



Quelle Alimentation pour quel Plasma: Générateurs Micro-ondes pour la production de plasma

François Silva

LPICM - UMR 7647, Ecole Polytechnique, Route de Saclay, 91128 Palaiseau

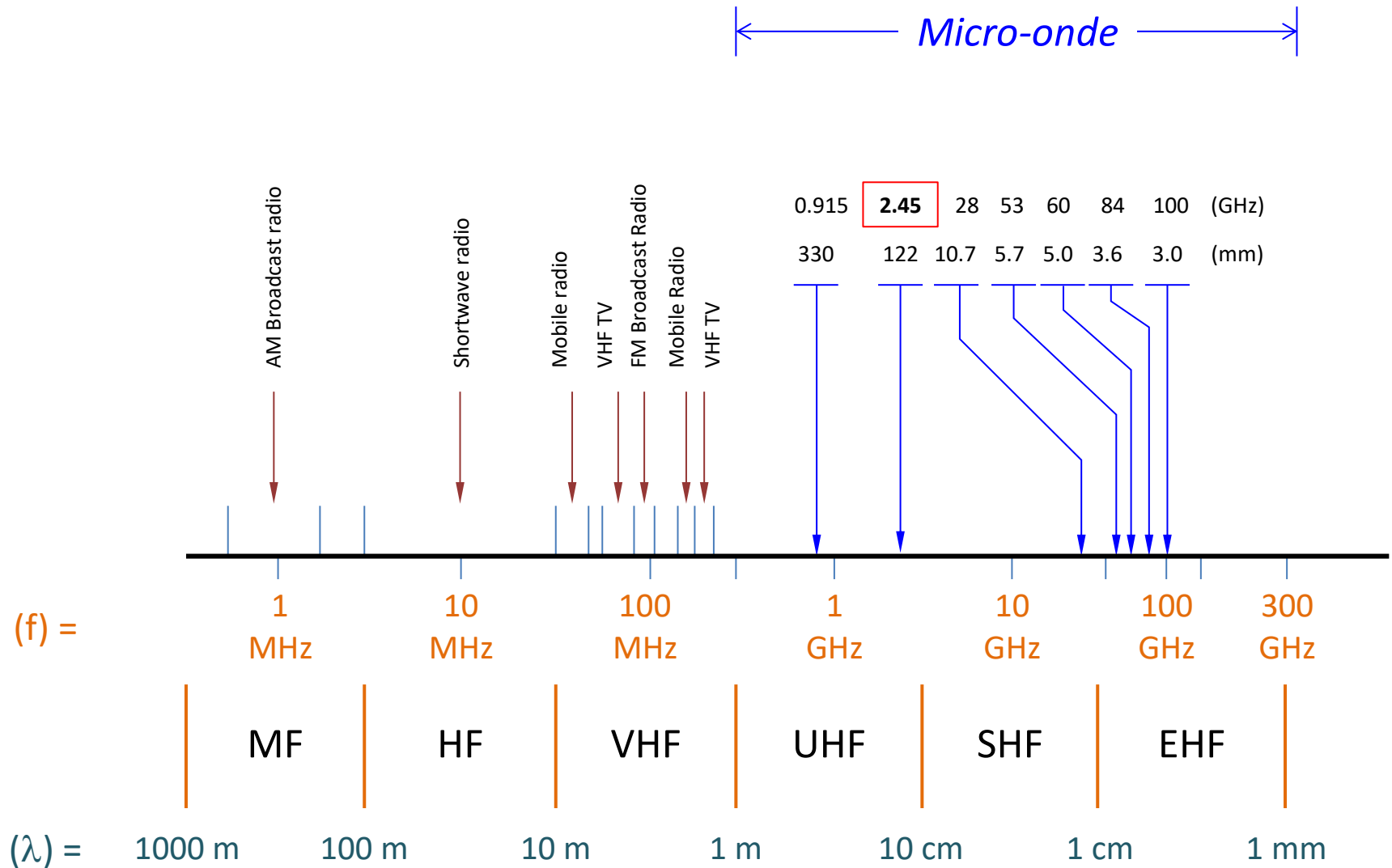
Action Nationale de Formation

1 au 3 Avril 2019, GREMI (Orléans)

Plan

1. *Introduction sur les plasmas micro-ondes*
2. *Systèmes micro-ondes*
 - *Générateurs*
 - *Magnétron*
 - *Alimentation à Transformateur*
 - *Alimentation à Découpage*
 - *Solid State*
 - *Lignes de transmission*
 - *Coupleurs directionnels*
 - *Adaptation d'impédance*
 - *Systèmes de couplage*
3. *Exemple de réacteur à plasma micro-onde*
 - *Cavités*
 - *Plasmas distribués*
 - *Plasmas ECR*
4. *Conclusion*

Introduction: Temps - Fréquence



Introduction: Temps - Fréquence

Pour une excitation **basse fréquence** dans un **plasma non-collisionnel**, **les électrons et les ions** sont perdus principalement aux parois. Pour une chambre de quelques centimètres de long, **les électrons** la traversent en 20 à 100 μs .

Donc pour :

- $f < 10$ kHz (quasi statique) : **le plasma s'éteint entre les cycles.**
- $f > 100$ kHz (AC) : **le plasma est continu.**

En ce qui concerne **les ions**, ils se déplacent à leur vitesse thermique (qq 100 m/s). Pour une épaisseur de gaine non-collisionnelle de 0.5 à 2.5 mm, les ions la traversent en 0,5 à 2,5 μs . Donc pour :

- $f < 1$ MHz, les ions traversent la gaine en moins d'un cycle RF et **suivent instantanément le potentiel de gaine.**
- $f > 10$ MHz, les ions prennent plusieurs cycles RF pour traverser la gaine et « **voient** » **un potentiel moyenné dans le temps.**

Particularités des plasmas micro-ondes

Lorsque $\omega > \omega_{pe} > \omega_{pi}$

ni les électrons, ni les ions ne peuvent suivre les variations du champ E (l'onde excitatrice, ne génère pas de variation temporelle significative de charge d'espace; on a un comportement de **décharge quasi-continu**).

En raison de la plus **haute fréquence d'excitation**, **les électrons** traversent une distance plus courte (par rapport à une excitation RF) avant de changer de direction. Ceci implique que peu d'électrons atteignent la surface au cours d'un cycle MW, **minimisant les effets de charge**.

La surface présente un potentiel quasi nul.

Il n'y a pas de bombardement ionique indésirable de la surface. De fait, il n'y a pas de phénomènes de pulvérisation ou de contamination des surfaces.

Avantages et Inconvénients

Les plasmas micro-ondes ne nécessitent **pas d'électrodes** (aucune partie métallique n'est en contact avec le plasma).

Les plasmas **micro-ondes** sont donc « **isotropes** » par nature et conviennent parfaitement pour les applications en **microélectronique** (chip, MEMS ...) qui sont très sensibles aux défauts de surface induits par un bombardement ionique (ex: oxyde de grille des transistors).

Ils sont utilisés pour la **production d'espèces actives** (« remote plasma »), les **procédés de nettoyage** de surface, de **passivation** et **fonctionnalisation** de surface, de **délaquage**, de **gravure**, de **dépôt** de couches minces...

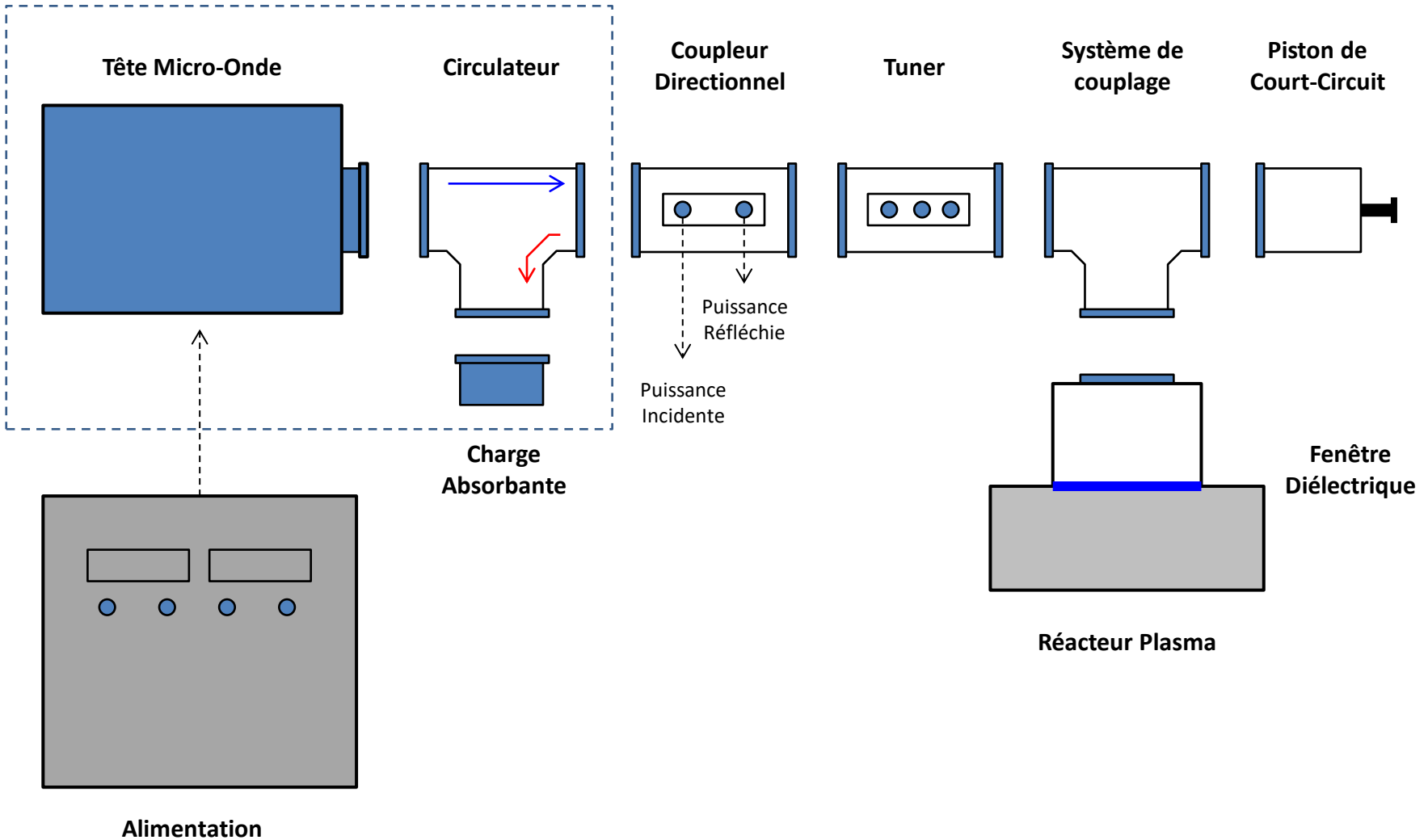
Les sources plasma sont en général **compactes** et permettent d'obtenir de **fortes densités plasma**.

Cependant, il est **difficile d'obtenir des plasmas homogènes, de grandes dimensions**, en utilisant une excitation micro-onde.

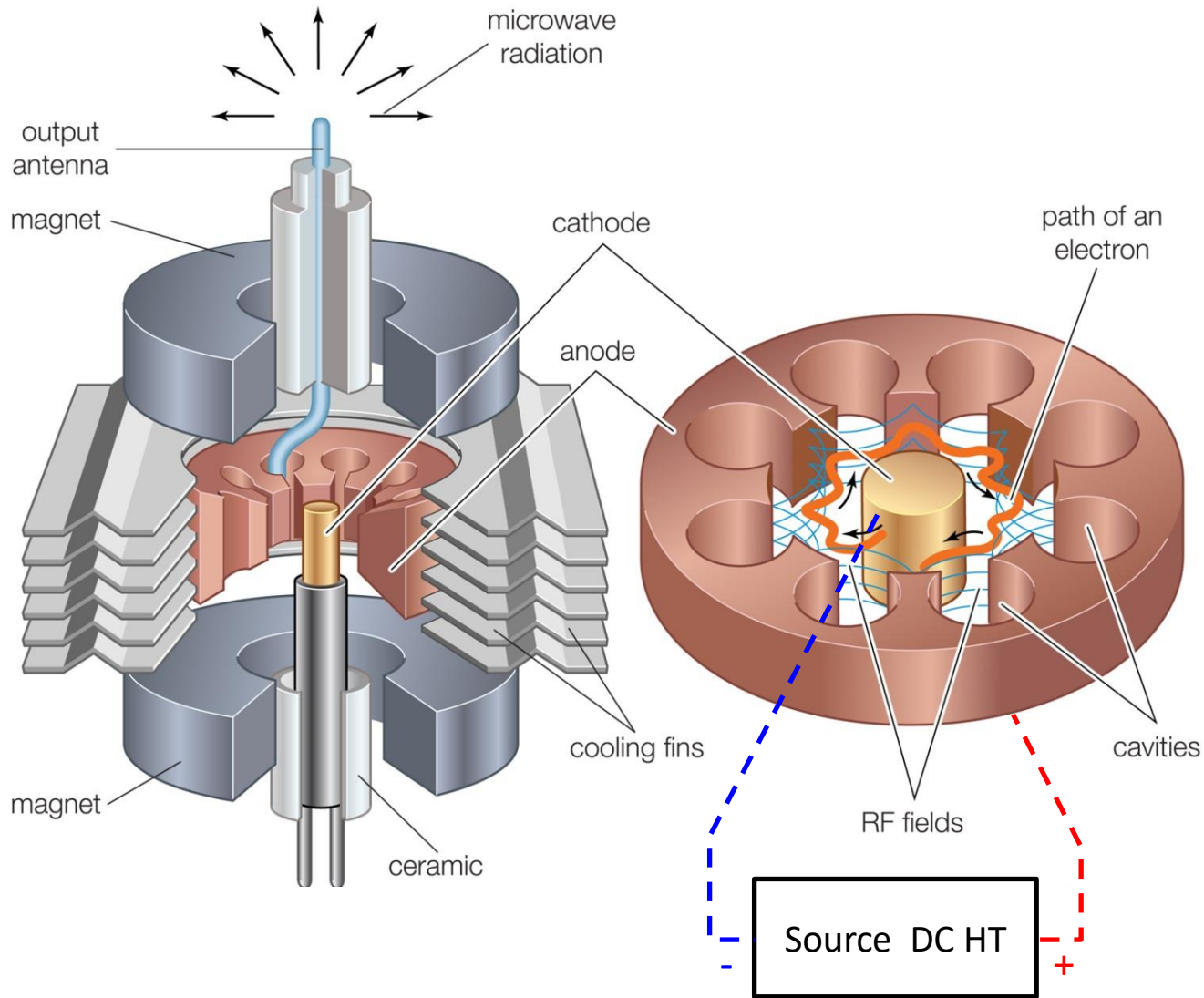
Éléments constitutifs d'un réacteur plasma

- Éléments essentiels d'une source plasma micro-onde:
 - Générateur micro-onde (sortie coaxiale ou guide d'onde)
 - Circulateur
 - Système d'accord d'impédance
 - Système de couplage (applicateur)
 - Fenêtre diélectrique
 - Enceinte
 - Piston de court-circuit

Eléments constitutifs d'un réacteur plasma



Générateur Micro-onde à tube: Magnétron



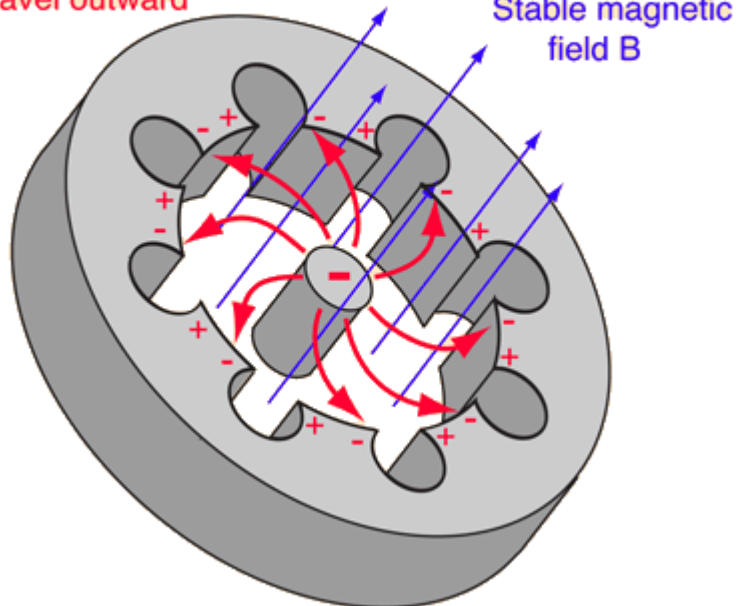
Générateur Micro-onde à tube: Magnétron

En l'absence de champ magnétique, les électrons émis par le filament chaud (1300°C) traversent radialement l'espace annulaire entre la cathode et l'anode.

En présence du champ magnétique les électrons sont déviés et se mettent à tourner autour de la cathode. Ils excitent les cavités à leur fréquence de résonance.

