

SOURCES DE PUISSANCE RF

Jean Lesrel

lesrel@ipno.in2p3.fr

l'Ecole des accélérateurs
Bénodet
février 2014

Deux trois notions avant de commencer

SOURCES DE PUISSANCE RF

Sources = très souvent Amplificateurs ou oscillateurs

Cela comprend le composant lui même mais aussi les alimentations nécessaires a son fonctionnement et souvent son préamplificateur, son système de refroidissement (à air, à eau ou les deux), les pompes à vide, le contrôle-commande, les mesures, les sécurités etc...

Pour travailler sur les sources de puissance il faut être:

électricien, électronicien, électrotechnicien, hydraulicien, vidicien, magnéticien, informaticien, radioprotechnicien, physicien et surtout démerdicien

Deux trois notions avant de commencer

SOURCE DE PUISSANCE RF

Puissance l'unité le Watt mais en on utilise aussi les dBm

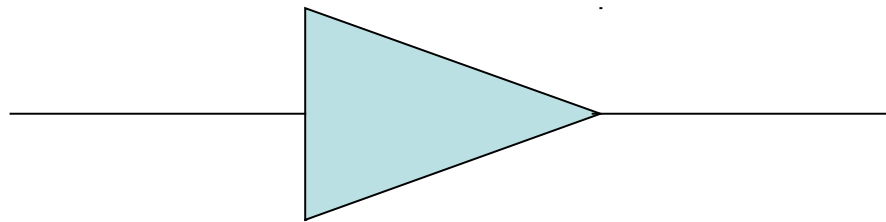
Les électroniciens n'étant pas très doué pour le calcul mental

Ils préfèrent additionner que multiplier

Puissance
d'entrée

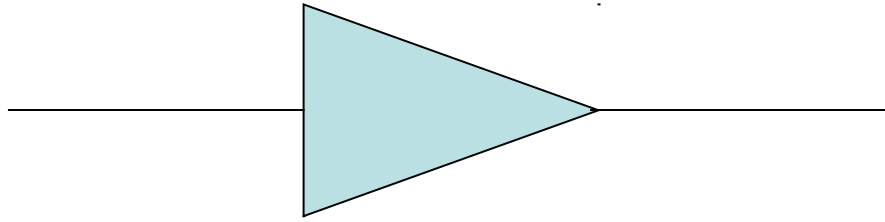
4,3 mW

2,58 W



?

Gain en
puissance = 80



Gain en puissance en dB

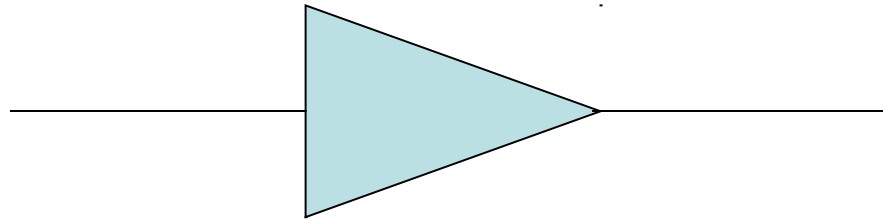
$$\text{Gain (dB)} = 10 \text{ Log}_{10} (\text{Psortie}/\text{Pentré})$$

Gain en puissance de 10	10dB	
Gain en puissance de 100	20 dB	
Gain en puissance de 2	3 dB	(3,01 dB)
Gain en puissance de 4	6 dB	(6,02 dB)
Gain en puissance de 8	9 dB	(9,031 dB)
Gain en puissance de 80	19 dB	(19,031 dB)

Attention: pour les gains en tension c'est $20 \text{ Log}_{10} (\text{Vsortie}/\text{Ventré})$

$$P = V^2 / R \text{ et que } \text{Log}_{10} (x^2) = 2 \text{ Log} (x)$$

Puissance en
dBm



Gain en puissance en dB

$$\text{Puissance (dBm)} = 10 \text{ Log}_{10} (\text{P en W} / 1 \text{ mW})$$

1mW 0 dBm

10mW 10 dBm

20 mW 13 dBm

100 mW 20 dBm

0,1 mW -10 dBm

1μW -30 dBm

1 nW -60 dBm

2 nW -57 dBm

1 W 30 dBm

4,3 mW 6,335 dBm

2,58 W 34,116 dBm

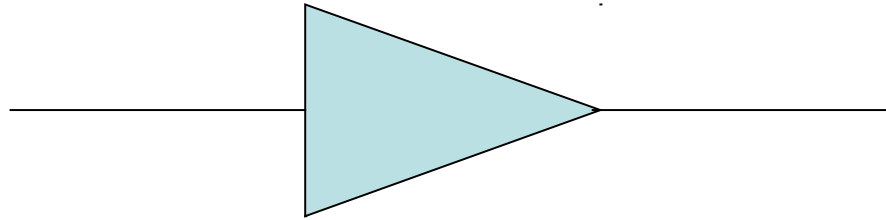
Il existe aussi les dBW mais pas souvent utilisés dans les accélérateurs

$$\text{Puissance (dBW)} = 10 \text{ Log}_{10} (\text{P en W} / 1 \text{ W})$$

Puissance
d'entrée

4,3 mW

2,63 W



Gain en puissance = 80

?

344 mW

210 W

339 mW

209 W

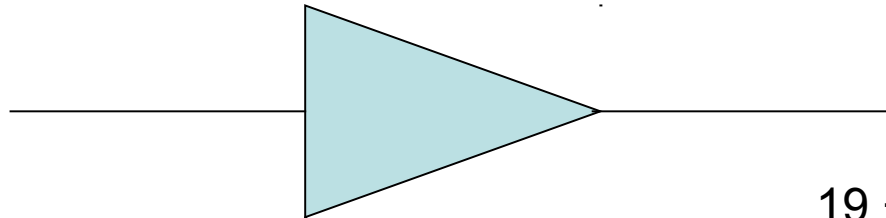


$$P (W) = 10^{(PdBm/10)} \times 1 \text{ mW}$$

Puissance
d'entrée

≈ 6,3 dBm

≈ 34,2 dBm



Gain en puissance = ≈ 19 dB



$$19 + 6,3 = 25,3 \text{ dBm}$$

$$19 + 34,2 = 53,2 \text{ dBm}$$

Notion de continu et Pulsé

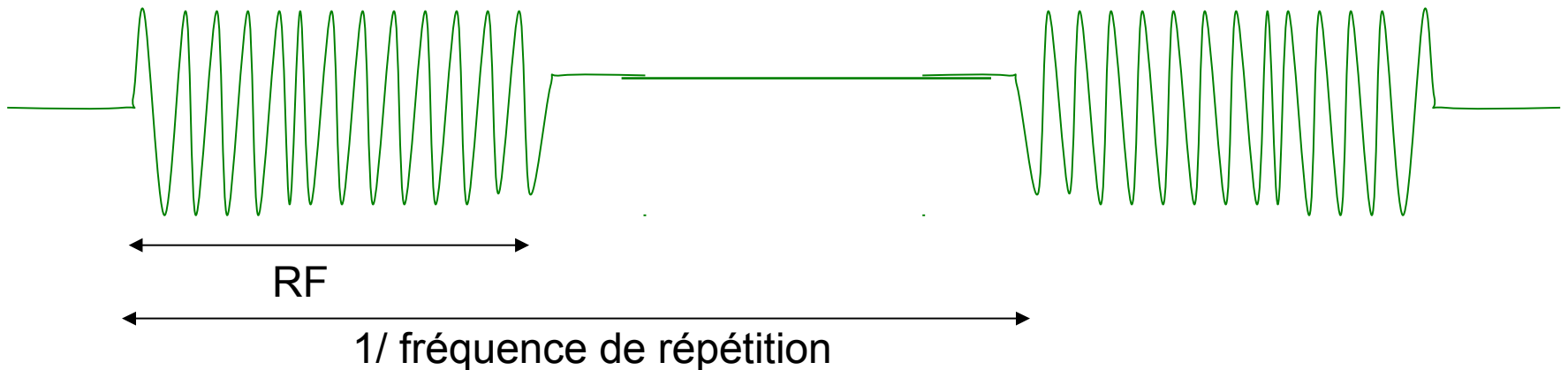
Suivant le type d'accélérateur, les sources de puissance peuvent être continues ou pulsées.

Continu (CW pour Continuous Wave) veut dire que la source délivre tout le temps de la RF.

Puissance moyenne = Puissance crête

Pulsé veut dire que la source délivre pendant un certain temps puis s'arrête et re délivre de la puissance au bout d'un autre temps (rapport cyclique)

Puissance moyenne = Puissance crête x durée RF x fréquence de répétition



Deux trois notions avant de commencer

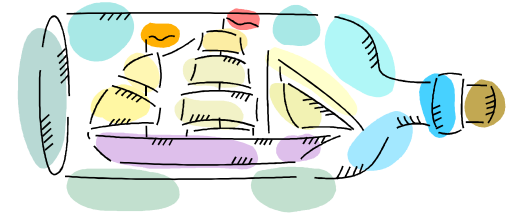
SOURCE DE PUISSANCE RF

Onde électromagnétique

Onde électromagnétique

distance

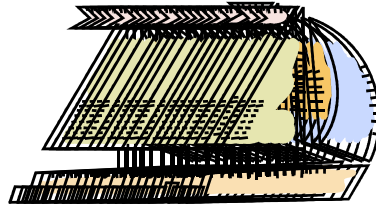
Onde électromagnétique



distance

Champs électrique et
champs magnétique

Onde électromagnétique



distance

L'énergie d'une onde électromagnétique est l'énergie d'un flux de photons ($h \cdot f$)

h constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js) et f la fréquence.

Ce sont les photons qui se déplacent

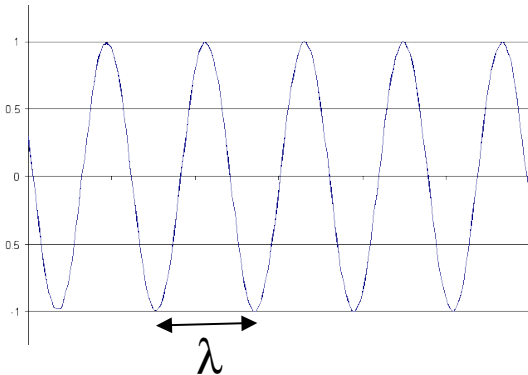
Onde électromagnétique

Pourquoi Sinusoïdale ?

Une onde sinusoïdale se propage dans un milieu homogène sans déformation, l'amplitude baisse (atténuation) la phase varie mais la forme reste la même et la fréquence reste identique (ce sont toujours les mêmes photons qui se déplacent, on en perd mais ils ont toujours la même énergie).

Longueur d'onde

Une onde électromagnétique de fréquence f se déplaçant dans l'espace à la vitesse de la lumière c , la longueur d'onde est définie par $\lambda = c/f$



Remarques : La longueur d'onde d'un signal RF est du même ordre de grandeur que les éléments employés pour le produire. Pas de simplification ni comme en électricité (élément ponctuel) ni comme en optique géométrique (élément grand devant λ) → modèle de Maxwell

Deux trois notions avant de commencer

SOURCE DE PUISSANCE RF

RF = Radio Fréquency, Radio Fréquence, HF comme Haute Fréquence mais aussi Hyperfréquence

Vocabulaire pas très clair car chaque domaine d'utilisation utilise son propre vocabulaire.

Essayons d'y voir plus claire

Ondes VLF (*Very Low Frequency*)

3 kHz à 30 kHz

Radiocommunications sous-maritimes militaires, systèmes de radionavigation, émetteurs de signaux horaires

Ondes LF (*Low Frequency*)

30 kHz à 300 kHz

Ondes électromagnétiques naturelles des orages terrestres, radiocommunications maritimes et sous-maritimes, transmissions par courant porteur, radiodiffusion en OL, émetteurs de signaux horaires, systèmes de radionavigation

Ondes MF (*Medium Frequency*)

300 kHz à 3 MHz

Systèmes de radionavigation, radiodiffusion en OM, radiocommunications maritimes et aéronautiques, radioamateurs, signaux horaires

Ondes HF (*High Frequency*)

3 MHz à 30 MHz

Radiodiffusion internationale, radioamateurs, radiocommunications maritimes et aéronautiques, radiocommunications militaires et d'ambassades, transmissions gouvernementales, signaux horaires, CB en 27 MHz **CYCLOTRON**

Ondes VHF (*Very High Frequency*)

30 MHz à 300 MHz

Radiodiffusion et télédiffusion, radiocommunications professionnelles, transmissions militaires, liaisons des secours publics, radionavigation et radiocommunications aéronautiques, radioamateurs, satellites météo **CYCLOTRON, LINAC, SYNCHROTRON**

Ondes UHF (*Ultra High Frequency*)

300 MHz à 3 GHz

Télédiffusion, radiodiffusion numérique, radioamateurs, radiocommunications professionnelles, transmissions militaires y compris aéronautiques, liaisons gouvernementales, liaisons satellites, FH terrestres, radiolocalisation et radionavigation, services de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), usages spatiaux, satellites météo, téléphonie, Global System for Mobile Communications ou GSM (historiquement Groupe Spécial Mobile) et Universal Mobile Telecommunications System (*UMTS*), liaisons WI-FI et Bluetooth, systèmes radar **LINAC, SYNCHROTRON, ECR**

Ondes SHF (*Super High Frequency*)

3 GHz à 30 GHz

FH terrestres et par satellite, systèmes radar, liaisons et FH militaires divers, radioastronomie et usages spatiaux, radiodiffusion et télédiffusion par satellite, liaisons Wi-Fi, fours à micro-ondes **LINAC ECR**

Ondes EHF (*Extremely High Frequency*)

30 GHz à 300 GHz

FH terrestres et par satellite, recherches spatiales, radioastronomie, satellites divers, liaisons et FH militaires, radioamateurs, systèmes radar **ECR**

Les **Bandes de fréquences de la télévision terrestre** sont situées dans la **bande** de radiofréquence comprise entre 30 et 3000 MHz regroupant les très hautes fréquences (VHF) et ultra hautes fréquences (UHF).

Bande I
de 47 à 68 MHz

Bande II
de 87,5 à 108 MHz.

Cette bande est utilisée pour la diffusion de la radio en modulation de fréquence (appelée couramment «bande FM »).

Bande III
de 174 à 230 MHz (174 à 223 MHz en France).
Cette bande est utilisée pour la diffusion de la télévision

Bande IV
de 470 à 606 MHz,
utilisées pour la diffusion de la télévision analogique et digitale

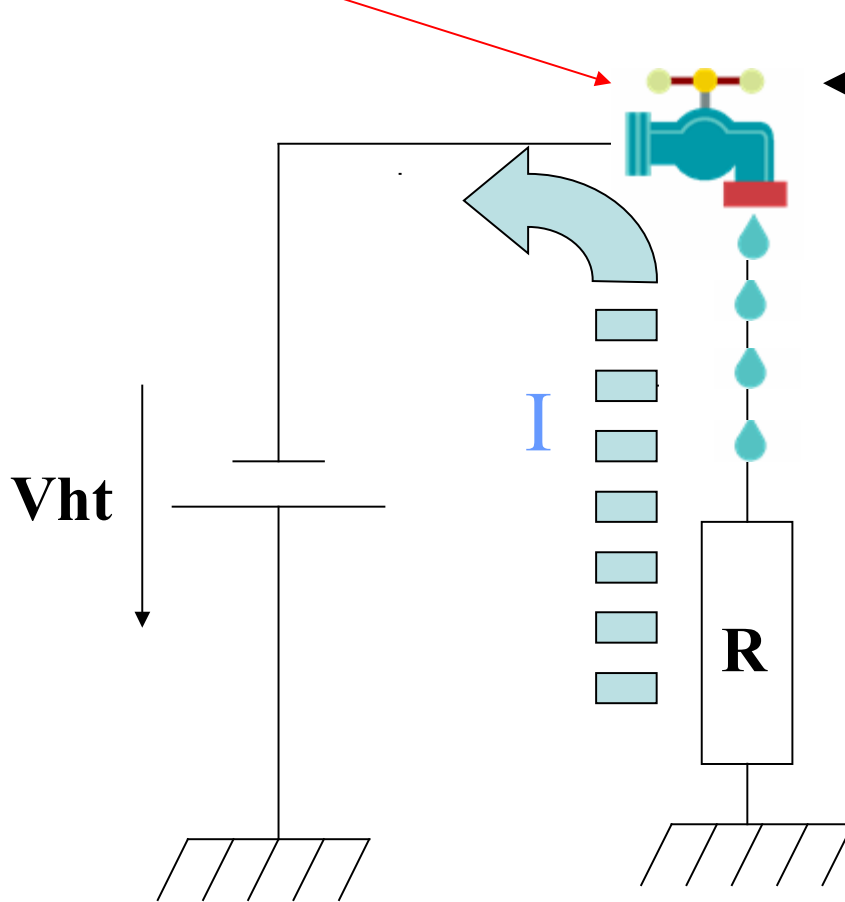
Bande V
de 606 à 862 MHz

Le nom des plages de fréquences utilisées dans le monde des **radars** provient de la Seconde Guerre mondiale. En effet, pour garder secret le développement de ce système, les militaires ont décidé de donner à ces plages des noms de code qui sont demeurés en usage depuis.

Bande P	< 300 MHz	Primitif
Bande L	1 à 2 GHz	Long
Bande S	2 à 4 GHz	Short
Bande C	4 à 8 GHz	Compromis en S et X
Bande X	8 à 12 GHz	
Bande Ku	12 à 18 GHz	Under K
Bande K	18 à 27 GHz	de l'allemand Kurtz (court)
Bande Ka	27 à 40 GHz	Above K
Bande Q	40 à 60 GHz	
Bande V	50 à 75 GHz	
Bande E	60 à 90 GHz	
Bande W	75 à 110 GHz	

