

FROM RESEARCH TO INDUSTRY



# ETUDE THÉORIQUE, NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE D'UN KLYSTRON 12 GHZ HAUT RENDEMENT

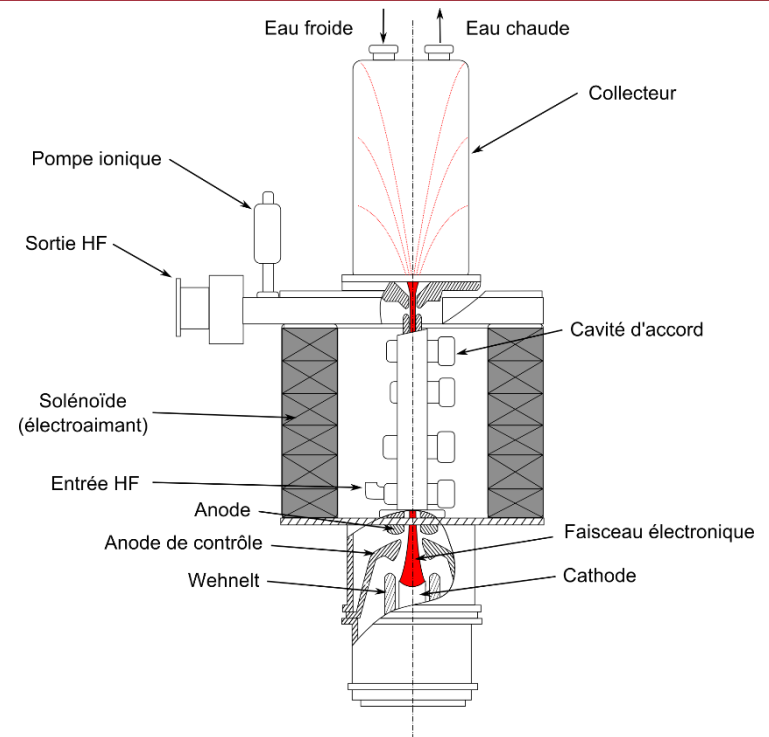
Journées Accélérateurs de Roscoff | Mollard Antoine [antoine.mollard@cea.fr](mailto:antoine.mollard@cea.fr)

1. Le principe du klystron
2. L'accélérateur CLIC et le développement d'une source radiofréquence à haut rendement
3. Le principe du kladistron ou klystron haut rendement
4. Le klystron TH2166 et le kladistron de démonstration

# **1. LE PRINCIPE DU KLYSTRON**

# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

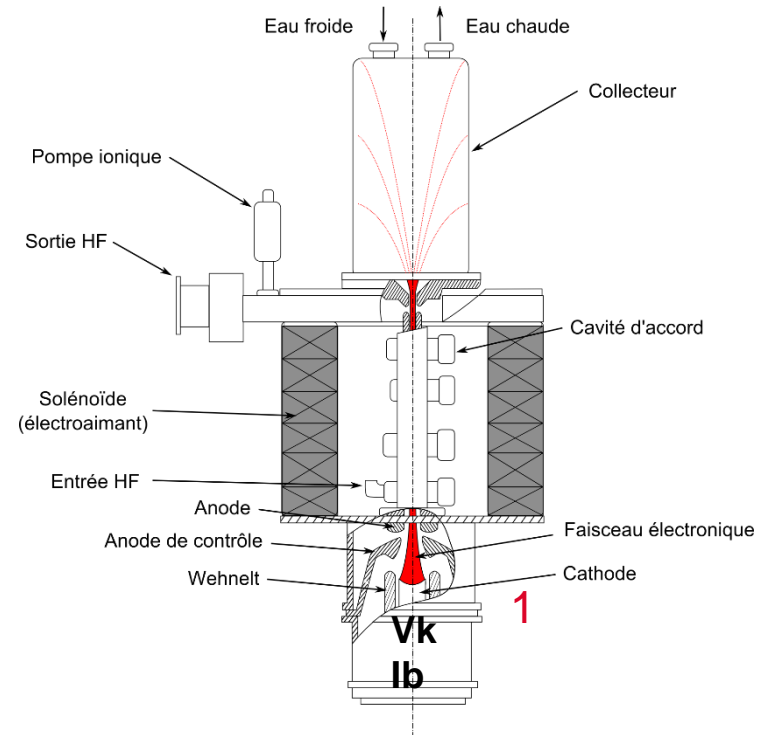
Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

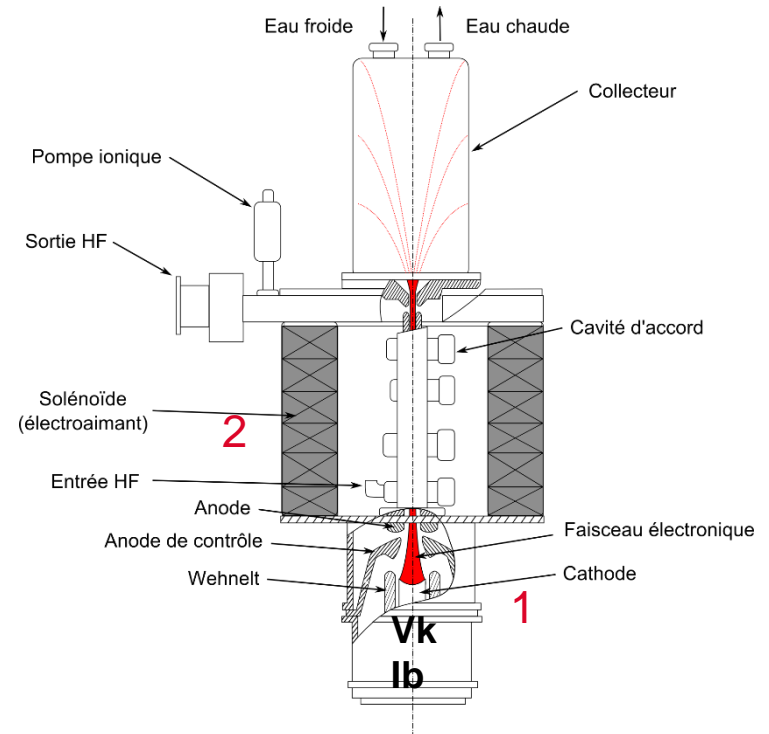
1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

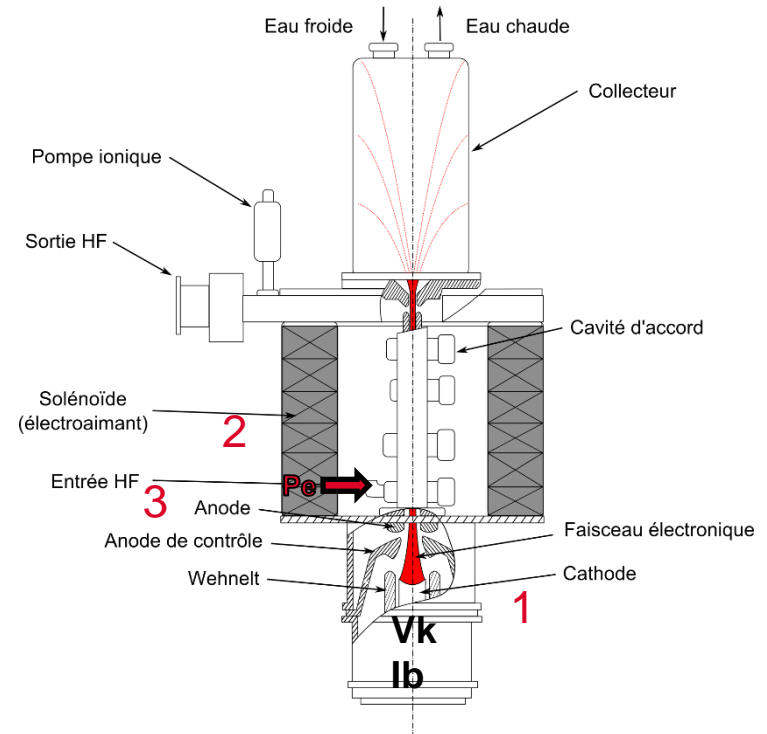
1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

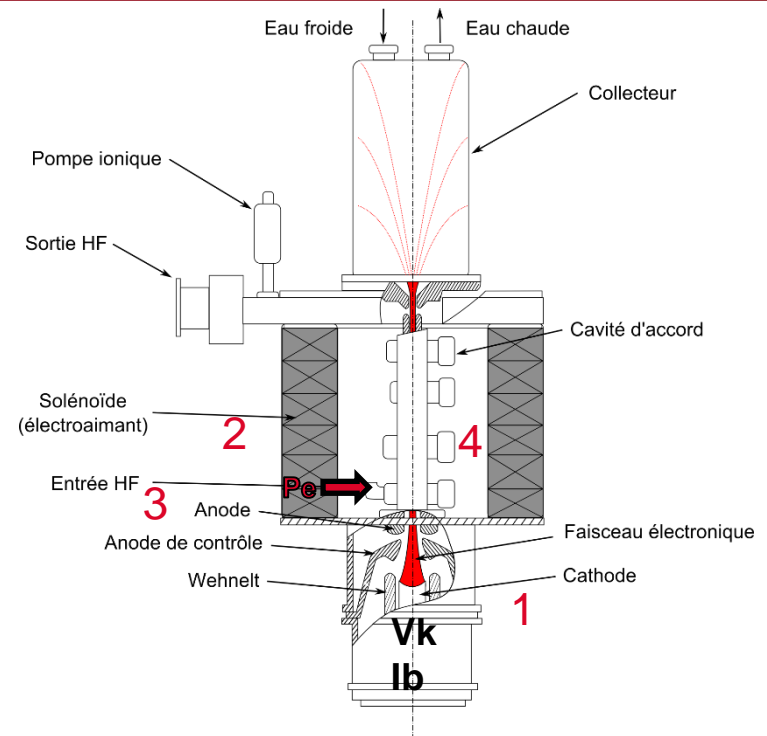
1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité
4. Formation des paquets d'électrons par les cavités intermédiaires