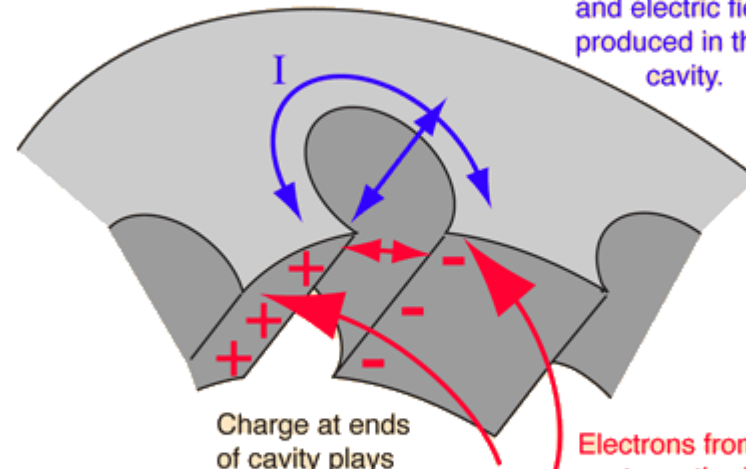
Le mouvement des paquets d'électrons autour des cavités provoque l'émission d'une énergie électromagnétique à la fréquence de résonance des cavités.

Hot cathode emits electrons which travel outward



Current around the cavity plays the role of an inductor.

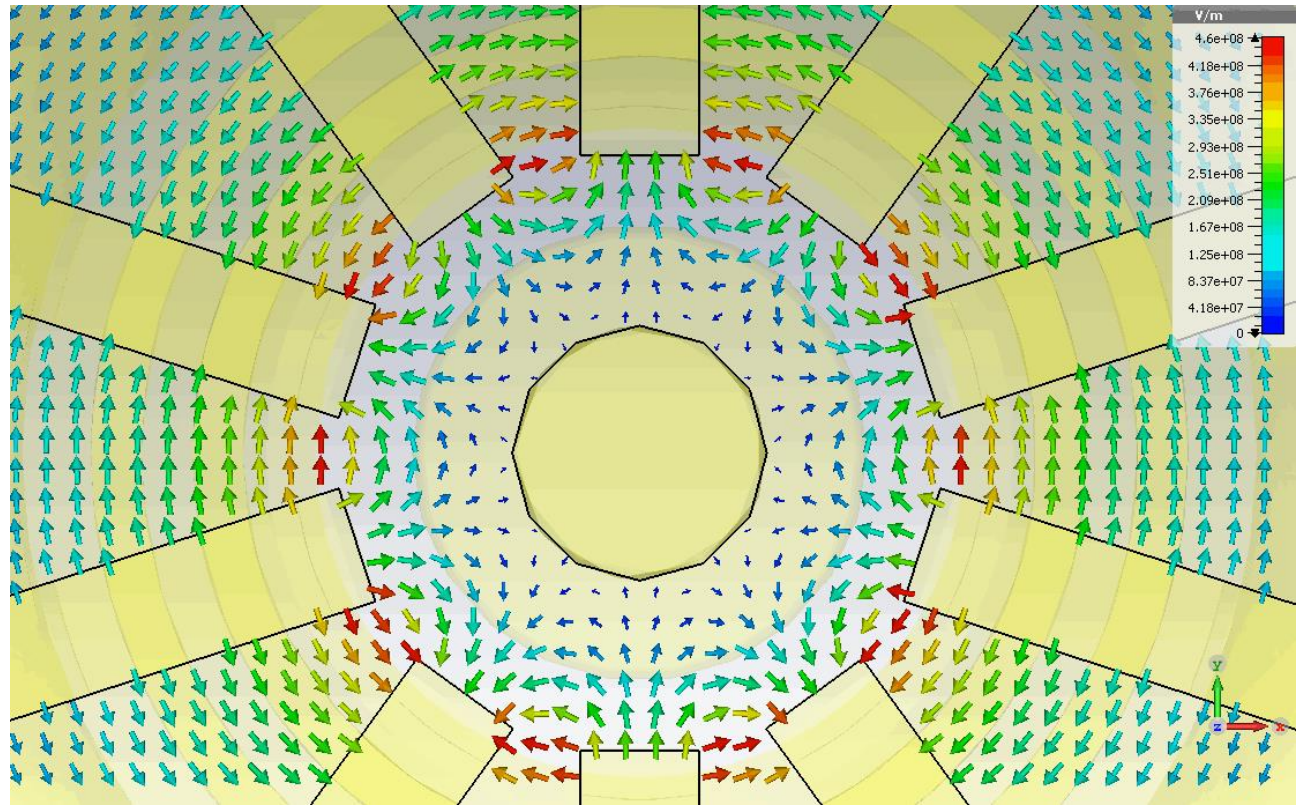
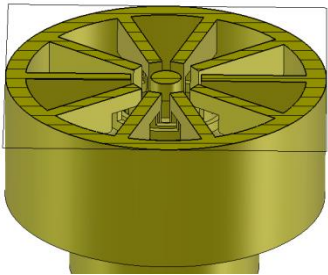
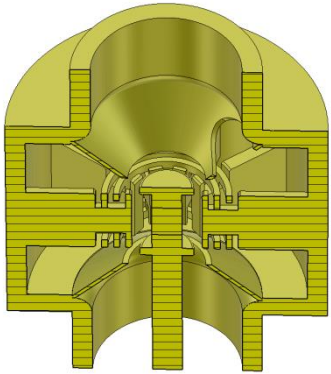
Oscillating magnetic and electric fields produced in the cavity.



Charge at ends of cavity plays the role of a capacitor.

Electrons from the hot center cathode arriving at a negatively charged region tend to drive it back around the cavity, "pumping" the natural resonant frequency.

Générateur Micro-onde à tube: Magnétron



Générateur Micro-onde à tube: Magnétron

Pour les magnétrons de haute puissance (915 MHz), le champ magnétique est produit par un électro-aimant.



Magnétron 2.45 GHz, 1.2 kW
(4.5 kV, 0.4 A, $\eta = 60\%$)



Magnétron 915 MHz, 60 kW
(18 kV, 3.8 A, $\eta > 80\%$)

Générateur Micro-onde à tube: Magnétron

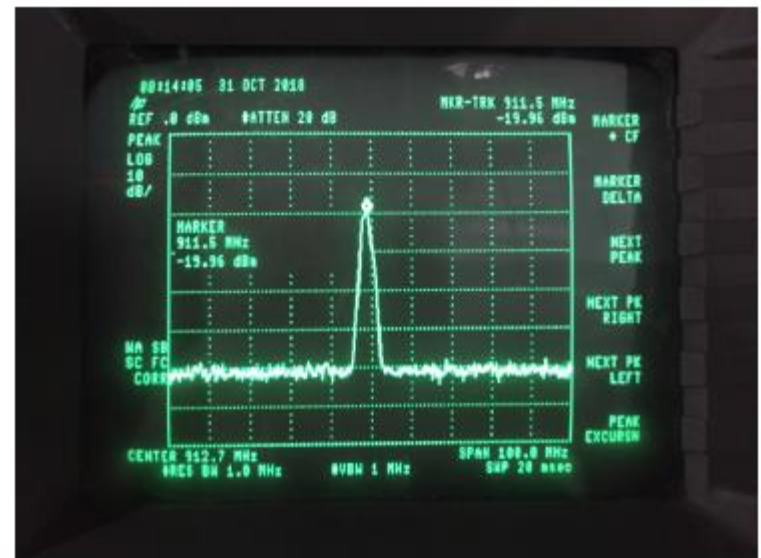
Les magnétrons sont conçus pour fonctionner de façon pleinement opérationnelle à haute puissance.

A basse puissance, le magnétron peut présenter des instabilités de fonctionnement (moding ...) entraînant un spectre d'émission élargi.

Spectre d'émission d'un magnétron 915 MHz



10 kW

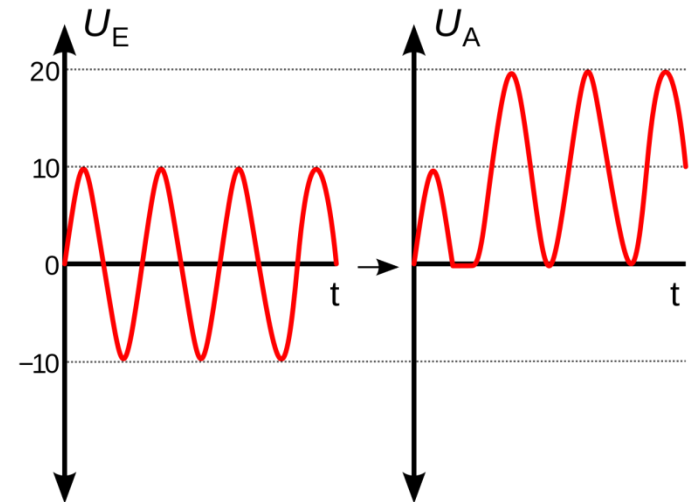
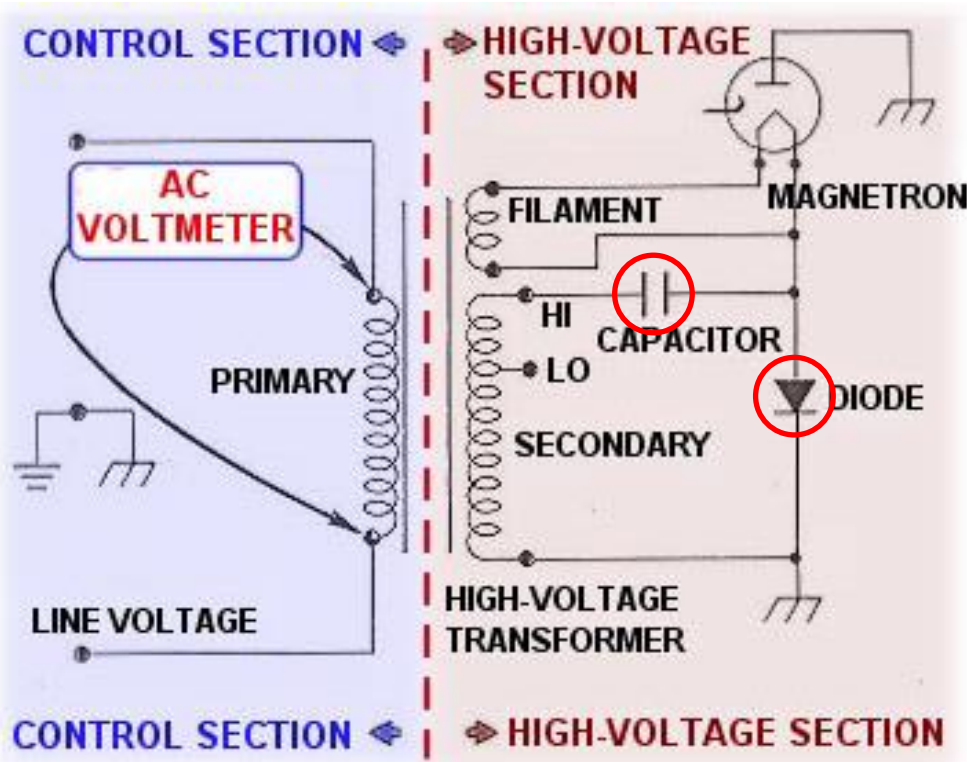


20 kW

Générateur Micro-onde à tube: Alimentation

Alimentation à transformateur

La haute tension aux bornes du magnétron est produite par un transformateur et un circuit doubleur de tension (circuit de Villard)



La stabilité de la haute tension influence directement la stabilité en puissance du magnétron (ripple)

Générateur Micro-onde à tube: Alimentation

Alimentation à transformateur

Avantages:

- Coût modéré
- Robuste

Inconvénients:

- Lourds et encombrants
- Mauvais rendement
- Stabilité en puissance discutable
- Impossibilité d'utiliser le magnétron en mode pulsé

Remarques:

Les alimentations à transformateur tendent à disparaître pour les générateurs à 2.45 GHz au profit d'alimentations à découpage.

On retrouve encore les transformateurs pour les alimentations à forte puissance pour les générateurs à 915 MHz.

Générateur Micro-onde à tube: Alimentation

Alimentation à découpage

Dans ce type d'alimentation, la régulation est assurée par des composants **électroniques de puissance utilisés en commutation** (généralement des transistors).

Les alimentations à découpage se sont fortement développées pour pallier les inconvénients des alimentations à transformateur, à savoir, poids élevé et faible rendement.

Avantages:

- Excellente stabilité en puissance
- Très bon rendement
- Compacte
- Possibilité de pulser le magnétron*
- Offre d'autres fonctionnalités (mode boost, burst, ARF)

Inconvénients:

- Prix plus élevé

* Le mode pulsé offre certains avantages dans le cas des plasmas de dépôt (augmentation de la vitesse de croissance, réduction de la génération de particules en phase gazeuse ...)

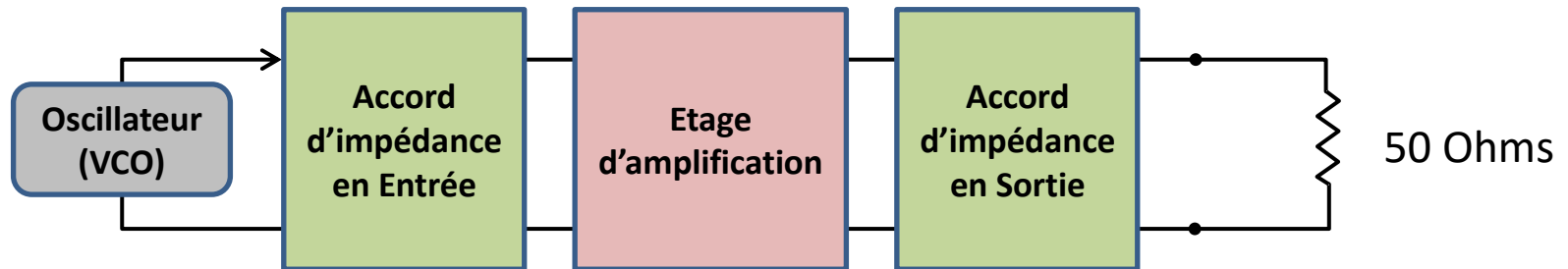
Générateur Micro-onde à tube: Alimentation

Troubleshooting

Problème	Cause possible
Faible puissance de sortie	<ul style="list-style-type: none">• Courant anodique incorrect• SWR incorrect• Tension Filament incorrecte• Champ magnétique incorrect• Puissance incorrecte
Arcing	<ul style="list-style-type: none">• SWR incorrect• Sortie salle• Système de couplage inadapté• Guide d'onde salle• Puissance de sortie trop élevée
Chute d'émission	<ul style="list-style-type: none">• Tension filament incorrecte• Tube en fin de vie• Pression dans le tube trop élevée
Moding	<ul style="list-style-type: none">• Tension filament incorrecte• SWR incorrect• Tube en fin de vie• Temps de préchauffage trop court• Pression dans le tube trop élevée• Puissance d'alimentation incorrecte

Générateur Micro-onde Solid State

Principe d'un générateur état solide avec un étage d'amplification



Le nombre d'étages d'amplification dépend de la puissance du générateur. Pour un générateur Solid State de 200 W, 4 étages sont nécessaires.