Principe des sources de puissance RF

Système de modulation de courant



Exemple

$V_{ht} = 40 \text{ kV}$ $R = 10\,000 \Omega$ donc
 $I = 4 \text{ A max}$

Modulation max 4 A crête à crête
soit 1,4 A efficace

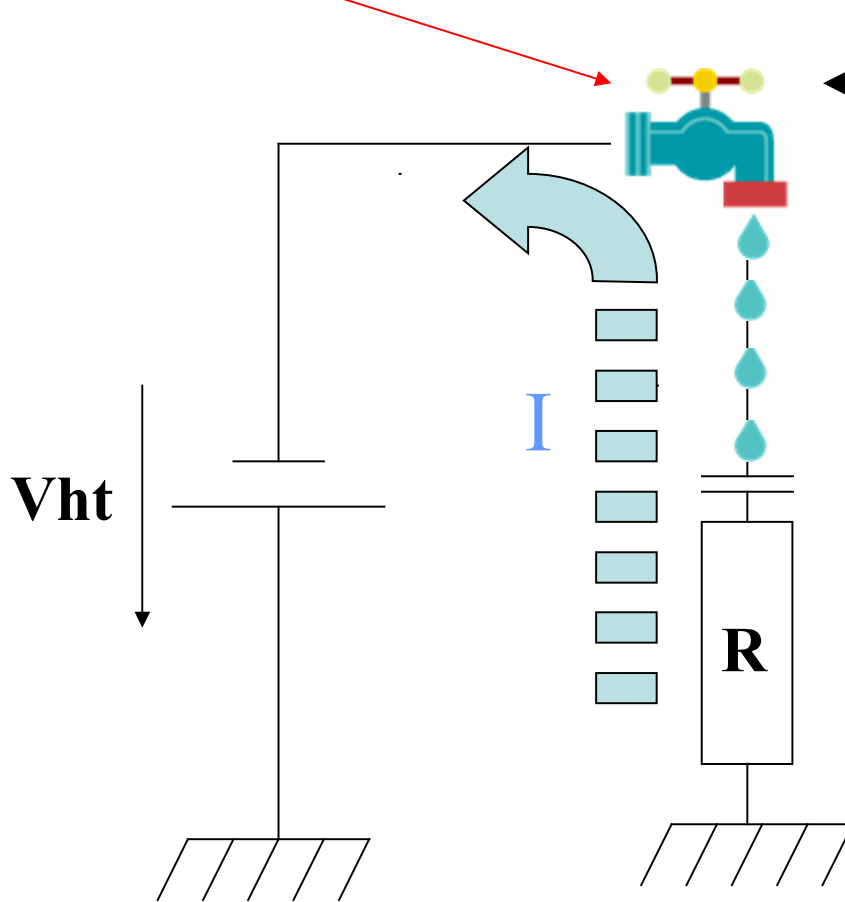
pour 2 A moyen

$P_{rf} = 20 \text{ kW HF}$ pour 116 kW Alim

17 % de rendement

Principe des sources de puissance RF

Système de modulation de courant



Exemple

$V_{ht} = 40 \text{ kV}$ $R = 10\,000 \Omega$ donc
 $I_{max} = 4 \text{ A}$

Modulation max 4 A crête à crête
soit 1,4 A efficace

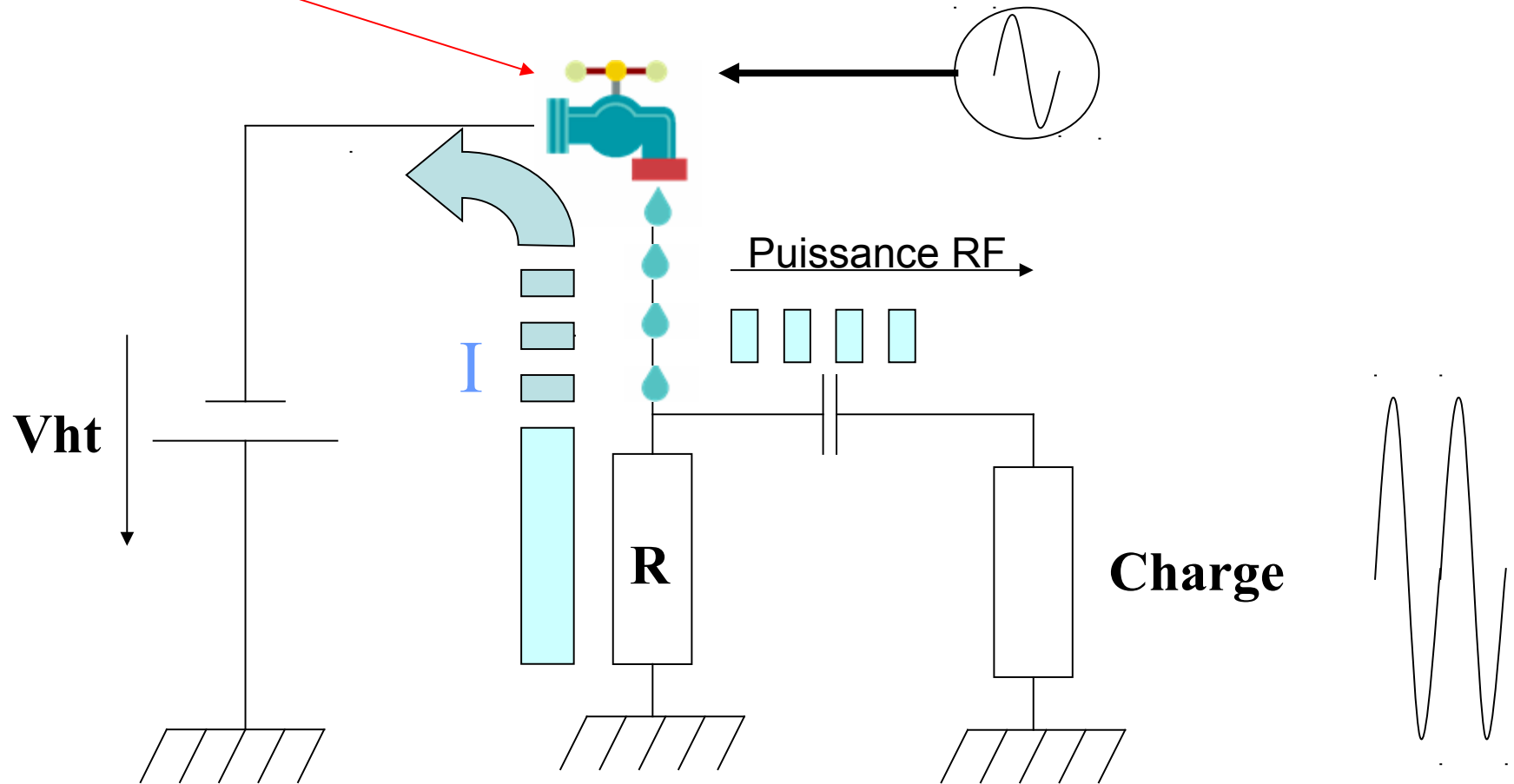
pour 0 A moyen

$P_{rf} = 20 \text{ kW}$ pour 20 kW

100% de rendement

Principe des sources de puissance RF

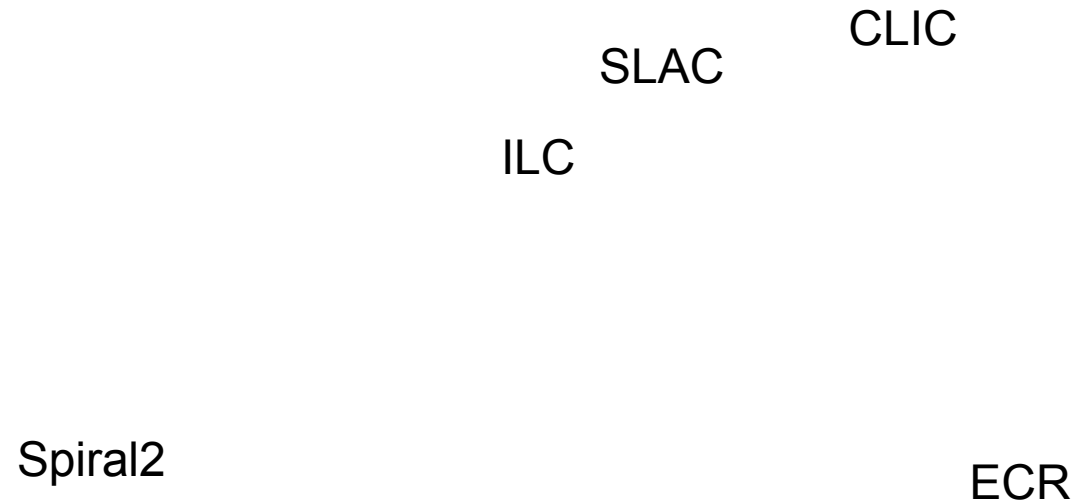
Système de modulation de courant



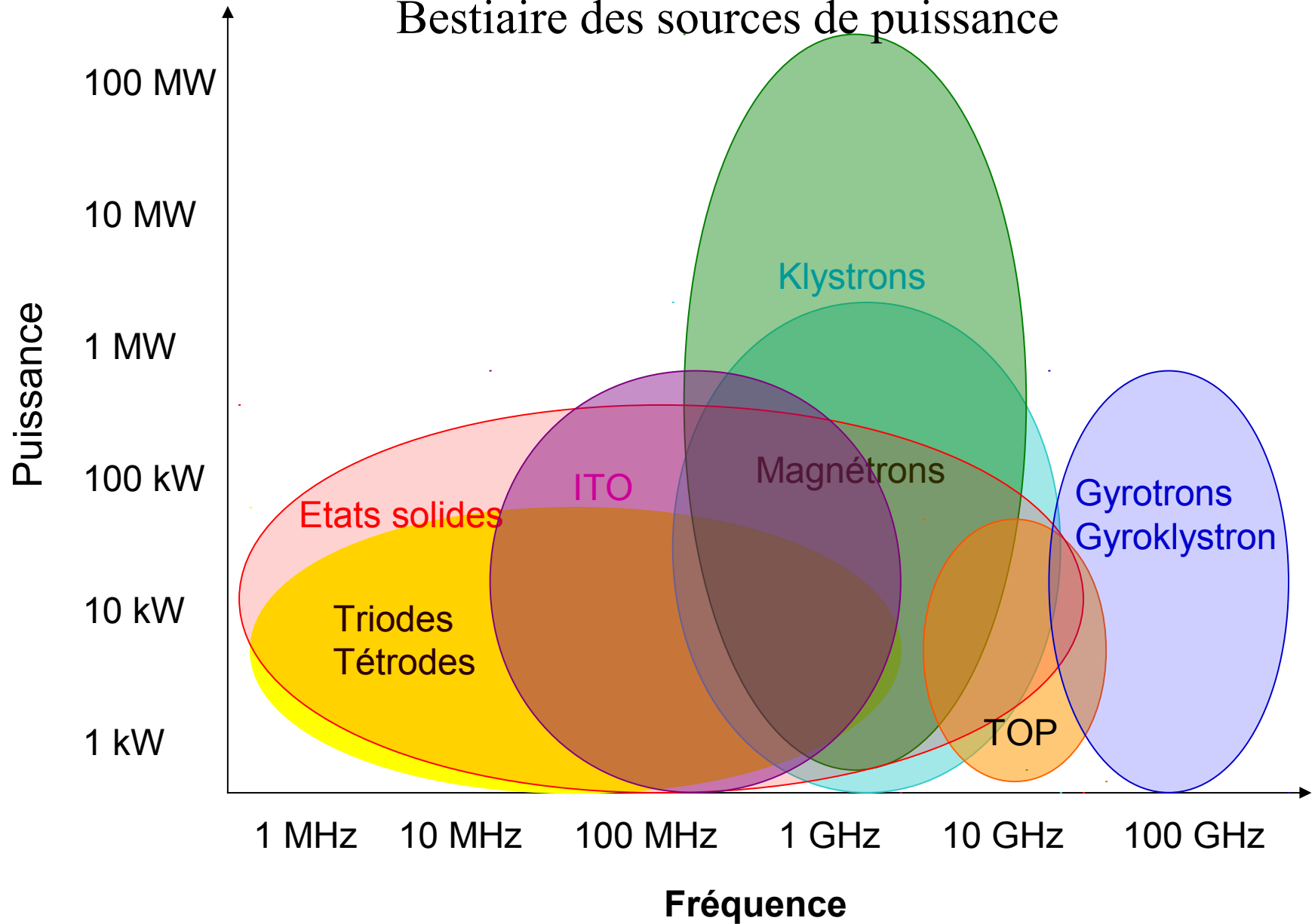
La réalité est entre les deux

20 à 80 % de rendement

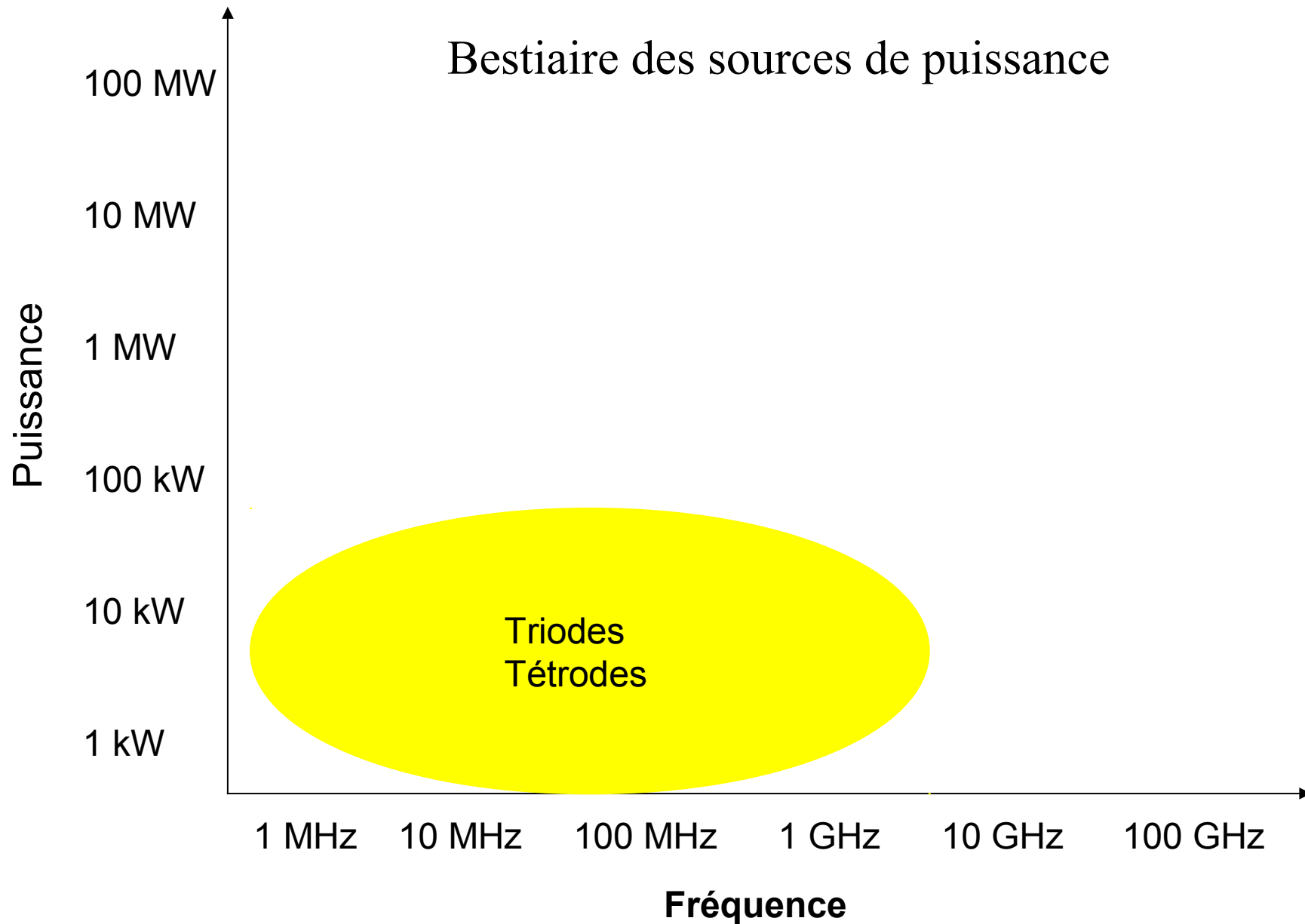
Bestiaire des besoins des accélérateurs



Bestiaire des sources de puissance



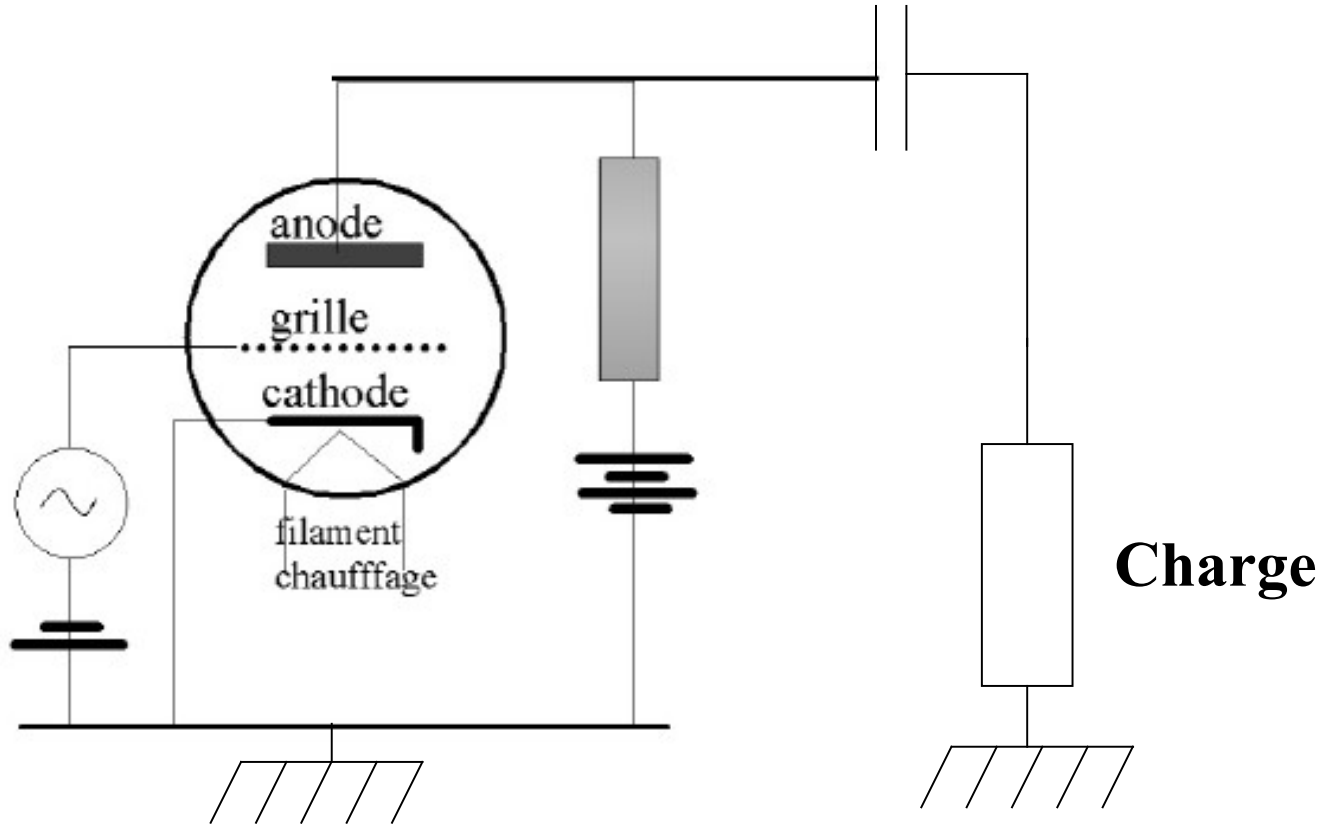
Bestiaire des sources de puissance





= Grille

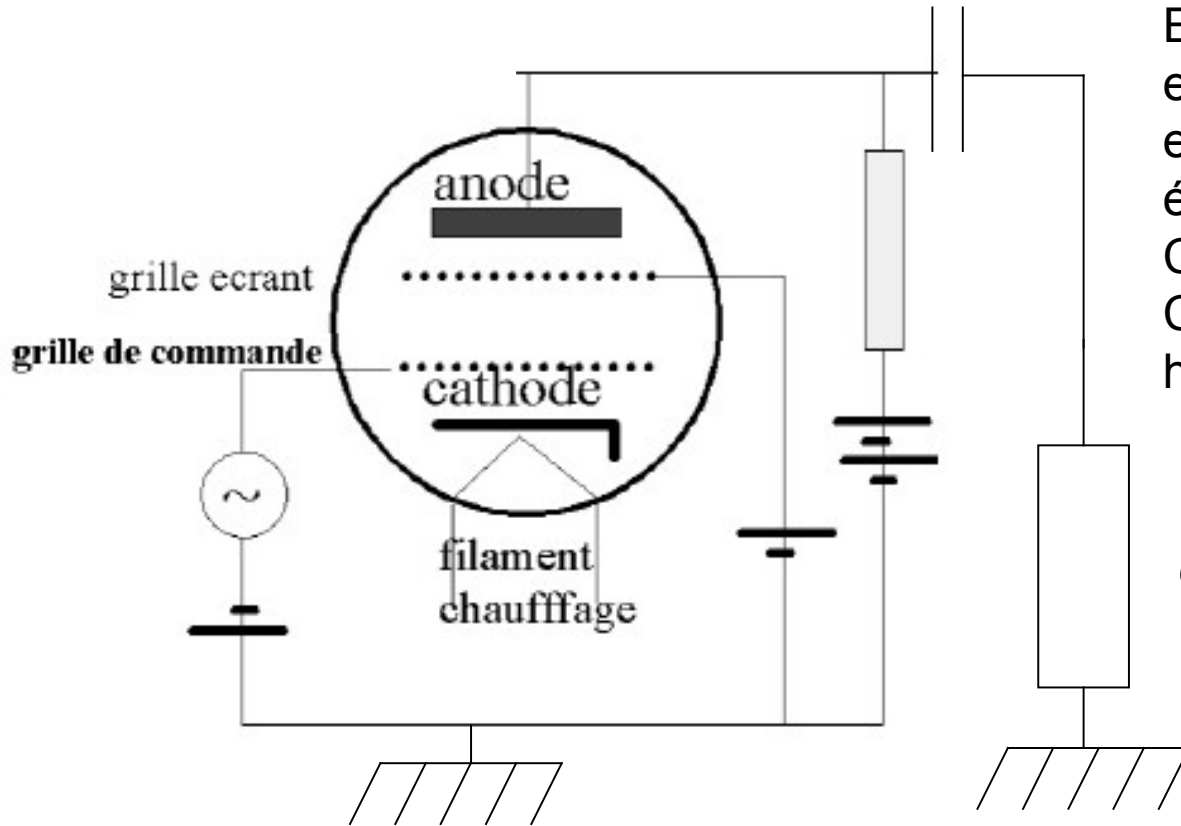
La triode





= Grille

La tédrode



En ajoutant une nouvelle grille entre la grille de commande et l'anode, on réalise un écran électrostatique qui réduit la Capacité grille anode
Ce qui permet de monter plus haut en fréquence

Charge

TH 781



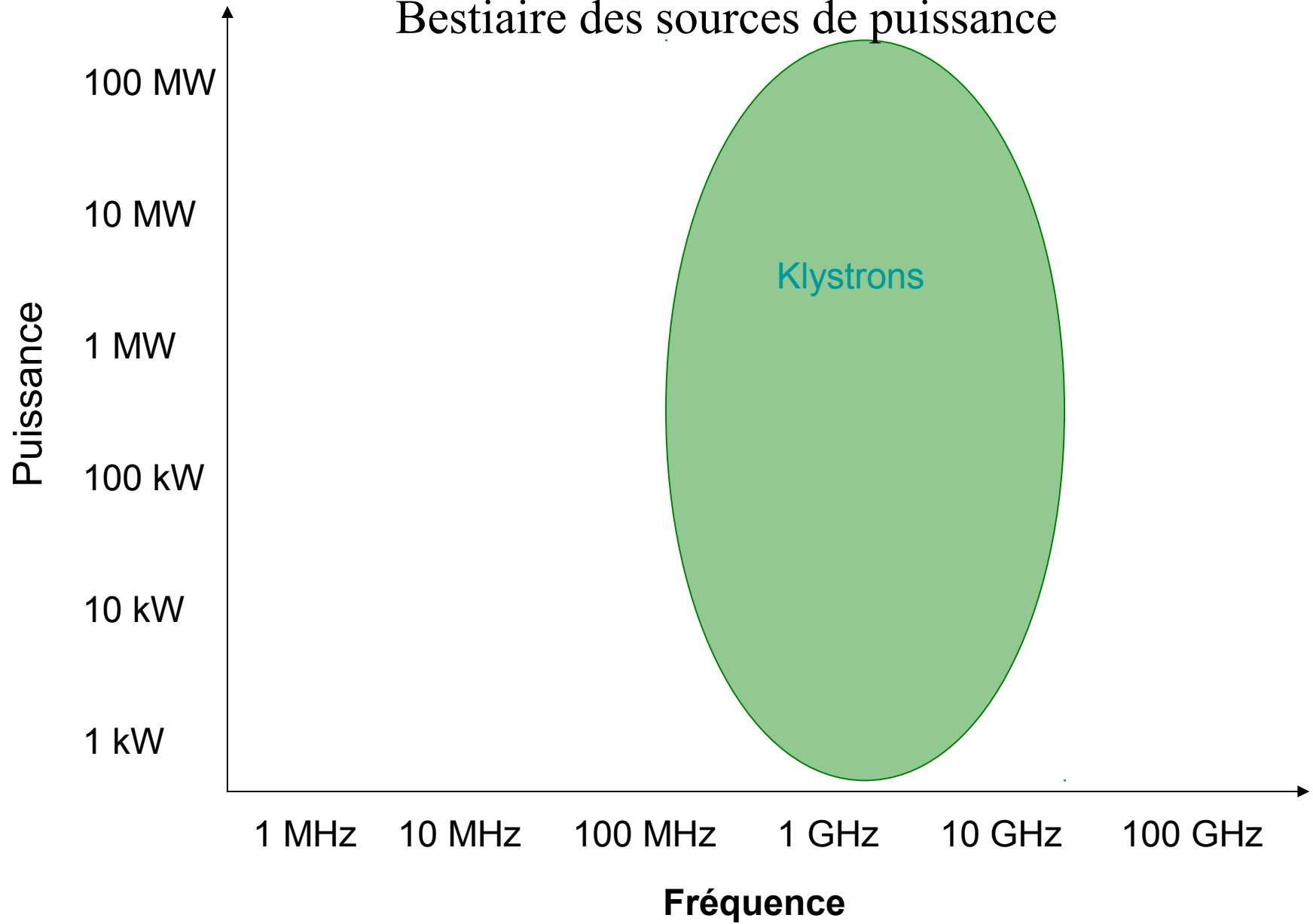
TH 713



TH 628



Bestiaire des sources de puissance



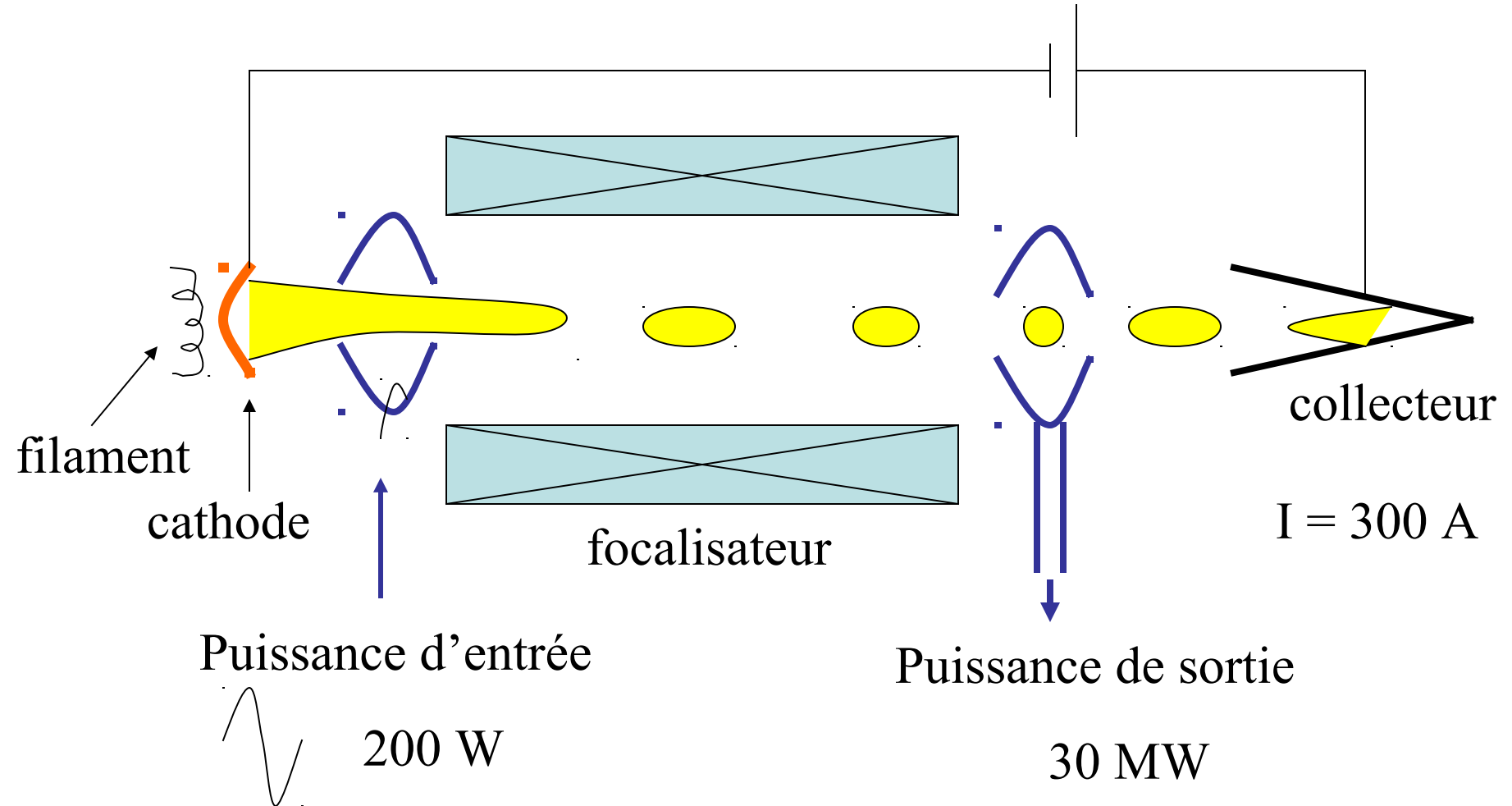


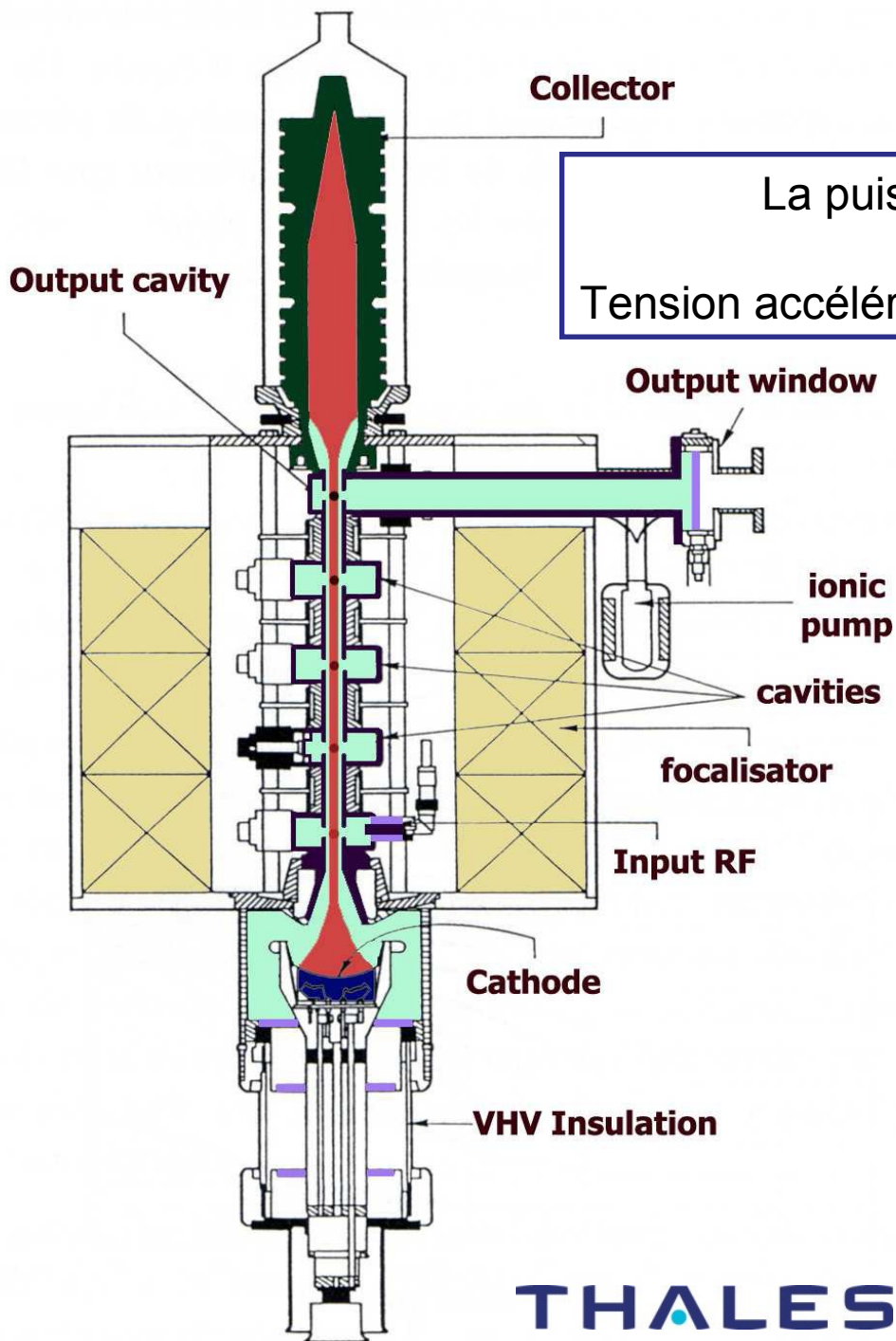
= Cavité

Le Klystron

Gain = 150 000

V (300 kV)





La puissance RF max de sortie =
 Tension accélératrice x Courant faisceau x rendement

Typiquement en pulsé (qq μ s)
 Tension accélératrice 250 kV
 Courant faisceau 200 A
 Rendement 40 %
 Soit 20 MW

Typiquement en CW
 Tension accélératrice 100 kV
 Courant faisceau 20 A
 Rendement 65 %
 Soit 1,3 MW

Le Klystron

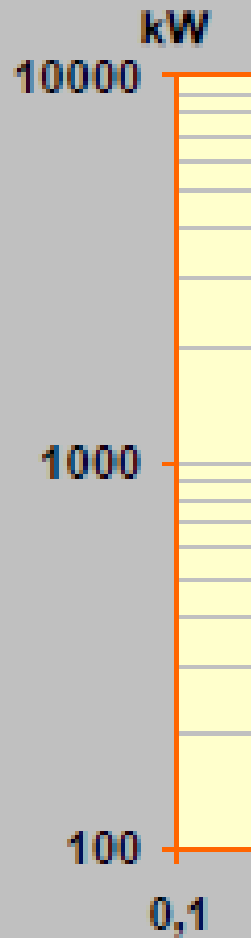


TH 2089B - Superklystron, extremely high output power (1.3 MW CW) and high efficiency.