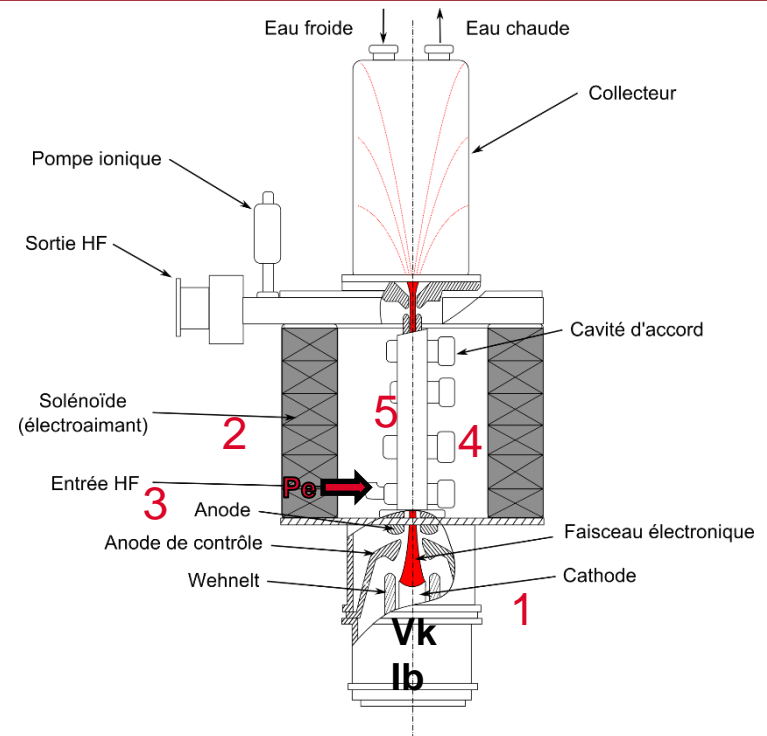




# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

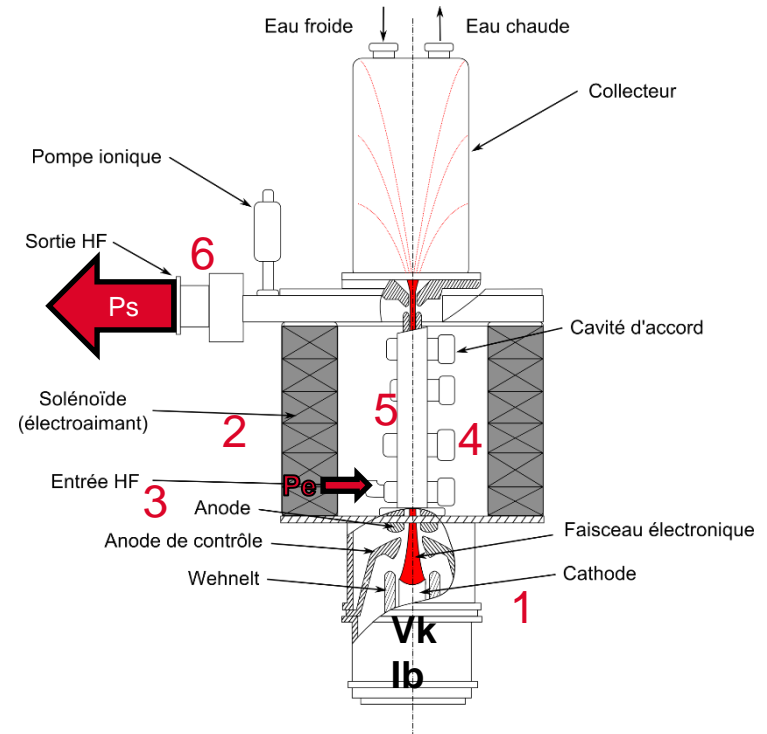
1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité
4. Formation des paquets d'électrons par les cavités intermédiaires
5. Glissement des paquets d'électrons entre les cavités.



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

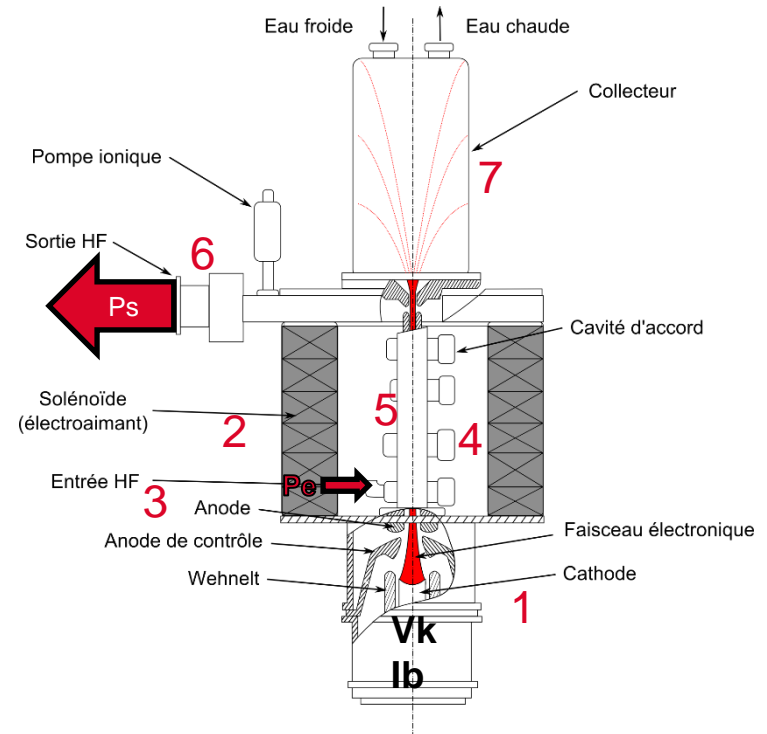
1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité
4. Formation des paquets d'électrons par les cavités intermédiaires
5. Glissement des paquets d'électrons entre les cavités.
6. Transfert d'énergie électromagnétique entre le faisceau et l'antenne de la cavité de sortie



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité
4. Formation des paquets d'électrons par les cavités intermédiaires
5. Glissement des paquets d'électrons entre les cavités.
6. Transfert d'énergie électromagnétique entre le faisceau et l'antenne de la cavité de sortie
7. Absorption des électrons par le collecteur

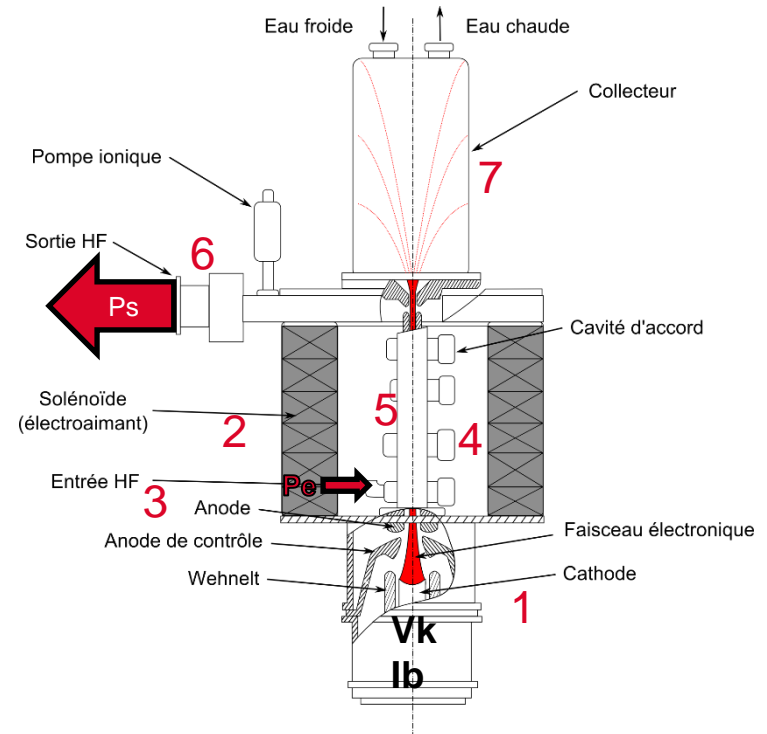


# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité
4. Formation des paquets d'électrons par les cavités intermédiaires
5. Glissement des paquets d'électrons entre les cavités.
6. Transfert d'énergie électromagnétique entre le faisceau et l'antenne de la cavité de sortie
7. Absorption des électrons par le collecteur

Le rendement du klystron est le rapport de la puissance RF en sortie ( $P_s$ ) sur la puissance fournie par le canon.