Avantages:

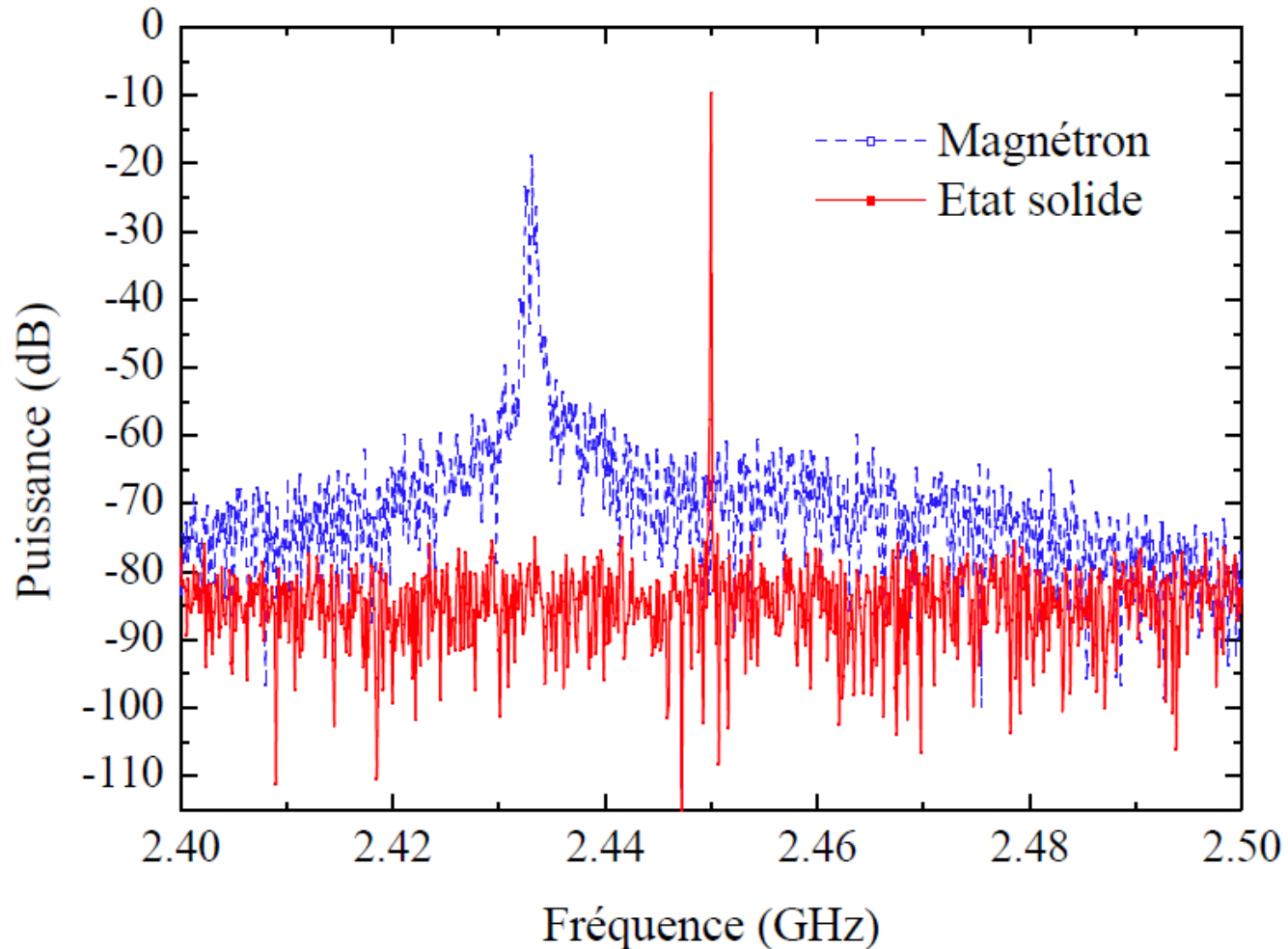
- Agilité en Fréquence (jusqu'à 100 MHz)
- Pureté Spectrale

Inconvénients:

- Prix élevé
- Puissance encore limitée
- Mauvais rendement (<50%)

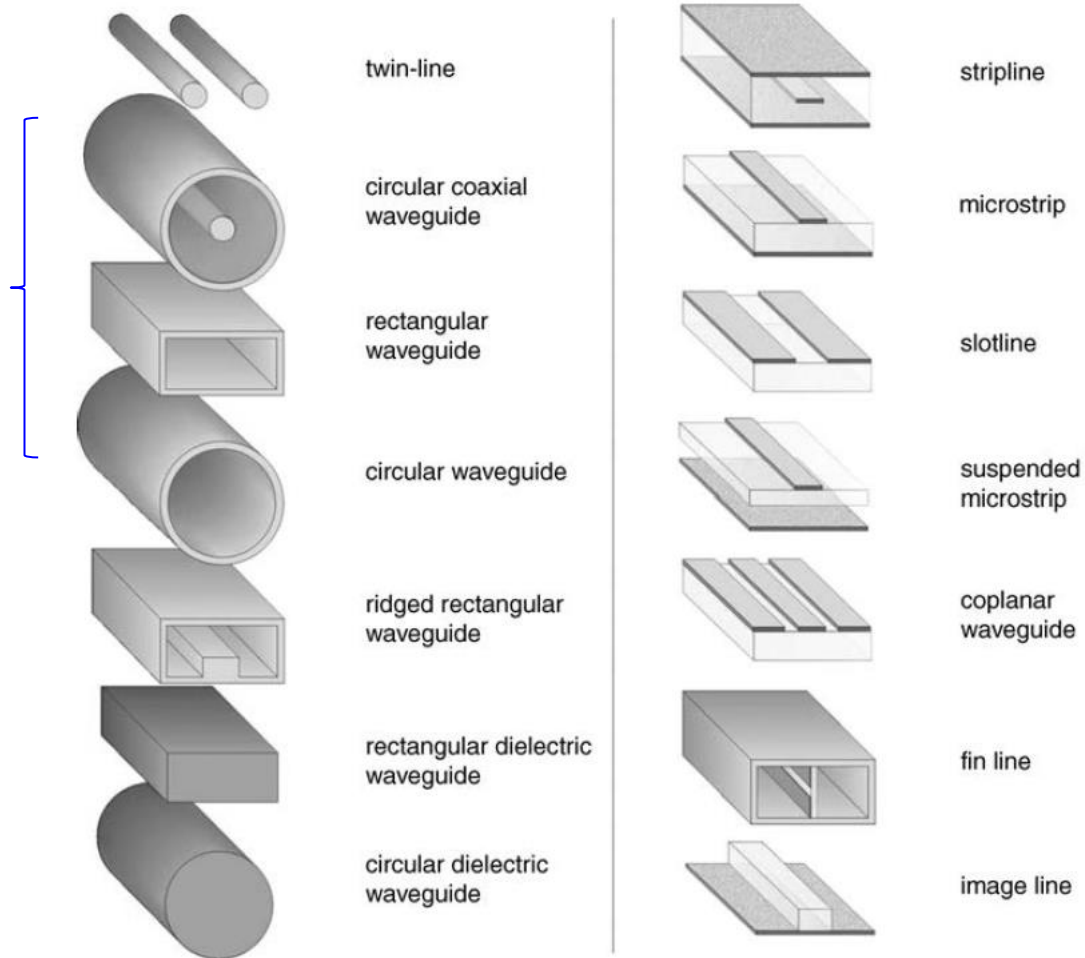
Générateur Micro-onde Solid State

Spectre d'émission d'une source micro-ondes Magnétron et Solid State



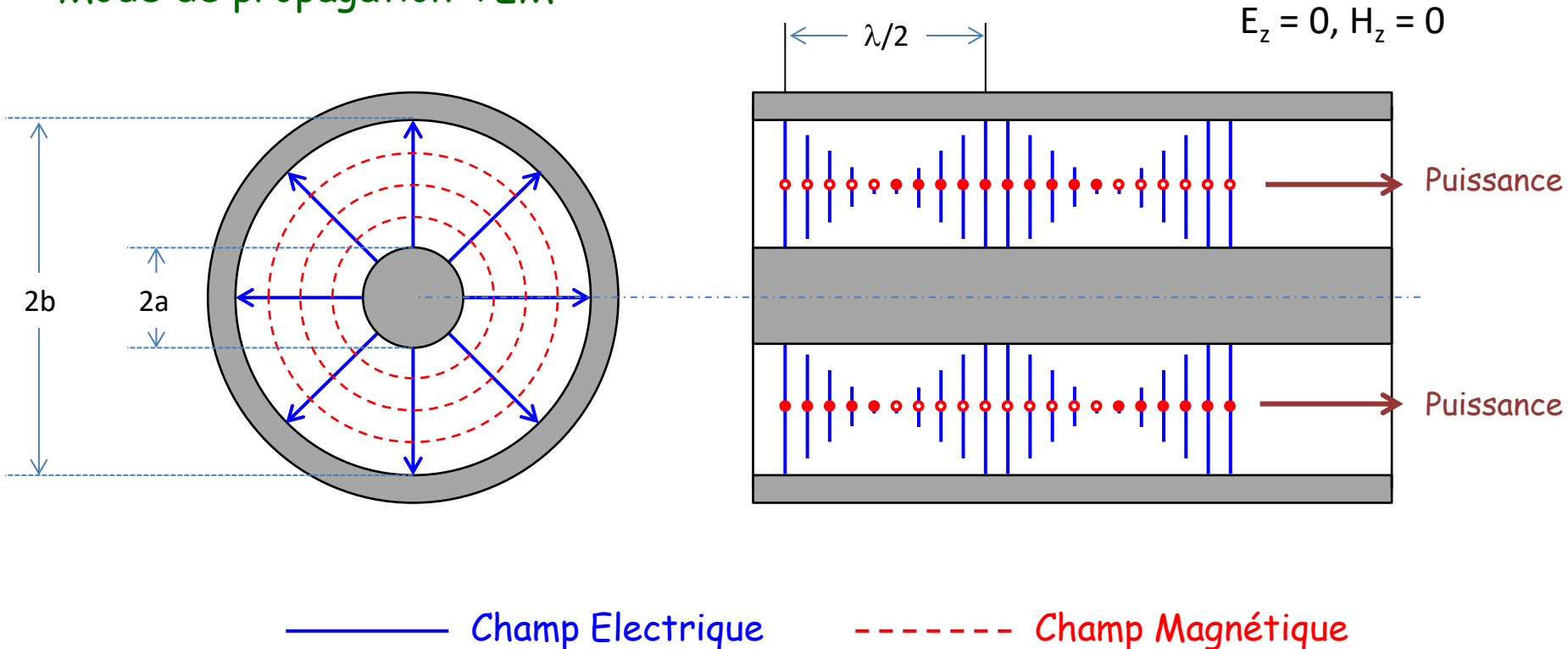
Ligne de transmission

Lignes utilisées pour la
génération de plasma



Ligne de transmission Coaxiale

Mode de propagation TEM



- Pas de fréquence de coupure
- Longueur d'onde guidée : λ_0

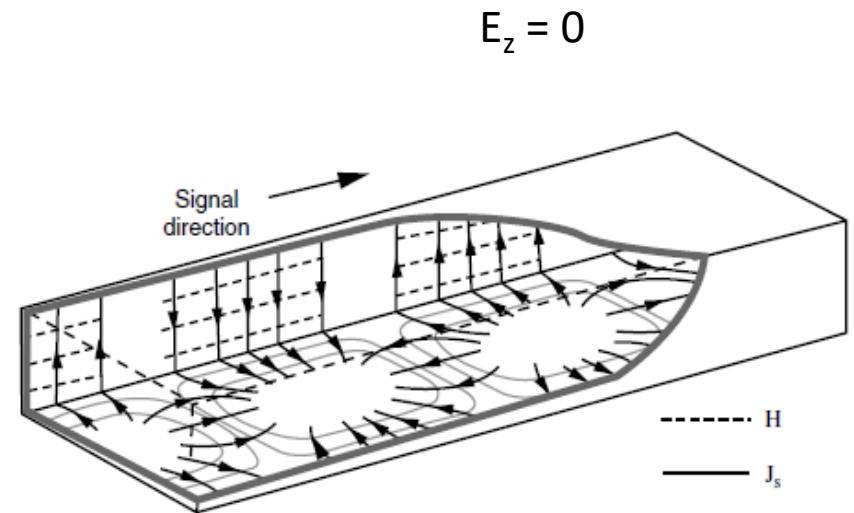
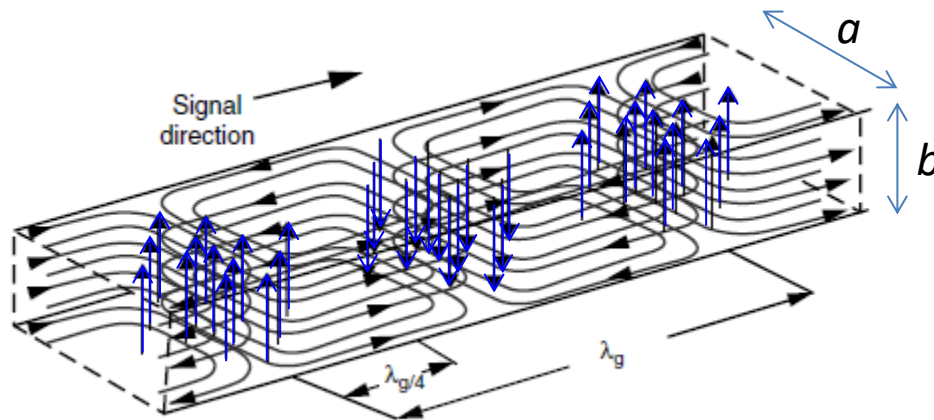
Pour un câble coaxiale @ 2.45 GHz
la puissance est limitée à 200 W

Ligne de transmission Coaxiale

Paramètres primaires	Formules Théoriques	Formules Pratiques
Inductance Linéique	$L_1(H/m) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(b/a)$	$L_1(\mu H/m) = 0,2 \ln(b/a)$
Capacité Linéique	$C_1(F/m) = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(b/a)}$	$C_1(pF/m) = \frac{55,5\epsilon_r}{\ln(b/a)}$
Résistance Linéique	$R_1(\Omega/m) = \frac{(a+b)}{2\pi ab\delta_s\sigma_c}$	$R_1(m\Omega/m) = 316 \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \sqrt{\frac{f}{\sigma_c}}$
Conductance Linéique	$G_1(S/m) = \omega C \tan \delta$	$G_1(\mu S/m) = 350 \frac{\epsilon_r f \tan \delta}{\ln(b/a)}$
Impédance caractéristique	$Z_0(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0\epsilon_r}} \ln(b/a)$	$Z_0(\Omega) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln(b/a)$
Pertes dans le conducteur	$\alpha_c(m^{-1}) = \frac{1+(b/a)}{b \ln(b/a)} \sqrt{\frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r f}{4\sigma_c}}$	$\alpha_c(m^{-1}) = 2,6 \times 10^6 \frac{1+(b/a)}{b \ln(b/a)} \sqrt{\frac{\epsilon_r f}{\sigma_c}}$
Pertes dans le diélectrique	$\alpha_d(m^{-1}) = \pi f \sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r} \tan \delta$	$\alpha_d(m^{-1}) = 10^{-8} f \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta$
Max peak power		$P_{max}(kW) = 44 E_{max} ^2 a^2 \sqrt{\epsilon_r} \ln(b/a)$
Cutoff modes supérieurs	$\lambda_c = \pi \sqrt{\epsilon_r} (a+b)$	

Ligne de transmission Guide d'onde rectangulaire

Mode de propagation TE_{10}



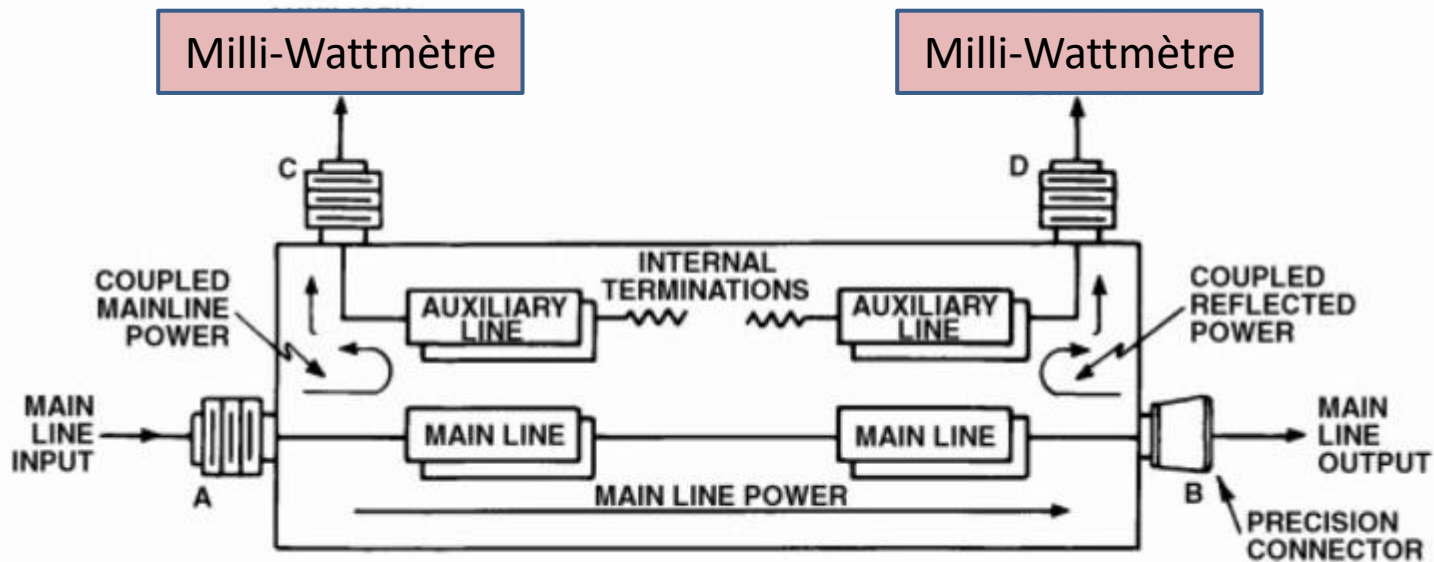
Longueur d'onde guidée : λ_g

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 + \frac{\lambda_0^2}{4} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)}}$$

Pour le mode TE_{10} $\lambda_g = 2a$

$$P_{max}(kW) = 6,63 \times 10^{-7} abn^2 \sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda_0}{2b} \right)^2} |E_{max}|^2$$

