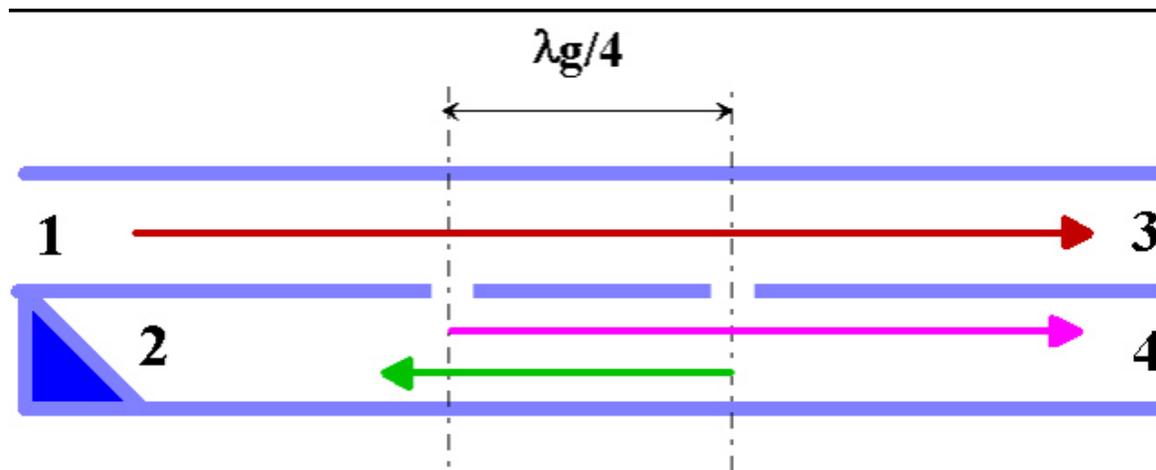
$$Z = \frac{1}{2\Pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$Z \approx 60 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \approx 138 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