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

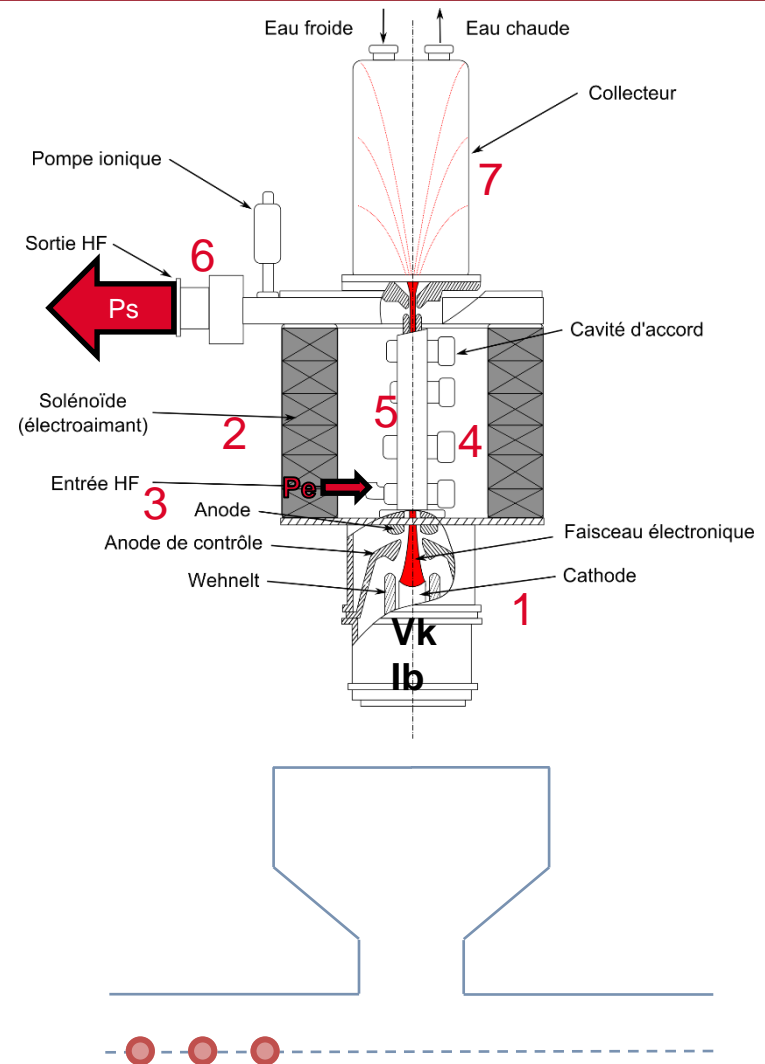
Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité
4. Formation des paquets d'électrons par les cavités intermédiaires
5. Glissement des paquets d'électrons entre les cavités.
6. Transfert d'énergie électromagnétique entre le faisceau et l'antenne de la cavité de sortie
7. Absorption des électrons par le collecteur

Le rendement du klystron est le rapport de la puissance RF en sortie ( $P_s$ ) sur la puissance fournie par le canon.

$$\eta = \frac{P_s}{V_k * I_b}$$

$$\mu P = \frac{I_b * 10^6}{V_k^{3/2}}$$



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

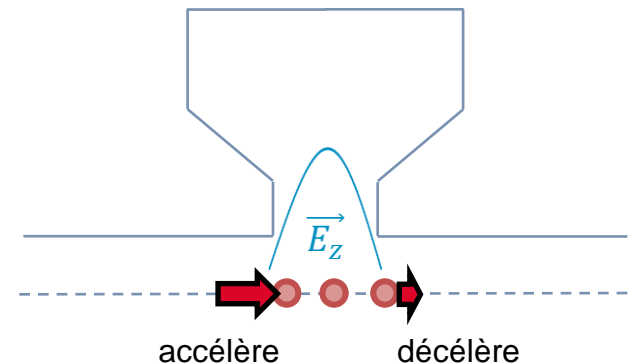
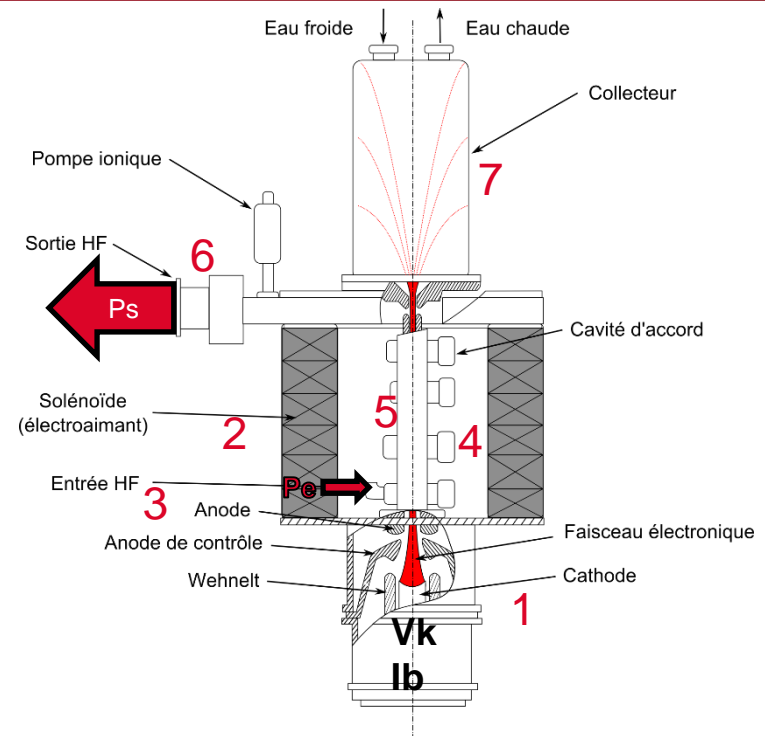
Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité
4. Formation des paquets d'électrons par les cavités intermédiaires
5. Glissement des paquets d'électrons entre les cavités.
6. Transfert d'énergie électromagnétique entre le faisceau et l'antenne de la cavité de sortie
7. Absorption des électrons par le collecteur

Le rendement du klystron est le rapport de la puissance RF en sortie ( $P_s$ ) sur la puissance fournie par le canon.

$$\eta = \frac{P_s}{V_k * I_b}$$

$$\mu P = \frac{I_b * 10^6}{V_k^{3/2}}$$



# LE PRINCIPE DU KLYSTRON

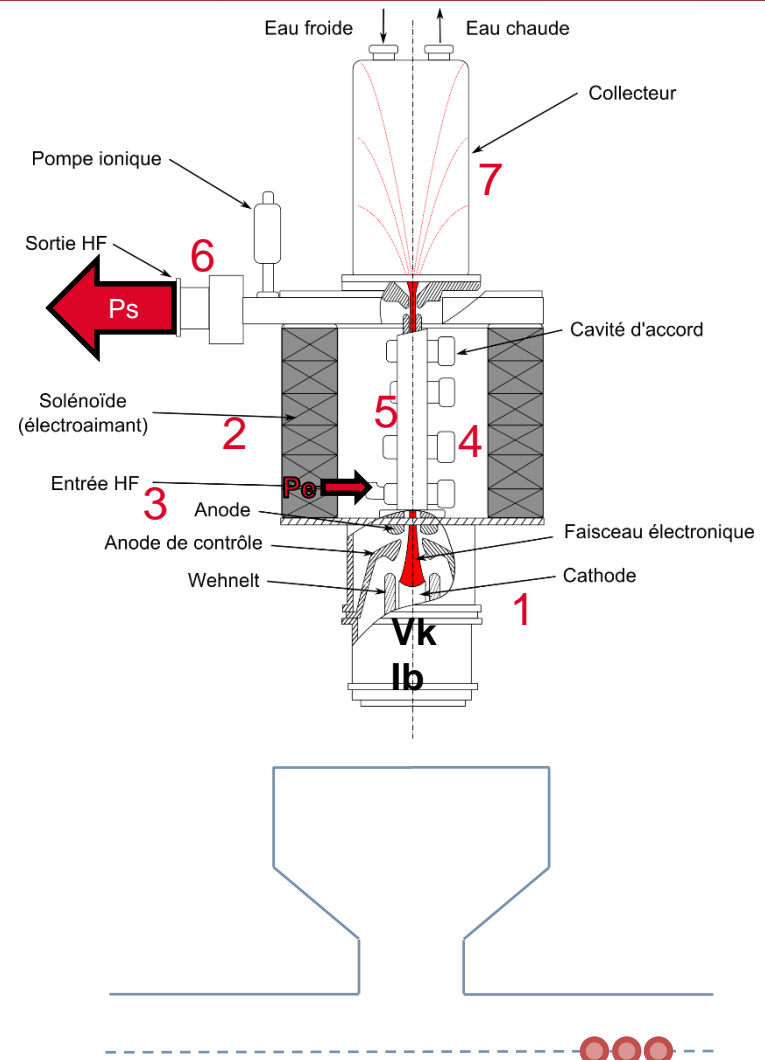
Tube électronique de faible bande passante amplifiant ou générant des micro-ondes (100MHz-100GHz), pour des puissances allant jusqu'à 100MW.