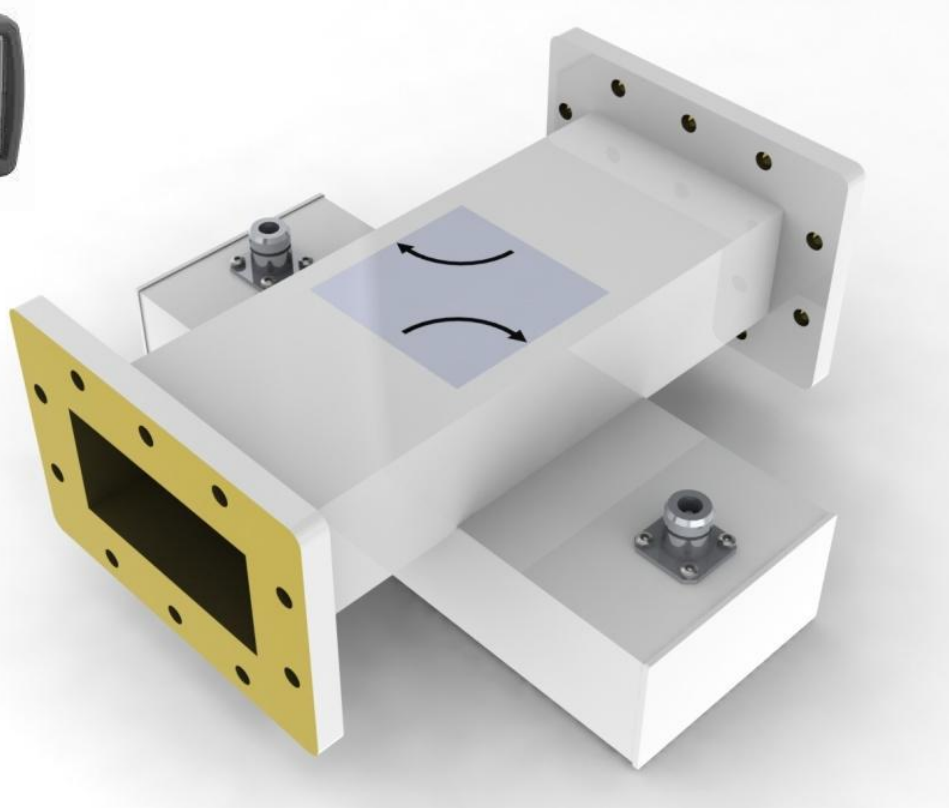
Coupleur directionnel



Milli-Wattmètre

Milli-Wattmètre

Coupleur en croix



Permet de déterminer avec précision la puissance incidente et réfléchi

Adaptateur d'impédance

3 Stubs

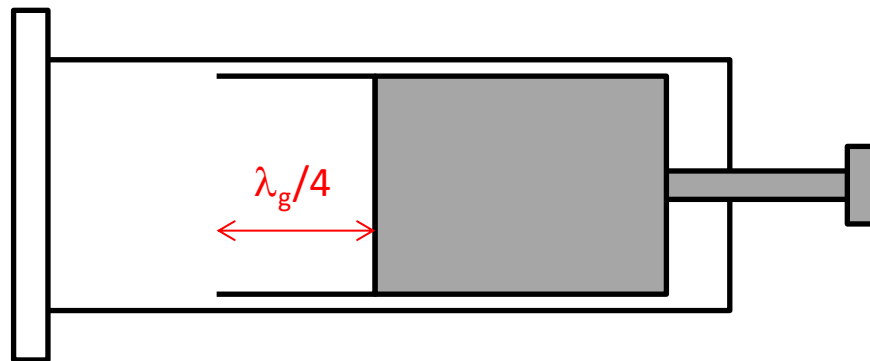


E-H



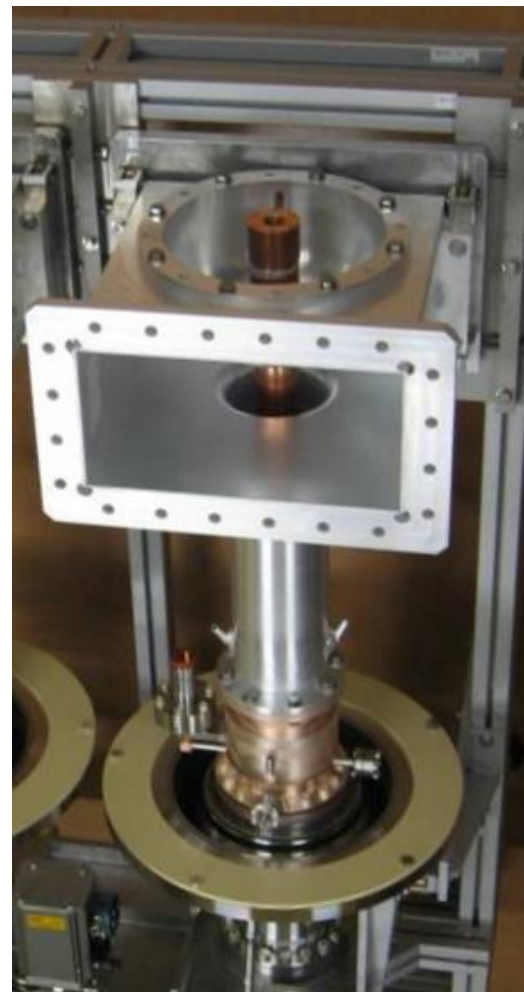
Existe en version manuelle ou automatique

Piston de court-circuit

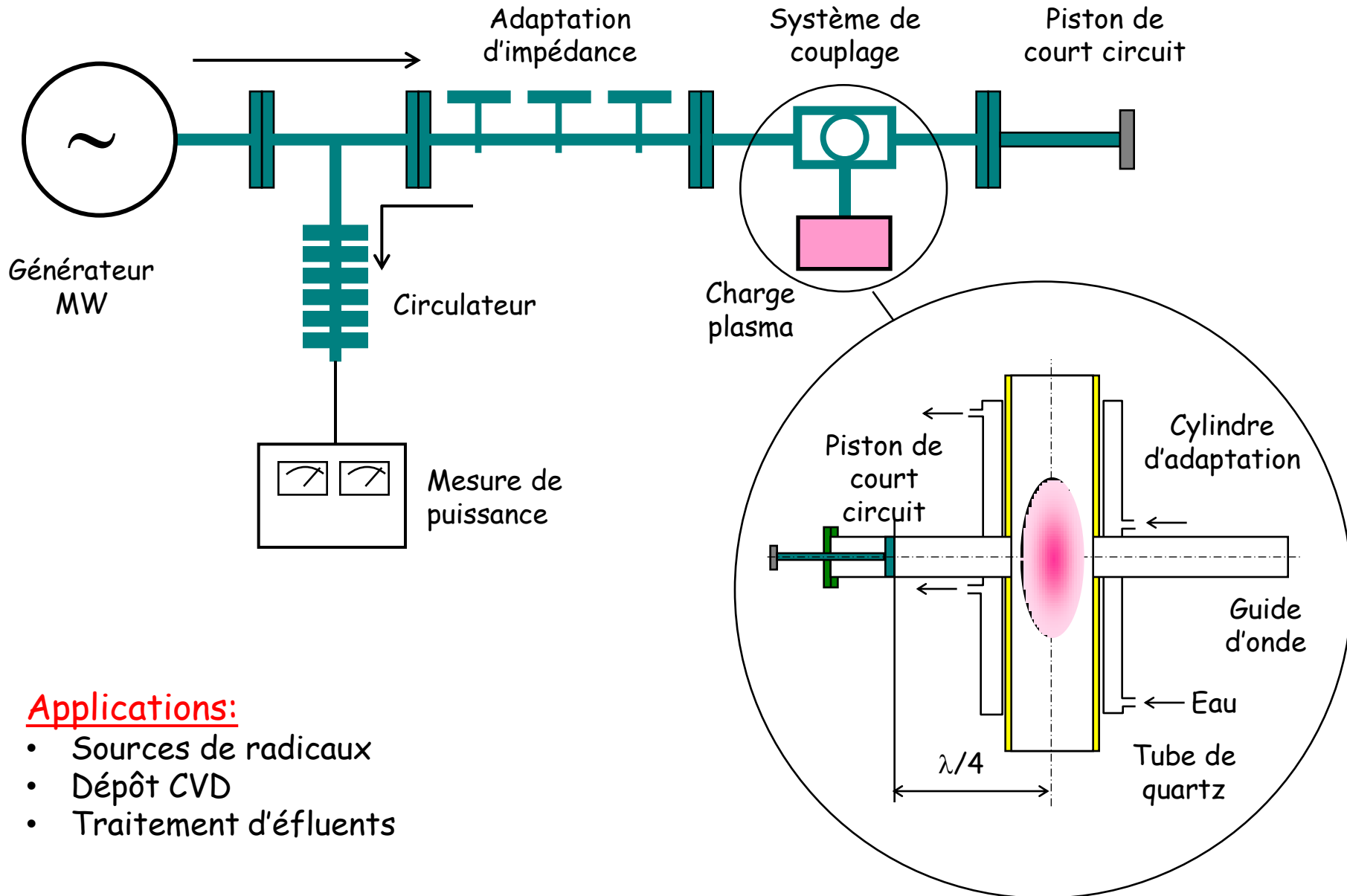


Systeme de couplage

Transition
Guide d'onde rectangulaire -
Guide d'onde Coaxial



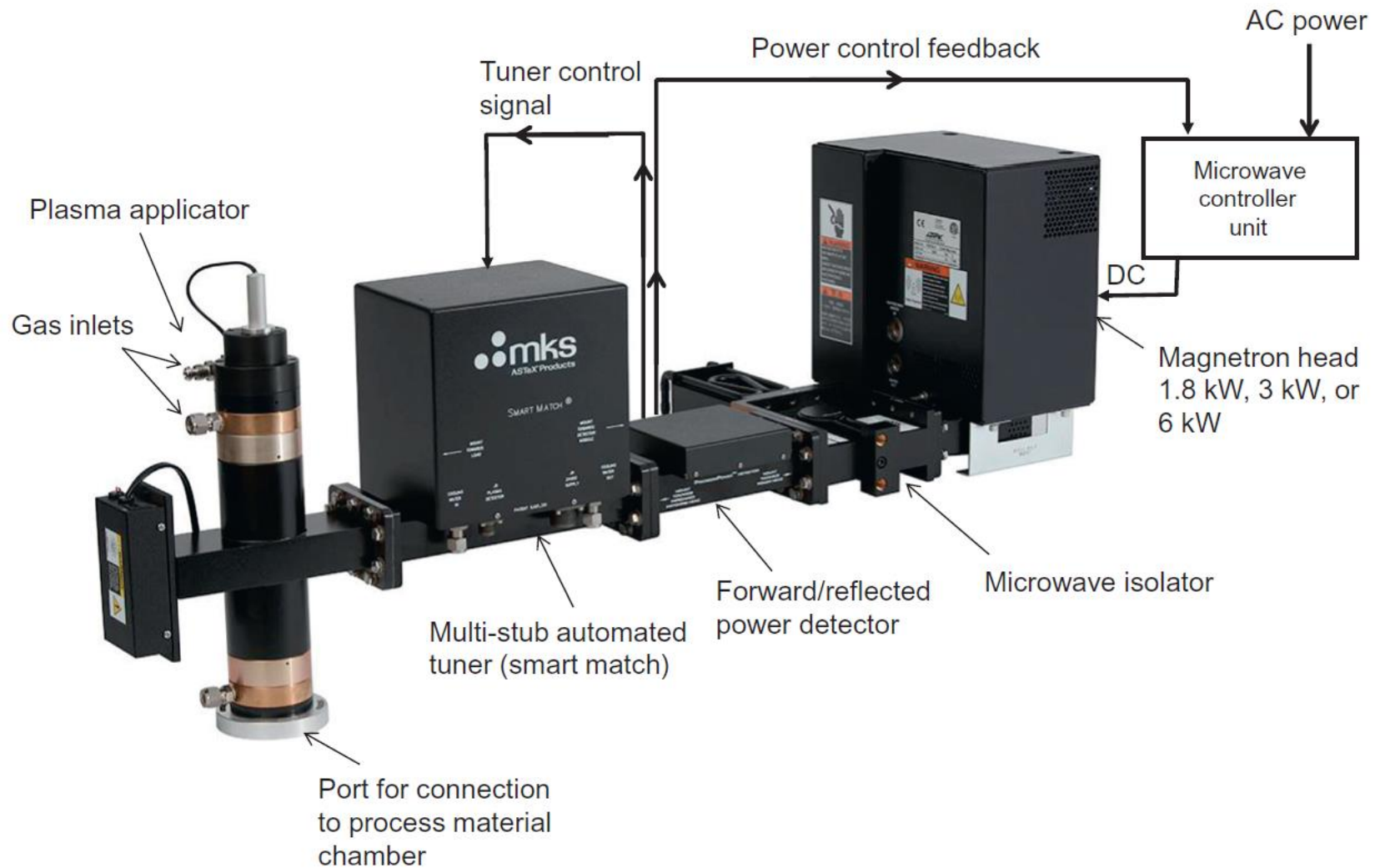
Réacteur à plasma Micro-ondes



Applications:

- Sources de radicaux
- Dépôt CVD
- Traitement d'éfluent

Réacteur à plasma Micro-ondes



Plasmas en cavité résonnante

- 1) Introduction
- 2) Modes de résonance
- 3) Cavité mono-mode
- 4) Cavité multi-modes
- 5) Technique de couplage
- 6) Exemples de réacteurs

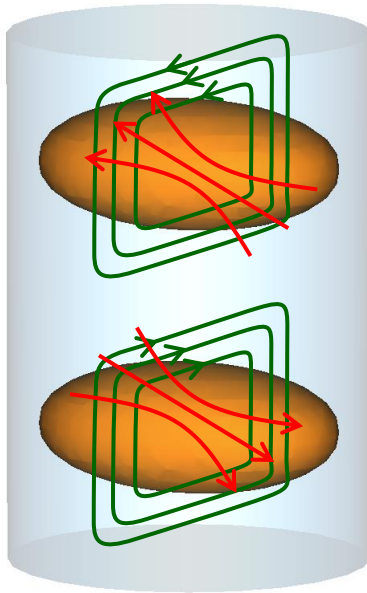
Introduction

- **Premiers travaux** sur les cavités résonnantes au début des **années 70** (30 W, 50 mTorr à 100 Torr, $n_e > 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$).
- Ces premiers résultats ont montré **l'efficacité des cavités résonnantes monomodes pour la création de plasmas**.
- Par la suite, utilisation pour l'étude de la **chimie des plasmas**, mais également la **propulsion ionique**, les **faisceaux d'ions**, la **gravure**, le **dépôt de couches minces** et le **traitement de surfaces**.
- Les évolutions technologiques se sont orientées vers **les plasmas à pressions modérées** (0.5 à 200 torr) pour le **dépôt** de couches minces (diamant...), et **les sources basses pression ECR** à aimant permanent.

Modes de résonances

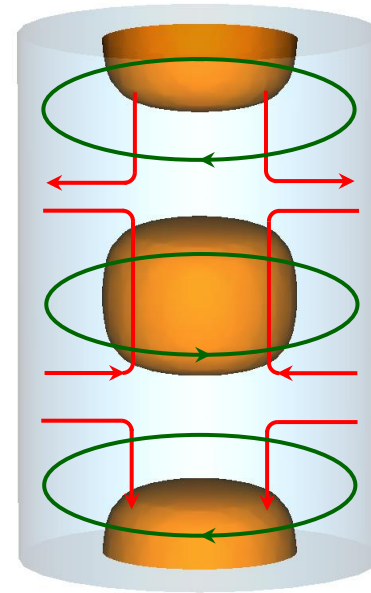
Il existe 2 types de mode de résonance :

- Transverse Electrique (TE) : E orthogonal à l'axe de la cavité
- Transverse Magnétique (TM) : H orthogonal à l'axe de la cavité



TE₁₁₂

E peut atteindre
plusieurs 10 kV/m



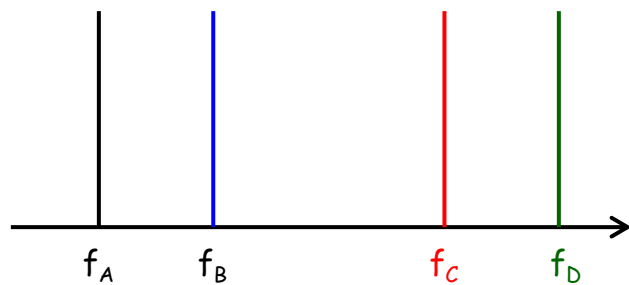
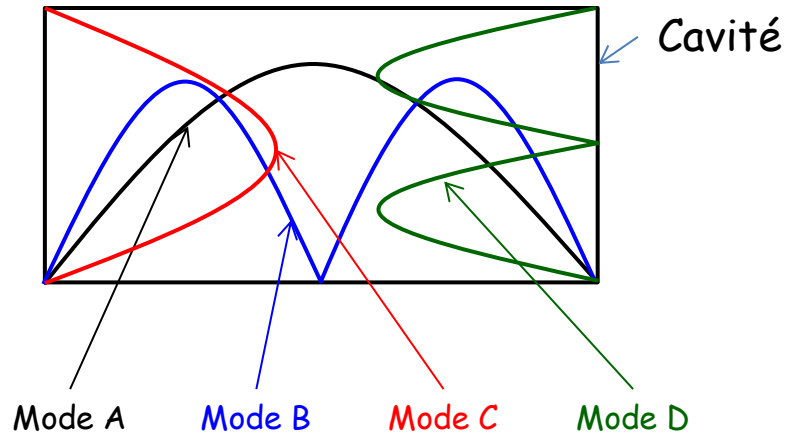
TM₀₁₂