Photo of TH1801 Tube
(top) and Cathode (bottom)

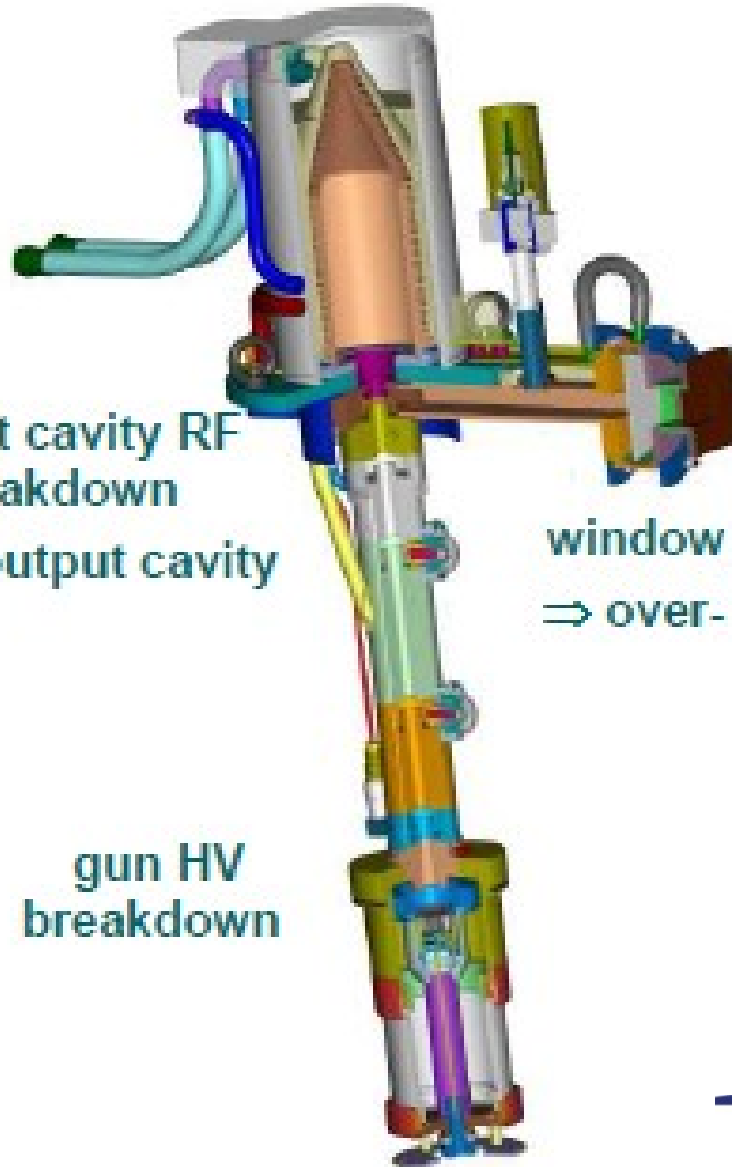
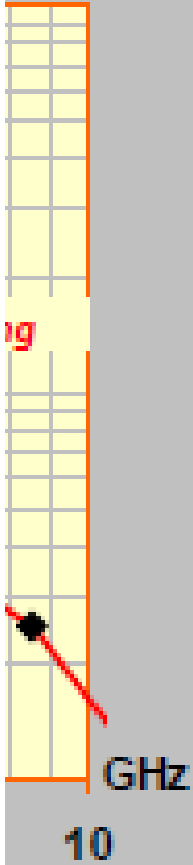
Les limitations en puissance



output cavity RF
breakdown
⇒ TW output cavity

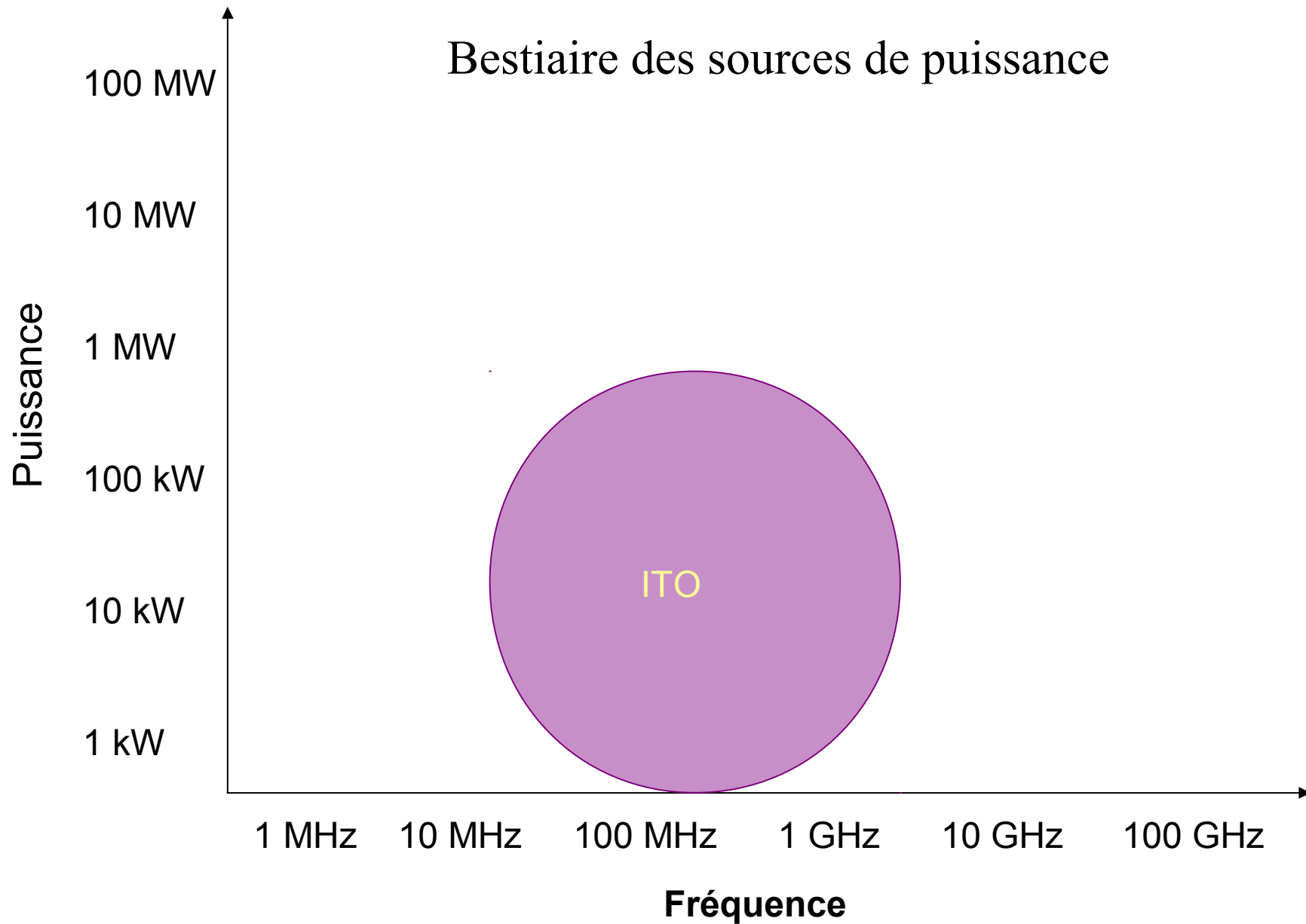
window RF breakdown
⇒ over- moded window

gun HV
breakdown



THALES

Bestiaire des sources de puissance

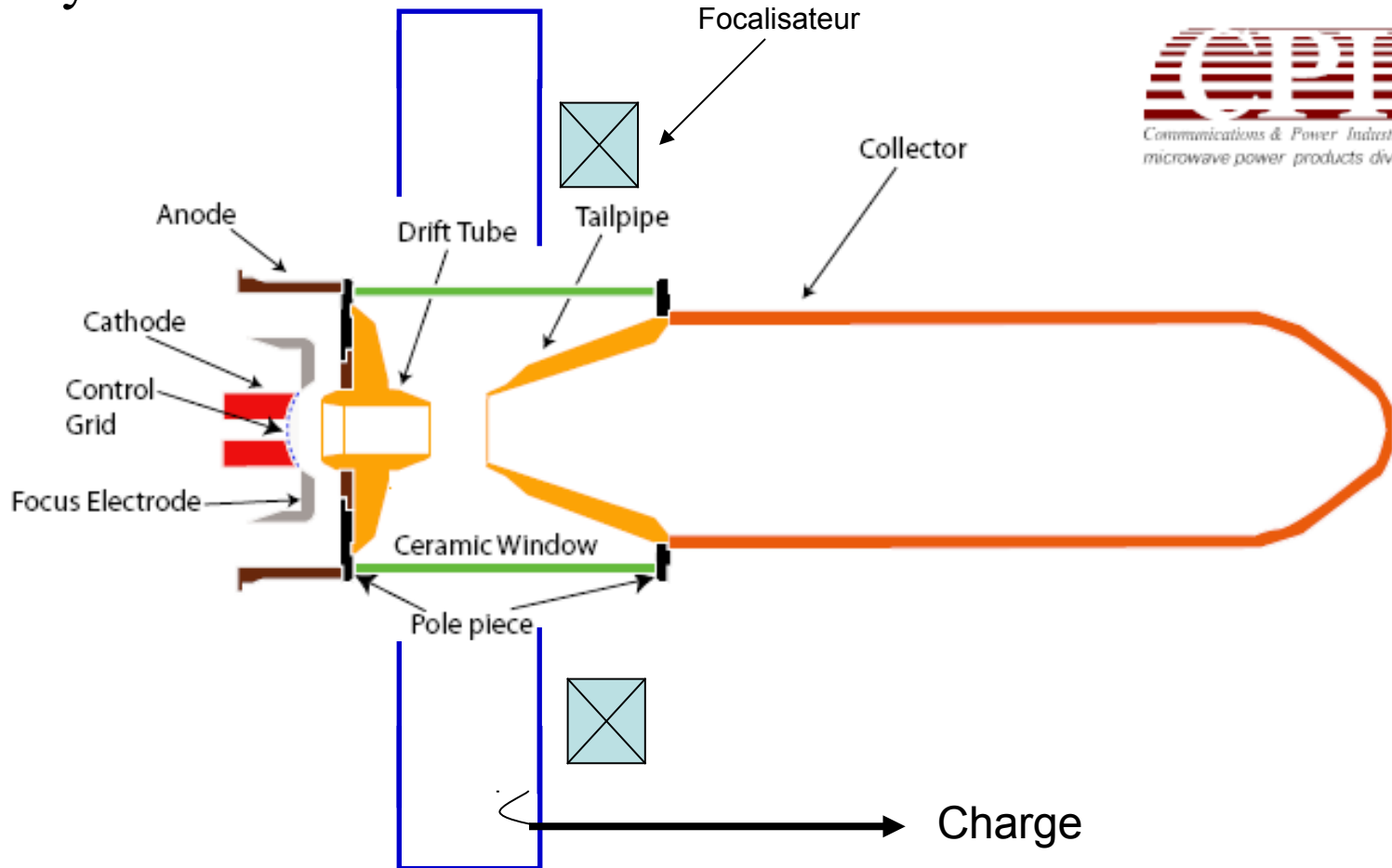




= Grille

L'IOT

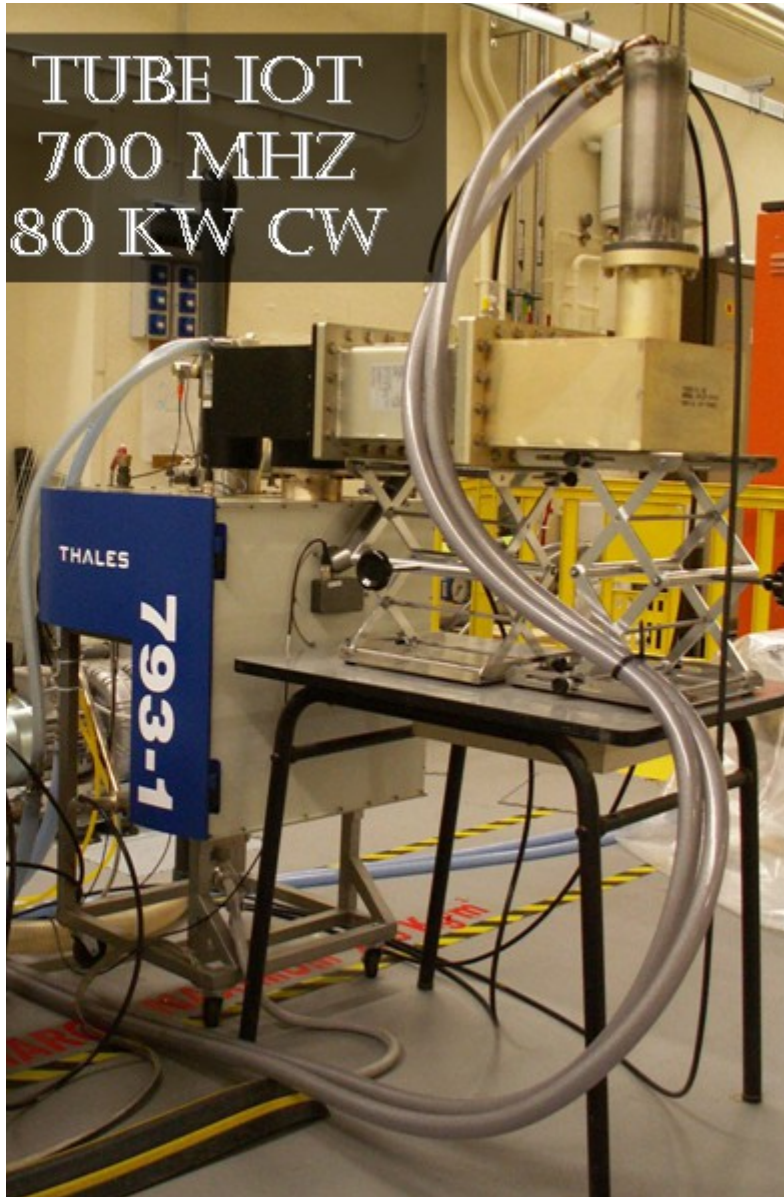
IOT (Inductive Output Tube) aussi appelé aussi Klystrode





= Grille

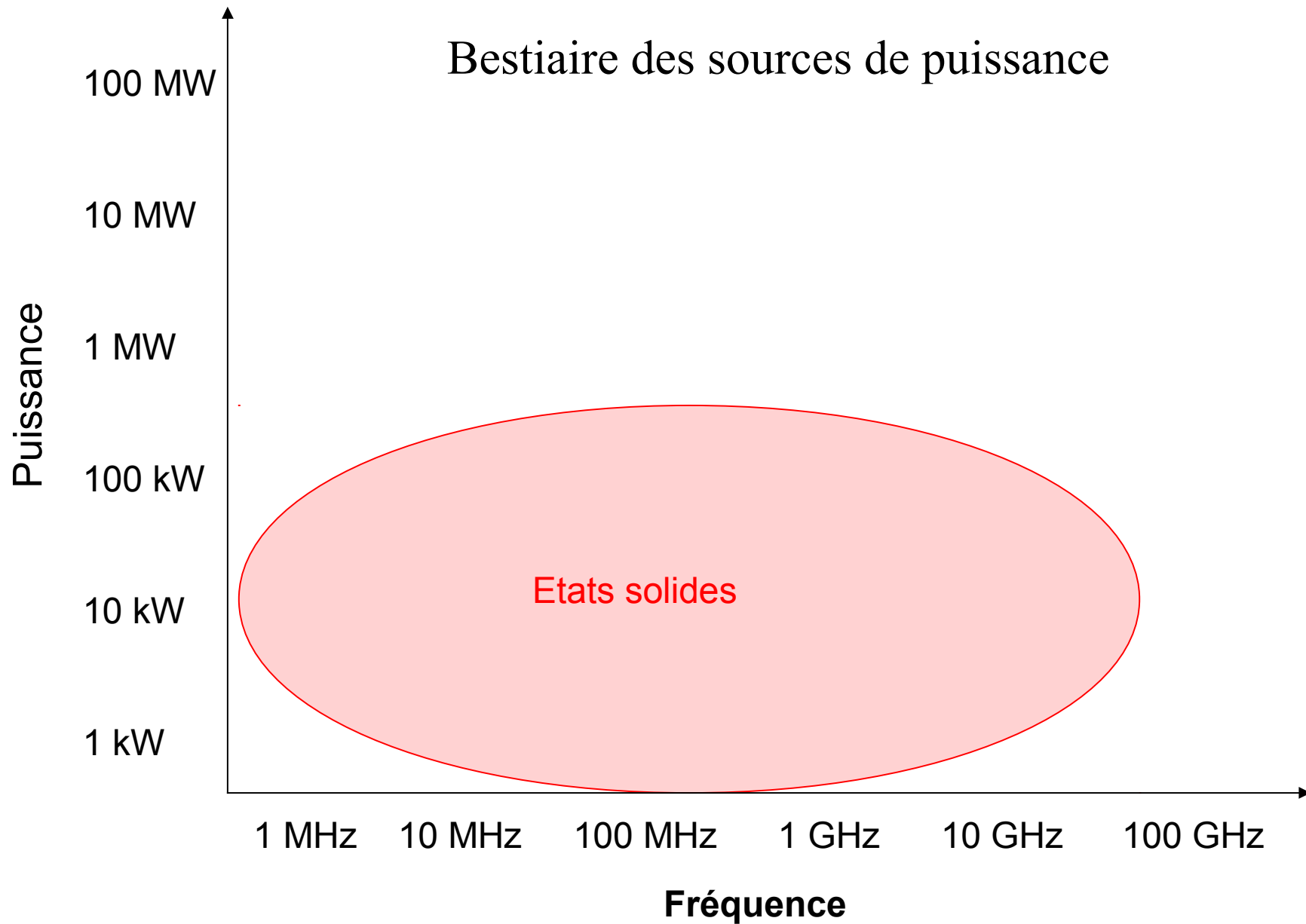
L'IOT



TH 18792



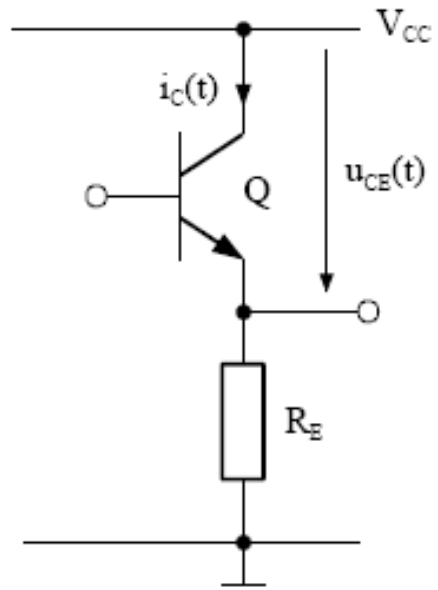
Bestiaire des sources de puissance



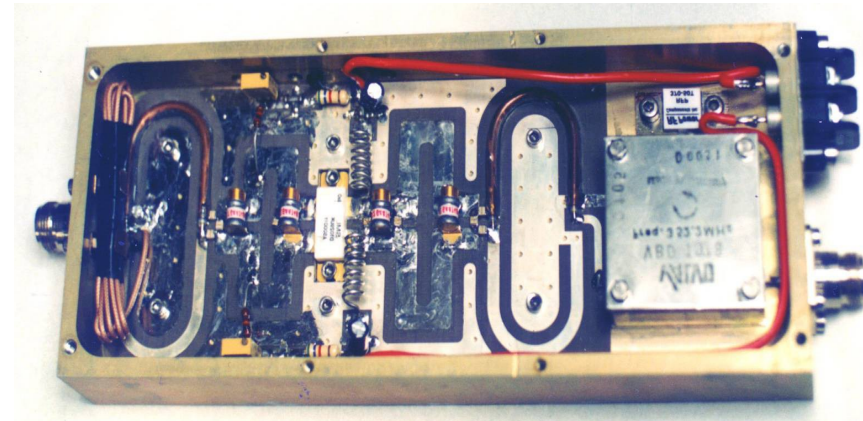


= transistor

L'état solide



Amplificateur Classe A collecteur commun (étage de sortie)



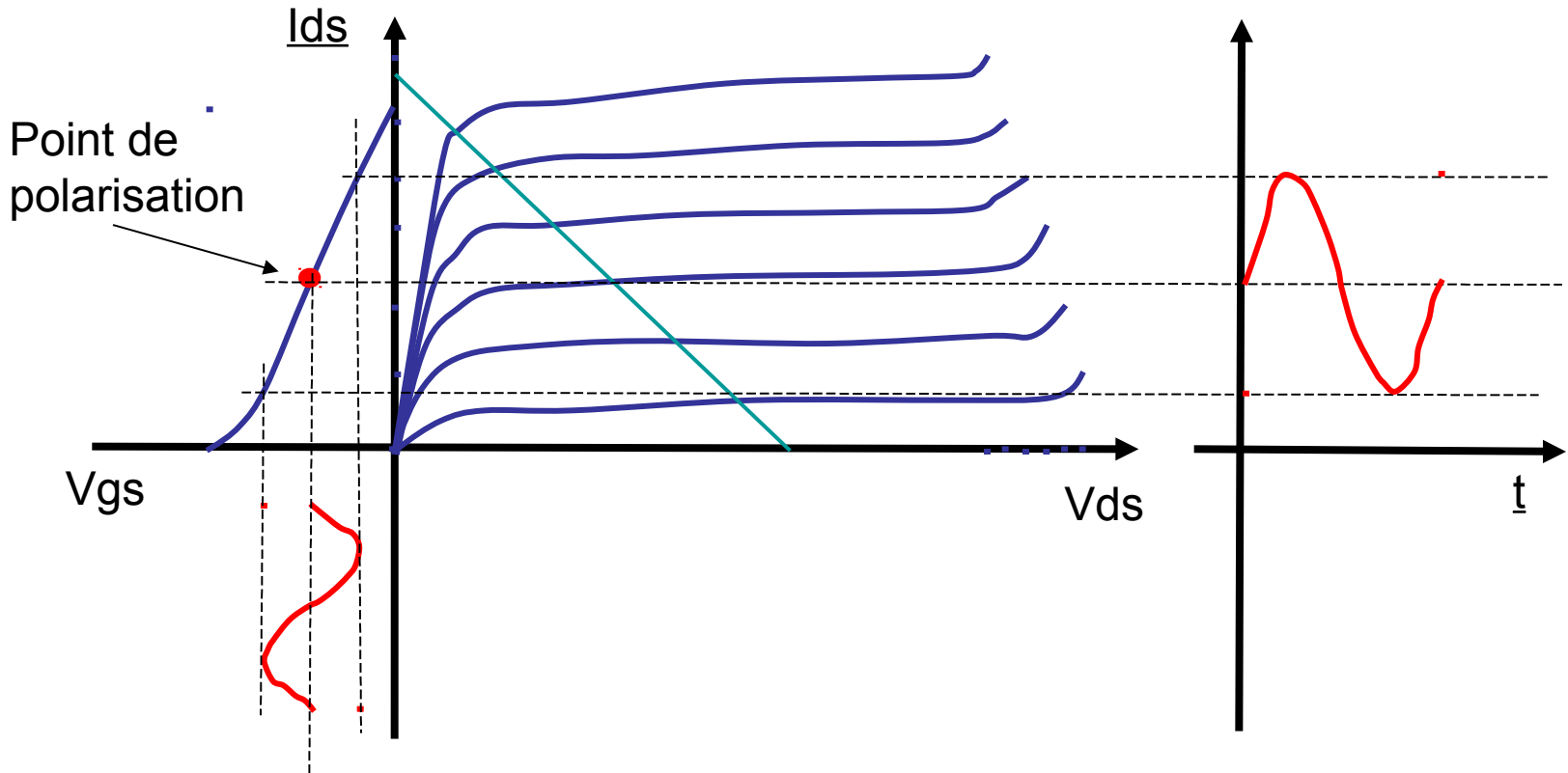
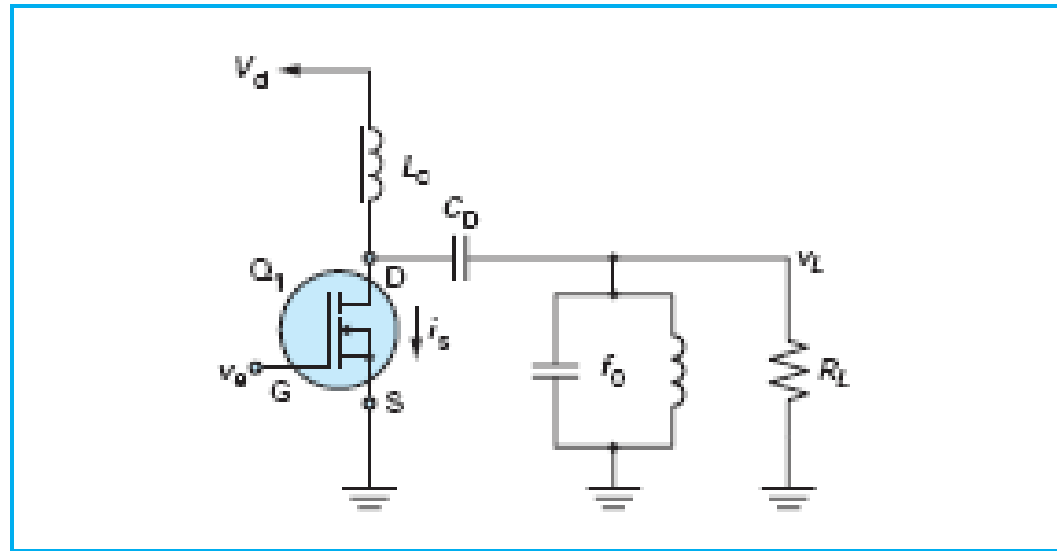
Module amplificateur
352,2 MHz – 315 W
Transistors MOSFET



= transistor

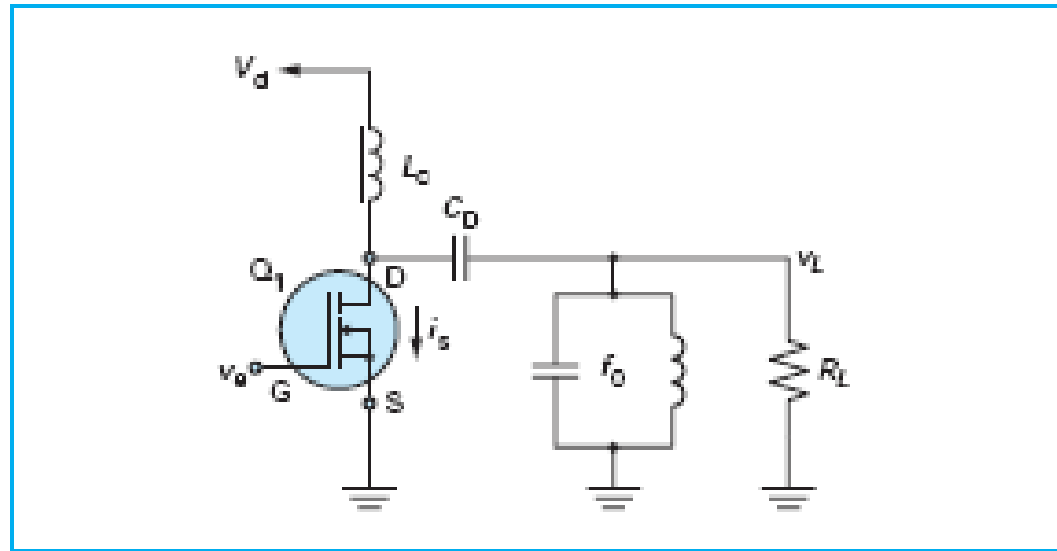
Classes d'amplification

La classe de fonctionnement est déterminé par l'angle de conduction du signal sinusoïdale.