1. Création d'un faisceau d'électron (émission thermoïonique) par le canon électronique (tension cathode  $V_k$ , courant faisceau  $I_b$ )
2. Focalisation du faisceau par le champ magnétique généré par le solénoïde
3. Modulation du faisceau par le signal HF dans la première cavité
4. Formation des paquets d'électrons par les cavités intermédiaires
5. Glissement des paquets d'électrons entre les cavités.
6. Transfert d'énergie électromagnétique entre le faisceau et l'antenne de la cavité de sortie
7. Absorption des électrons par le collecteur

Le rendement du klystron est le rapport de la puissance RF en sortie ( $P_s$ ) sur la puissance fournie par le canon.

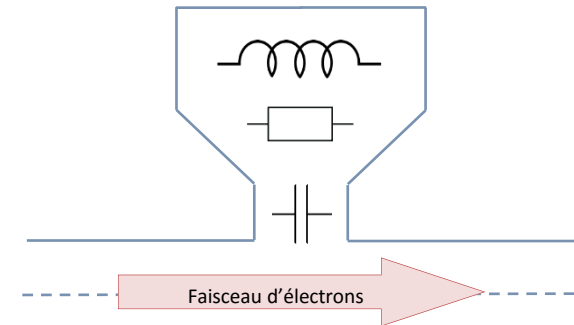
$$\eta = \frac{P_s}{V_k * I_b}$$

$$\mu P = \frac{I_b * 10^6}{V_k^{3/2}}$$



# MODÉLISATION DE LA CAVITÉ AVEC UN CIRCUIT RLC ÉQUIVALENT

- L'interaction faisceau/cavité peut être modélisée par un circuit RLC équivalent.
- Les paramètres de ce circuit dépendent des champs électriques et magnétiques et donc des dimensions et des matériaux des cavités.
- Ce modèle est utilisé dans certains codes tels que AJDisk et Klys2D.



$$Q_0 = \frac{R}{\omega_0 L} = \frac{\omega_0 \mu_0 \iiint |B|^2 dV}{\iint R_s |B|^2 dS}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\frac{R}{Q} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{|\int \vec{E} dz|^2}{\omega_0 \epsilon_0 \iiint |\vec{E}|^2 dV}$$



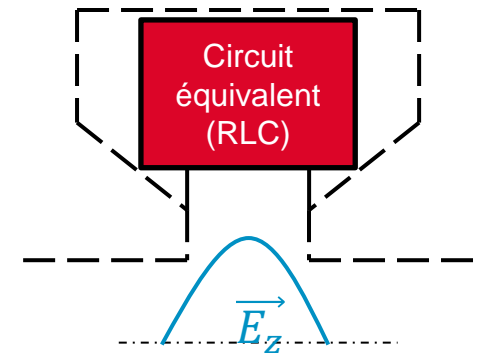
# LES CODES D'INTERACTION FAISCEAU/RF UTILISÉS POUR CALCULER LE RENDEMENT

- **AJDisk**

- Code 1D (SLAC)
- Pas de valeurs de champ magnétique nécessaire
- Cavités ramenées à des circuits RLC équivalents (f, R/Q, Q0, Qext)

- **KLYS2D**

- Code 2D (Thales Electron Devices)
- Valeurs de champ magnétique nécessaires
- Cavités ramenées à des circuits RLC équivalents (f, R/Q, Q0, Qext)



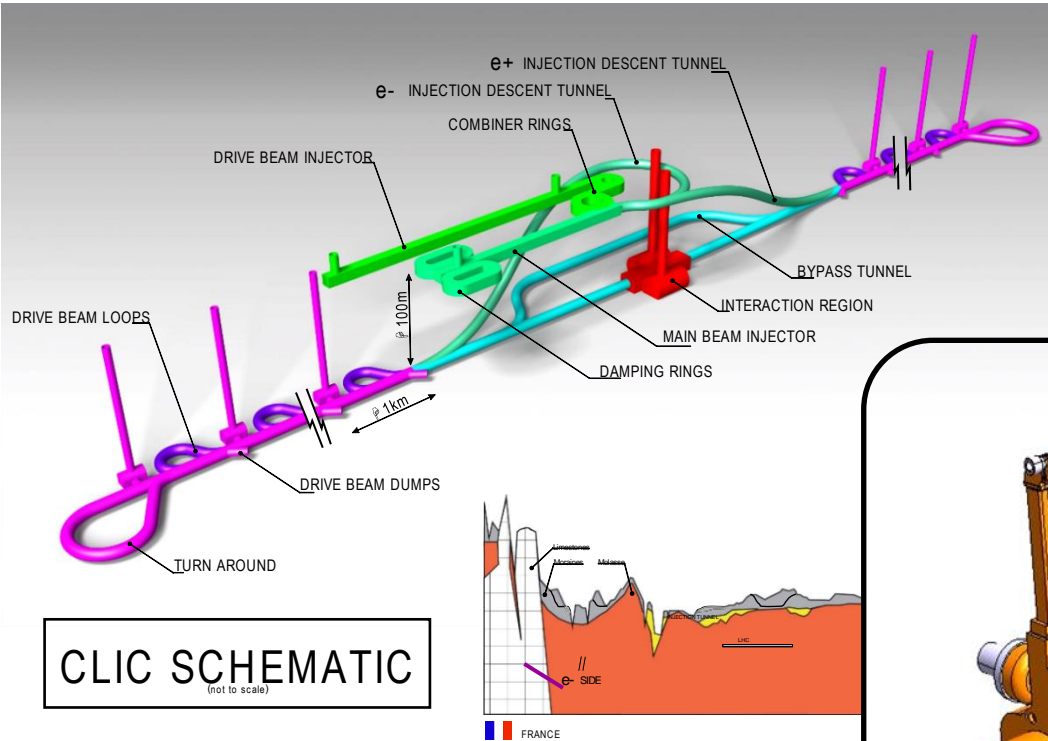
- **Magic2D**

- Code temporel 2D (ATK)
- Code à différences finies
- Valeurs de champ magnétique nécessaires
- Cavités des klystrons entièrement modélisées

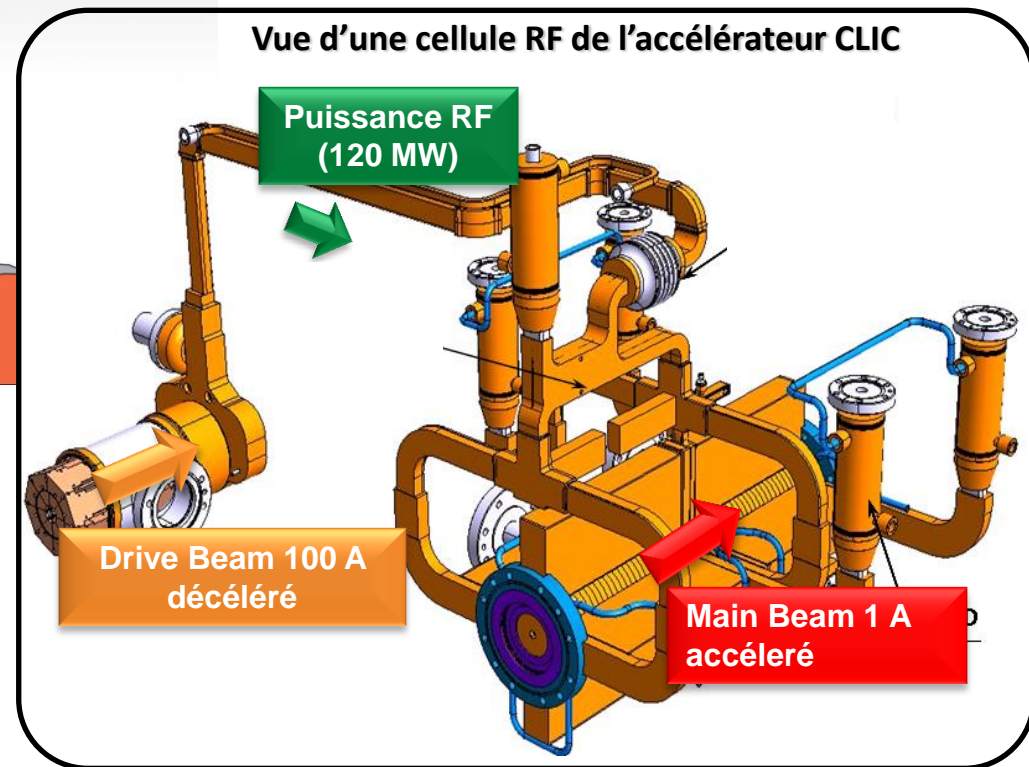
## **2. L'ACCÉLÉRATEUR CLIC ET LE DÉVELOPPEMENT D'UNE SOURCE RADIOFRÉQUENCE HAUT RENDEMENT**

CLIC : Compact Linear Collider: Accélérateur linéaire (3TeV) pour la collision électrons-positrons **sur 50 km.**

- L'accélérateur CLIC est composé de cavités décélératrices et accélératrices.
- On compte **120000 cavités accélératrices** pour la version 3 TeV.
- Ces nombreuses cavités seront conditionnées sur plusieurs bancs spécifiques nécessitant une source RF de forte puissance de type klystron.