Seuls les modes TM_{0mn} permettent d'obtenir des plasmas axisymétriques

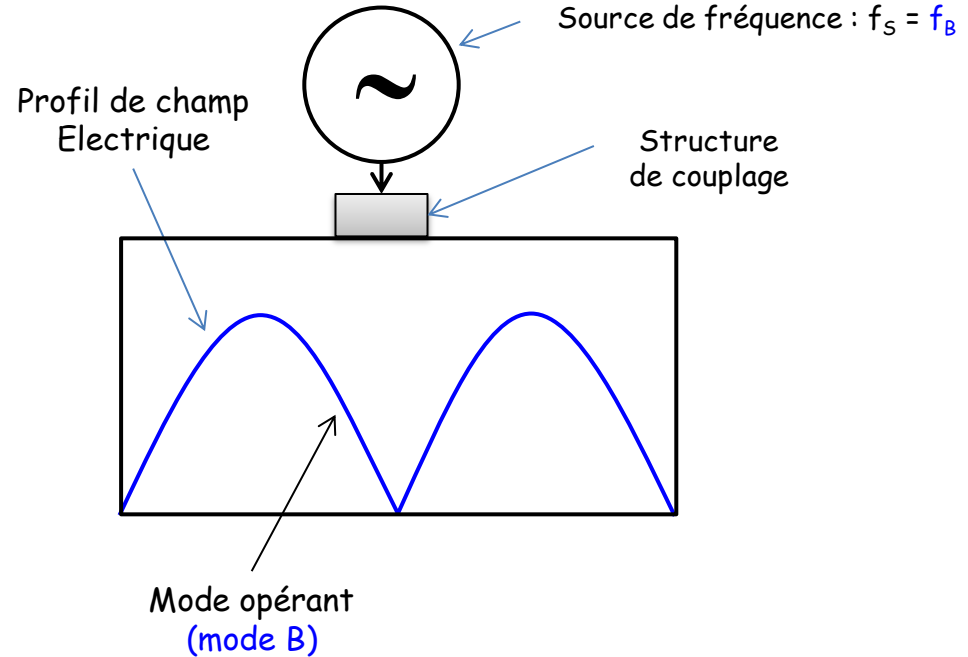
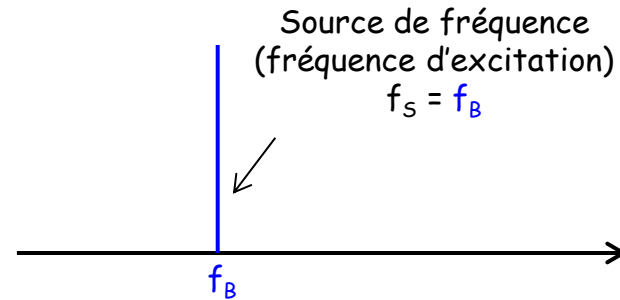
La fréquence de résonance (ω_0) dépend de la géométrie de la cavité ($R, h \dots$) mais également de son contenu diélectrique (ϵ)

Modes de résonances

Différents modes de résonance



Fréquences de résonance des modes de cavité
(Mode potentiellement excitable)



Modes de résonances

- Modes propres de résonance

Pour les modes TE

$$f_{mnp} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\left(\frac{u'_{mn}}{2\pi R} \right)^2 + \left(\frac{p}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (p > 0)$$

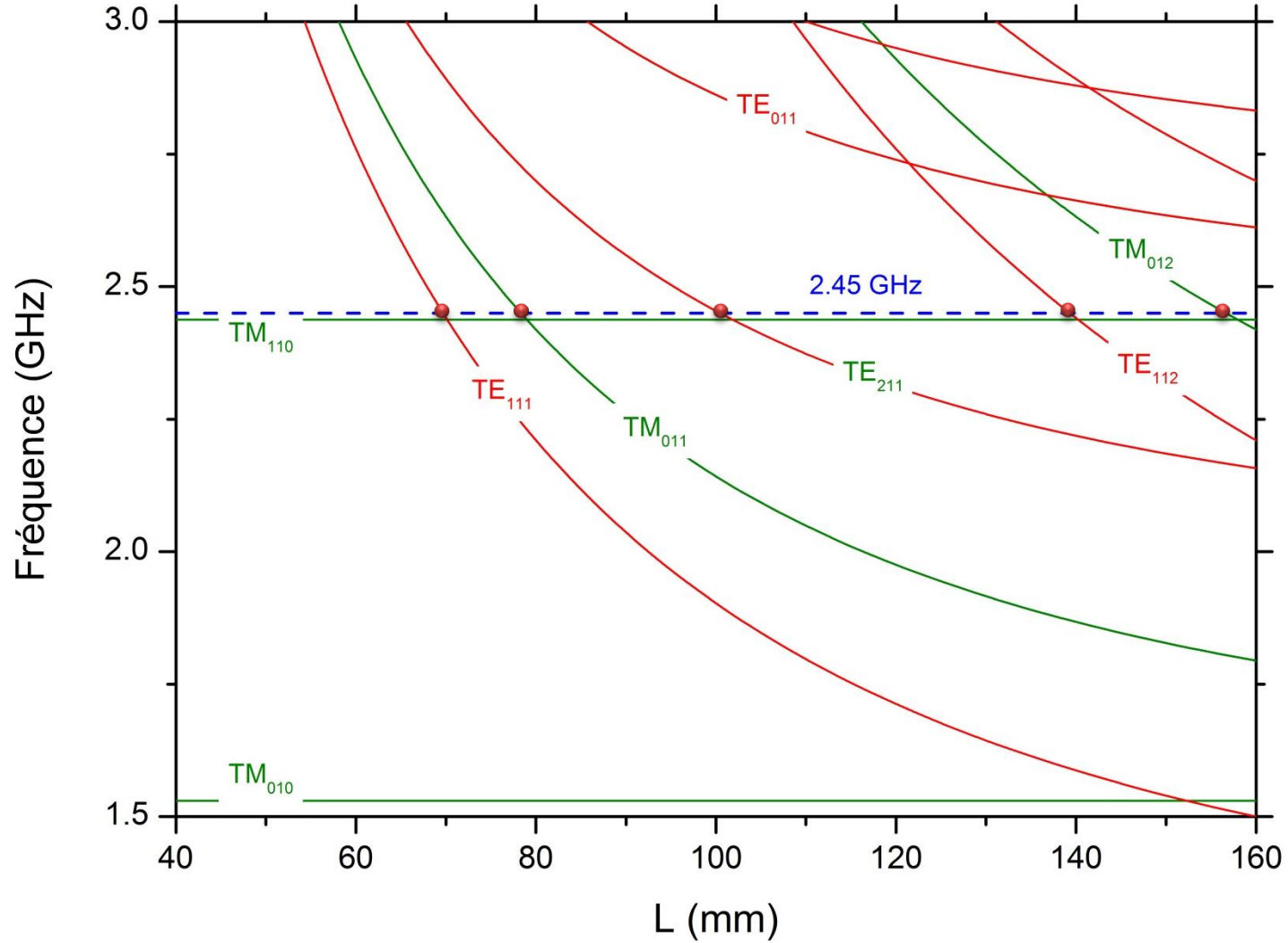
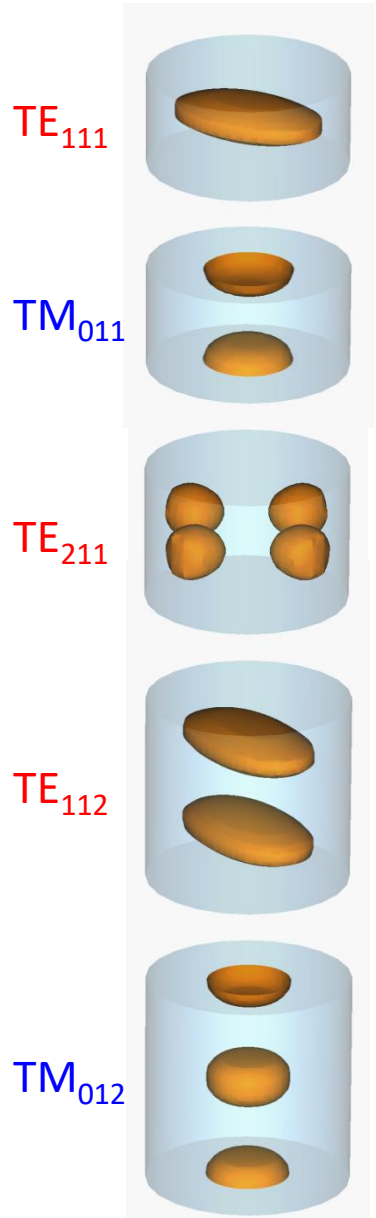
Pour les modes TM

$$f_{mnp} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\left(\frac{u_{mn}}{2\pi R} \right)^2 + \left(\frac{p}{2L} \right)^2 \right]^{1/2}$$

u_{mn} et u'_{mn} sont les zéros des Fonctions de Bessel $J_m(x)$ et $J'_m(x)$

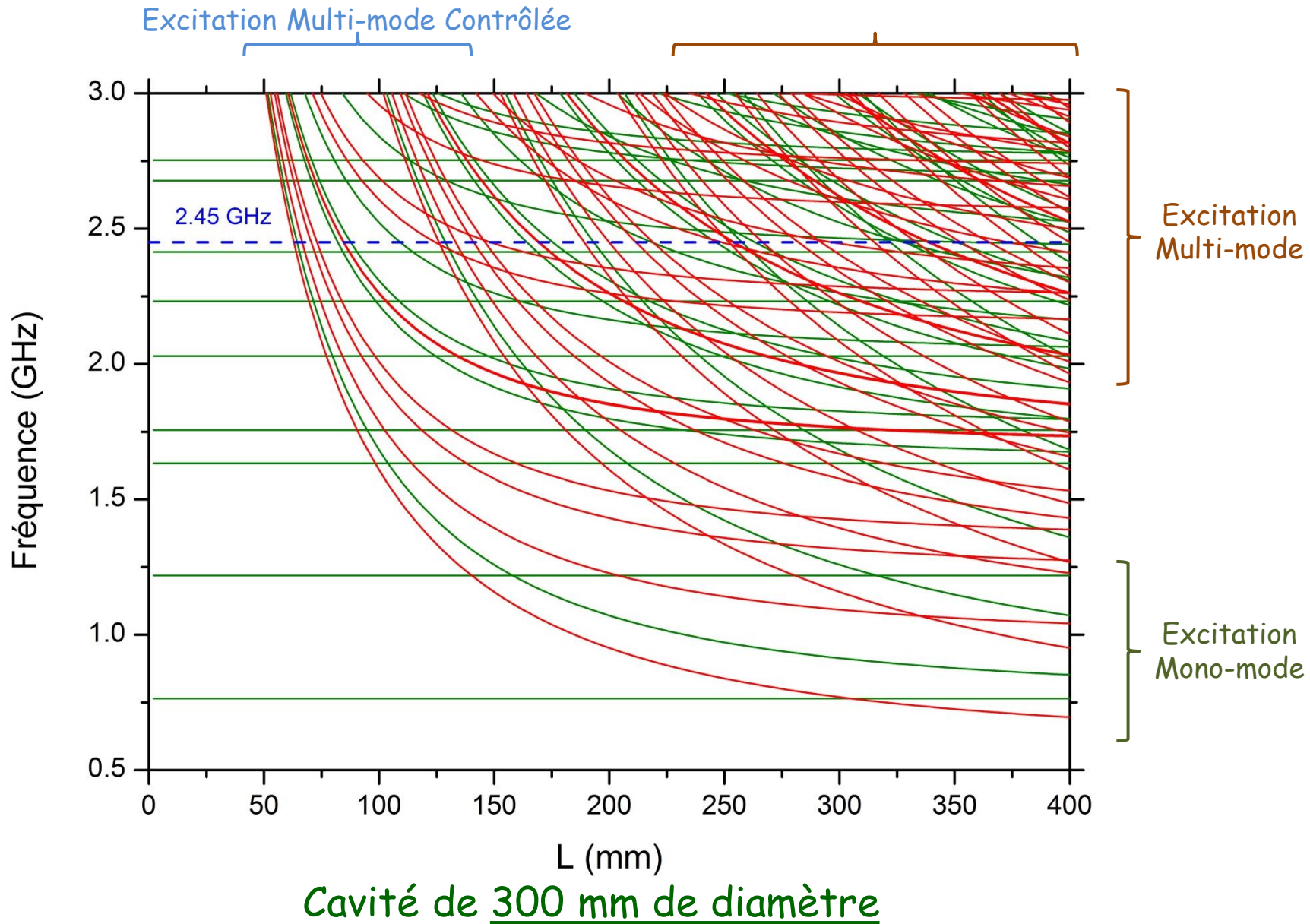
Un mode particulier peut être excité en modifiant la longueur (L) de cavité, la fréquence d'excitation étant généralement fixée (915 ou 2450 MHz).

Cavité mono-mode



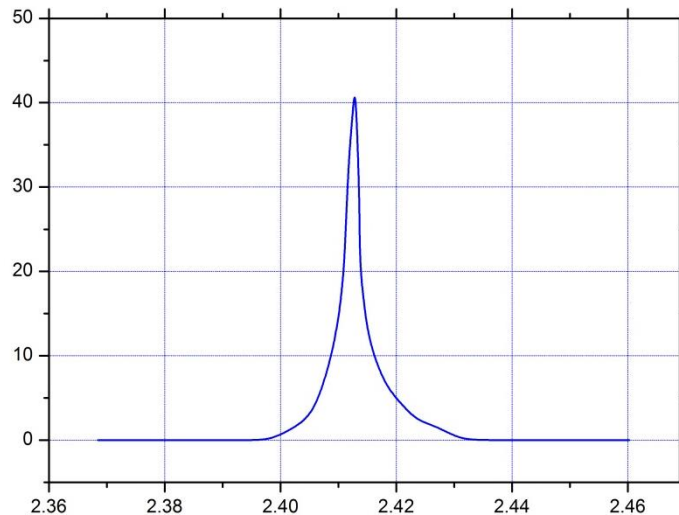
Cavité de 150 mm de diamètre

Cavité multi-modes



Cavité multi-modes

Lorsque le diamètre de la cavité augmente, le nombre de modes que l'on peut exciter augmente fortement et ils sont très rapprochés en fréquence. La cavité devient alors **multi-modes** (il est plus difficile de contrôler la structure de champ). Par ailleurs, le **spectre d'émission du magnétron** présente une certaine **largeur spectrale** (typiquement 50 MHz). Il sera par conséquent difficile de contrôler l'excitation d'un mode particulier si celui-ci est séparé en fréquence de moins 50 MHz de ses voisins.



Spectre d'émission
d'un magnétron 6kW

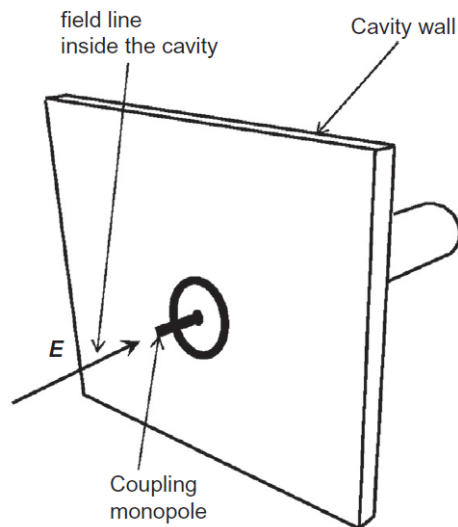
L'excitation d'un mode unique est plus facile pour les petites cavités (i.e. dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de quelques $\lambda/2$).

Techniques de couplage

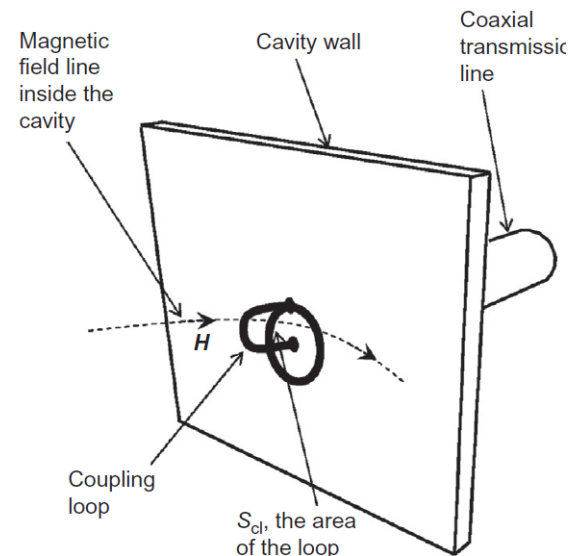
Le système de couplage permet d'exciter le mode de résonance de la cavité et de transférer l'énergie micro-onde du générateur à la charge plasma.

Une des composantes du champ d'excitation (E ou H), doit être commune au champ du mode que l'on souhaite exciter.