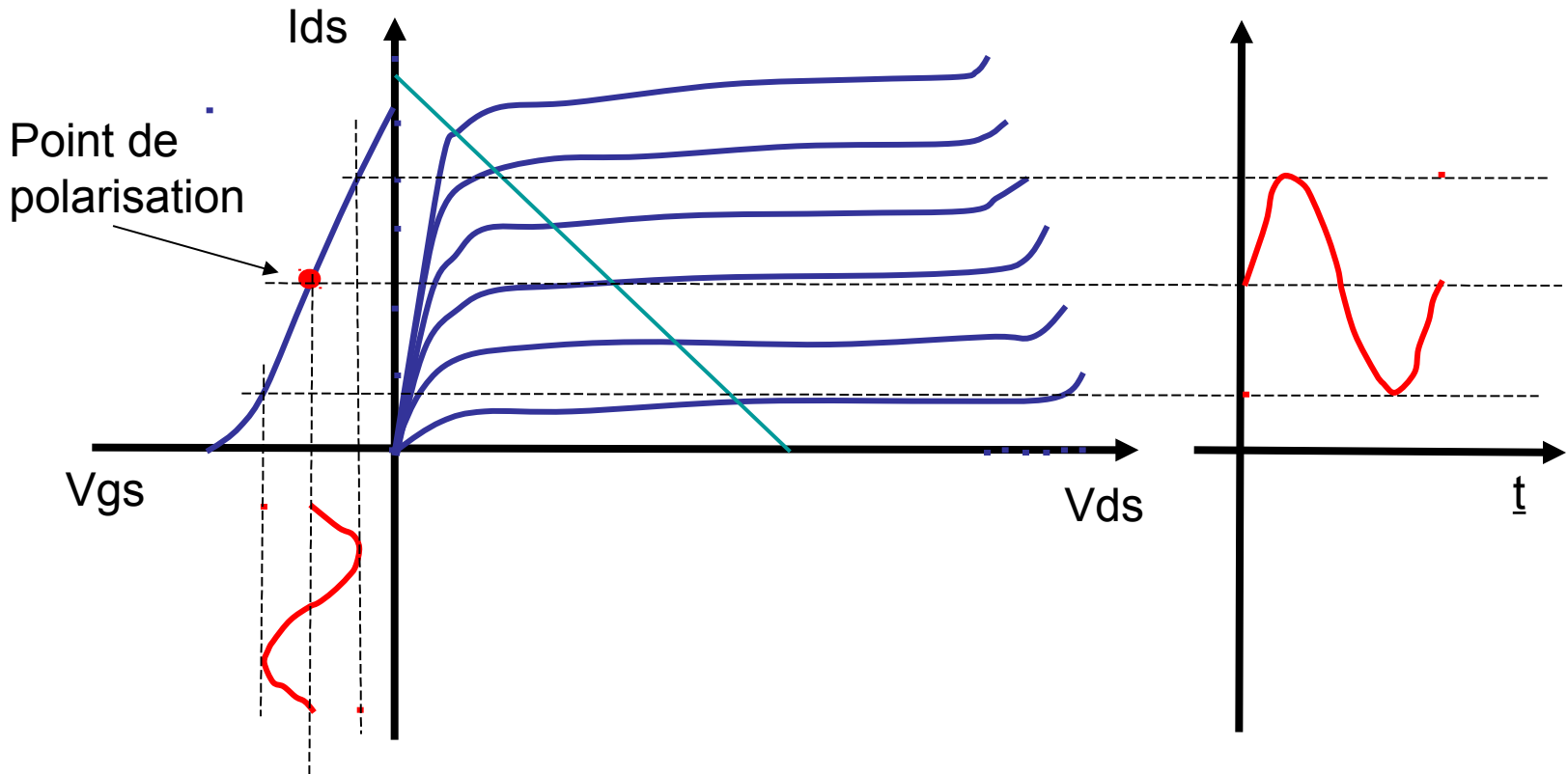




= transistor

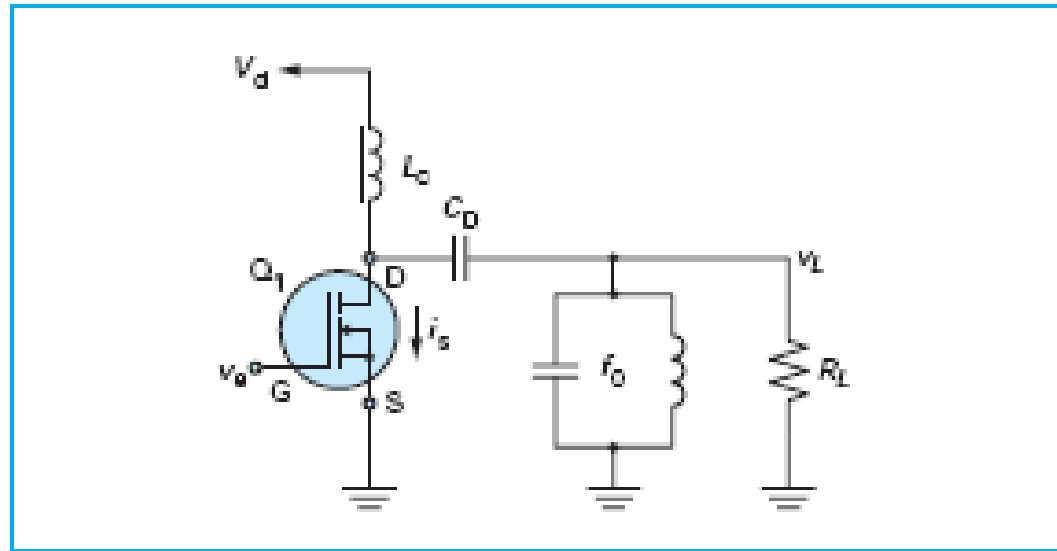


Classe A

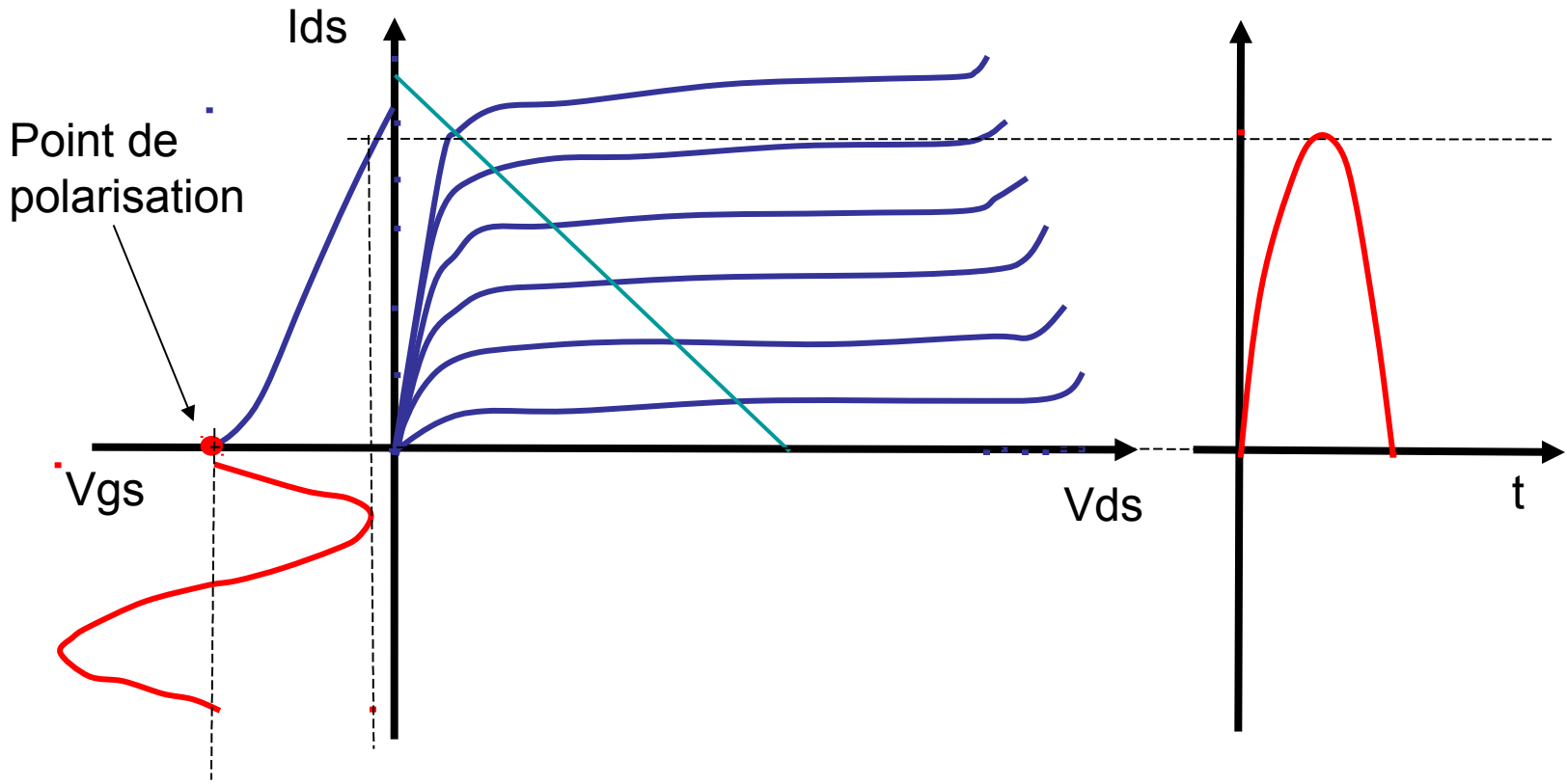




= transistor

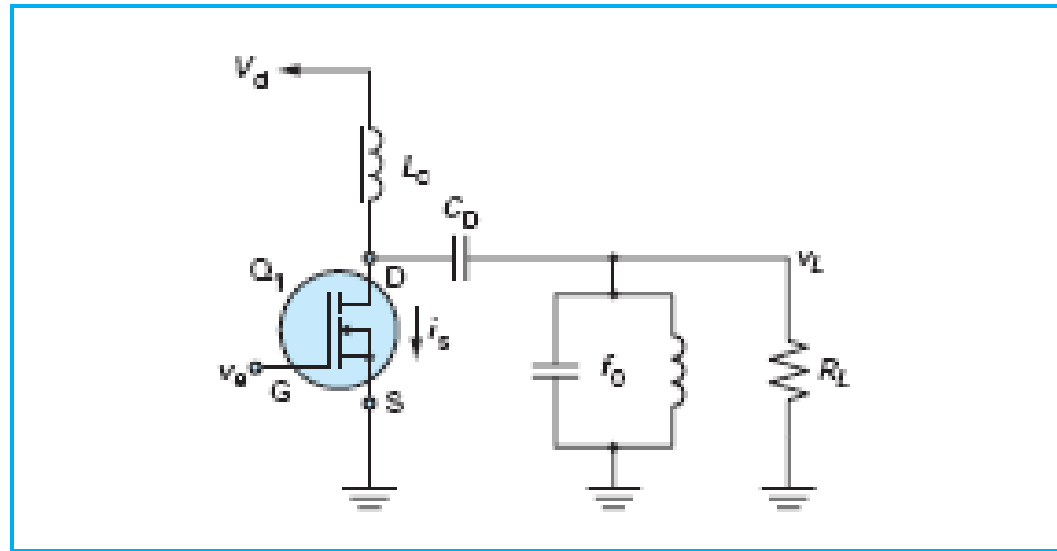


Classe B

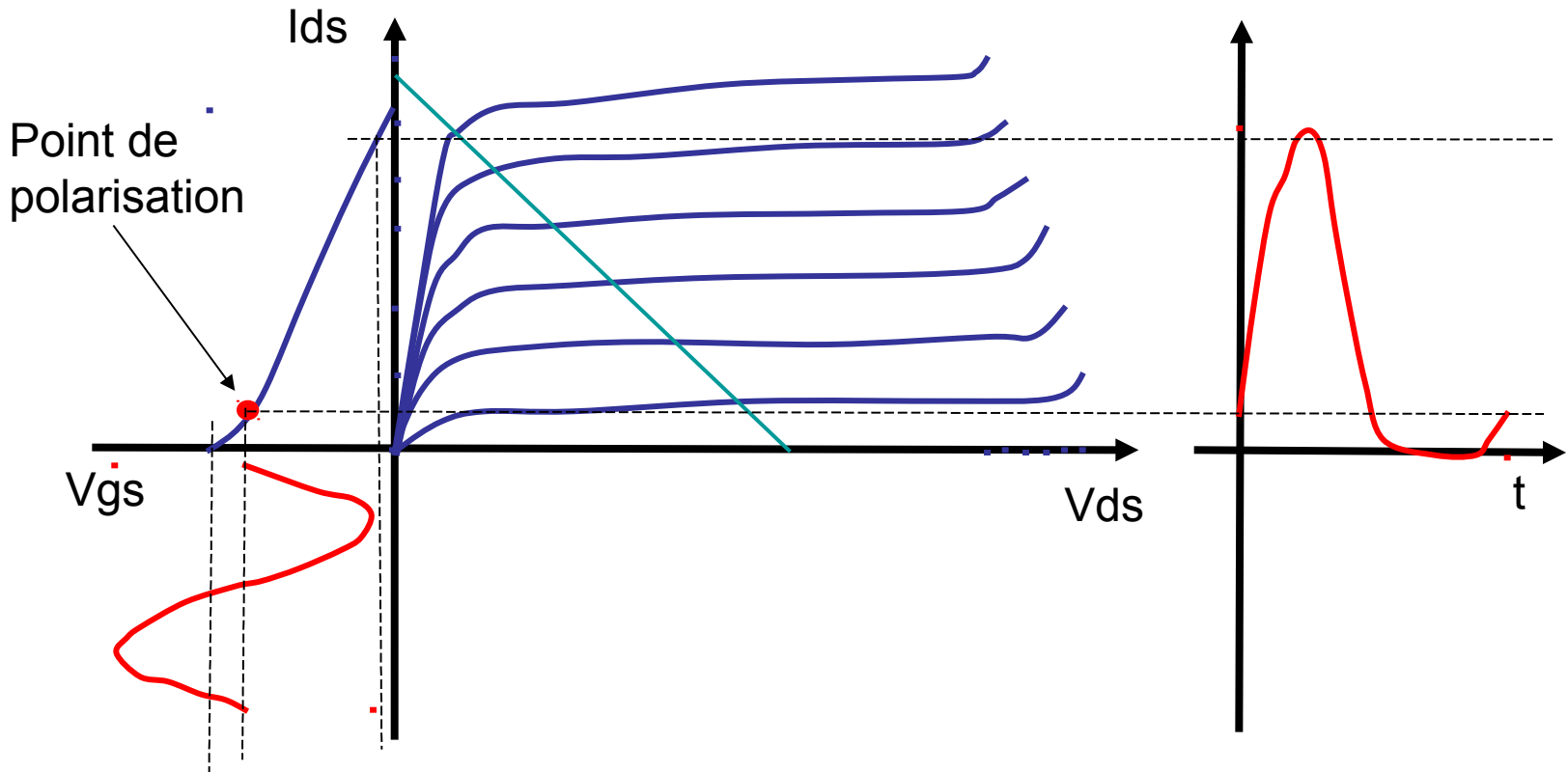




= transistor

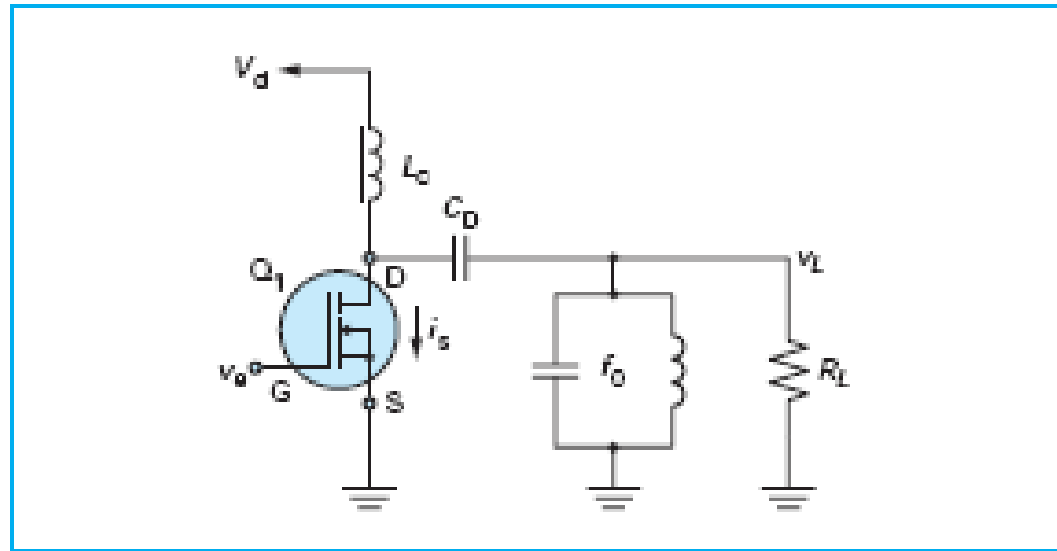


Classe AB

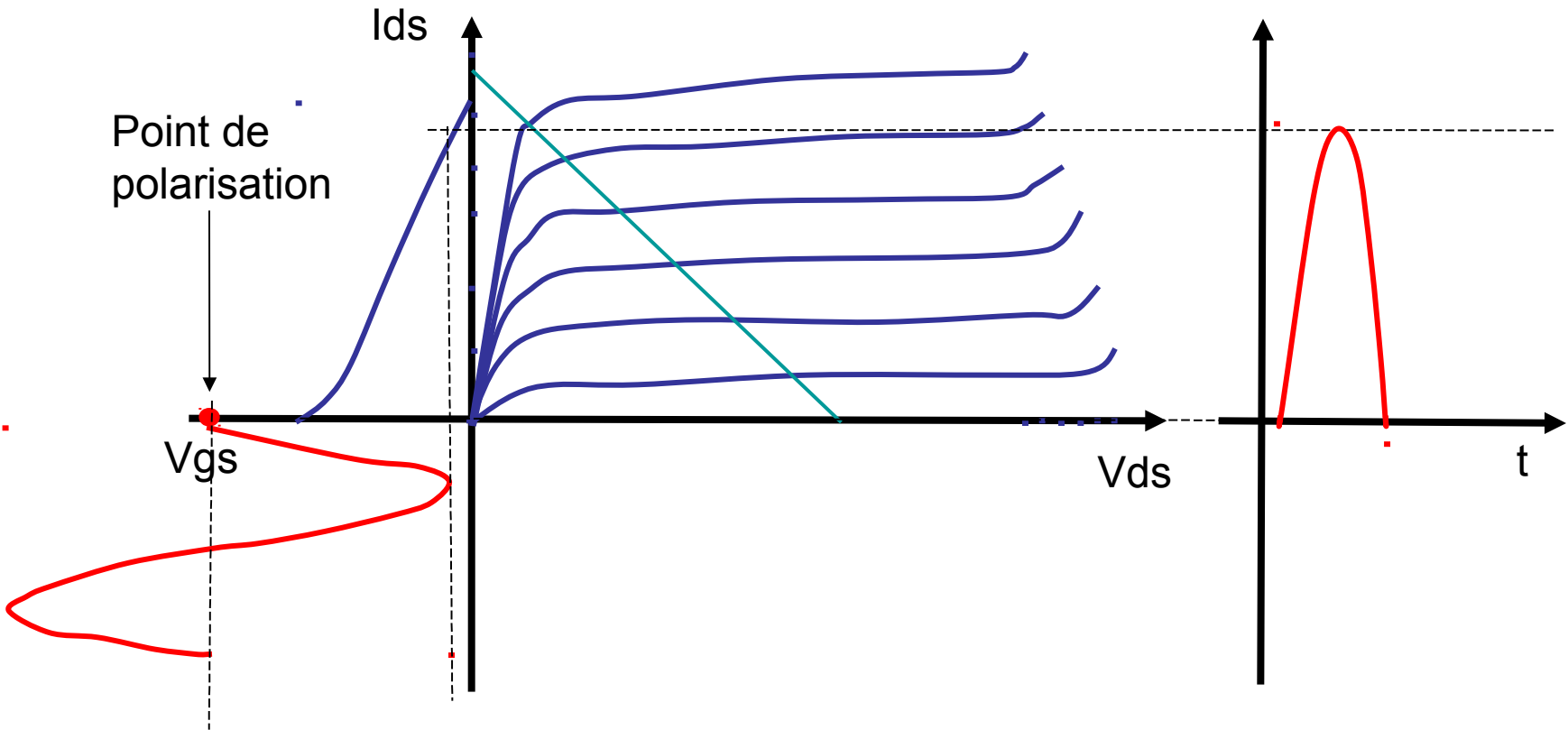




= transistor



Classe C





= transistor

L'état solide

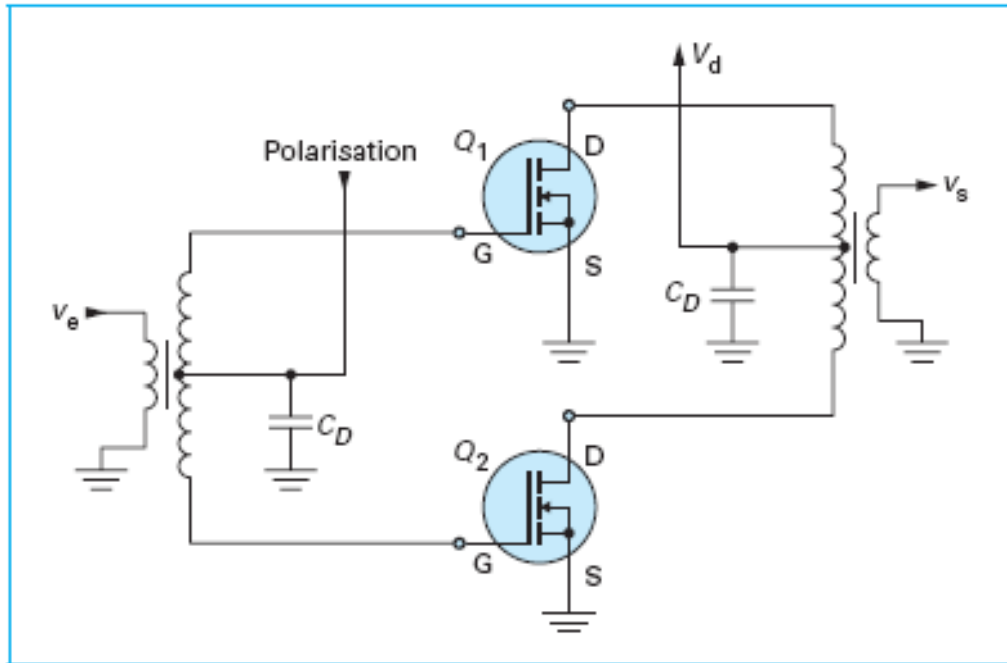


Figure 34 - Schéma de principe d'un étage *push-pull* RF

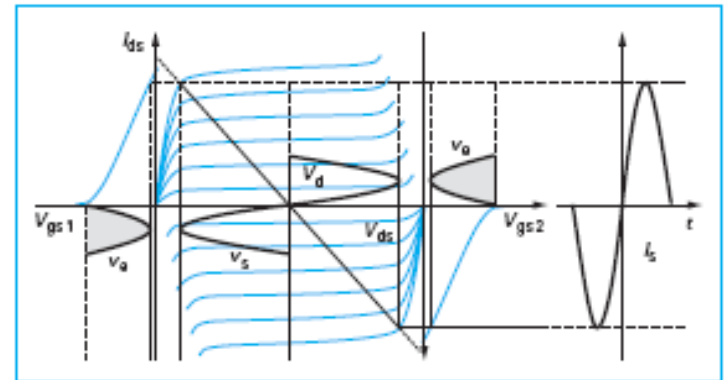


Figure 7 - *Push-pull* classe B

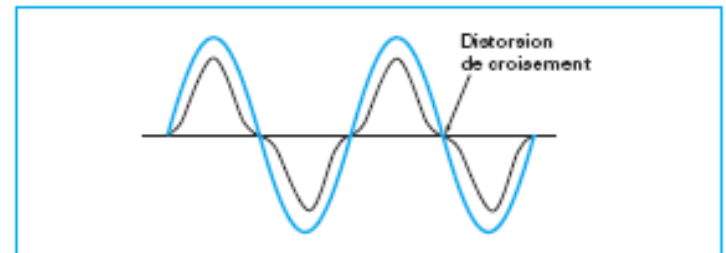


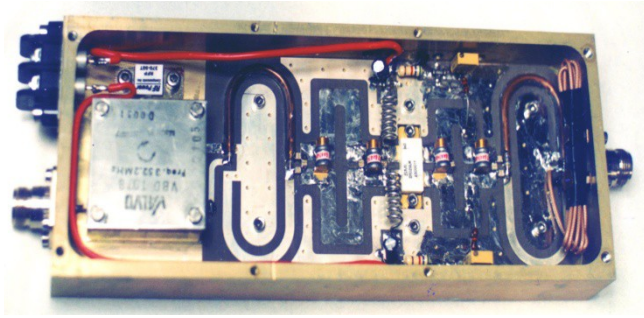
Figure 8 - Distorsion de croisement



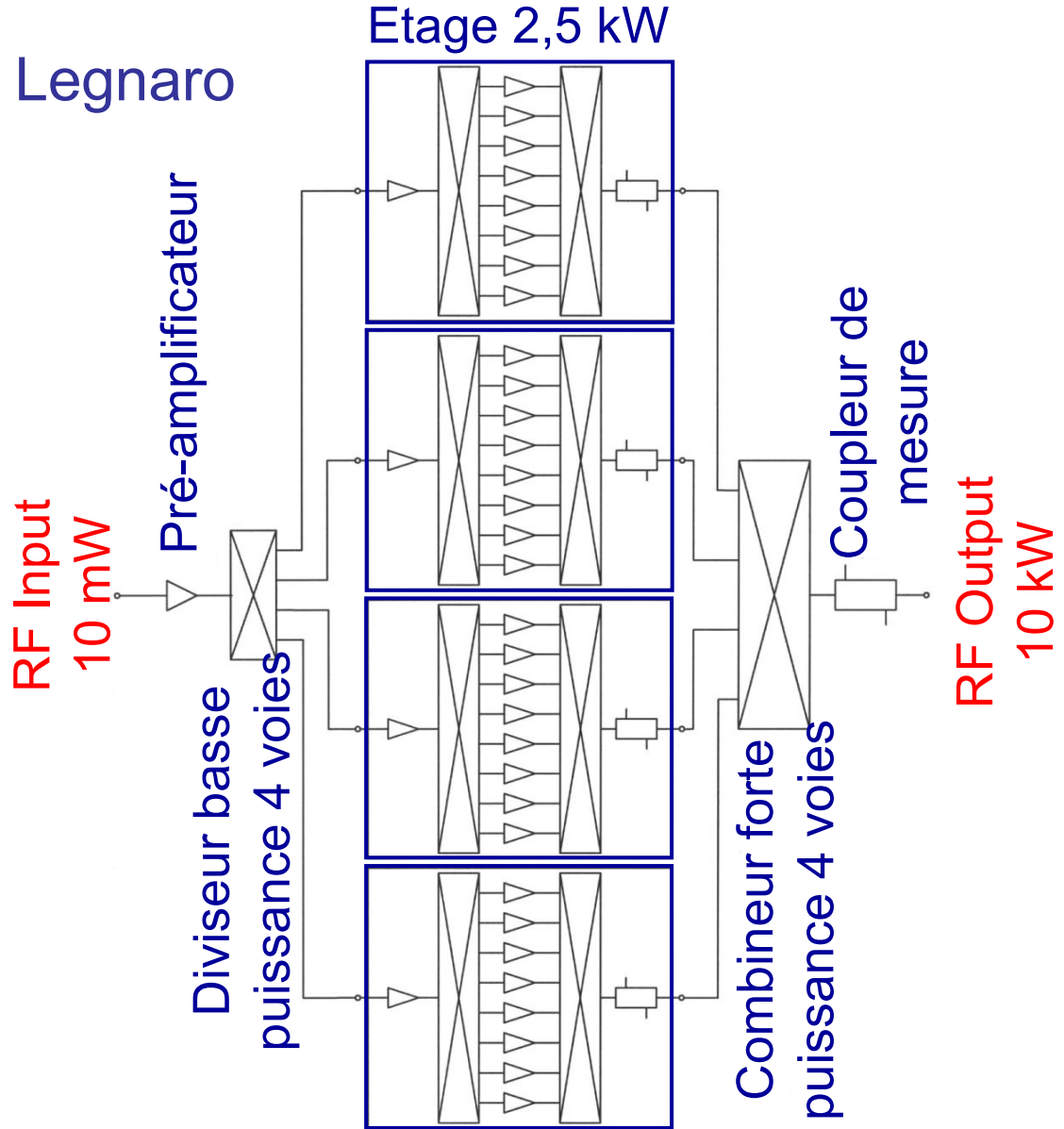
= transistor

L'état solide

- Fabio SCARPA – INFN Legnaro



Module amplificateur
352,2 MHz – 315 W