Afin de **limiter** le nombre de stations de puissance (très coûteuses en investissement et en opération), le développement d'un **klystron à haut rendement** et donc à faible consommation d'énergie est nécessaire.



# LE PROJET DE KLYSTRON HAUT RENDEMENT

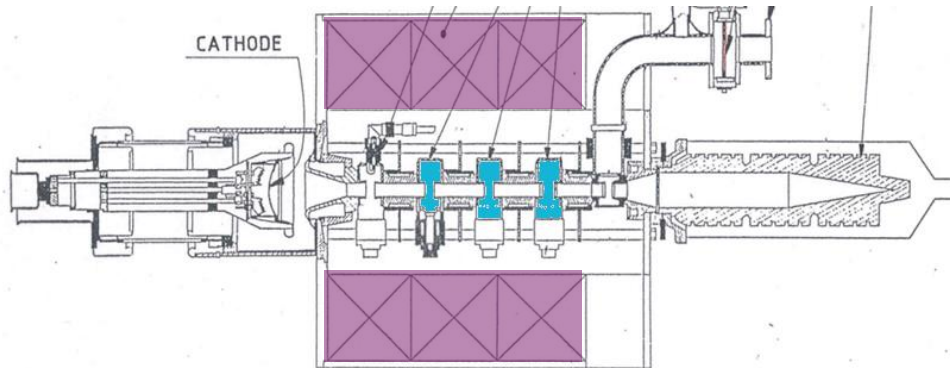
Le travail de thèse consiste à développer une source de puissance RF haut-rendement.

Ce klystron mono-faisceau doit pouvoir fournir un signal RF à une fréquence 12GHz. Ce signal doit être pulsé avec une période de  $4.5\mu\text{s}$  et une puissance crête de 10 à 12MW.

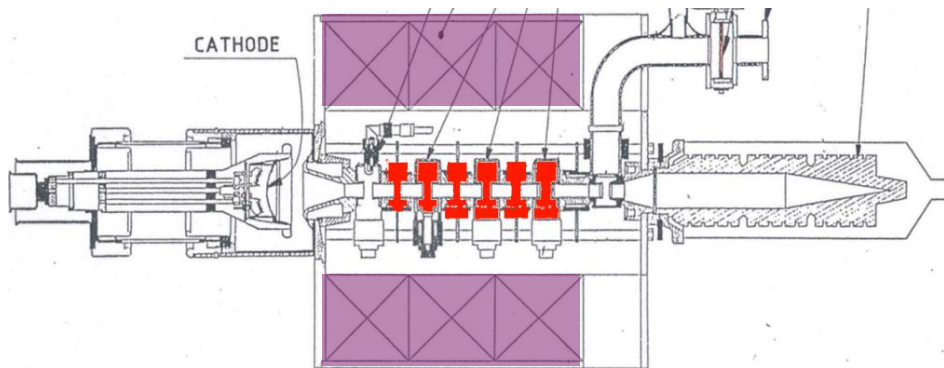
L'objectif est d'atteindre avec ce klystron un rendement supérieur à 70%.

### **3. LE PRINCIPE DU KLADISTRON OU KLYSTRON HAUT RENDEMENT**

# LE KLADISTRON

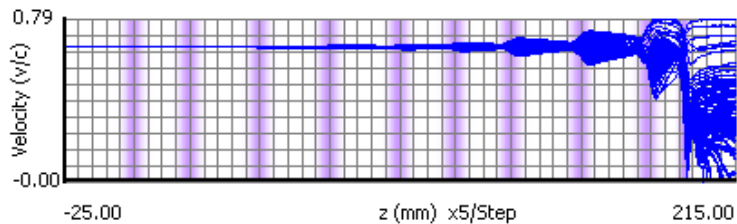
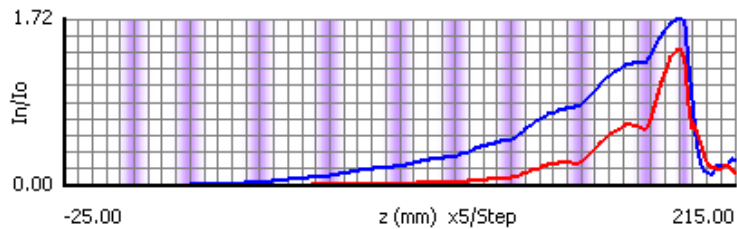
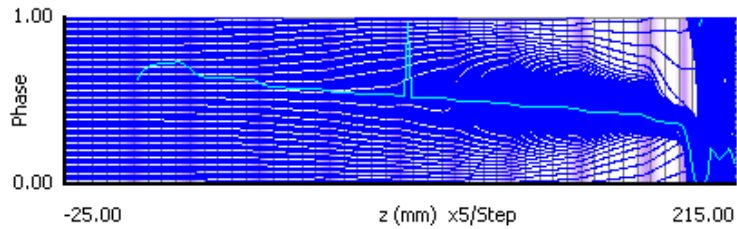


$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\text{cavités}} \nearrow \\ \frac{R}{Q} \searrow \end{array} \right. \Rightarrow \text{Rendement } (\eta) \nearrow$$



Un Kladiatron (Kl-adi(adiabatique)-stron) est un klystron haut-rendement pourvu d'un nombre important de cavités (au moins deux fois plus que dans un klystron conventionnel).

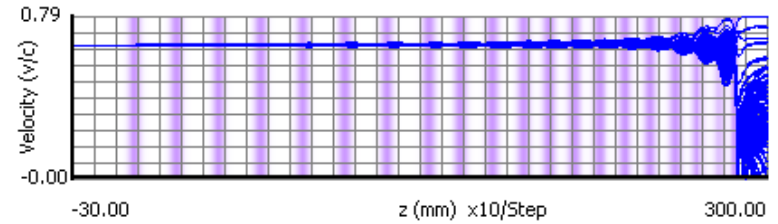
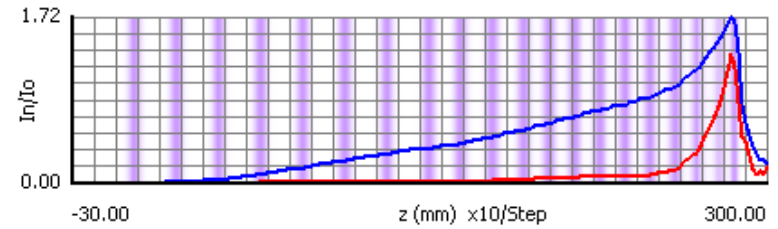
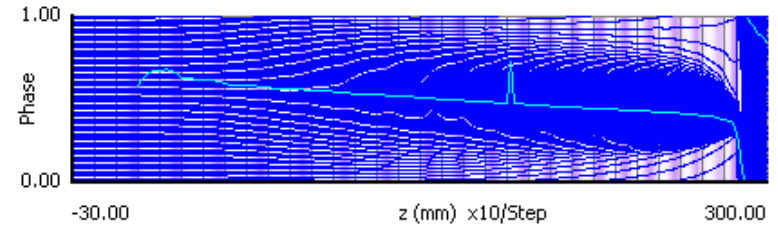
L'idée est ici de moduler de façon progressive le faisceau d'électrons au moyen d'un nombre important de cavités.



**10 cavités**

**Rendement supérieur à 60%**

Longueur 197 mm



**20 cavités**

**Rendement supérieur à 70%**

Longueur 285 mm

Les cavités de ce design sont faiblement couplées au faisceau (R/Q faible).