Transformation de modes



Coupleur à 2 trous



Voie 3: $E_3 = E_1 - (e_1 + e_2)$

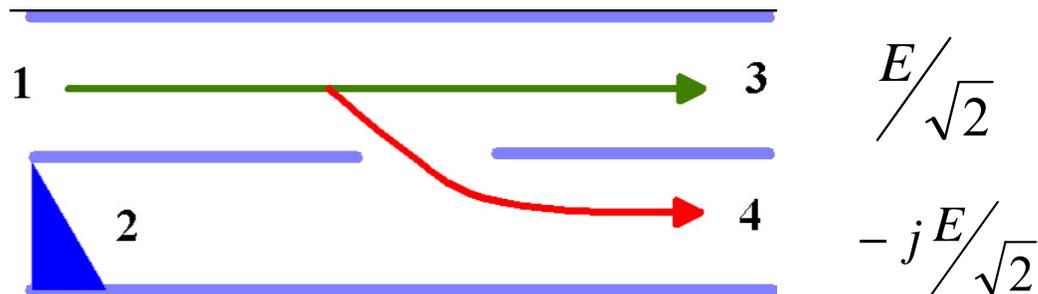
Voie 4: $E_4 = e_1 + e_2$

Voie 2: $E_2 = e_1 - e_2$

avec $e_1 = e_2 \Rightarrow E_2 = 0$

Coupleur Hybride

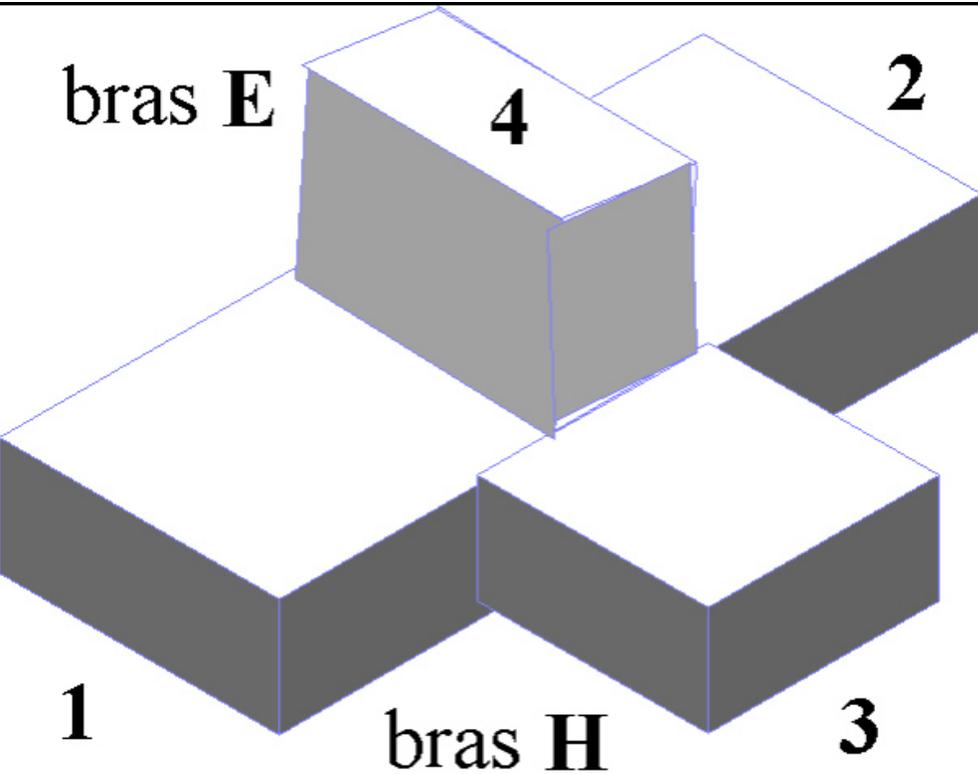
- Une jonction à 4 voies forme un **octopôle**
- Théorème : Si les 4 voies sont simultanément adaptées, il forme un **coupleur directif**



- 1) E_1 se divise entre E_3 et E_4 et $E_2=0$
- 2) E_1 se divise entre E_2 et E_4 et $E_3=0$
- 3) E_1 se divise entre E_2 et E_3 et $E_4=0$