Transistors MOSFET





= transistor

L'état solide



Eurisol 10 kW à 350 MHz



Spiral II 20 kW à 88 MHz



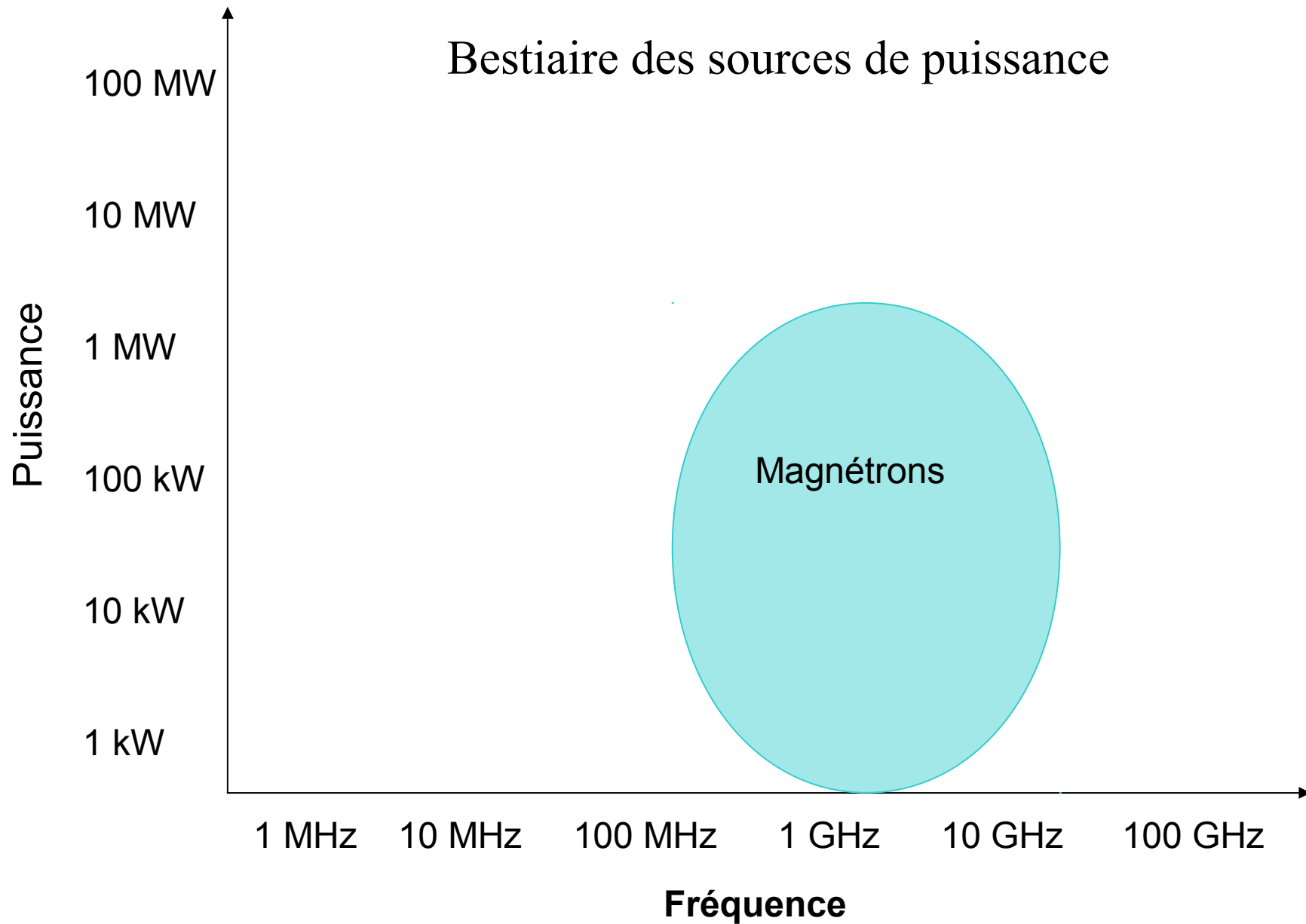
= transistor

L'état solide



SOLEIL 180kW @ 350 MHz

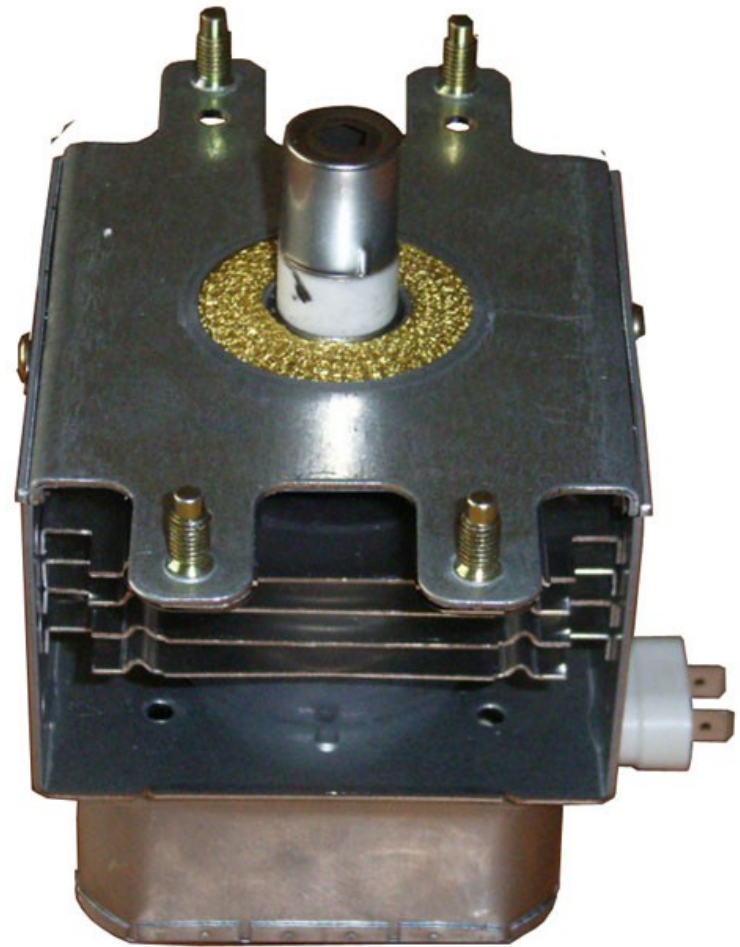
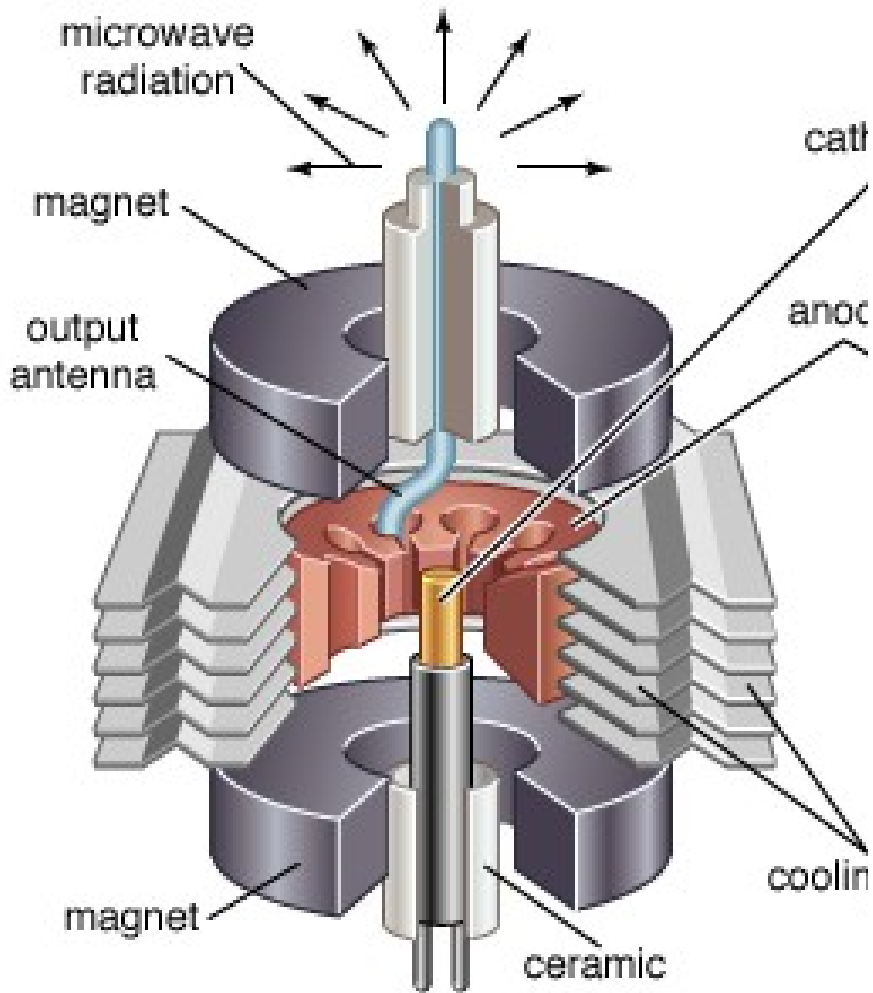
Bestiaire des sources de puissance



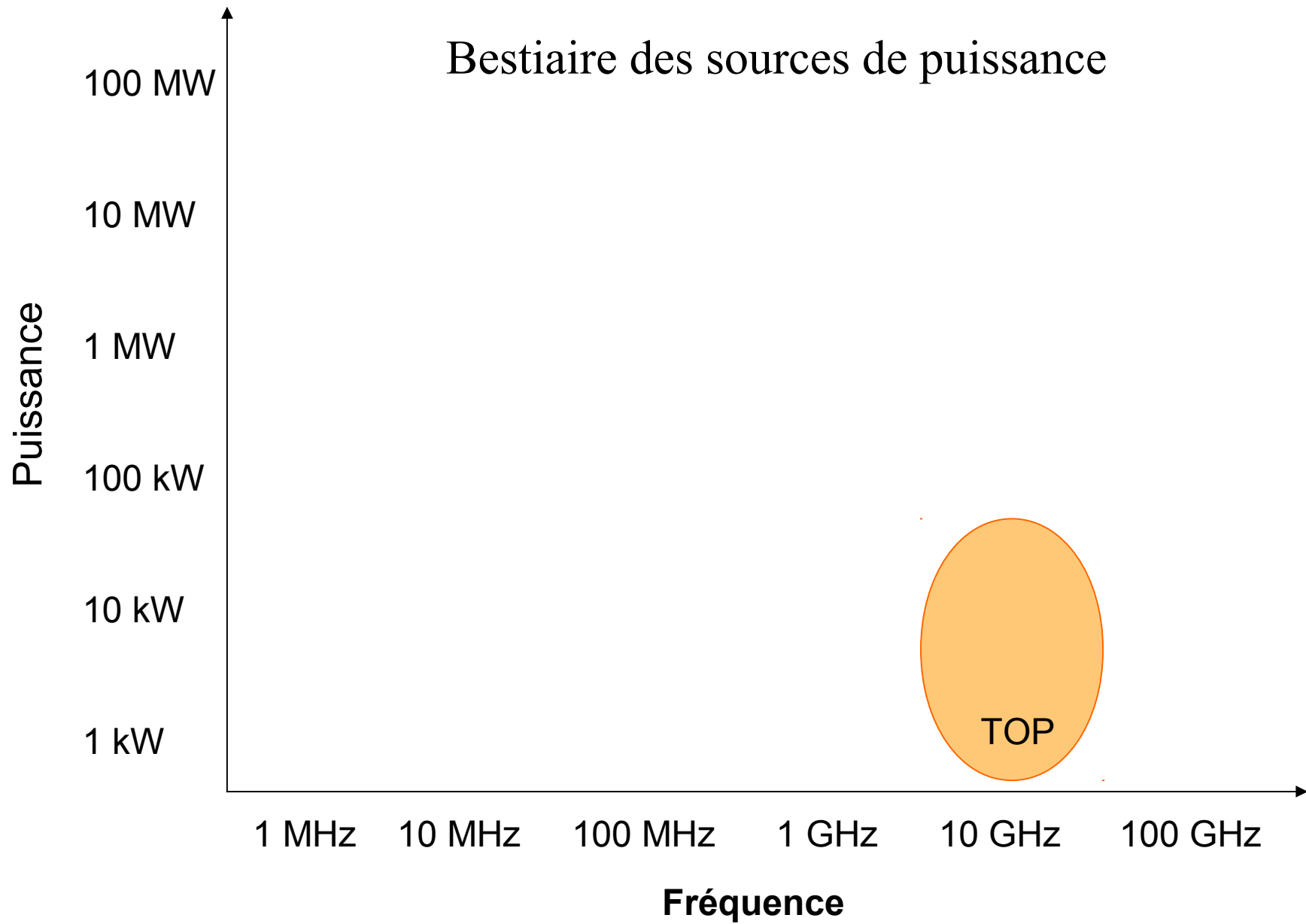


= cavités

Magnetron



Bestiaire des sources de puissance

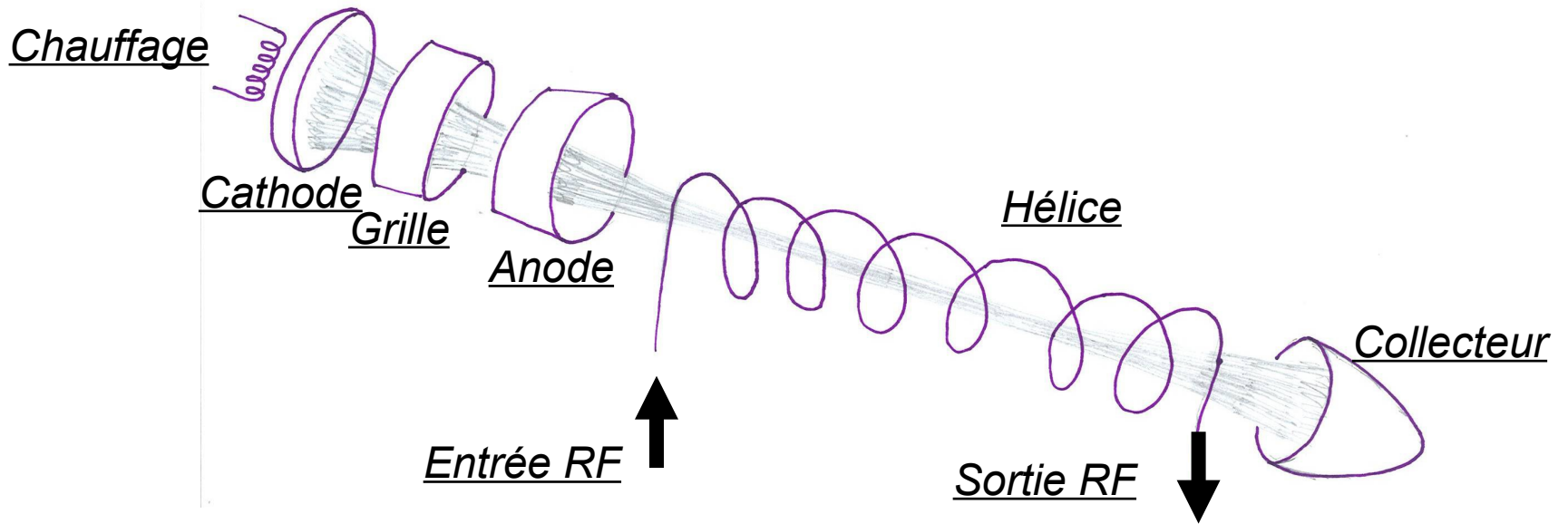




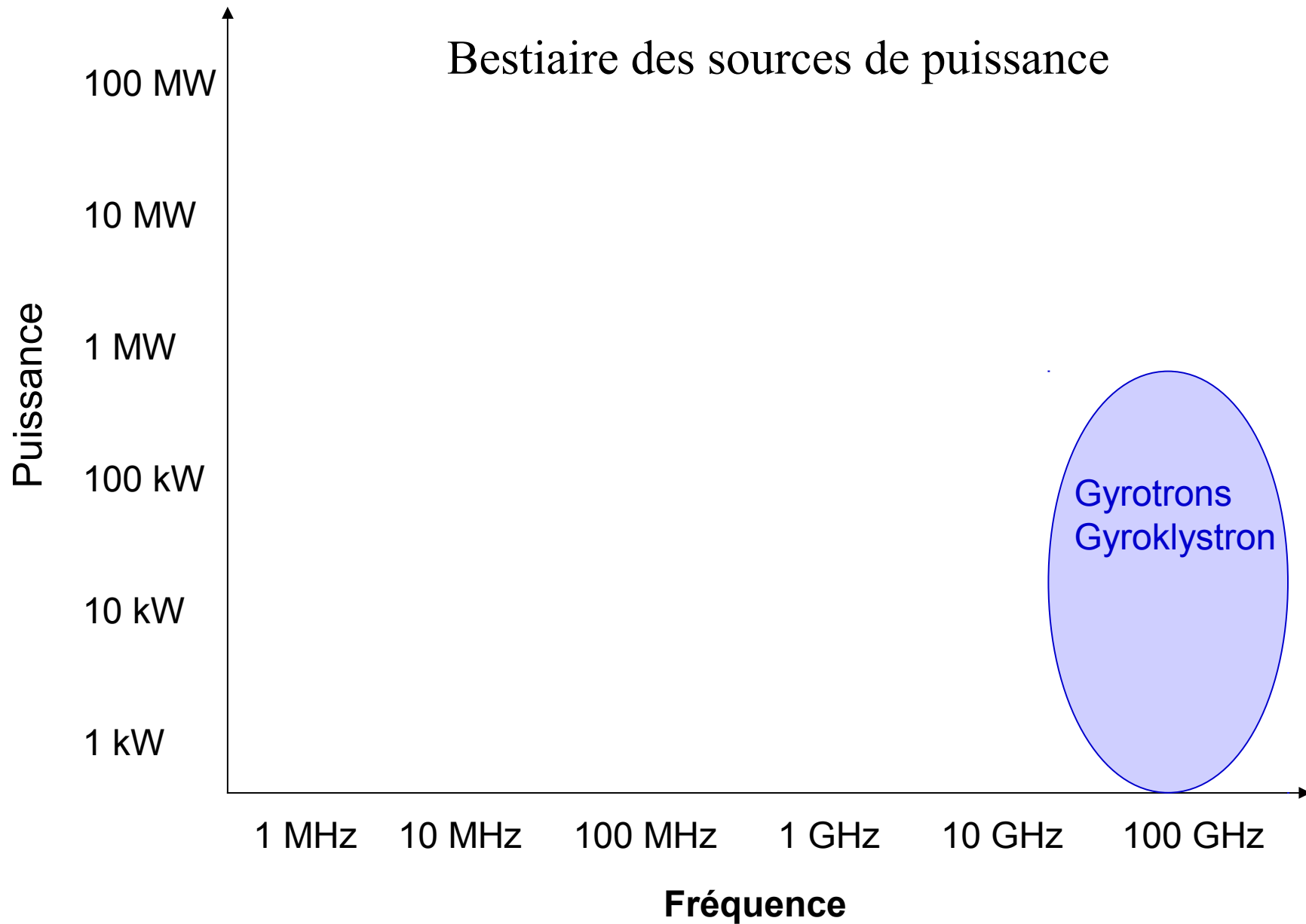
=

TOP (Tube à Onde Progressive)

Les TOP sont des amplificateurs large bande utilisés comme amplificateurs en mesure ou en puissance



Bestiaire des sources de puissance

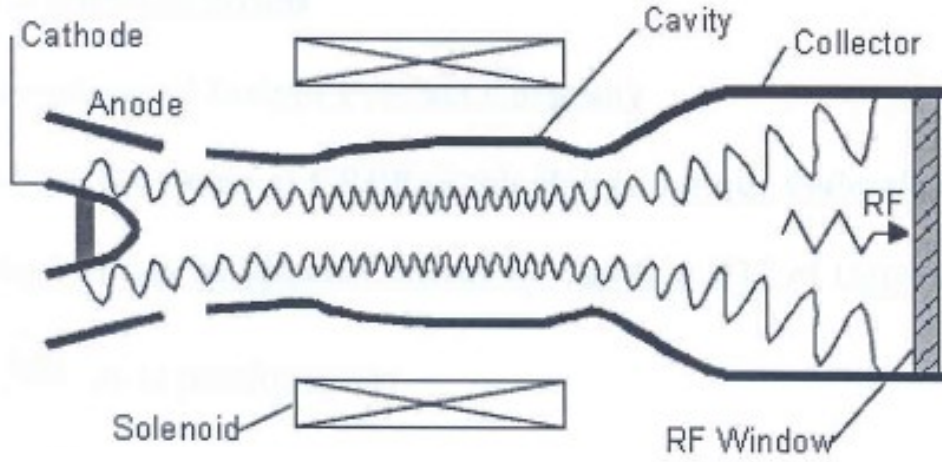




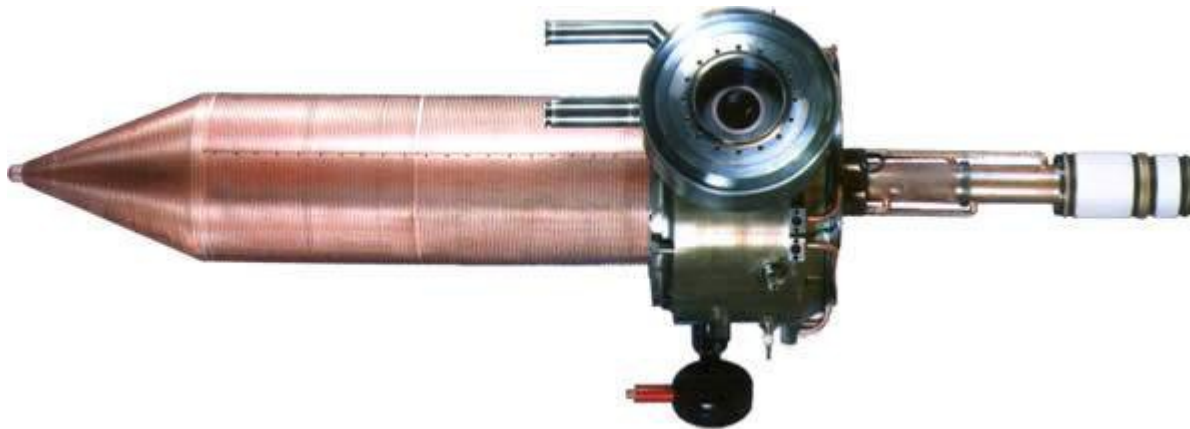
=MASER

Gyrotron

Microwave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



2,3 m



TH 1506 : 500 kW à 118 GHz.