Couplage Electrique



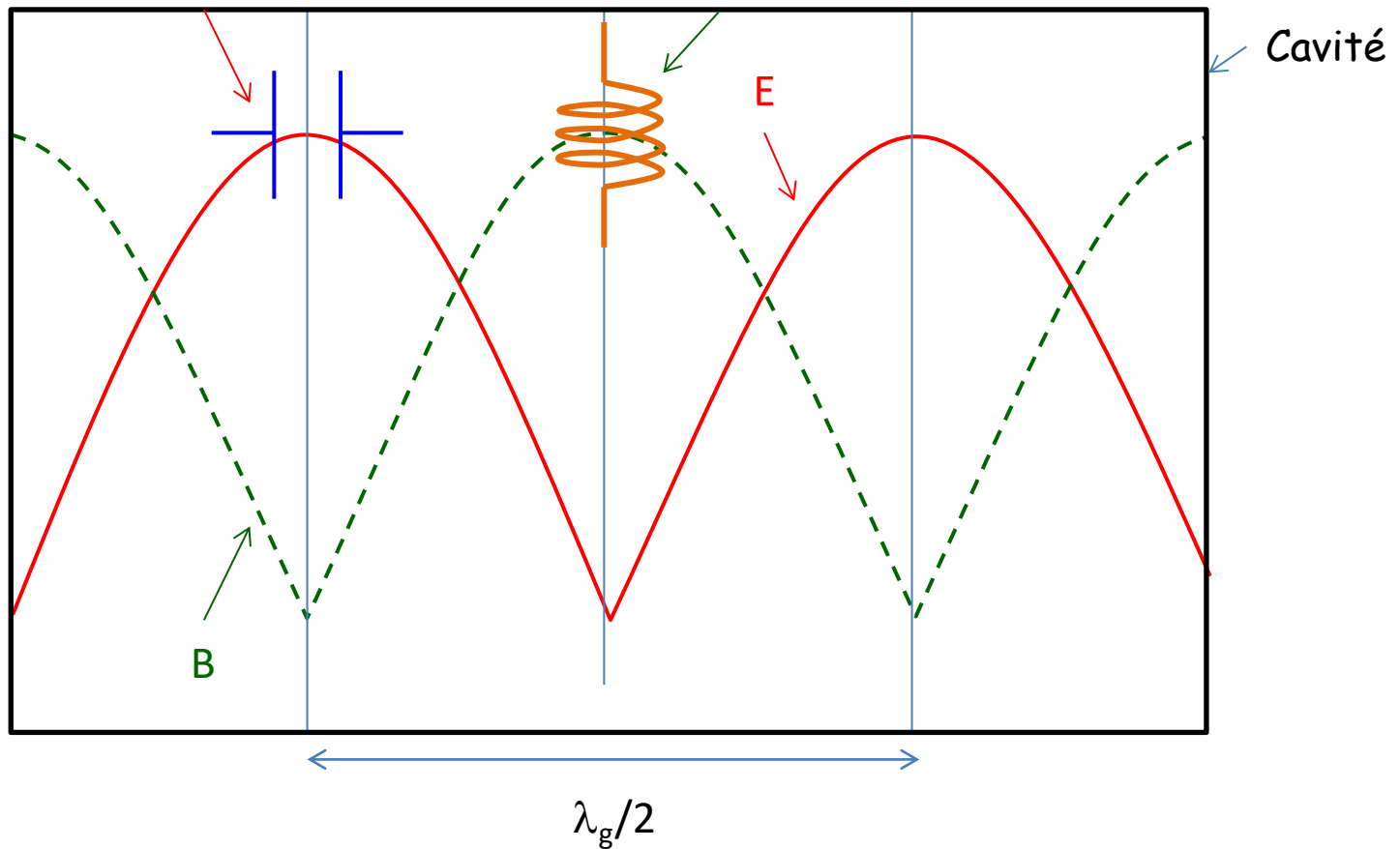
Couplage Magnétique



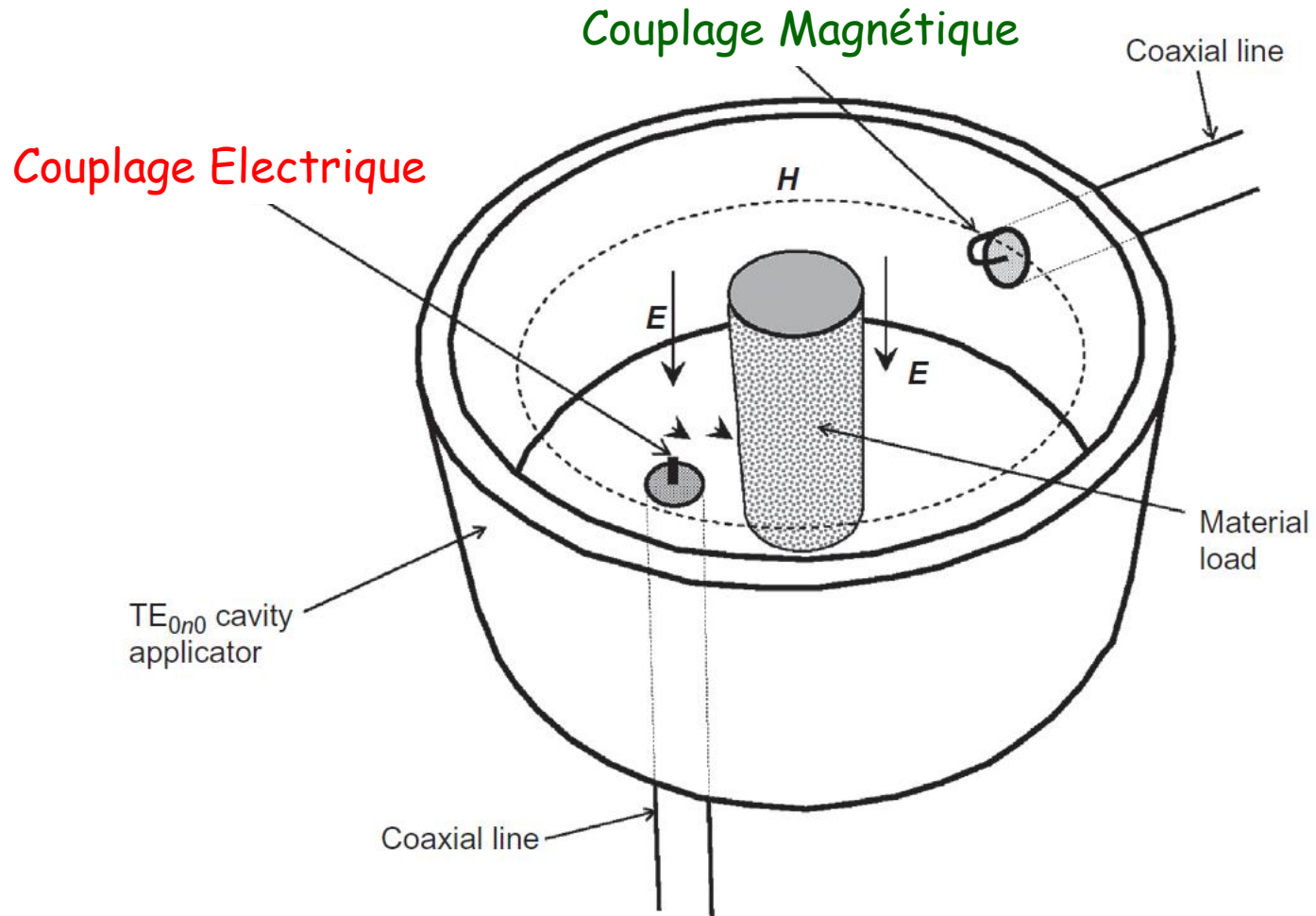
Techniques de couplage

Couplage électrique

Couplage magnétique



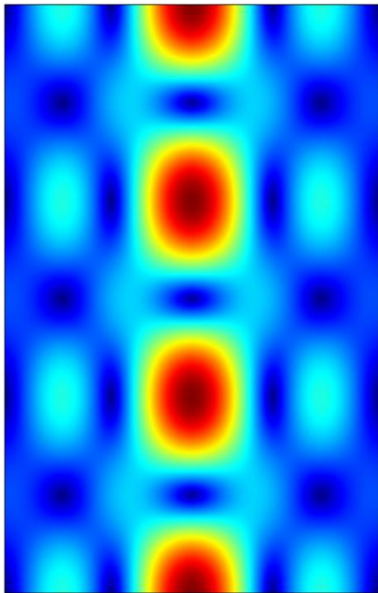
Techniques de couplage



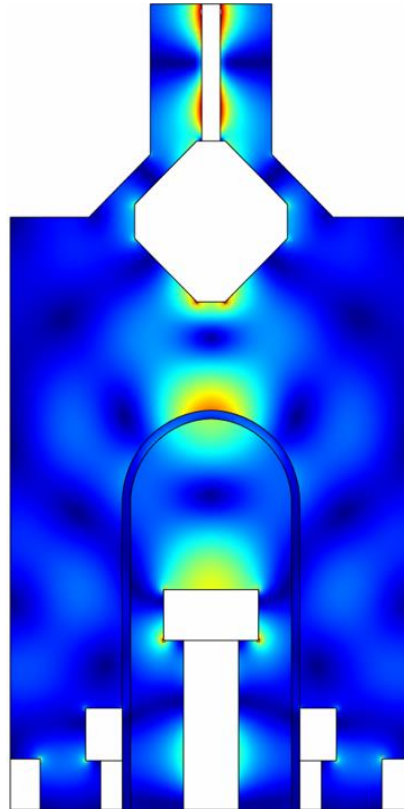
Méthodes pour coupler une cavité TM_{0n0}

Réacteur plasma type Bell Jar (LSPM)

Réacteur Bell Jar



Mode de résonance
(TM_{023})



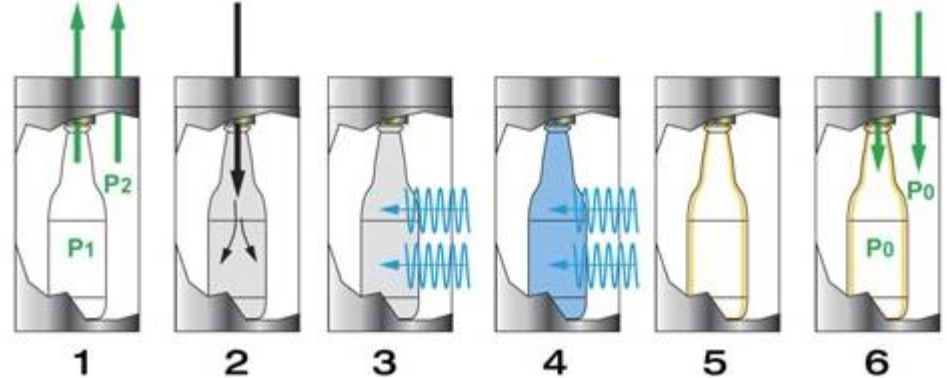
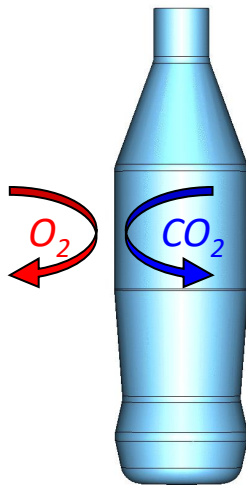
Structure de couplage
+ Fenêtre diélectrique



Réacteur final

Exemple de réacteur industriel

Procédé de dépôt ACTIS™



Durée du process : 7 s

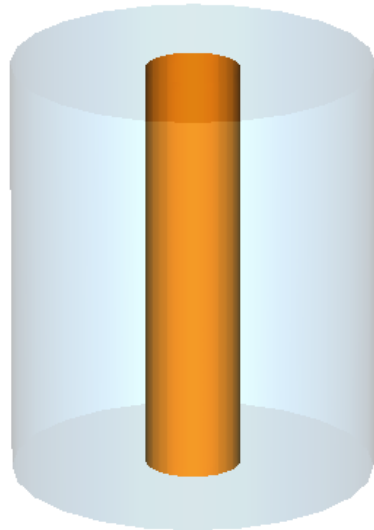
Dépôt d'une couche barrière de diffusion (aC:H) pour prévenir l'oxydation des boissons par l'oxygène atmosphérique et/ou, les pertes de CO_2 (cas des boissons gazeuses) au travers le PET de la bouteille.

1. Pompage
2. Injection de l'acétylène
- 3 - 5. Dépôt plasma
6. Retour à la pression atmosphérique

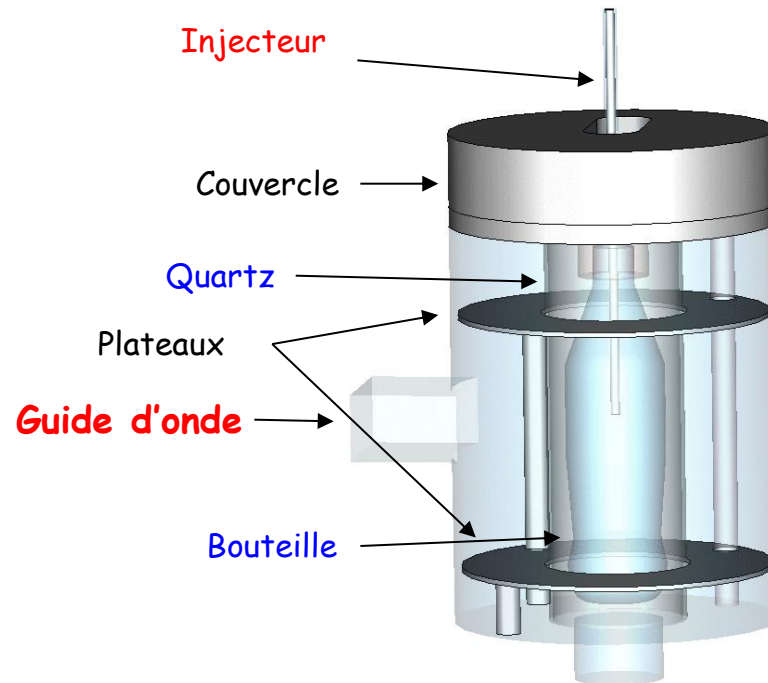
Exemple de réacteur industriel

Procédé de dépôt ACTIS™

Choix du mode de résonance

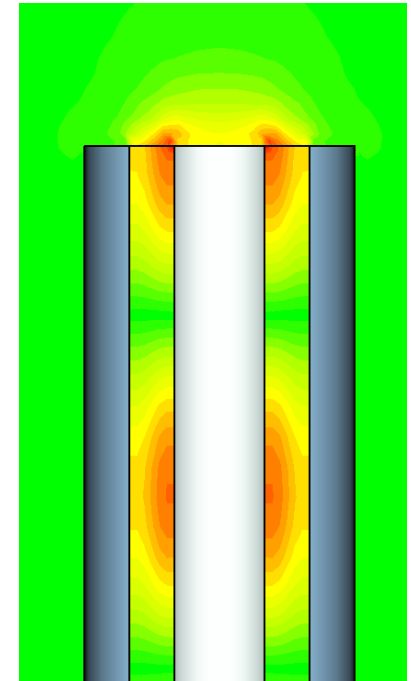
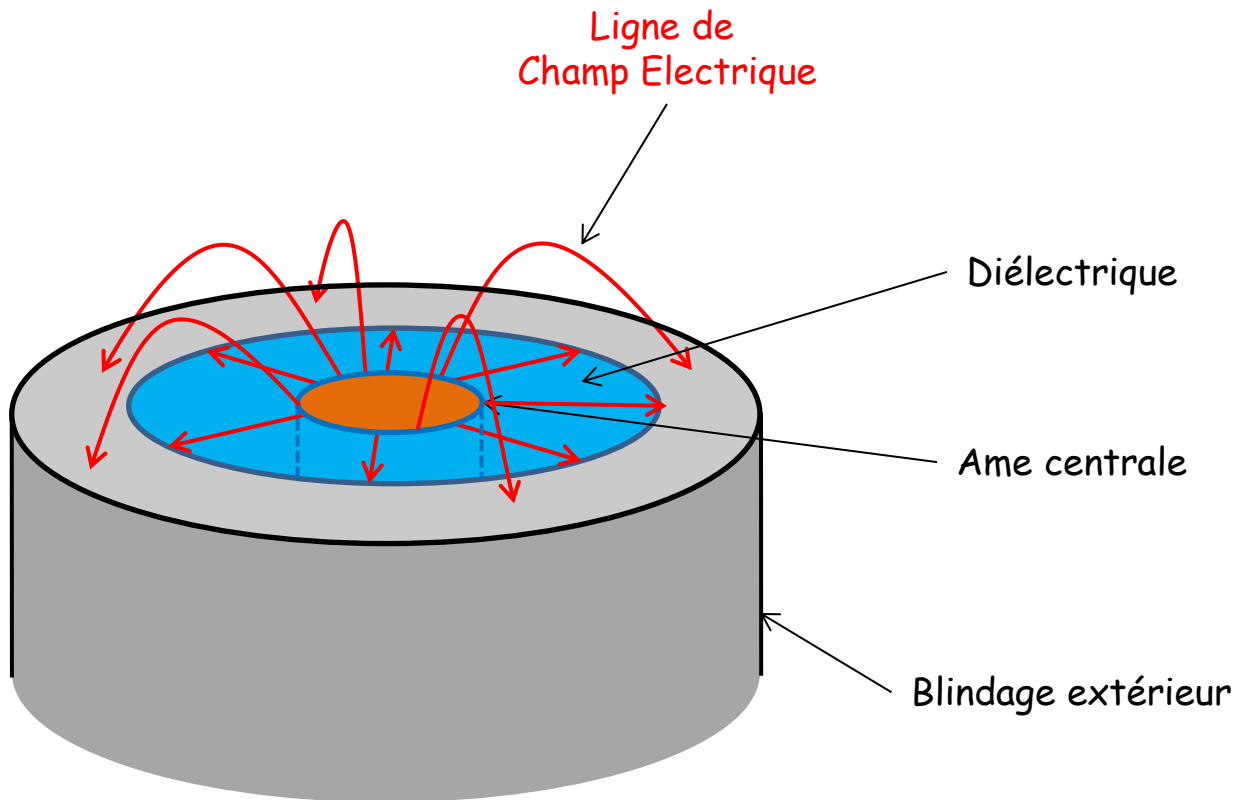