**Sorties en
quadrature
de phase**

“Té” magique



Entrée en 4 : 1 et 2 en op. de phase 0 en 3

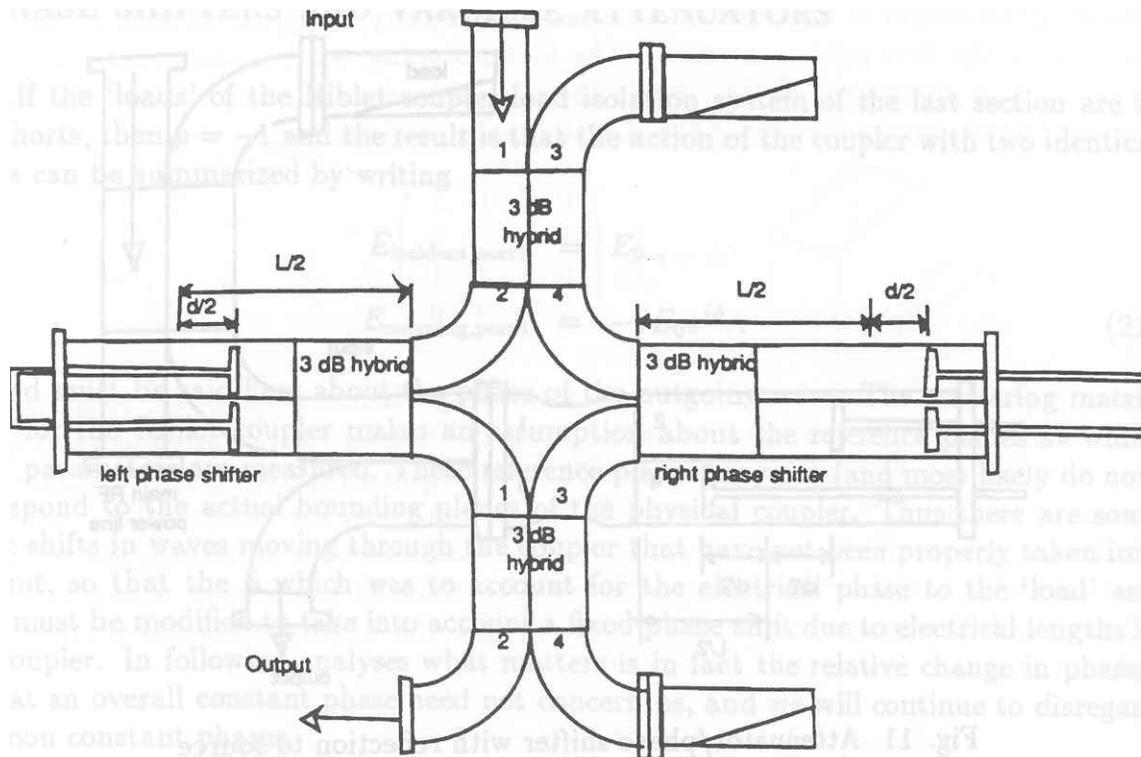
Entrée en 3 : 1 et 2 en phase, 0 en 4

Entrée en 1 et 2 :

$$\vec{E}_3 = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad \text{voie somme}$$

$$\vec{E}_4 = \vec{E}_1 - \vec{E}_2 \quad \text{voie difference}$$

Déphaseur / Circulateur



R.K. Cooper

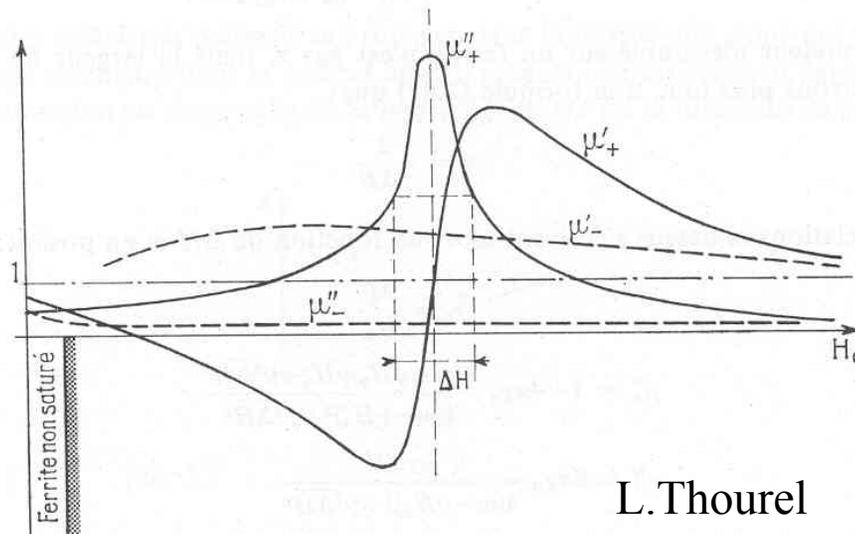
CAS RF Engineering 91

Emploi de ferrites

Ferrite : $\mu = \mu' + j\mu''$

Effet Faraday : Rotation de la polarisation d'une onde E.M. sous l'effet d'un champ magnétique