900 kW à 140 GHz



Lire les caractéristiques d'une source

High power pulsed klystrons

Short and medium pulses ($\leq 10 \mu s$)

Band	Frequency	Reference	Peak output power	Average output power	Efficiency	Gain	Pulse duration	Cathode voltage	Beam current	Magnet
			typ. MW	typ. kW	typ. %	min. dB	max. μs	typ. kV	typ. A	
L	1.3	TV 2022	20	40	40	50	8	235	215	TH 20100
		TV 2022A	20	50	42	49	8	239	199	TH 20100
		TV 2022B	20	60	42	49	10	239	199	TH 20100
		TV 2022D	30	60	42	50	7	275	260	TH 20100
	1.5	TH 2170	20	10	42	49	5	235	215	TH 20100
S	2.856	TH 2163	7.5	8	48	48	6	150	105	TH 20578
		TH 2163A	10	10	48	50	3.5	168	124	
		TH 2129	20	30	41	53	7.5	228	218	TH 20393
		TH 2171 (1)	25	20	43	51	6	243	240	TH 20690 (3)
		TH 2128 (1)	35	17.5	43	53	5	280	291	
		TH 2128A (1)	45	7	44	53	2.5	305	335	TH 20689 (3)
		TH 2128C/D (1)	45.5	10	43	54	4.5	315	335	TH 20690 (3)
		TH 2128E	30	24	43	53	5	261	270	
		TH 2146	45	20	43	55	4.5	307	340	TH 20691(3)

Lire les caractéristiques d'une source

≈ 3500 kVA

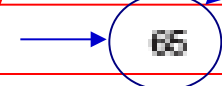
High-power CW klystron amplifiers

Préampli:
50.4 dBm
≈ 110 W

1 710 kW

90.4 dBm

Band	Frequency	Reference	Output power	Efficiency	Gain	Cathode voltage	Beam current
	GHz		typ. kW	typ. %	min. dB	typ. kV	typ. A
P	0.350	TH 2089F (1)(2)	1 100	62	40	94	19
		TH 2089A/D (1)(2)(3)	1 100	62	40	94	19
	0.352	TH 2089C (1)(2)(3)	1 100	65	40	90	19
		TH 2089B (1)(2)(3)	1 300	65	40	100	20
	0.368	TH 2145	200	58	43	41	8.3
	0.401	TH 2167 (1)	300	63	37	54	8.8
		TH 2161/C (1)	180	61	40	44	6.7
	0.500	TH 2161 A (1)	250	63	40	49	8.1
		TH 2161 B (1)	310	61	42	52	10
		TH 2178 (1)	800	62	40	75	17.6
S	2.450	TH 2174	50	59	48	26.5	3.2
	2.856	TH 2110	50	57	48	26.5	3.3



Traité d'électricité Vol XIII Hyperfréquences de Fred Gardiol
Micro-ondes de Paul F. Combes

...

<http://www.thalesgroup.com/electrondevices>

<http://www.cpii.com/>

http://www.toshiba-tetd.co.jp/eng/electron/e_kly.htm

Merci de votre attention

COMPOSANTS et MESURES RF



Jean Lesrel

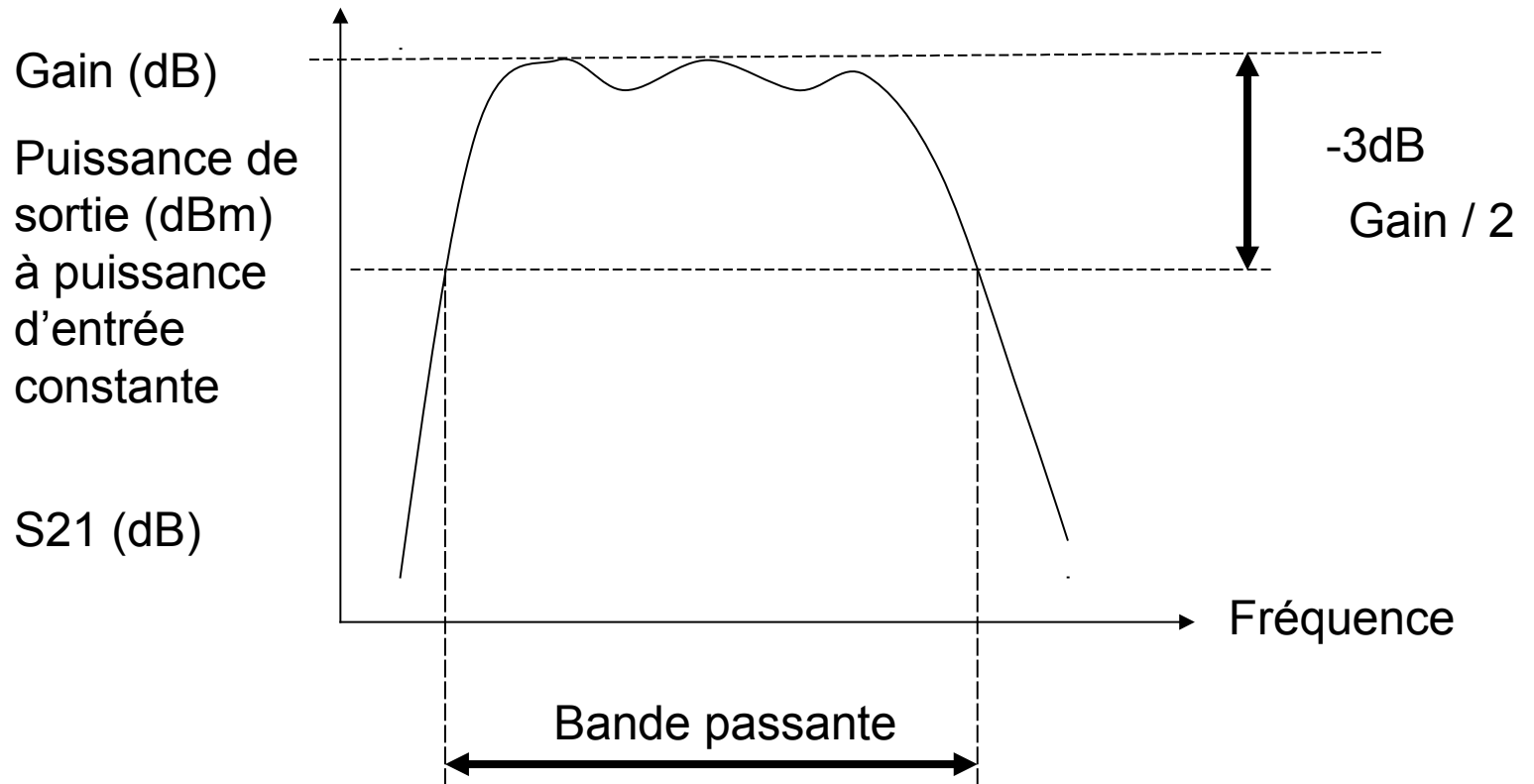
lesrel@ipno.in2p3.fr



Ecole IN2P3 des Accélérateurs
Bénodet
Février 2014

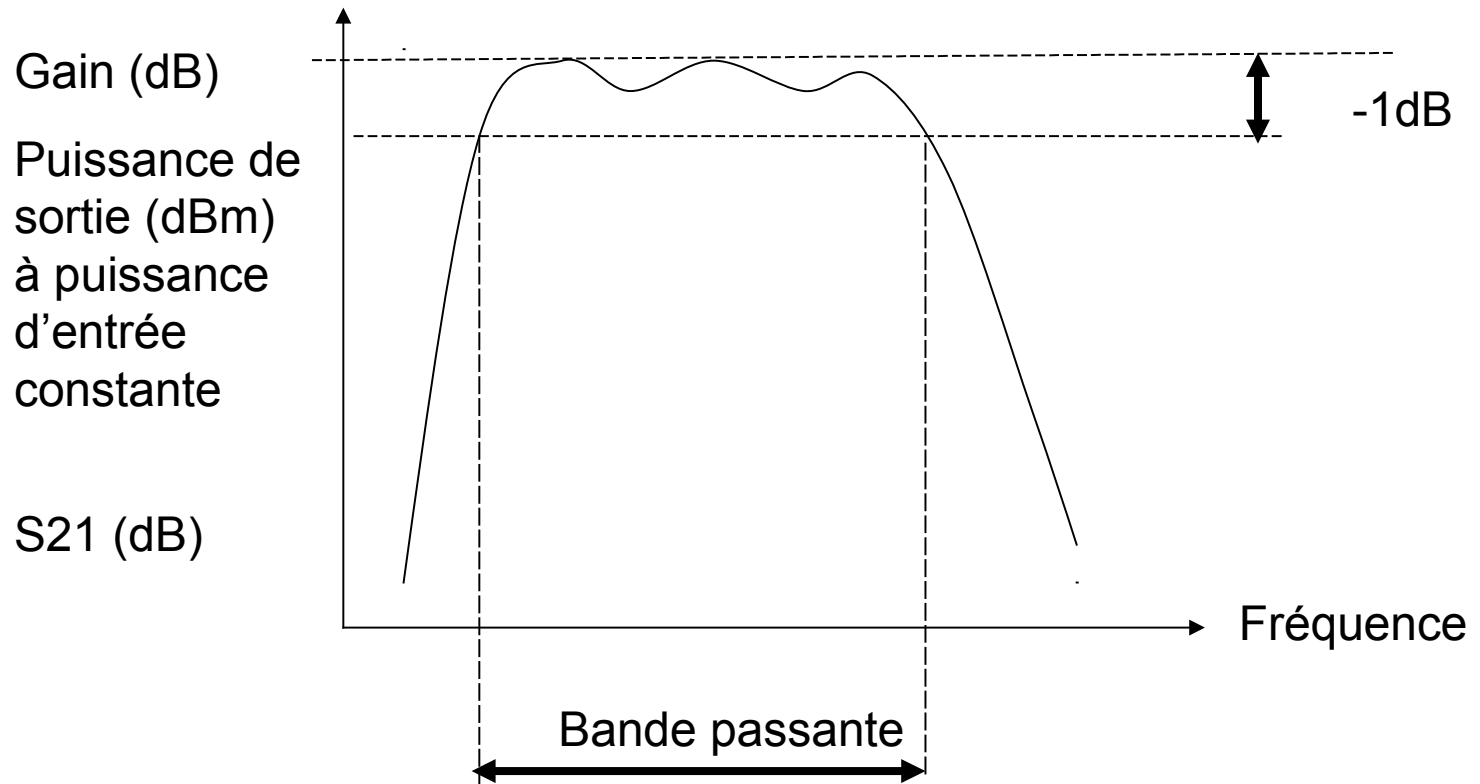
Notion de largeur de bande ou bande passante

Dans quelle gamme de fréquence la source de puissance fonctionne



Notion de largeur de bande ou bande passante

Dans quelle gamme de fréquence la source de puissance fonctionne



Attention à bien mentionner :

Bande passante à -1 dB xxx MHz

Mesures de puissance

Wattmètre : mesure une puissance



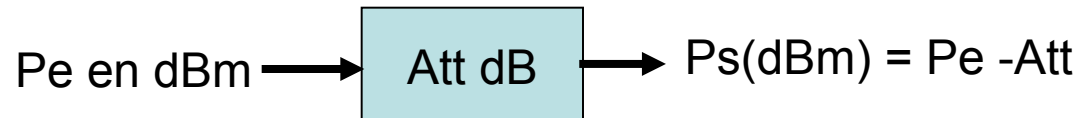
Sondes



Grande dynamique : 60 à 90 dB

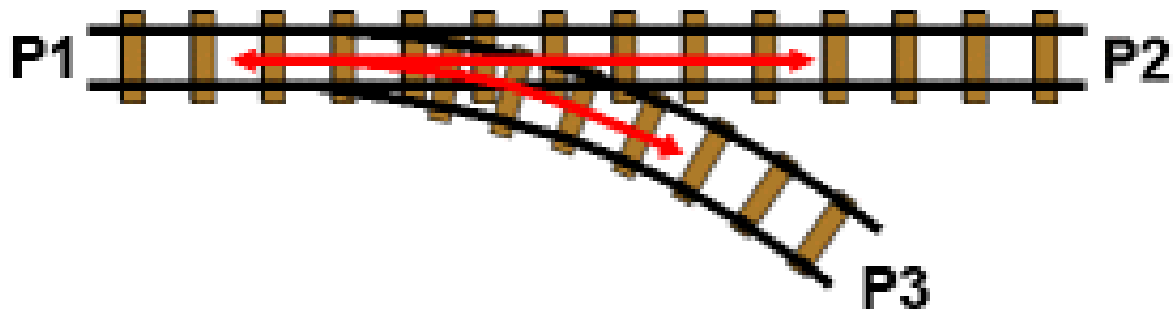
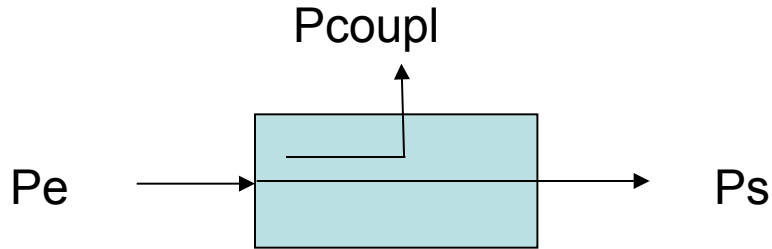
$P_{max} = 20 \text{ dBm}$ soit 100 mW

Atténuateurs



Attention à la puissance dissipée

Coupleurs



$$\text{couplage (dB)} = 10 \log_{10} (P_e / P_{coupl})$$

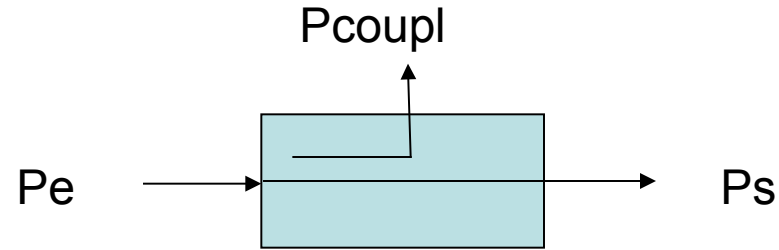
$$\text{couplage (dB)} = P_e(\text{dBm}) - P_{coupl}(\text{dBm})$$

Perte d'insertion ou main-line loss

$$\text{Perte d'insertion (dB)} = 10 \log_{10} (P_e / P_s)$$

$$\text{Perte d'insertion (dB)} = P_e(\text{dBm}) - P_s(\text{dBm})$$

Coupleurs



Perte d'insertion minimum (coupleur idéal)

$$\text{Perte d'insertion (dB)} = 10 \log_{10} (P_e / P_s)$$

$$P_s = P_e - P_{coupl}$$

$$\text{Perte d'insertion minimum (dB)} = 10 \log_{10} [1 / (1 - 10^{-CPL/10})]$$

Coupling, dB

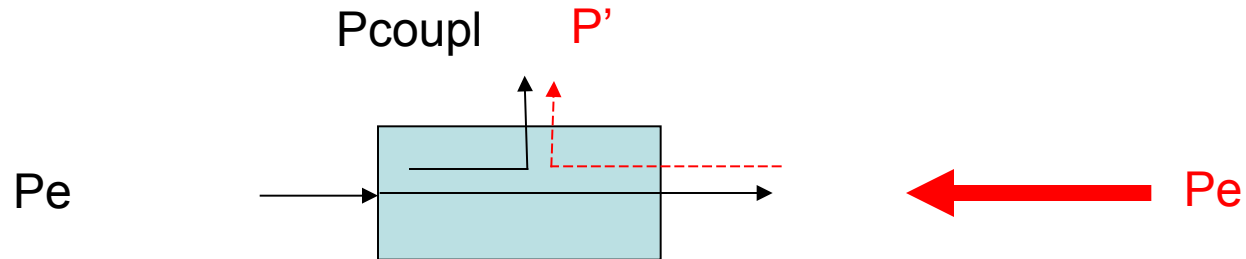
Theoretical Minimum

Main Line Insertion Loss, dB

6	1.2
10	.46
15	.14
20	.04
30	.004

Coupleurs

Attention à la directivité



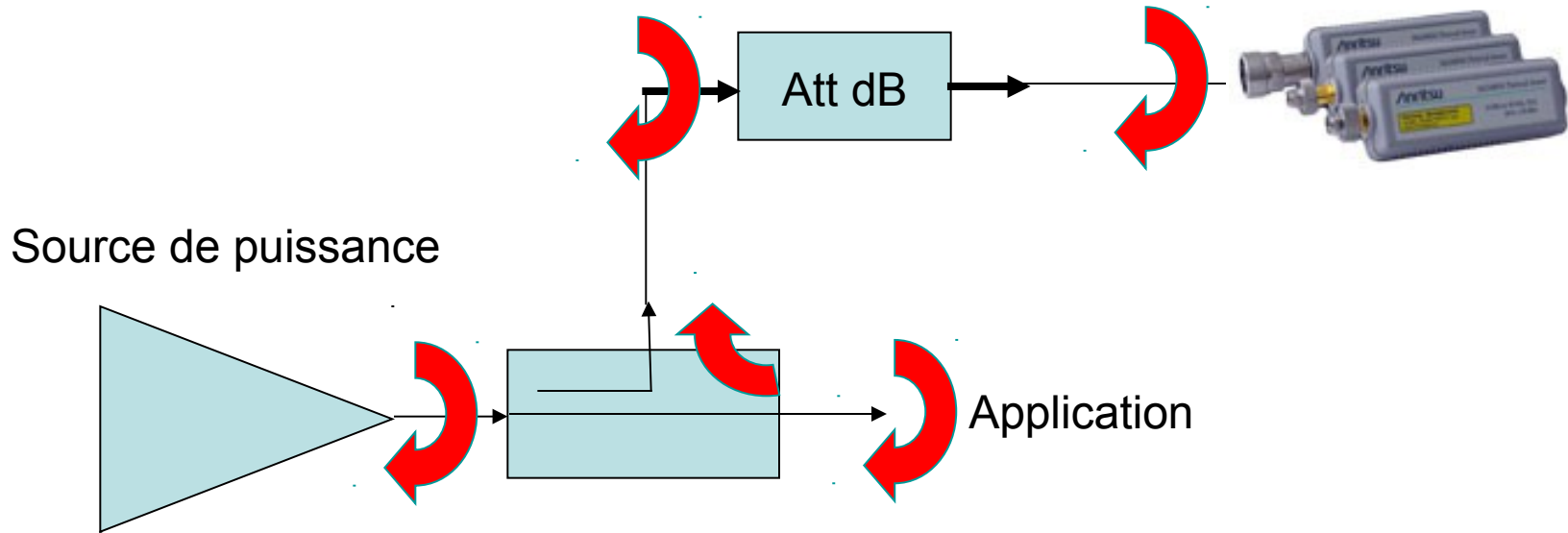
$$\text{Directivité (dB)} = 10 \log_{10} (P_{\text{coupl}} / P')$$

$$\text{Directivité(dB)} = 10 \log^{10} [P_{\text{coupl}}/P_e] - 10 \log^{10} [P'/P_e]$$

$$= - \text{couplage(dB)} - P'(\text{dBm}) + P_e(\text{dBm})$$

$$P'(\text{dBm}) = P_e(\text{dBm}) - \text{couplage(dB)} - \text{Directivité (dB)}$$

Mesures de puissance



Les erreurs sont nombreuses:

Incertitudes de la sonde

Réflexions sur la sonde et autres composants

Incertitudes sur les atténuations (atténuateur et câbles) et couplage

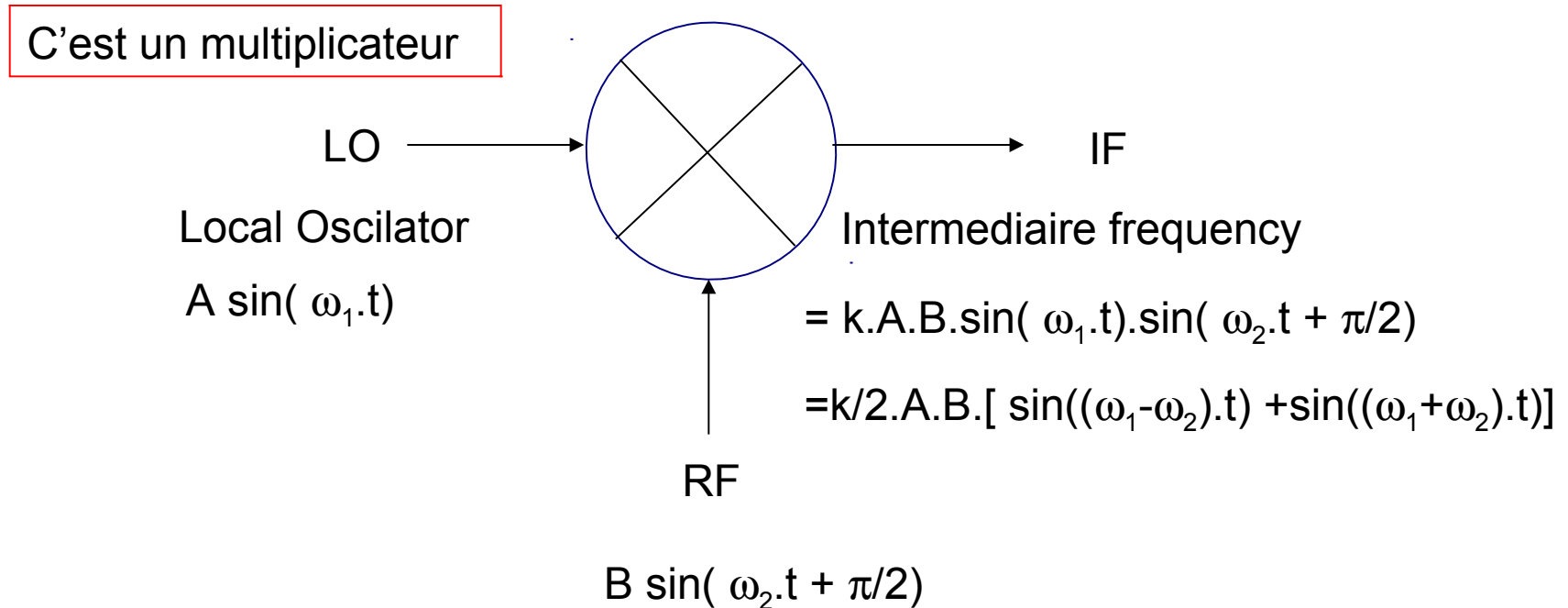
Directivité, rapport cyclique, harmoniques ...

etc...

On mesure des mW pour des puissances crêtes de plusieurs centaines de kW

Le Mélangeur (Mixer)

C'est le composant fondamentale de tout changement de fréquence, il a plusieurs fonctions (modulation, démodulation, changement de fréquence, mesure de phase etc...). Le mélangeur est formé d'un ou plusieurs éléments non linéaire (diode).

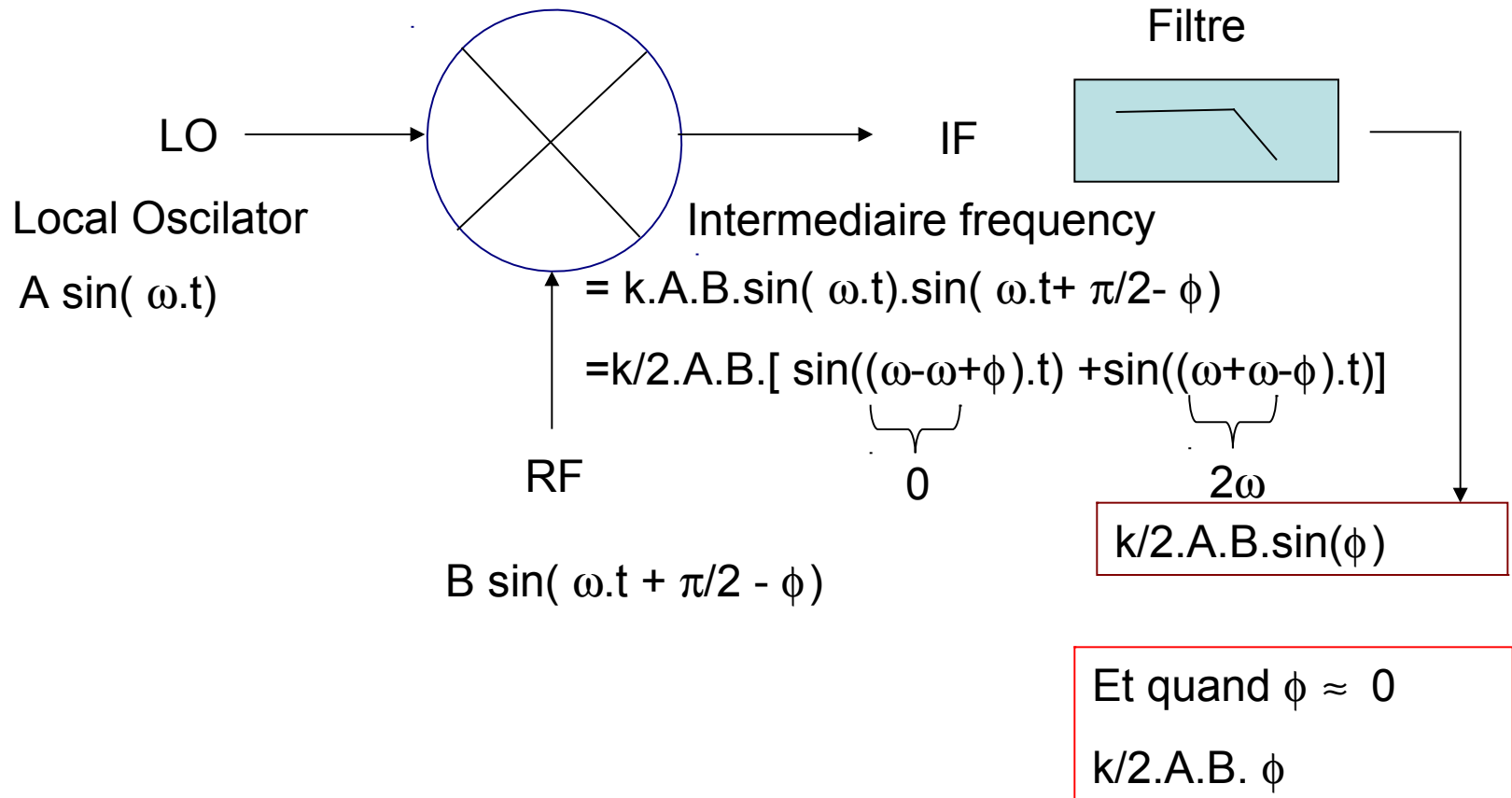


Au premier ordre on se retrouve avec la somme de deux sinusoïdes à
f1-f2 et f1+f2

Après filtrage (passe-haut ou passe-bas) on ne garde que f1-f2 ou f1+f2

Le Mélangeur (Mixer)