## Klystron Efficiency vs. Perveance

« KLADISTRON »  
12GHz

« KLADISTRON »  
4.9GHz pour  
démonstration  
technique

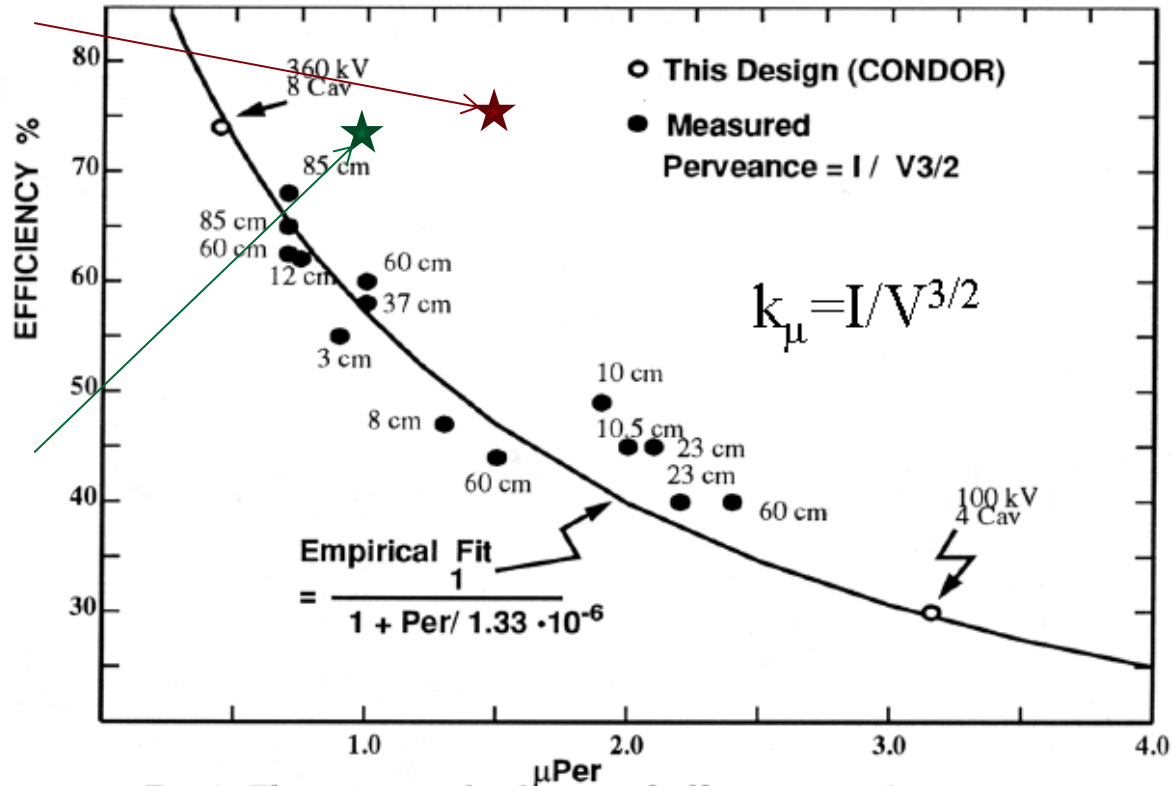


Fig.1 The empirical relation of efficiency to the perveance.

Taken from R. Palmer, *et al*, "Status of the BNL-MIT-SLAC Cluster Klystron Project", AIP Conf. Proc. 337, p. 94ff, (1994).



## **4. LE KLYSTRON TH2166 ET LE KLADISTRON DE DÉMONSTRATION**



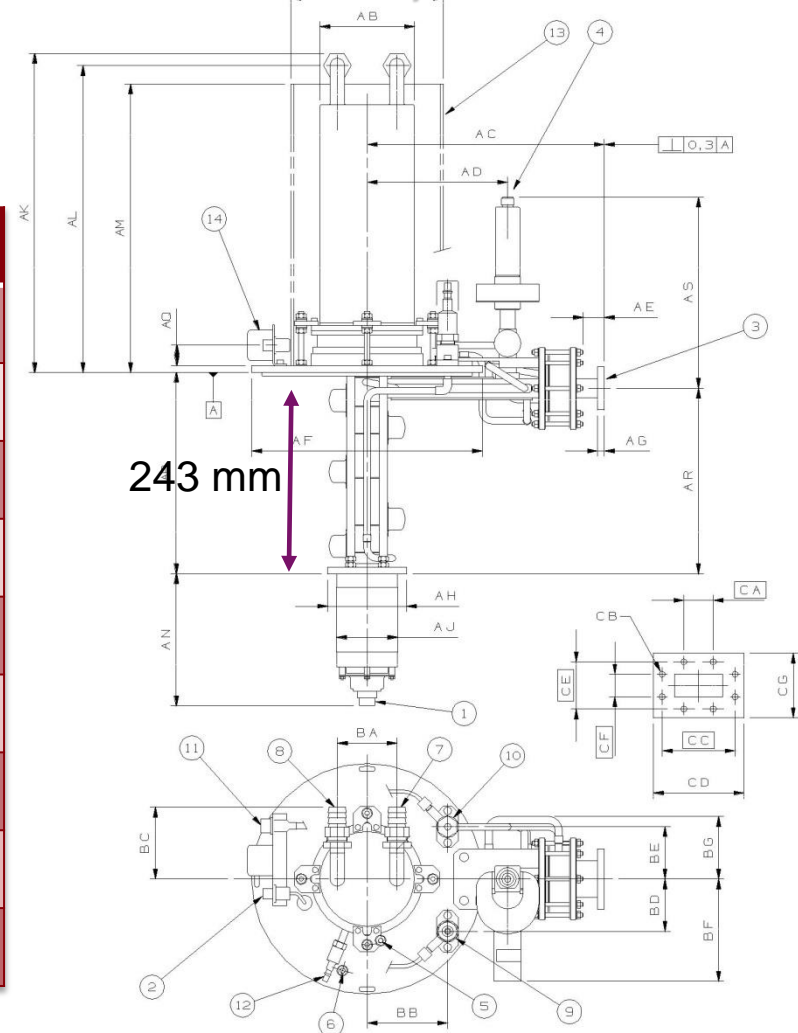
Le klystron TH2166 a été conçu par Thales pour le microtron de Mayence.

## Caractéristiques

Fréquence	4.9 GHz
Puissance de sortie	56 kW
Rendement	50%
V <sub>k</sub>	26 kV
μP	1.066
Champs magnétique maximal	0.27 T
Gain	>40 dB
Nombre de cavités	6
Longueur de la ligne d'interaction	243mm

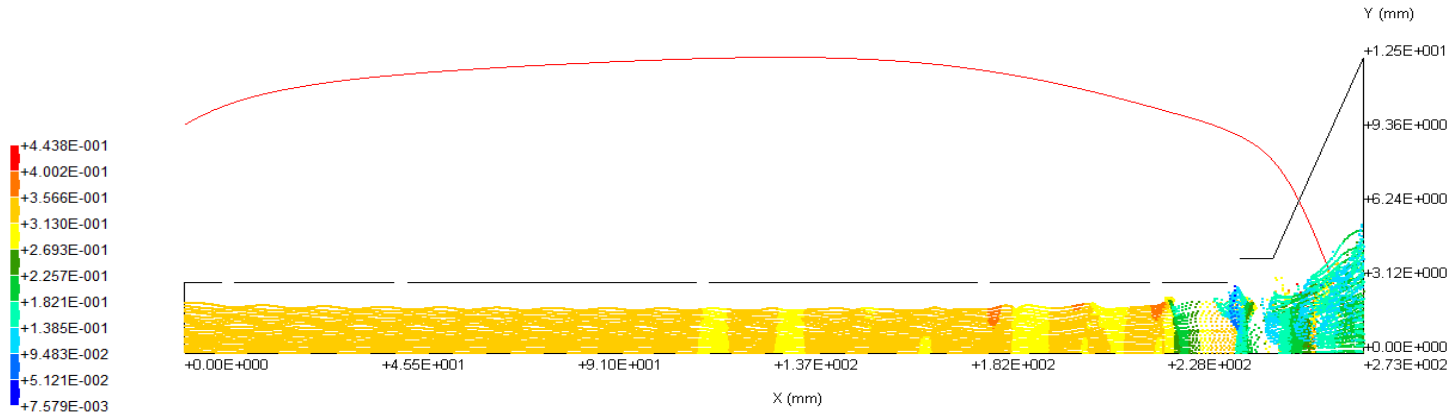
Ce klystron sera modifié pour démontrer expérimentalement le principe du kladistron.