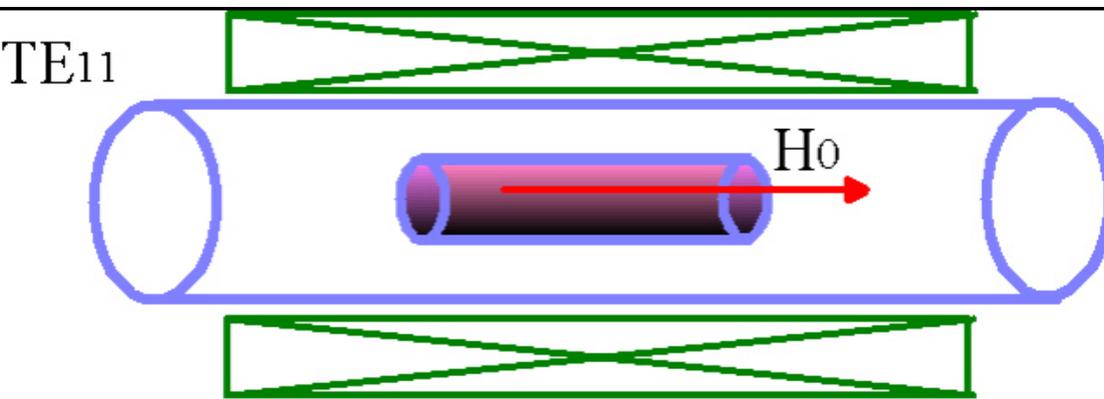
Effet gyromagnétique : Mouvement de précession de spin $\mu''_+ \neq \mu''_-$ **Effet non réciproque**



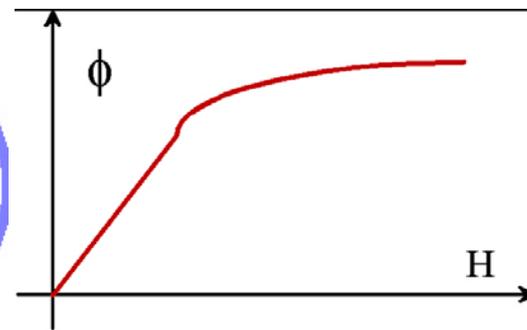
L.Thourel

Dispositifs à ferrites pour micro-ondes

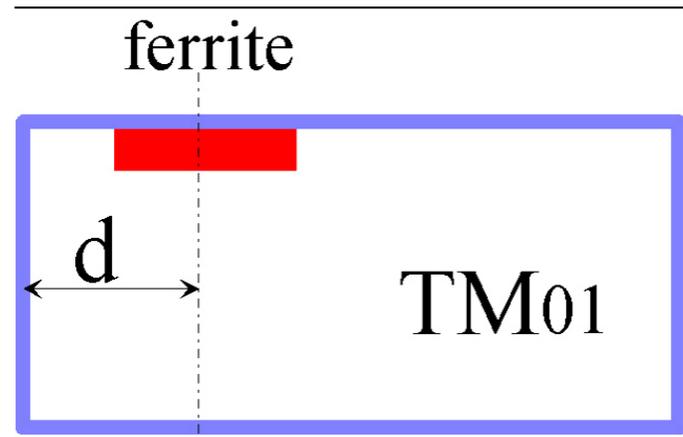
Déphaseur / Ligne directionnelle



Déphaseur



Ligne directionnelle

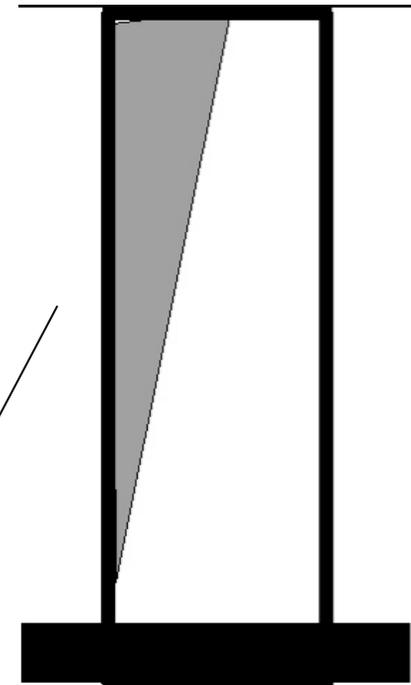


Charges adaptées (1)

Charges de mesures :

- Charges non refroidies ou refroidies à l'air
- Large bande
- Peuvent être ajustables
- Faible puissance qq 100 W

Elément
absorbant



Charges adaptées (2)

Charges de puissance:

- Charges refroidies à l'eau
- bande étroite
- Peuvent être utilisées pour des mesures de puissance
- qq 10 kW en CW, qq 10 MW en impulsion

$$P = q \times C \times \Delta t$$

$$C = 4,2 \text{ k J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