TM_{020}



Plasmas Distribués (sources coaxiales)

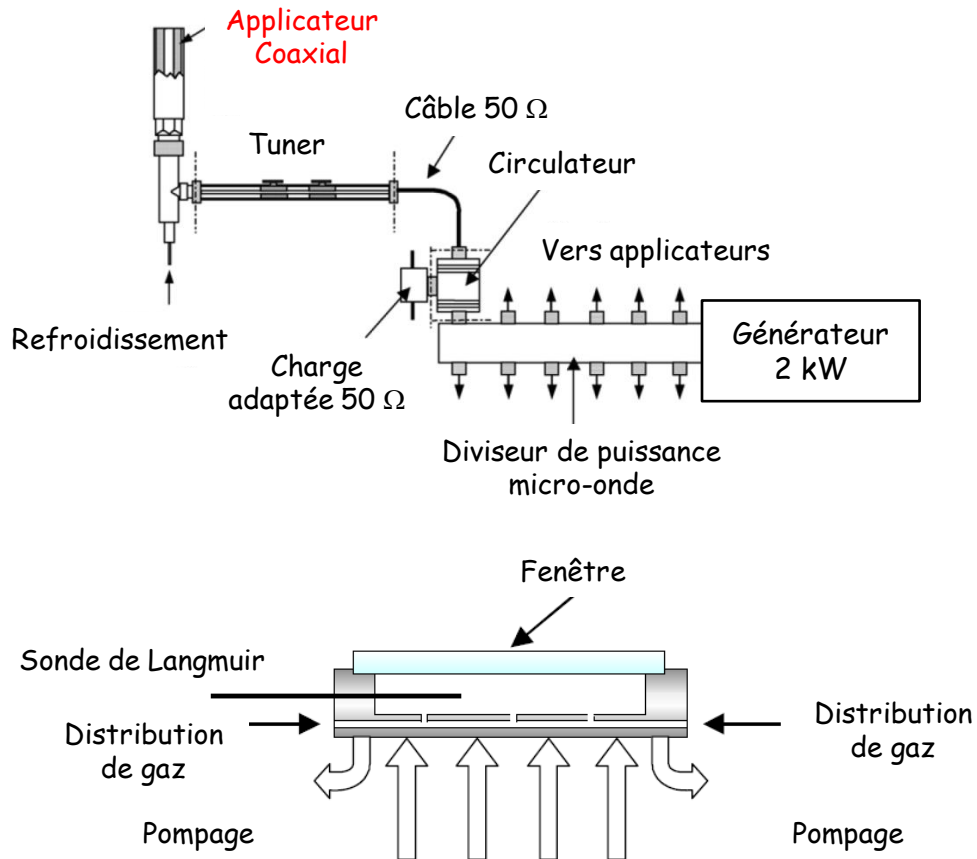
Source plasma Coaxiale



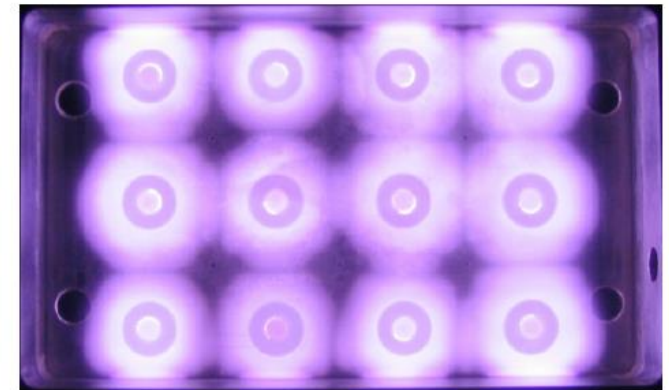
Renforcement du champ électrique à l'interruption de la ligne coaxiale

Plasmas Distribués (sources coaxiales)

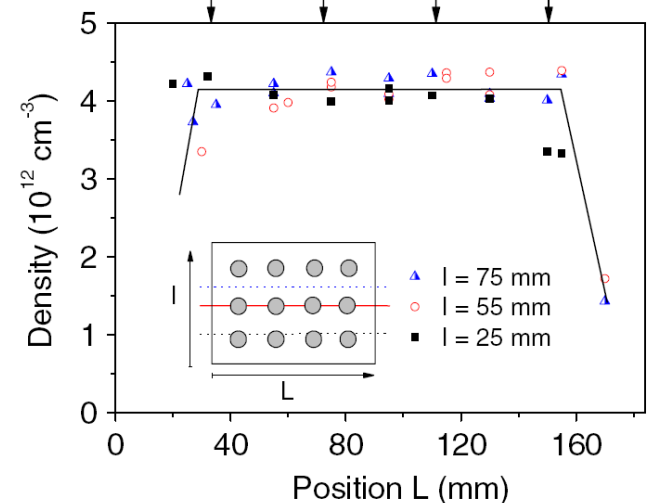
Configuration plasma Matriciel



Plasma Ar, P = 60 pa, 100 W



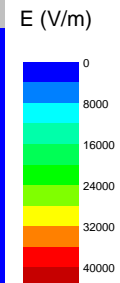
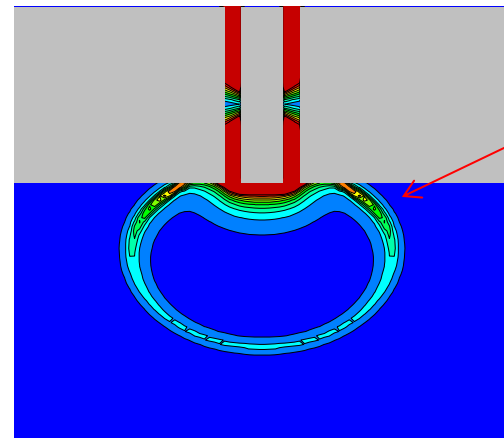
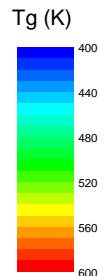
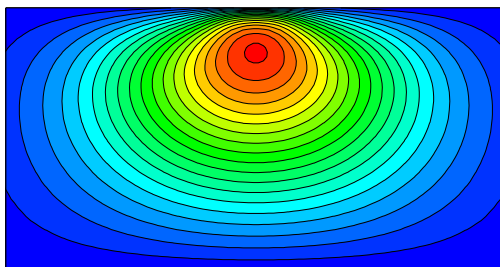
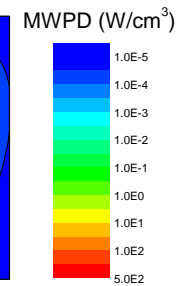
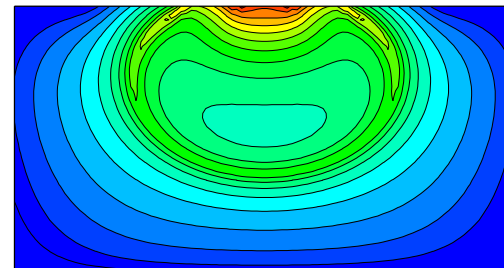
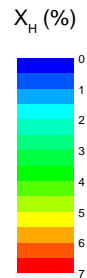
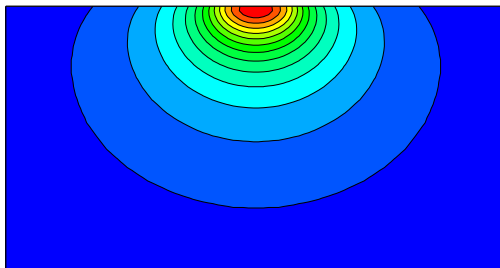
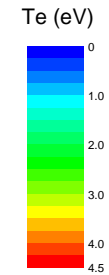
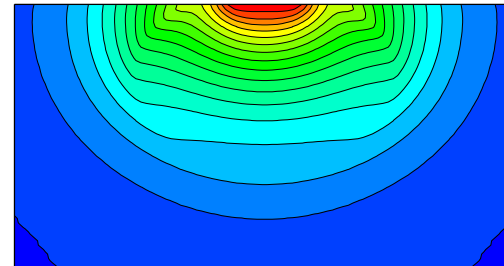
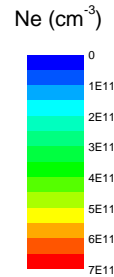
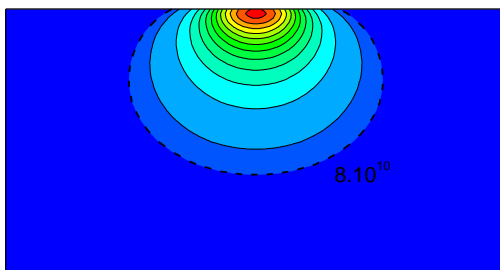
Position of microwave applicators



Plasma quasi-homogène à partir de 20 mm du plan de source

Plasmas Distribués (sources coaxiales)

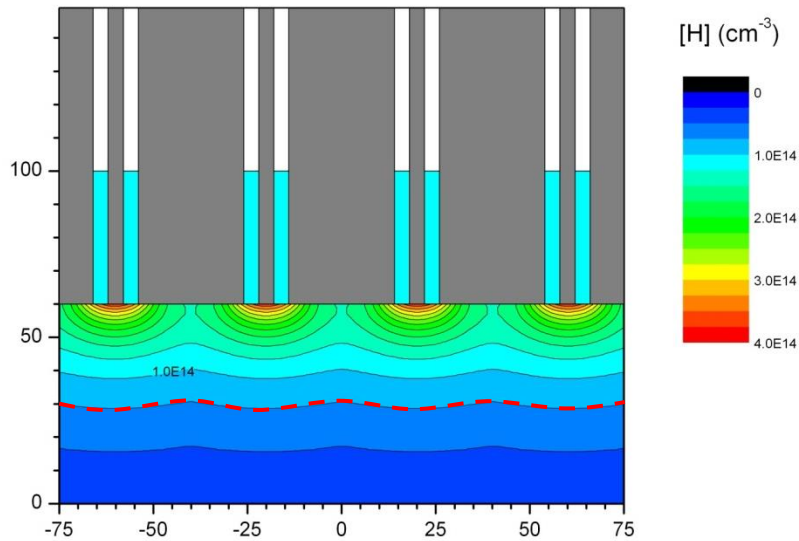
Plasma H_2 , $P = 50$ pa, 100 W



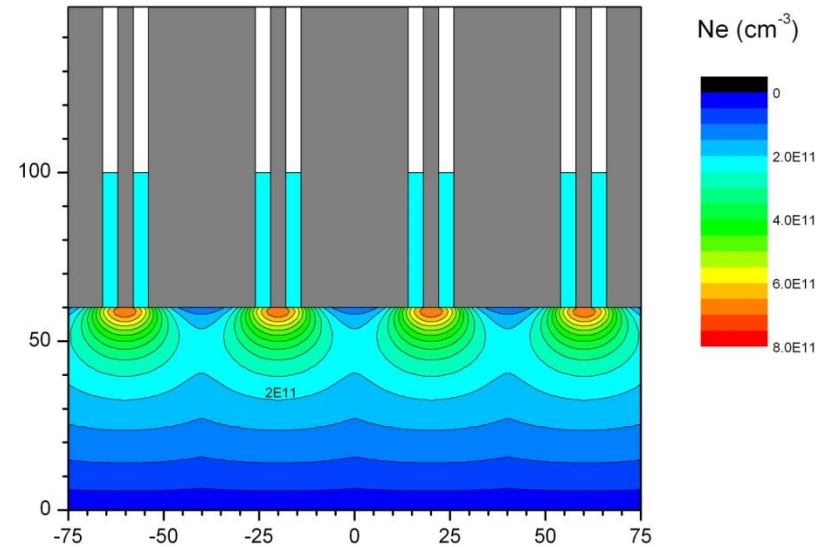
Propagation de E, le long de la ligne de cut-off
($n_e = 7,5 \cdot 10^{10} cm^{-3}$)

Plasmas Distribués (sources coaxiales)

Configuration plasma Matriciel



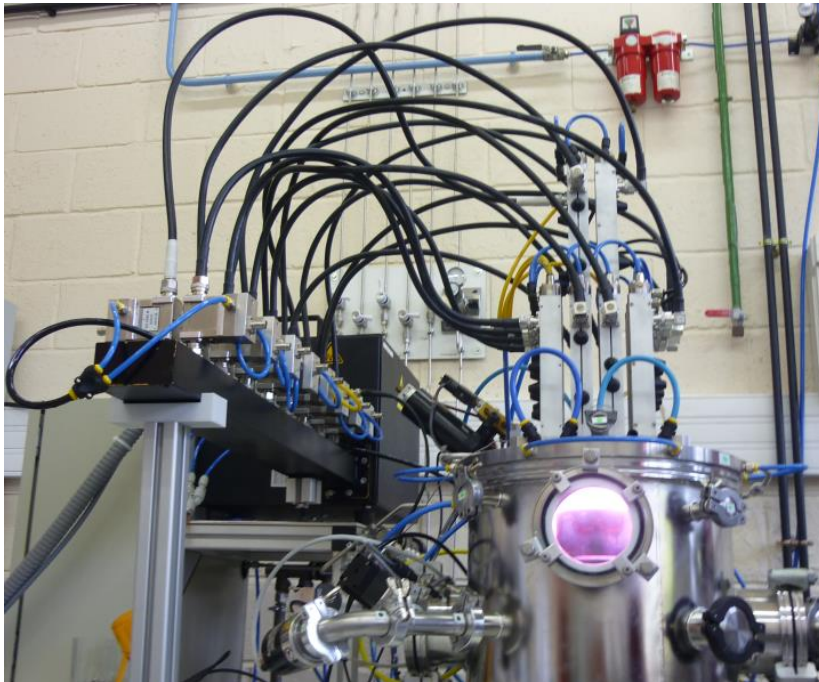
Plasma H_2 , $P = 50 \text{ pa}$, 100 W



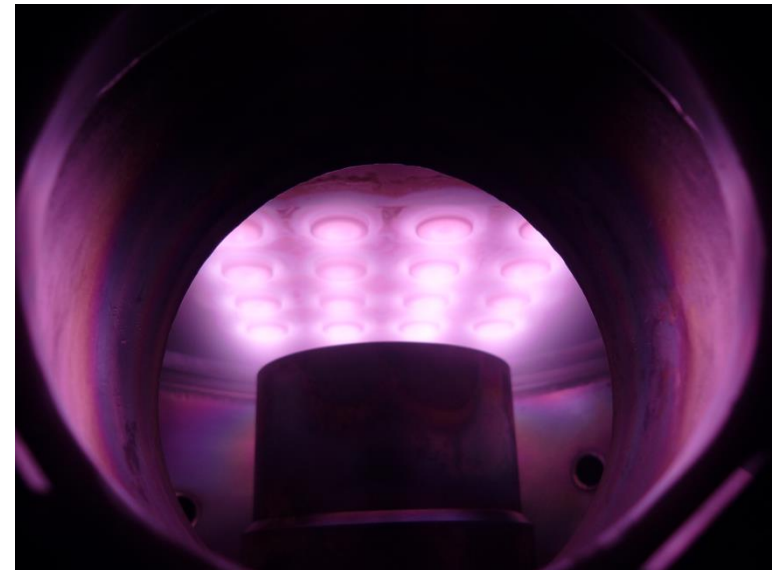
Plasma quasi-homogène à partir de 20 mm du plan de source

Plasmas Distribués (sources coaxiales)

Configuration plasma Matriciel (4x4)

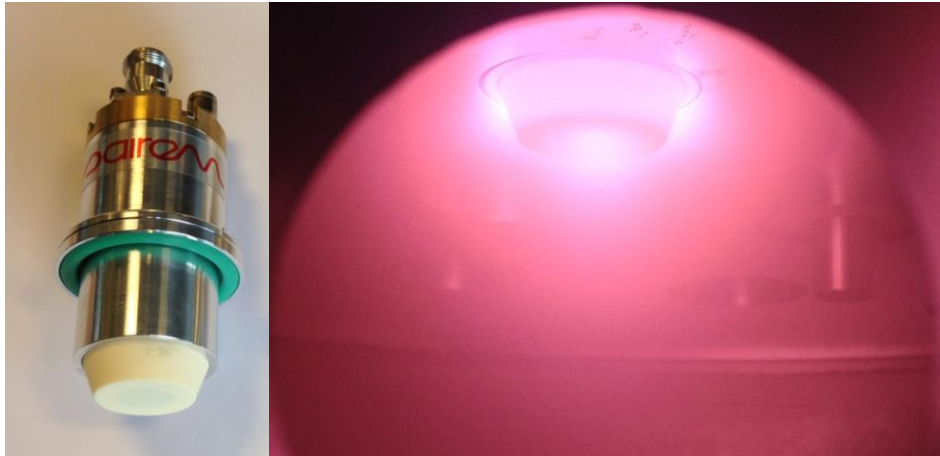


Plasma H_2 , $P = 50$ pa, 100 W/ source



Dépôt de films de diamant nanocristallin sur 150 mm de diamètre (plasma $H_2/CH_4/CO_2$)