Vue de face du klystron TH2166

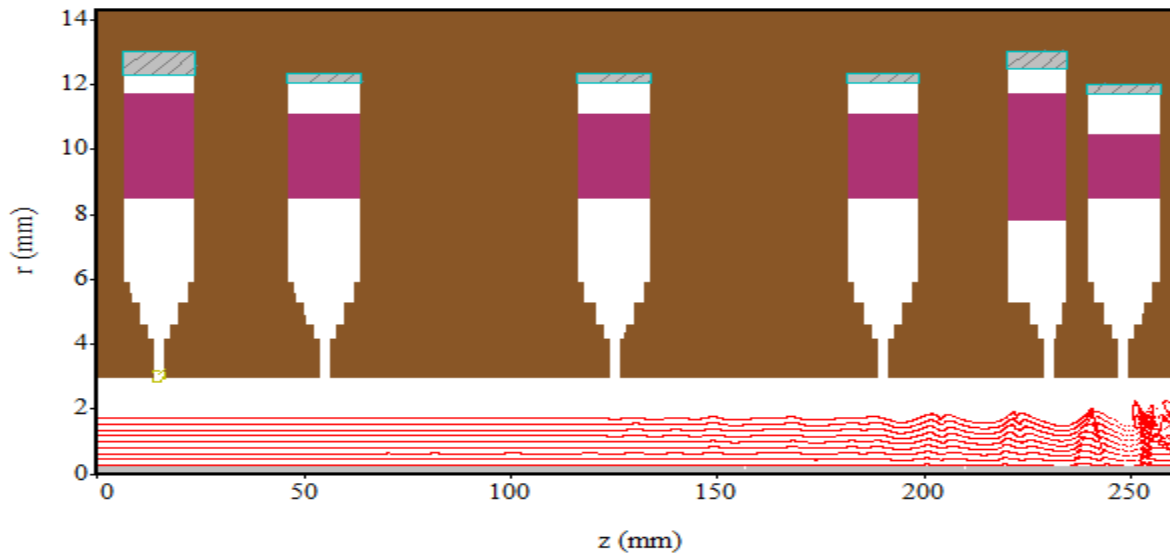


# TRAJECTOIRES DES ÉLECTRONS DANS LE KLYSTRON TH2166

Validation par comparaison des codes



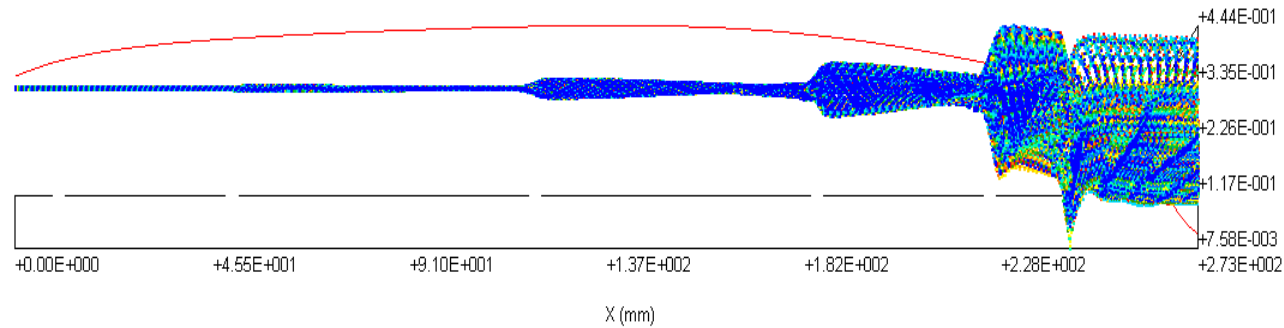
Klys2D  
(Thales)



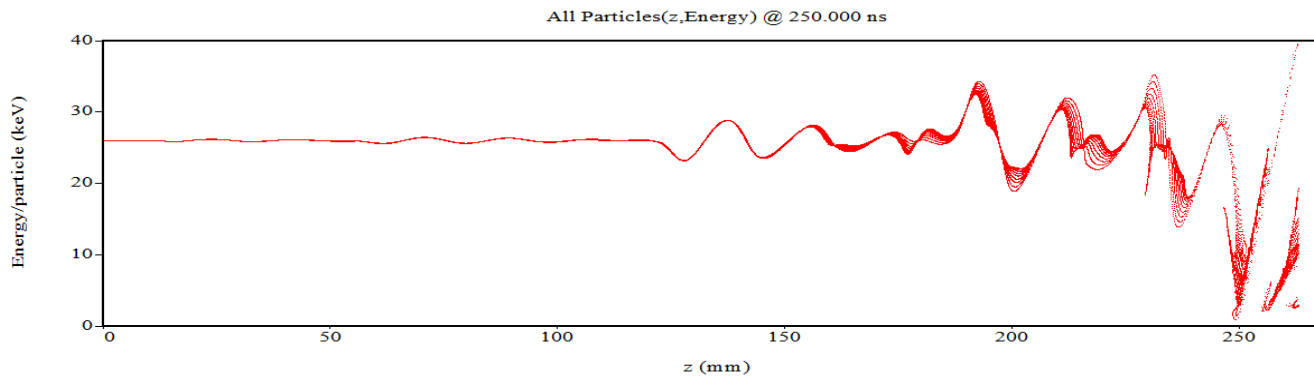
MAGIC2D

# DISPERSIONS DES VITESSES DES ÉLECTRONS DANS LE KLYSTRON TH2166

Validation par comparaison des codes



Klys2D  
(Thales)



MAGIC2D

# RÉSULTATS DE TESTS ET DE SIMULATIONS DU KLYSTRON TH2166 - VALIDATION DES CODES

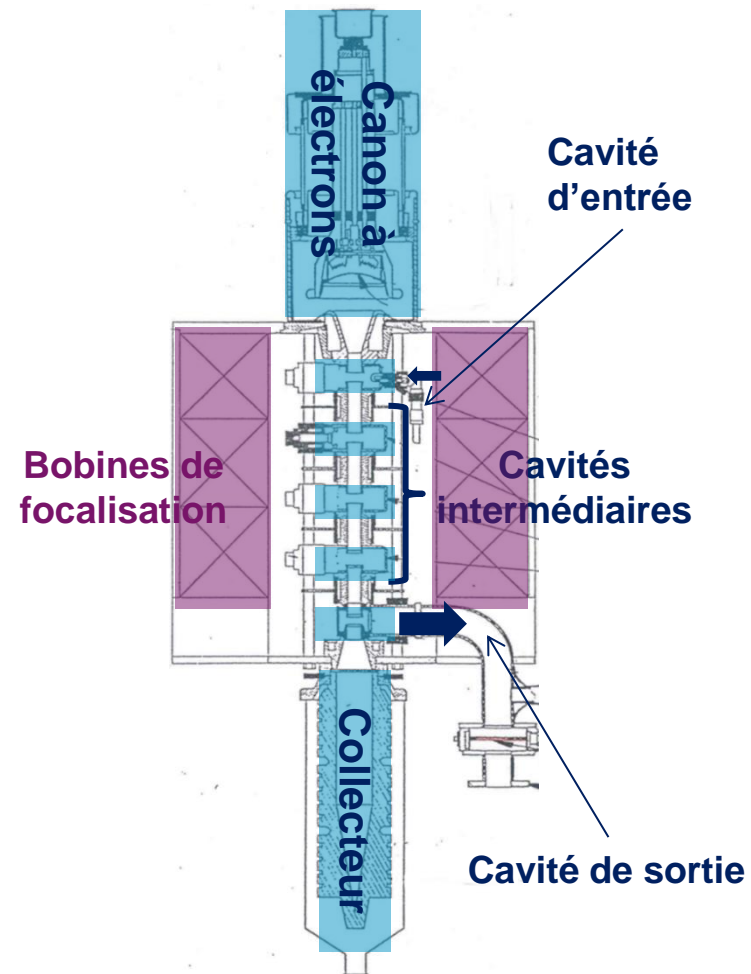
Code/Tests	Rendement	Puissance d'entrée à saturation	Gain
<i>AJDisk</i>	55.0%	2.5W	43.8dB
Klys2D Chp B constant, faisceau initial uniforme	48.2%	0.6W	49.5dB
Klys2D Chp B variable, faisceau simulé par Optic2D	49.0%	0.5W	50.6dB
Tests (Thales)	46.1%	0.5W	53.5dB
MAGIC2D Chp B constant, faisceau initial uniforme	53.3%	0.5W	50.8dB

# AMÉLIORATION DU KLYSTRON TH2166

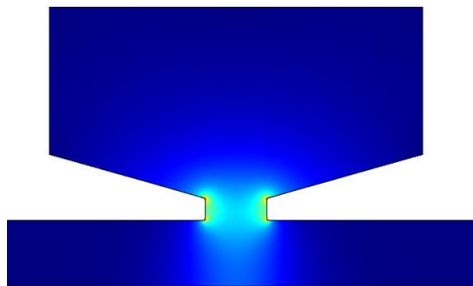
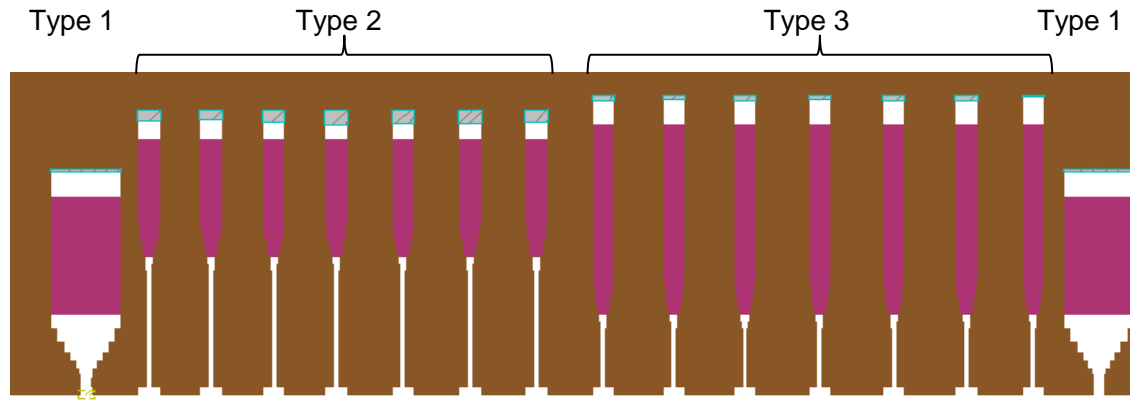
## CHOIX DES CAVITÉS

Le design des cavités intermédiaires doit :

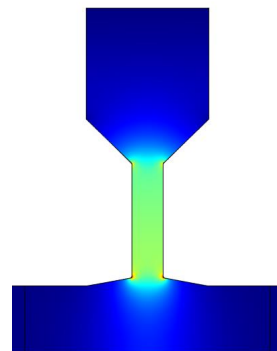
- Permettre l'utilisation des bobines de focalisation du klystron TH2166.  
→ *Longueur totale inférieure à 243mm*
- Permettre de mettre en œuvre le concept de kladistron.  
→ *Nombre total de cavités supérieur à 6*
- Eviter le couplage des cavités.  
→ *Espace entre les cavités supérieur à 9mm*
- Eviter les pics de gain hors bande.  
→ *Valeurs de  $R/Q$  et  $Q_0$  faibles*