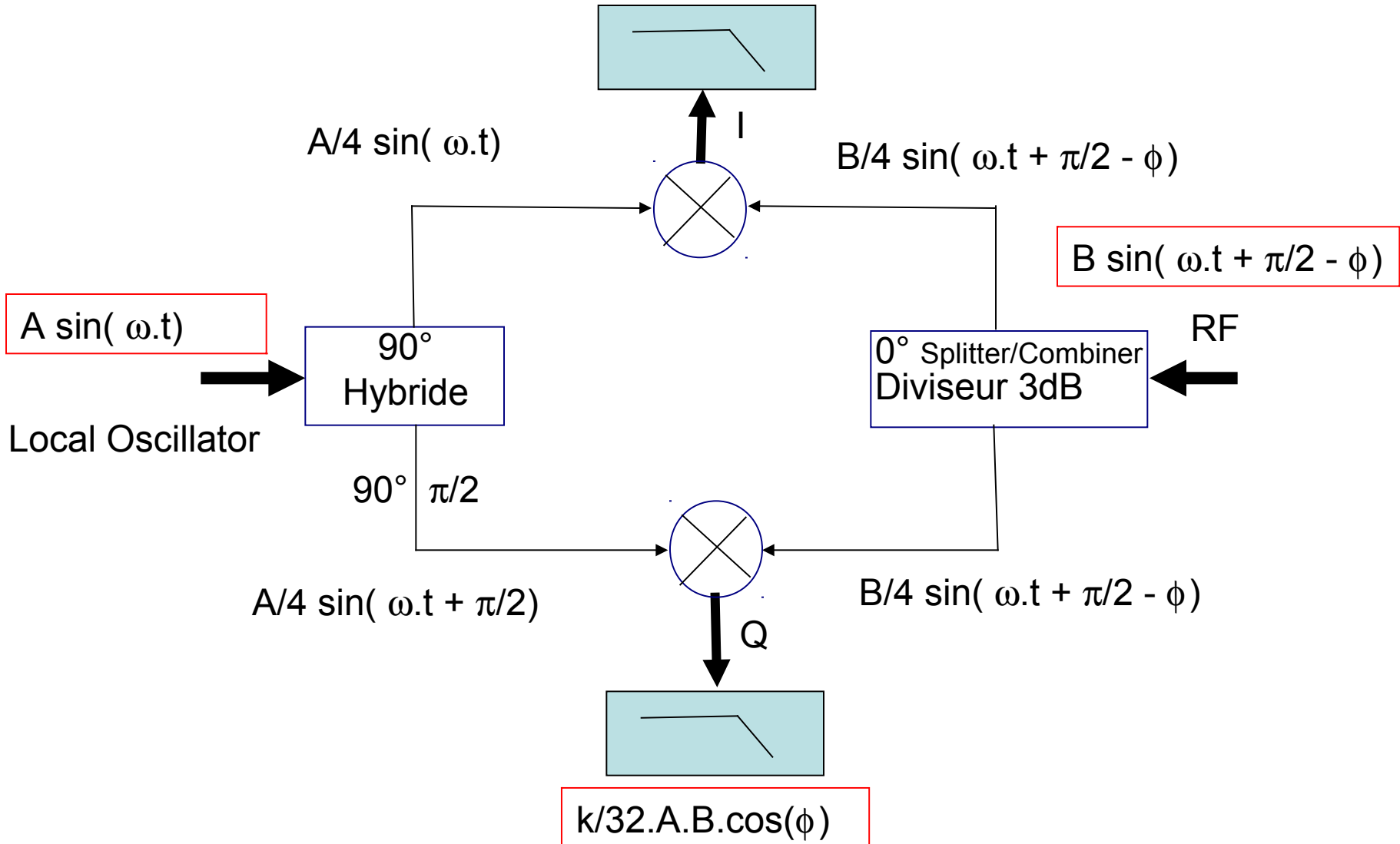
Mesure de phase quand $\omega_1 = \omega_2 = \omega$



A et B doivent être constants

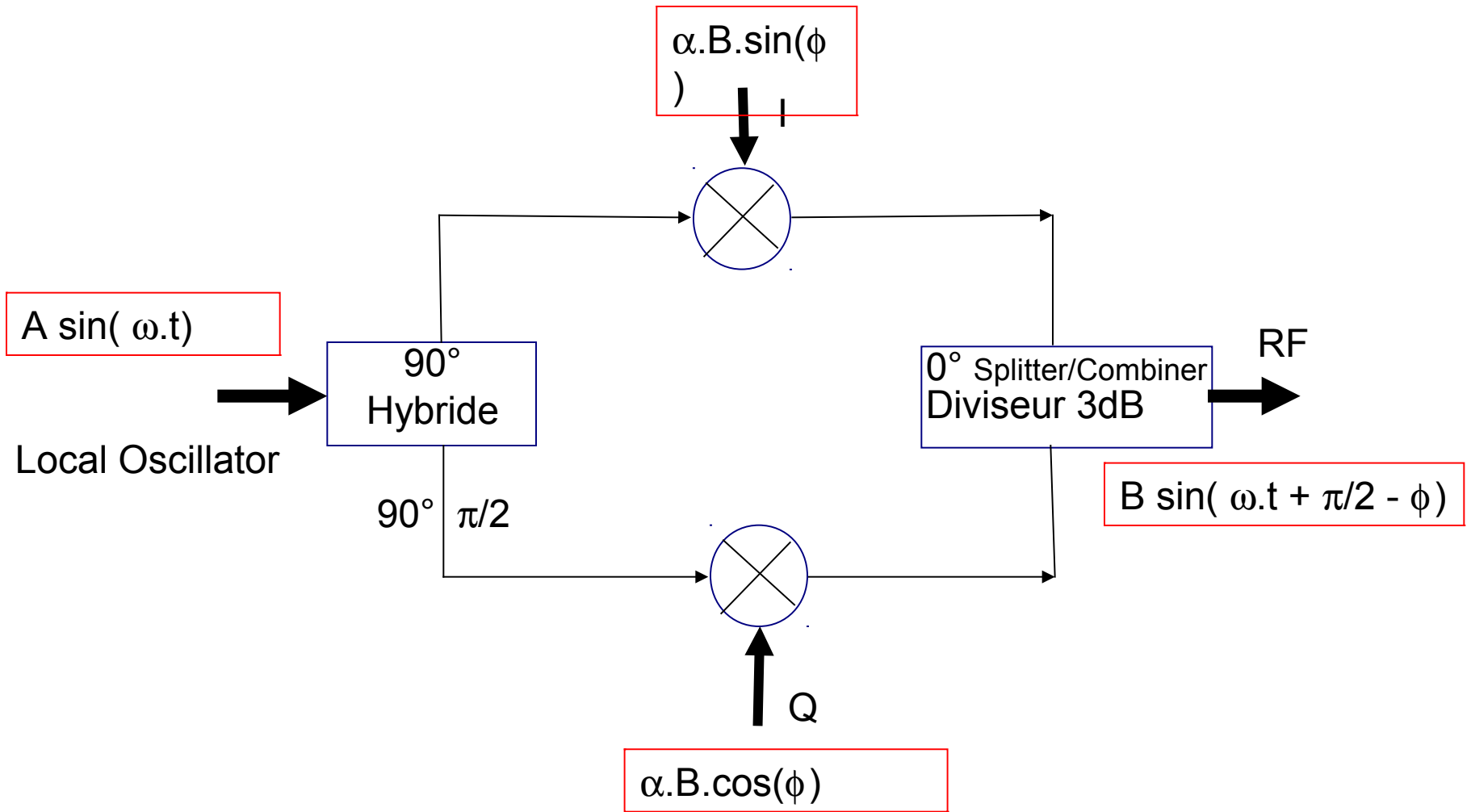
Démodulateur I/Q

$$k/32.A.B.\sin(\phi)$$



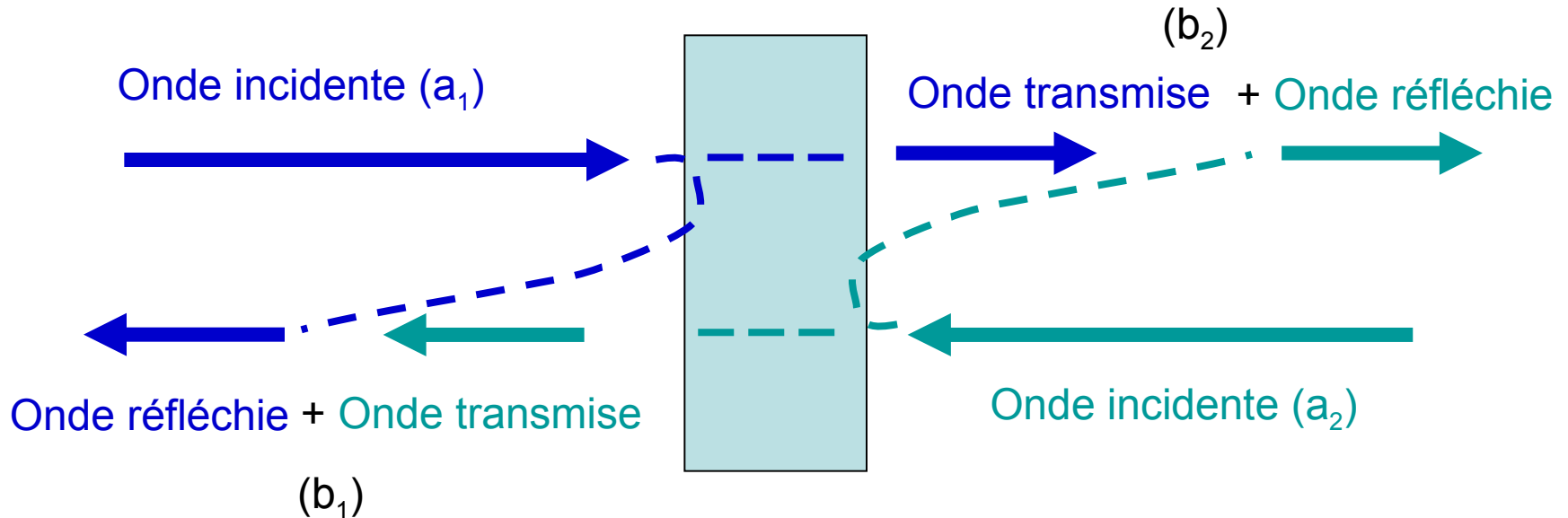
$$k/32.A.B.\cos(\phi)$$

modulateur I/Q



paramètres S

Les paramètres S caractérisent un quadripôle



Ondes qui sont des racines carrés de watts

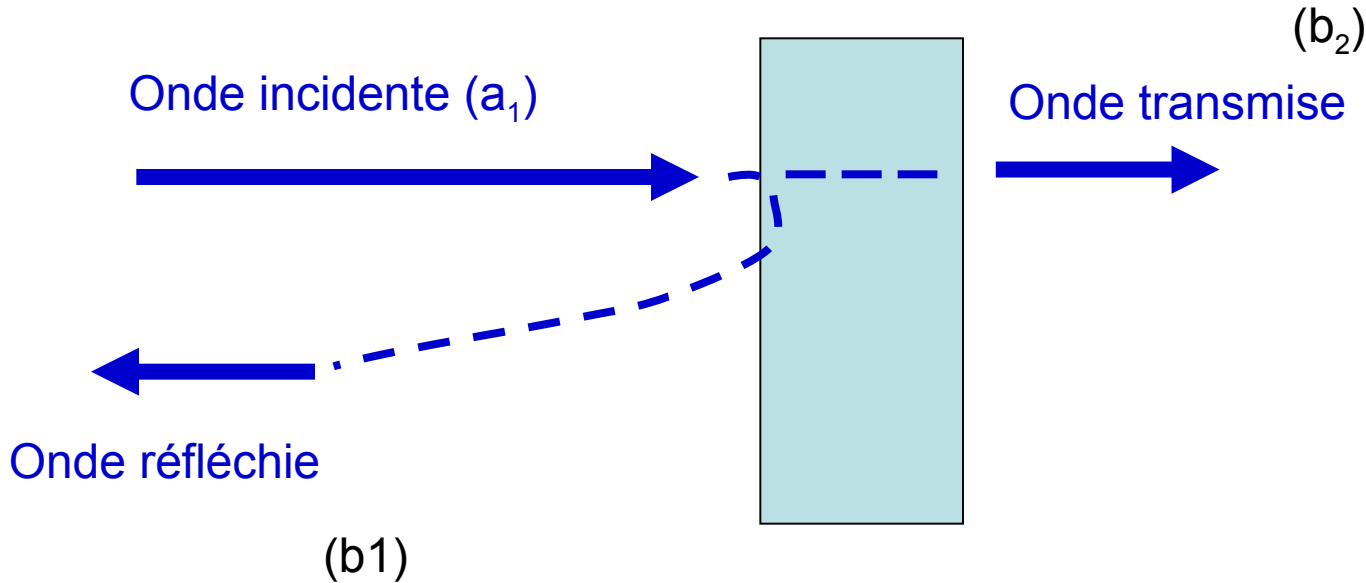
$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

a, b et S sont des valeurs complexes (Amplitude et Phase ou Réel et Imaginaire)

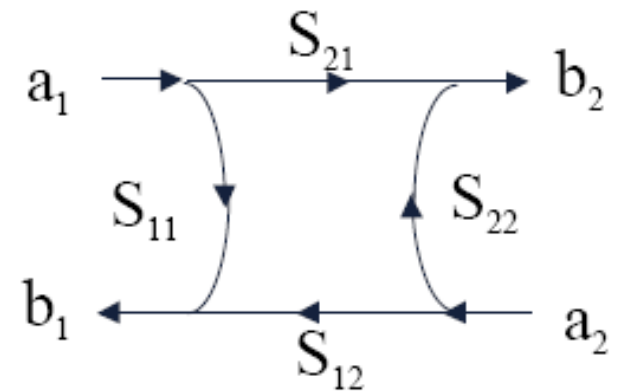
- S_{11} et S_{22} traduisent la réflexion du signal incident à chacun des accès
- S_{21} et S_{12} traduisent la propagation du signal à travers le quadripôle

Mesures des paramètres S



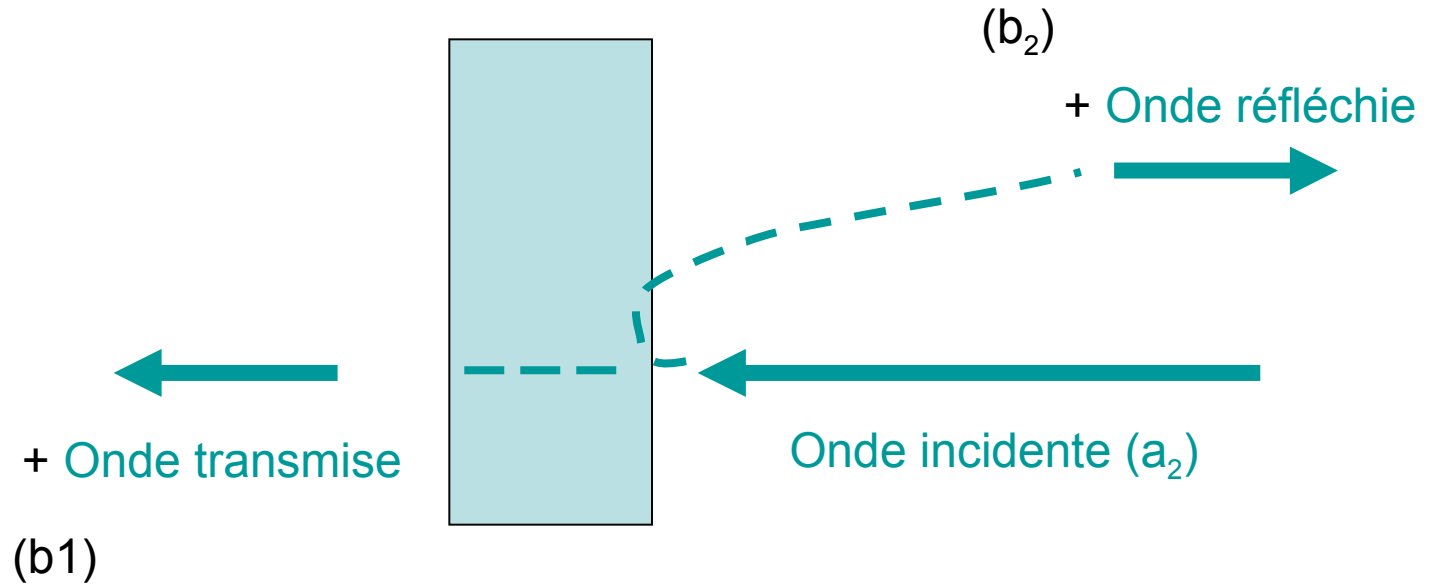
- Les paramètres S sont obtenus comme

$$\begin{array}{l}
 S_{11} = b_1 / a_1 \Big|_{a_2=0} \\
 S_{21} = b_2 / a_1 \Big|_{a_2=0}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 S_{12} = b_1 / a_2 \Big|_{a_1=0} \\
 S_{22} = b_2 / a_2 \Big|_{a_1=0}
 \end{array}$$



L'amplitude de S_{11} ($|S_{11}|$) compris entre 0 et 1, la phase de S compris entre 0 et 2π
 L'amplitude de S_{21} ($|S_{21}|$) compris entre 0 et 1 (atténuation) >1 (amplification)

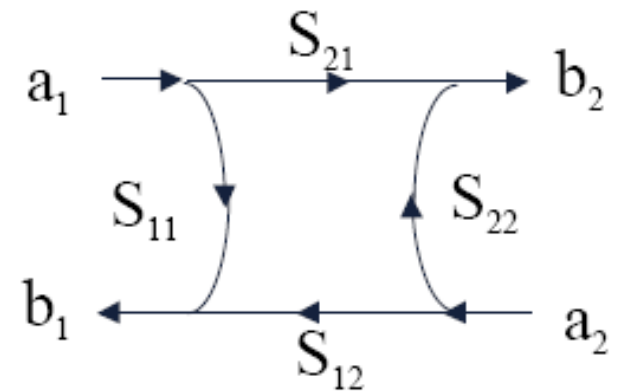
Mesures des paramètres S



- Les paramètres S sont obtenus comme

$$S_{11} = b_1 / a_1 \Big|_{a_2=0} \quad S_{12} = b_1 / a_2 \Big|_{a_1=0}$$

$$S_{21} = b_2 / a_1 \Big|_{a_2=0} \quad S_{22} = b_2 / a_2 \Big|_{a_1=0}$$



L'amplitude de S_{22} ($|S_{22}|$) compris entre 0 et 1, la phase de S compris entre 0 et 2π
 L'amplitude de S_{12} ($|S_{12}|$) compris entre 0 et 1 (atténuation) >1 (amplification)

Coefficient de réflexion S_{11} ROS VSWR SWR TOS Return Loss

Coefficient de réflexion est défini comme le rapport de l'onde réfléchie à l'onde incidente à un endroit donné d'une ligne. $\Gamma = \rho \angle \theta$

S_{11} est défini comme le rapport de l'onde réfléchie à l'onde incidente d'un quadripôle.

$$\text{Coefficient de réflexion} = S_{11}$$

$$\text{Return loss} = -10 \log_{10} (P_r/P_i) = -20 \log_{10} (|S_{11}|) = -20 \log_{10} (\rho)$$

ROS Rapport des ondes stationnaires

et en anglais

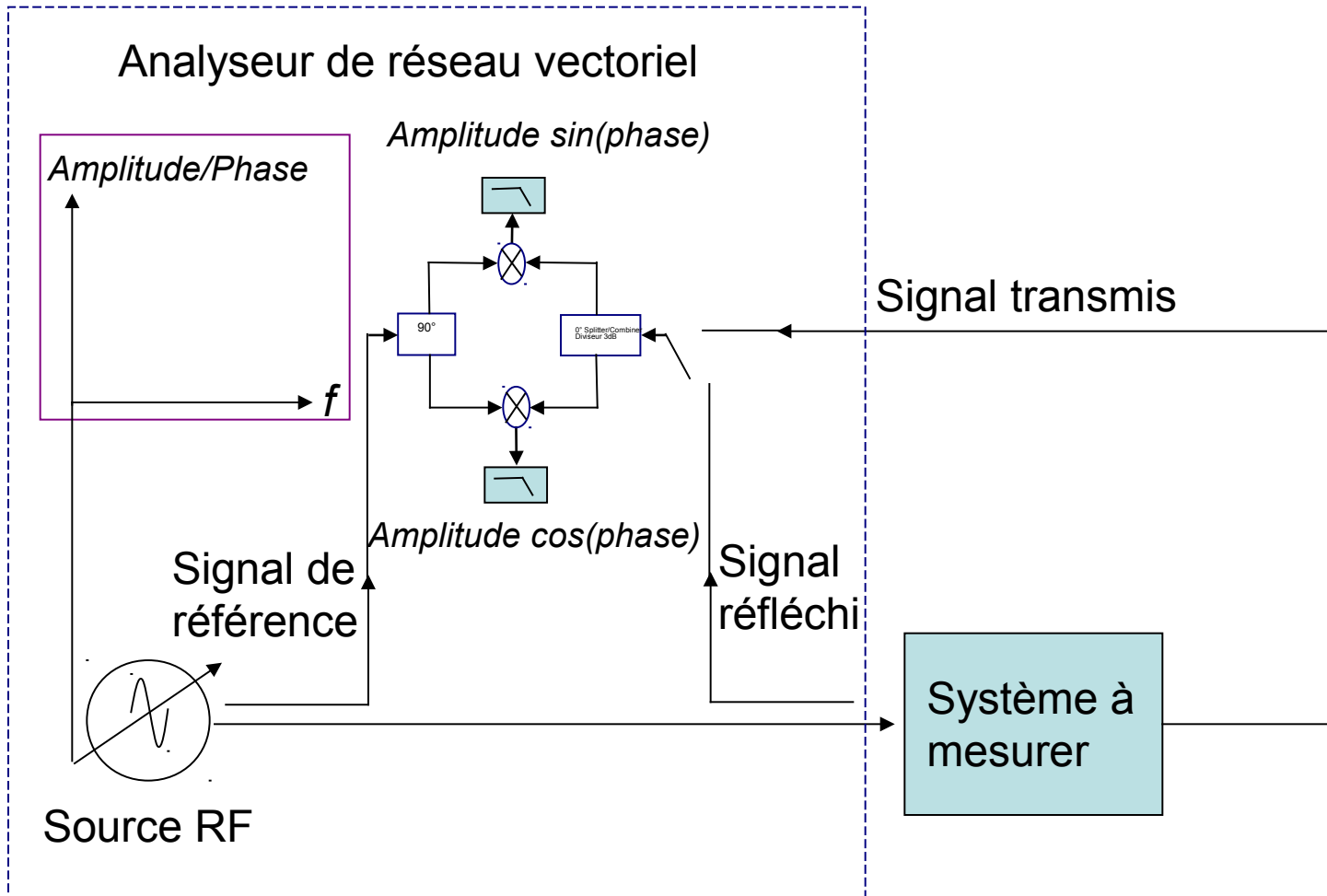
VSWR Voltage Standing Waves Ratio

SWR Standing Waves Ratio

$$ROS = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = \frac{1 + |s_{11}|}{1 - |s_{11}|}$$

Le ROS est appelé TOS (Taux d'onde stationnaire) ce qui n'est judicieux pour une quantité comprise entre 1 et ∞ , mais c'est pourtant le terme TOS le plus usité.

Mesures des paramètres S

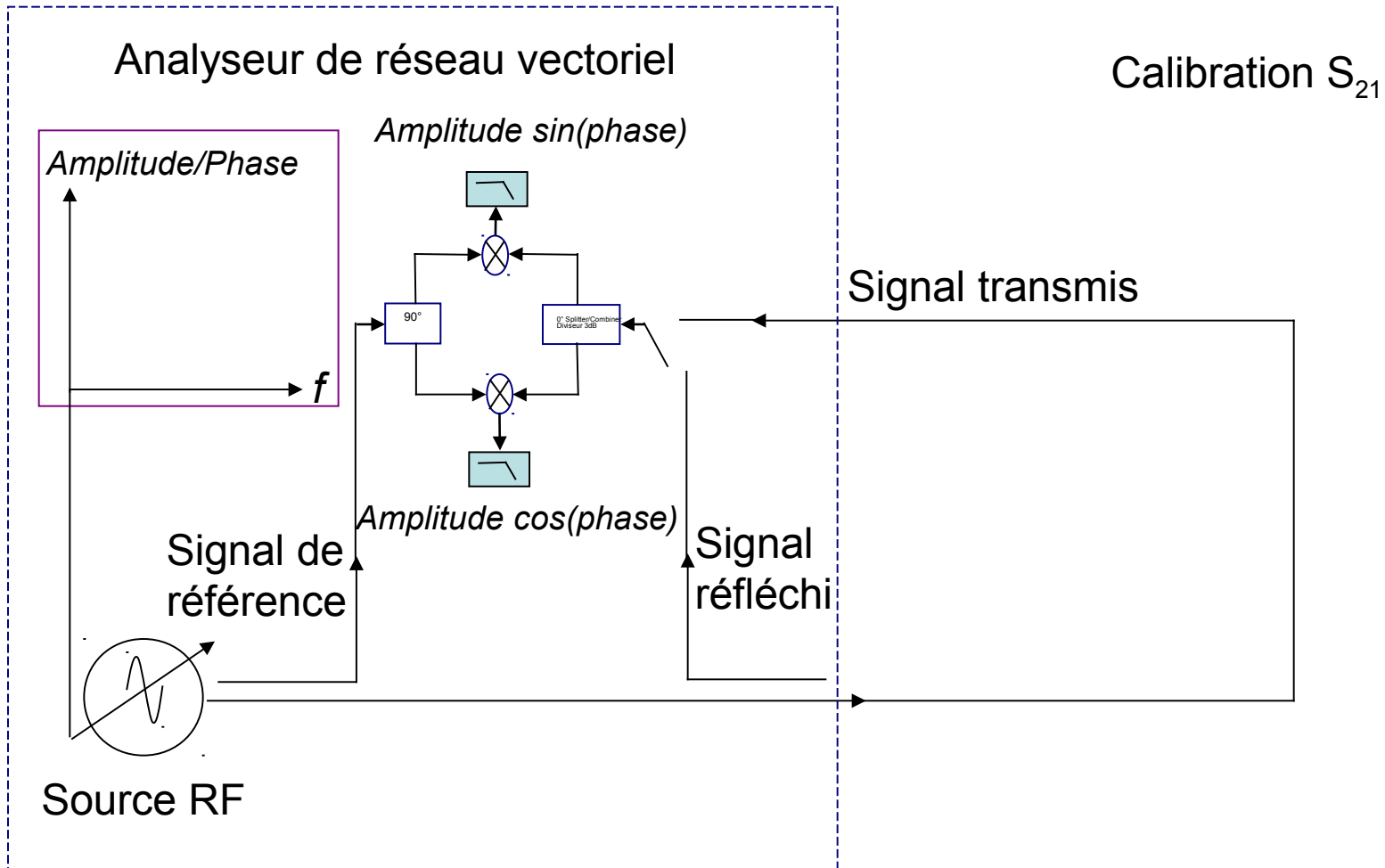


L'amplitude des paramètres S sont très souvent donnés en dB

$$20 \log_{10} (|S_{11}|)$$

La phase des paramètres S sont très souvent donnés en $^\circ$

Mesures des paramètres S

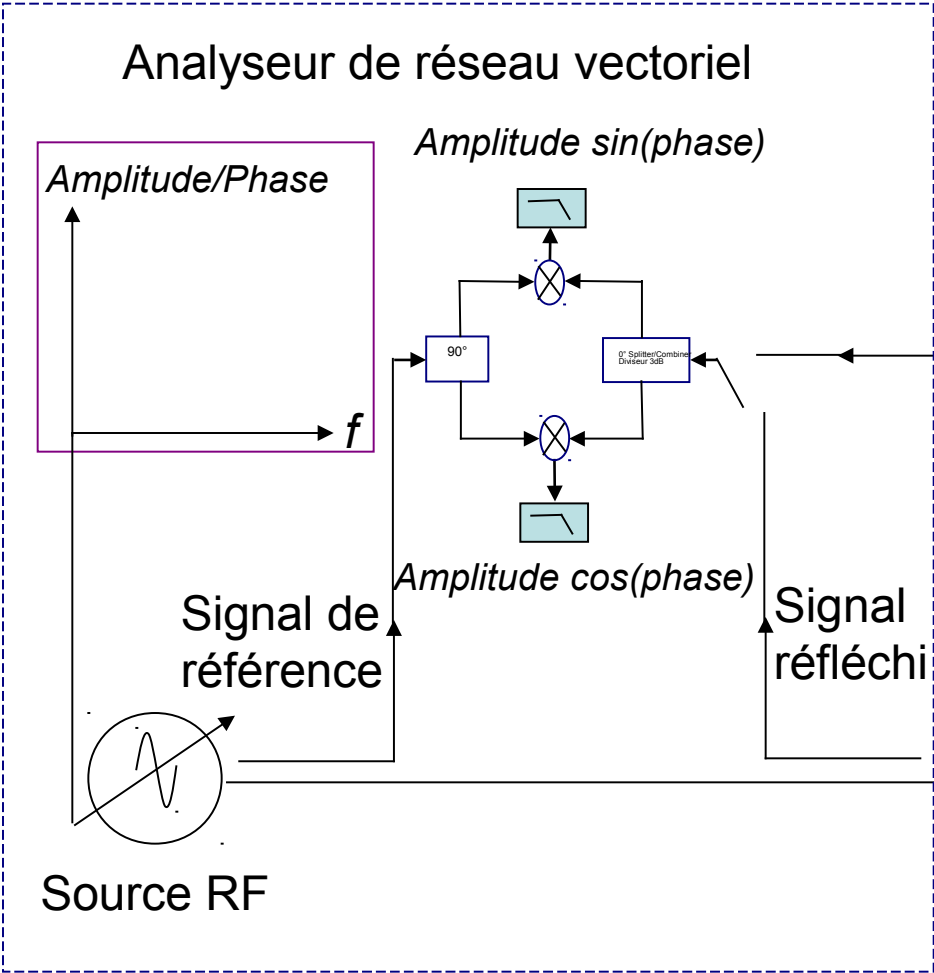


$$|S_{21}| = 1$$

$$20 \log_{10} (|S_{21}|) = 0 \text{ dB}$$

$$\text{Phase } S_{21} = 0^\circ$$

Mesures des paramètres S



Calibration S_{11}

3 étapes (2 minimum)