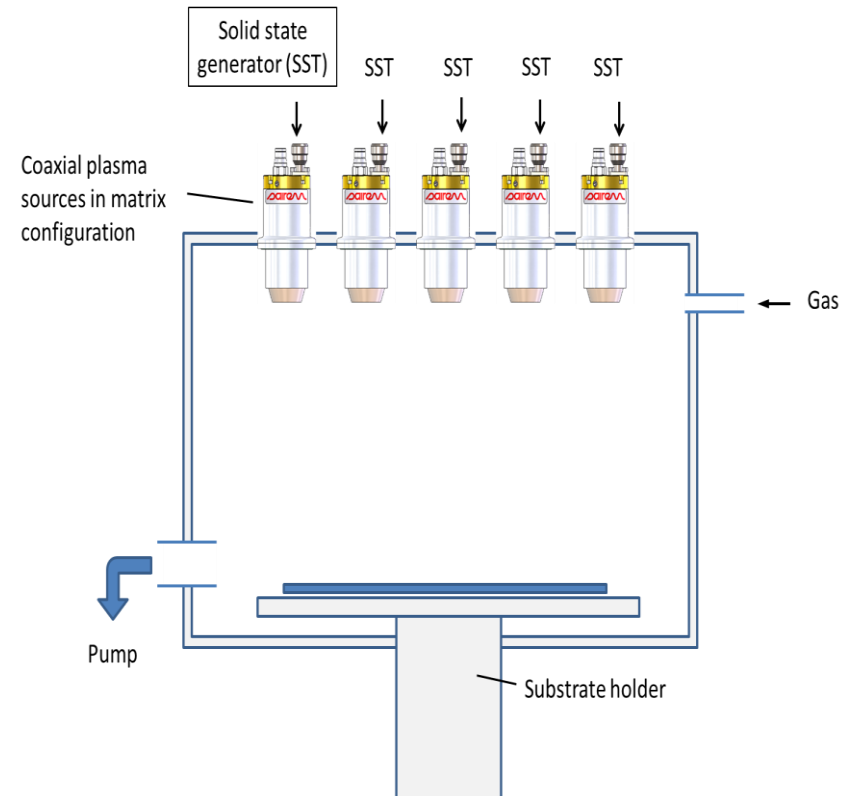
Plasmas Distribués (sources coaxiales)



Source SAIREM Hi-Wave pour production de plasma à pression intermédiaire (qq 0.1 mbar)

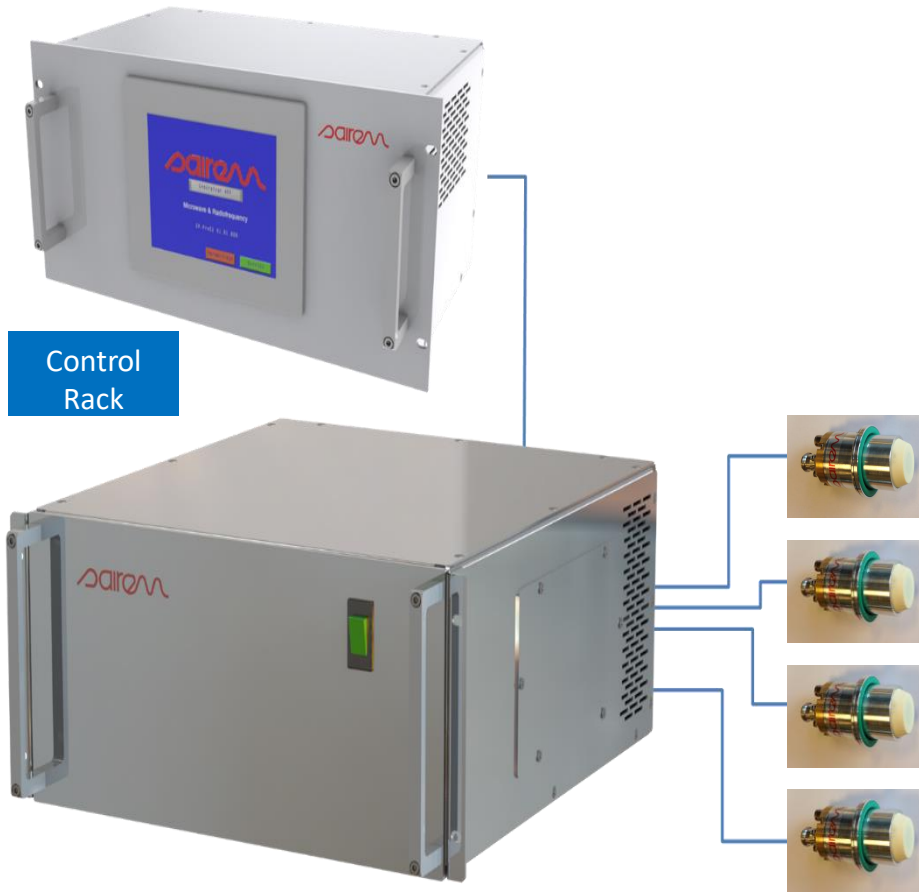
Automatic impedance tuning using variable frequency
(SAIREM patent WO 2012146870)

Configuration matricielle



Example of integration of Hi-Wave plasma sources in matrix configuration for the production of a **high density sheet of plasma**

Plasmas Distribués (sources coaxiales)



Control Rack

4 × 200 W 2.45 GHz module rack

Hi-WAVE plasma sources



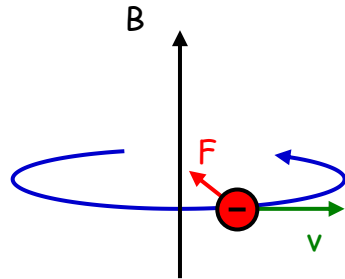
Plasmas ECR

A basse pression, la puissance est perdue par les pertes aux parois et la création d'électrons chauds, plutôt que de l'ionisation.

L'utilisation d'un champ magnétique permet de pallier cette limitation (la pression doit être suffisamment faible pour que le libre parcours moyen des ions soit de l'ordre de grandeur de la dimension de la chambre).

$$\vec{F} = -q(\vec{v} \wedge \vec{B})$$

q : charge de l'électron
 m_e : masse de l'électron



$$\Omega = \frac{q \cdot B}{m_e}$$

Un électron mobile interagissant avec un champ magnétique subit une force de Lorentz perpendiculaire à son mouvement

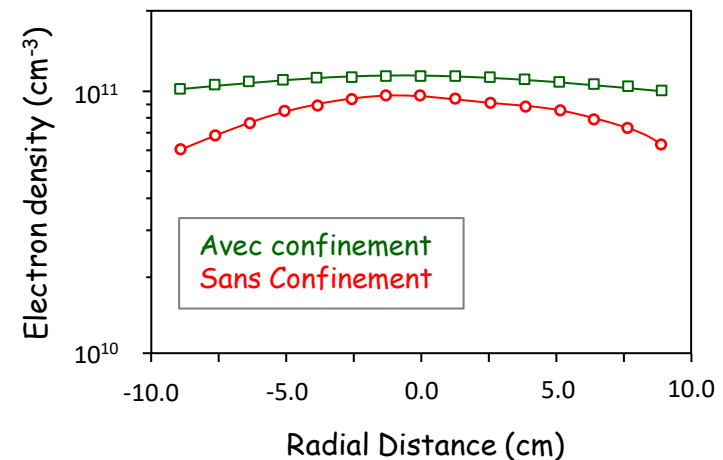
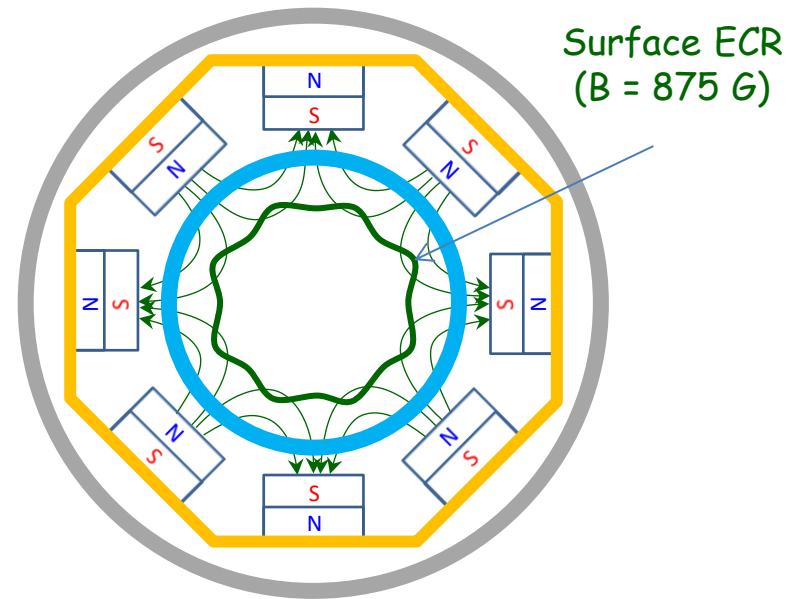
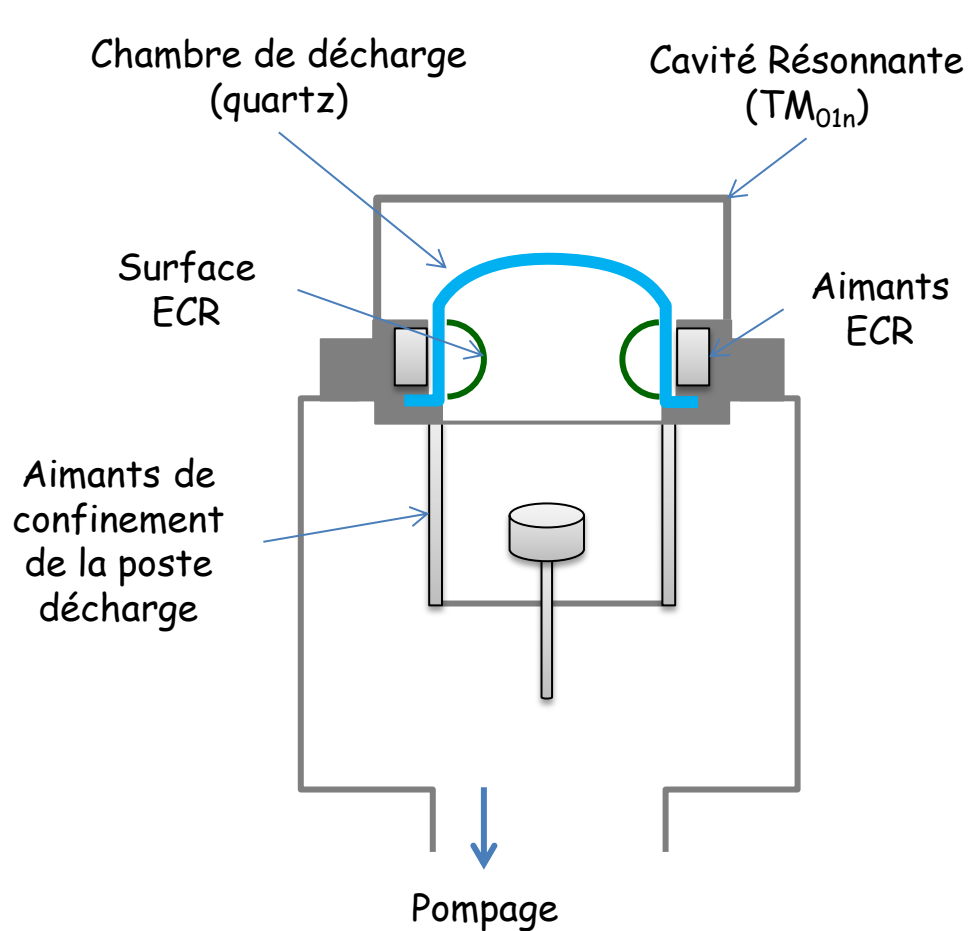
La force étant perpendiculaire à sa vitesse, l'électron décrit un cercle autour de la ligne de champ magnétique (la variation de la vitesse de l'électron change le rayon de son orbite mais pas sa période).

L'électron tourne à la fréquence de précession de Larmor Ω .

B (Gauss)	Ω (MHz)
100	280
875	2450

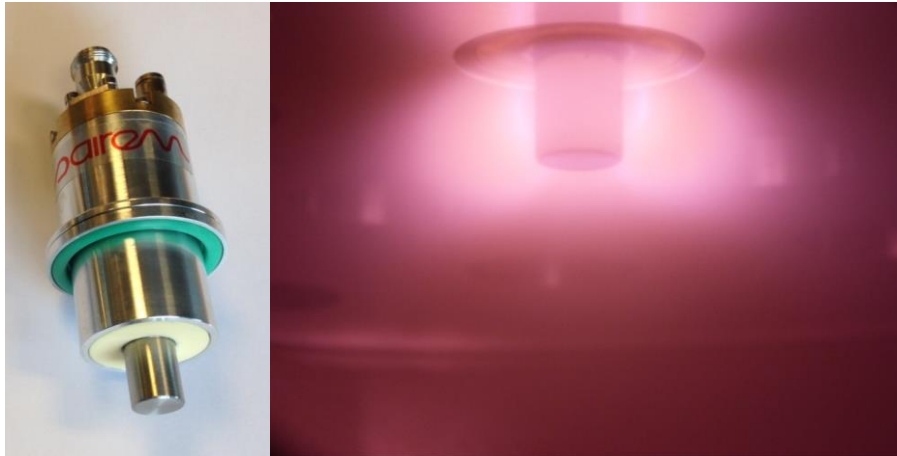
Un champ électromagnétique à la fréquence de Larmor sera en phase avec les électrons et transférera son énergie à chaque cycle. C'est le principe des réacteurs à plasma RCE (Résonance Cyclotronique Electronique).

Plasma ECR en cavité résonnante



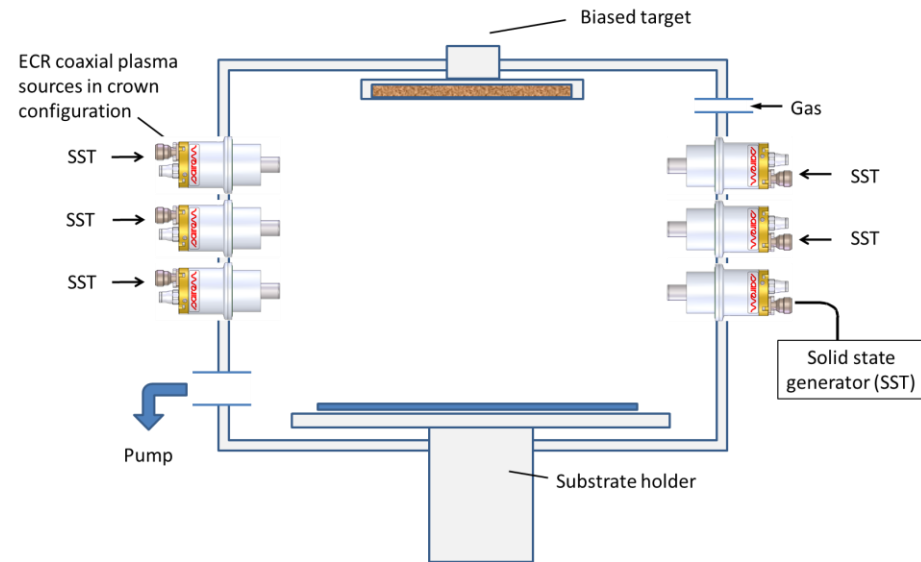
La structure de champ magnétique doit être optimisée pour limiter les pertes aux parois

Plasmas Distribués (sources coaxiales)



Source SAIREM Aura-Wave pour production de plasma ECR

Configuration en couronne



Example of integration of Aura-Wave plasma sources in crown configuration for the production of a **high density volume of plasma**

Performances des réacteurs Micro-ondes

Les performances d'un réacteur plasma peuvent être évaluées suivant plusieurs critères:

- Efficacité du couplage micro-onde
- Coût énergétique de production des ions (eV/ion)
- Ne, Te
- Densité de puissance micro-onde
- Dimension de la zone de traitement
- Vitesse de croissance, uniformité de dépôt
- Tenue en puissance du réacteur (durée de vie du quartz ...)

Conclusion

- Plasmas Denses
- Sans électrodes
- Potentiel des surfaces quasi-nul
- Sources Compactes
- Potentiellement transposables sur de grandes surfaces
- L'utilisation d'un chauffage ECR permet d'améliorer l'homogénéité et la densité des plasmas micro-ondes
- Difficile d'obtenir des plasmas homogènes de grandes dimensions à pression modérée