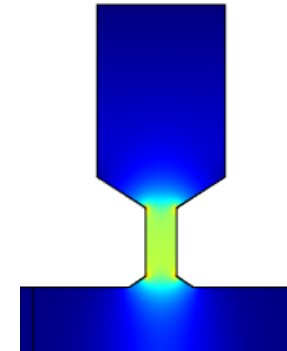
# AMÉLIORATION DU KLYSTRON TH2166 CHOIX DES CAVITÉS



Type 1

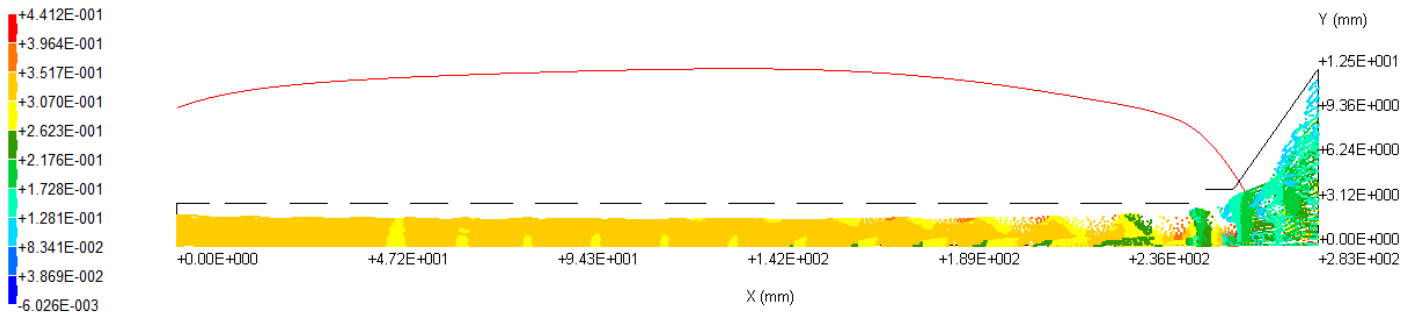


Type 2

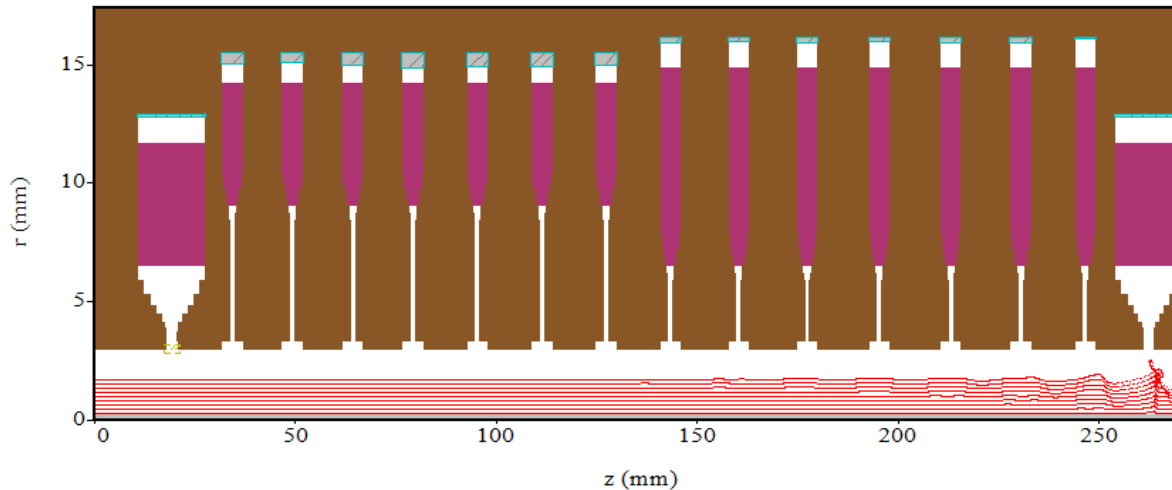


Type 3

# LE KLADISTRON TH2166 – SIMULATIONS



All Particles(z,r) @ 325.719 ns



Les simulations MAGIC2D nécessitent d'autres optimisations (collecteur, faisceau, champ magnétique)

## Klys2D

Chp B variable, faisceau simulé par Optic2D

Gain = 32dB

Pe,sat = 40W

$\eta=53\%$

## MAGIC2D

Chp B constant, faisceau initial uniforme

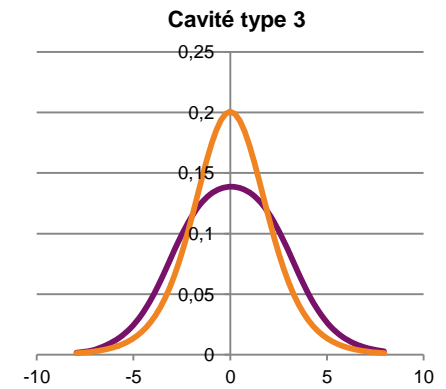
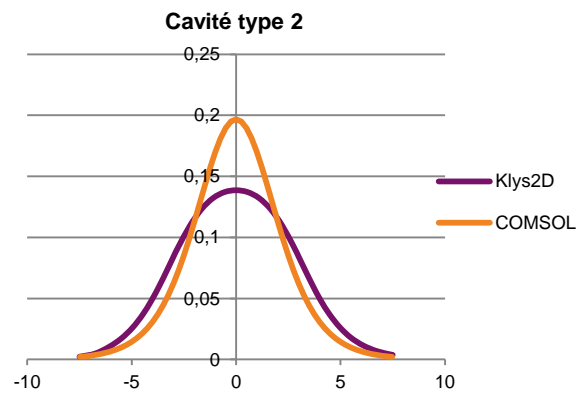
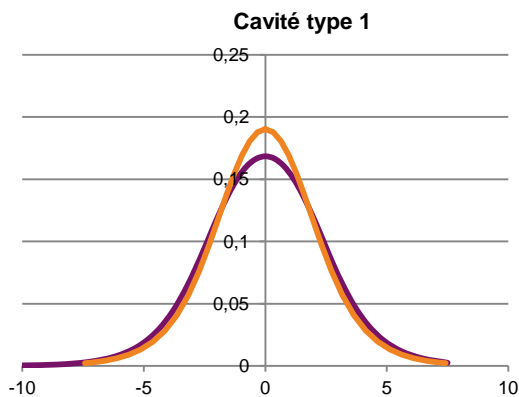
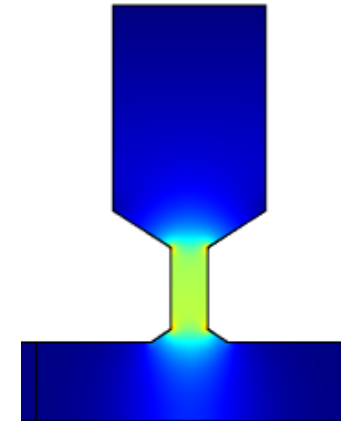
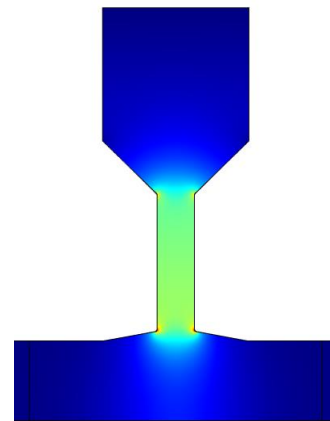
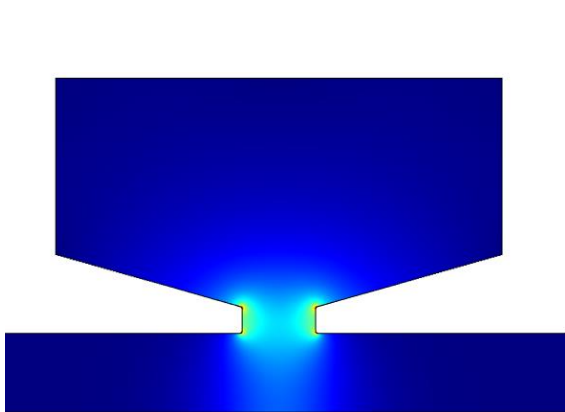
Gain = 44,2dB

Pe,sat = 2,5W

$\eta = 59,2\%$



# CHAMP ÉLECTRIQUE SUR L'AXE AU PASSAGE DES CAVITÉS DU KLADISTRON COMPARAISON COMSOL/KLYS2D



Le champ électrique sur l'axe au passage de la cavité de type 1 est le même dans Klys2D et dans COMSOL. En revanche, il est bien différent au passage des cavités de type 2 et 3, la forme des cavités n'étant pas conventionnelle pour klys2D.

- ✓ Etude du Klystron TH2166
- ✓ Validation des codes de calcul
- ✓ Design du Kladistron TH2166
- ❑ Amélioration des simulations  
Intégration du champ magnétique variable et du faisceau issu du canon à électrons dans MAGIC2D
- ❑ Lancement de la phase de conception des cavités du kladistron
- ❑ Etude des cas d'instabilités dus à l'excès de gain des cavités
- ❑ Optimisation de la mise en paquets des électrons

**Merci de votre attention**