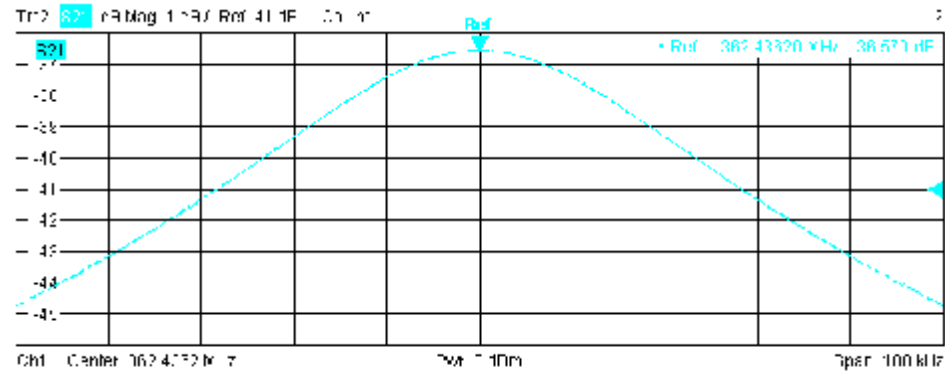
Charge Circuit (open)

$|S_{11}| = 0$

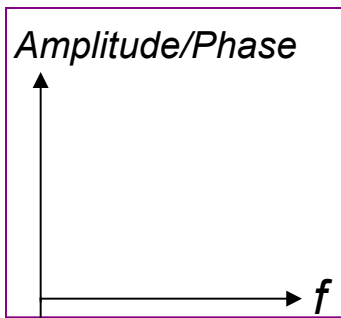
$20 \log_{10} (|S_{11}|) = -\infty \text{ dB}$

Phase $S_{11} = 180^\circ$

Exemple de mesure d'une cavité



Analyseur de réseau vectoriel



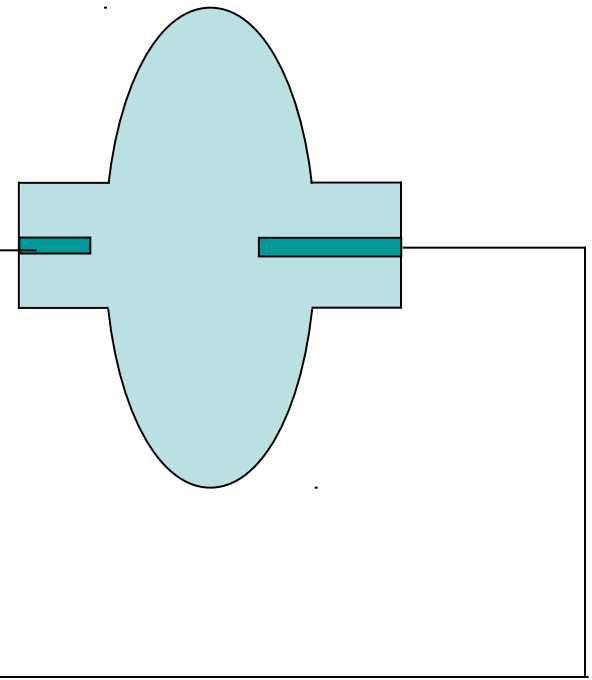
Amplitude $\sin(\text{phase})$

Amplitude $\cos(\text{phase})$

Signal de référence

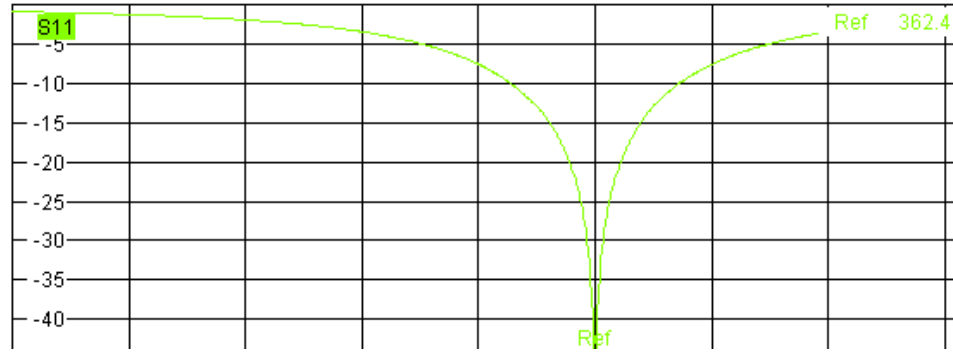
Signal transmis

Source RF

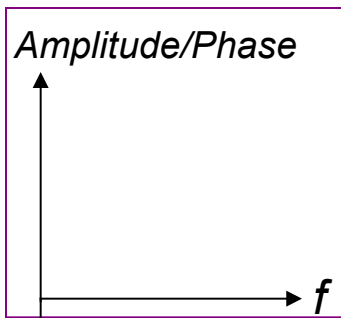


Exemple de mesure d'une cavité

Trc1 S11 dB Mag 5 dB / Ref-25 dB Cal int



Analyseur de réseau vectoriel



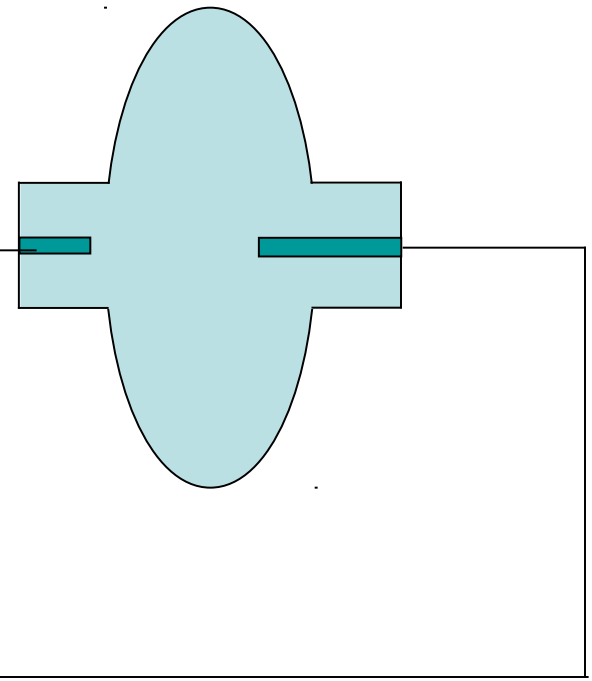
Amplitude $\sin(\text{phase})$

Amplitude $\cos(\text{phase})$

Signal de référence

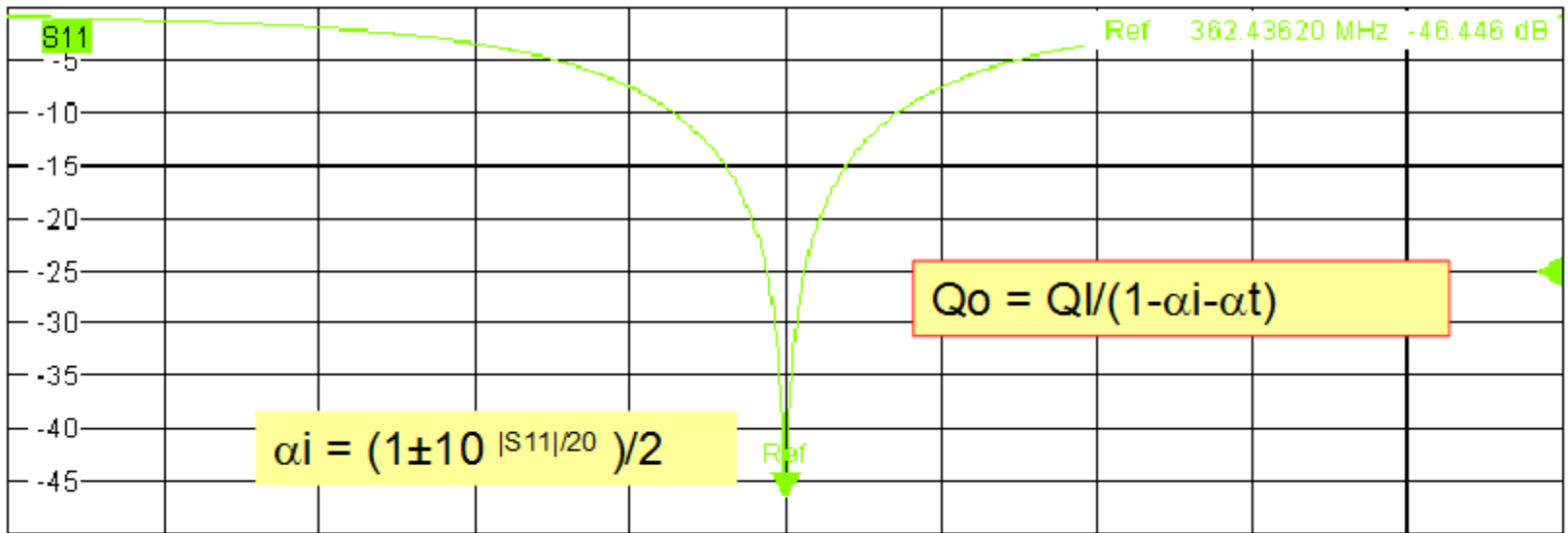
Signal réfléchi

Source RF



Trc1 S11 dB Mag 5 dB / Ref -25 dB Cal int

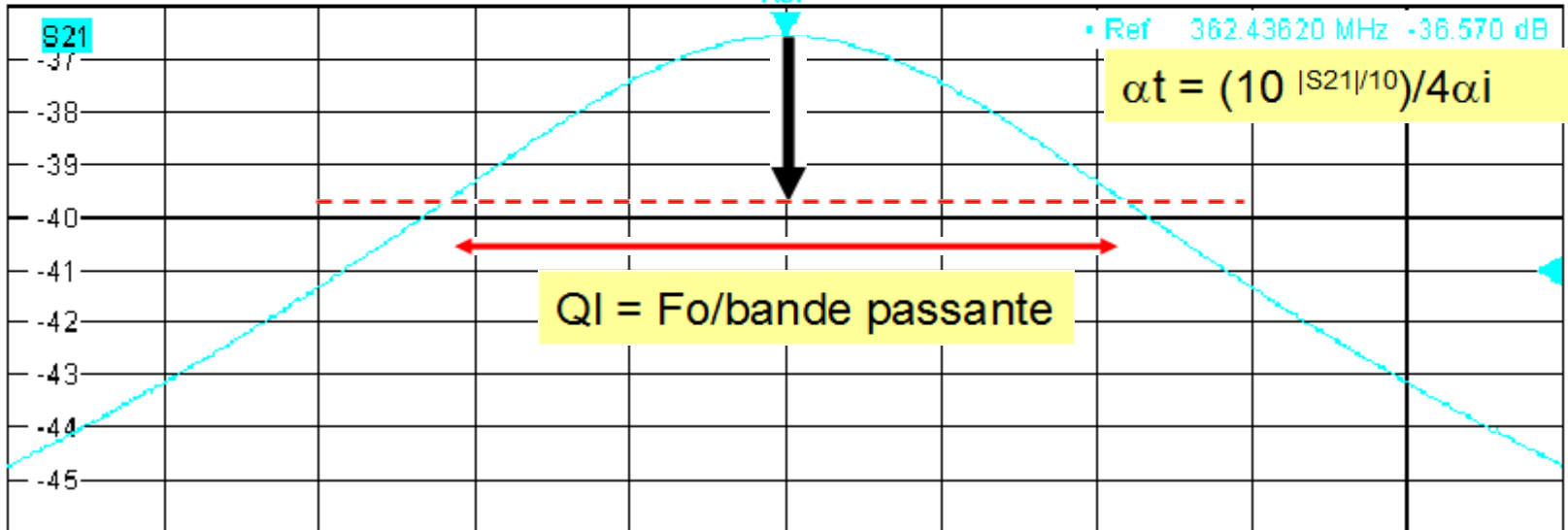
1



Ch1 Center 362.4362 MHz Pwr 0 dBm Span 100 kHz

Trc2 S21 dB Mag 1 dB / Ref -41 dB Cal int

2

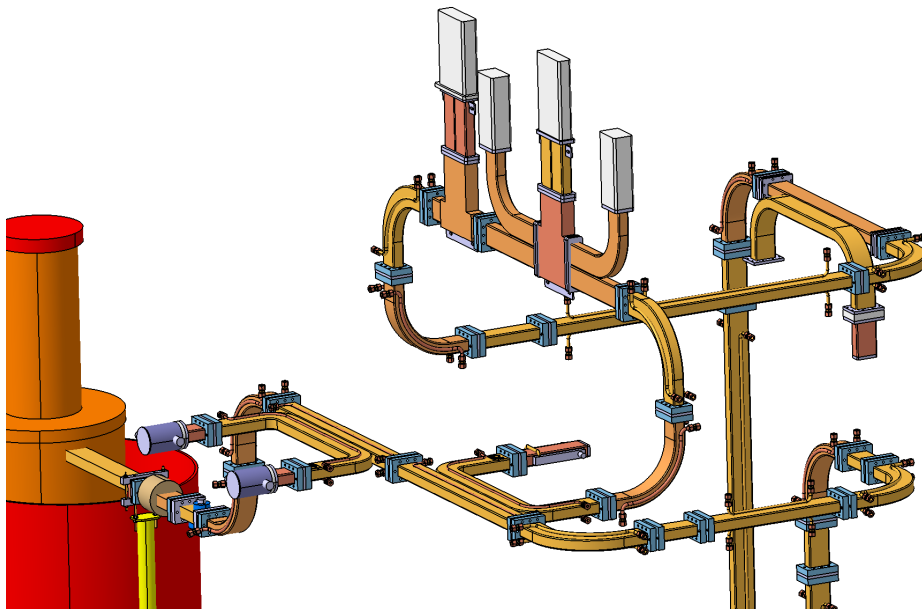
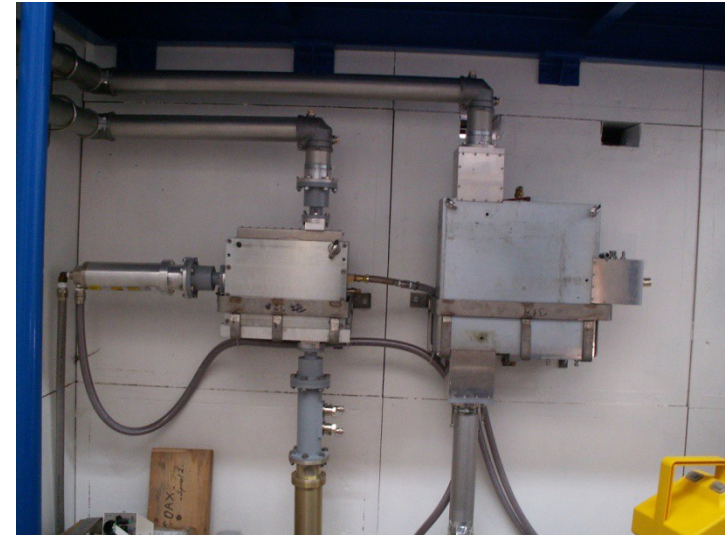
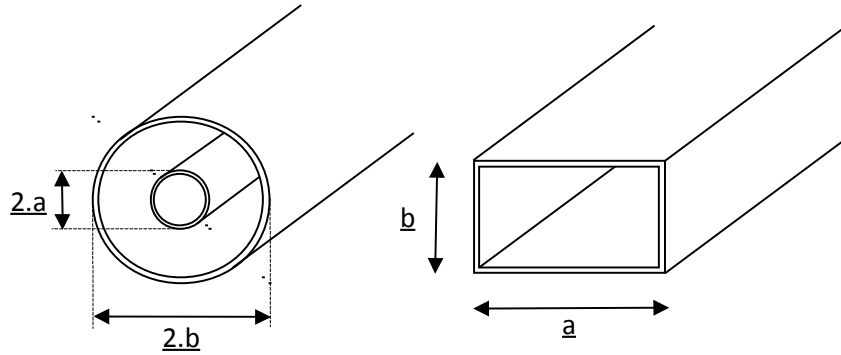


Ch1 Center 362.4362 MHz Pwr 0 dBm Span 100 kHz

Amplitude

Sol

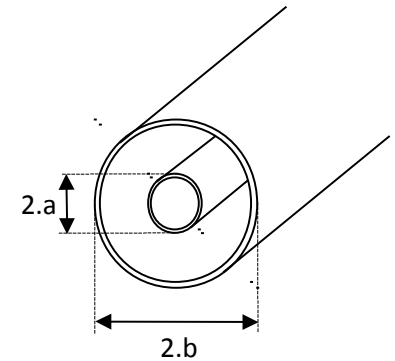
Lignes de transmission



Lignes de transmission coaxiales

Les lignes coaxiales sont composées d'un conducteur interne ou central et d'un conducteur extérieur.

Il existe un standard (type EIA) qui est le plus utilisé.



Type	Φ int (mm)	Φ ext (mm)	Pmax à 700 MHz
7/8" EIA	8.7	20	2.5 kW
1 5/8" EIA	16.9	38.8	6 kW
3 1/8" EIA	33.4	76.9	20 kW
4 1/2" EIA	44.8	103	32 kW
6 1/8" EIA	66	151.9	75 kW

Atténuation en Neper /m

$$1 \text{ Np} = 20 / \ln 10 \text{ dB} \approx 8.685889638 \text{ dB}$$

$$\alpha_{coax} = \frac{1}{\zeta_0 \cdot \ln \left(\frac{b}{a} \right)} \left(\frac{Ra}{a} + \frac{Rb}{b} \right)$$

Les différents constructeurs donnent des puissances maximales à ne pas dépassées, cette puissance moyenne maximale n'est pas calculé d'après le champ électrique de claquage, mais par l'échauffement par effet joule des conducteurs afin de ne pas dépasser une certaine température (généralement 120 °C) à une température ambiante de 40°C.

Les guides d'onde rectangulaire sont standardisés, le rapport a/b est de 2 pour maximisé la puissance à transmettre.

Les guides d'ondes rectangulaires ont une fréquence de coupure et une bande passante pour le mode de propagation utilisé (TE₁₀).

La fréquence de coupure (f_c) pour les différents modes de propagation est donné par la formule :

$$f_{c_{m,n}} = c/2 \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

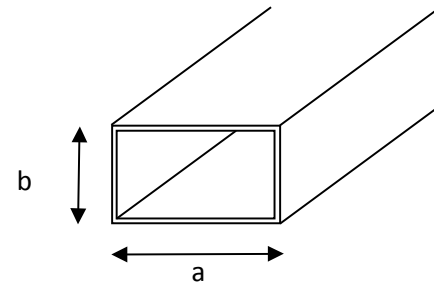
Avec c la célérité (299 792 458 m/s),

a la plus grande dimension du guide,

b la plus petite dimension du guide

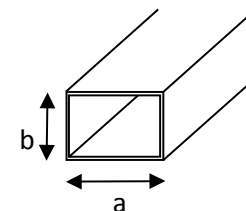
m et n sont des entiers positifs correspondant au mode utilisé.

La bande passante commence à 1.25 f_c et se termine la fréquence de coupure du premier mode supérieur (moins quelques %).



Les standards et dimensions des guide d'onde

WG	EIA-WR	IEC-R	Fc (GHz)	Flow (GHz)	Fhigh (GHz)	a (inches)	b (inches)	a (mm)	b (mm)
0	2300	3	.257	0.32	0.49	23.000	11.500	584.200	292.100
0	2100	4	.281	0.35	0.53	21.000	10.500	533.400	266.700
1	1800	5	.328	0.41	0.625	18.000	9.000	457.200	228.600
2	1500	6	.393	0.49	0.75	15.000	7.500	381.000	190.500
3	1150	8	.513	0.64	0.96	11.500	5.750	292.100	146.050
4	975	9	.605	0.75	1.12	9.750	4.875	247.650	123.825
5	770	12	.766	0.96	1.45	7.700	3.850	195.580	97.790
6	650	14	.908	1.12	1.70	6.500	3.250	165.100	82.550
7	510	18	1.157	1.45	2.20	5.100	2.550	129.540	64.770
8	430	22	1.372	1.70	2.60	4.300	2.150	109.220	54.610
9A	340	26	1.736	2.20	3.30	3.400	1.700	86.360	43.180
10	284	32	2.078	2.60	3.95	2.840	1.340	72.136	34.036
11A	229	40	2.577	3.30	4.90	2.290	1.145	58.166	29.083
12	187	48	3.152	3.95	5.85	1.872	.872	47.549	22.149
13	159	58	3.712	4.90	7.05	1.590	.795	40.386	20.193
14	137	70	4.301	5.85	8.20	1.372	.622	34.849	15.799
15	112	84	5.260	7.05	10.0	1.122	.497	28.499	12.624
16	90	100	6.557	8.20	12.4	.900	.400	22.860	10.160
17	75	120	7.869	10.0	15.0	.750	.375	19.050	9.525
18	62	140	9.488	12.4	18.0	.622	.311	15.799	7.899
19	51	180	11.571	15.0	22.0	.510	.255	12.954	6.477
20	42	220	14.051	18.0	26.5	.420	.170	10.668	4.318
21	34	260	17.357	22.0	33.0	.340	.170	8.636	4.318
22	28	320	21.077	26.5	40.0	.280	.140	7.112	3.556
23	22	400	26.346	33.0	50.0	.224	.112	5.690	2.845
24	19	500	31.391	40.0	60.0	.188	.094	4.775	2.388
25	15	620	39.875	50.0	75.0	.148	.074	3.759	1.880
26	12	740	48.372	60.0	90.0	.122	.061	3.099	1.549
27	10	900	59.014	75.0	110	.100	.050	2.540	1.270
28	8	1200	73.768	90.0	140	.080	.040	2.032	1.016
29	7	1400	90.791	110	170	.065	.033	1.651	.826
30	5	1800	115.714	140	220	.051	.026	1.295	.648
31	4	2200	137.242	170	260	.043	.022	1.092	.546
32	3	2600	173.571	220	325	.034	.017	.864	.432



Puissance max:

$$P_{wg} = \frac{E_d^2}{4 \cdot \zeta_0} \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}$$

On peut pressuriser les guides pour augmenter E_d

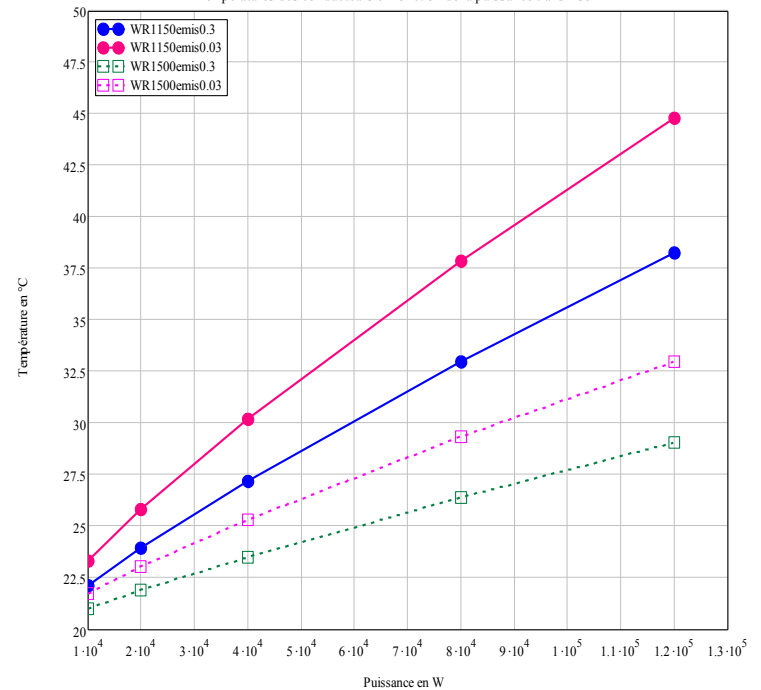
Atténuation en Neper /m

1 Np = $20 / \ln 10$ dB ≈ 8.685889638 dB

$$\alpha_{wg} = \frac{R_s \cdot \left(1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_c}{f}\right)^2\right)}{b \cdot \zeta_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

Tenir compte de la température pour les fortes puissances

Températures des conducteurs en fonction de la puissance transmise



Traité d'électricité Vol XIII Hyperfréquences de Fred Gardiol

Micro-ondes de Paul F. Combes

Electronique appliqué au hautes fréquences de François Dieuleveult

...

Modulateur pour Klystron

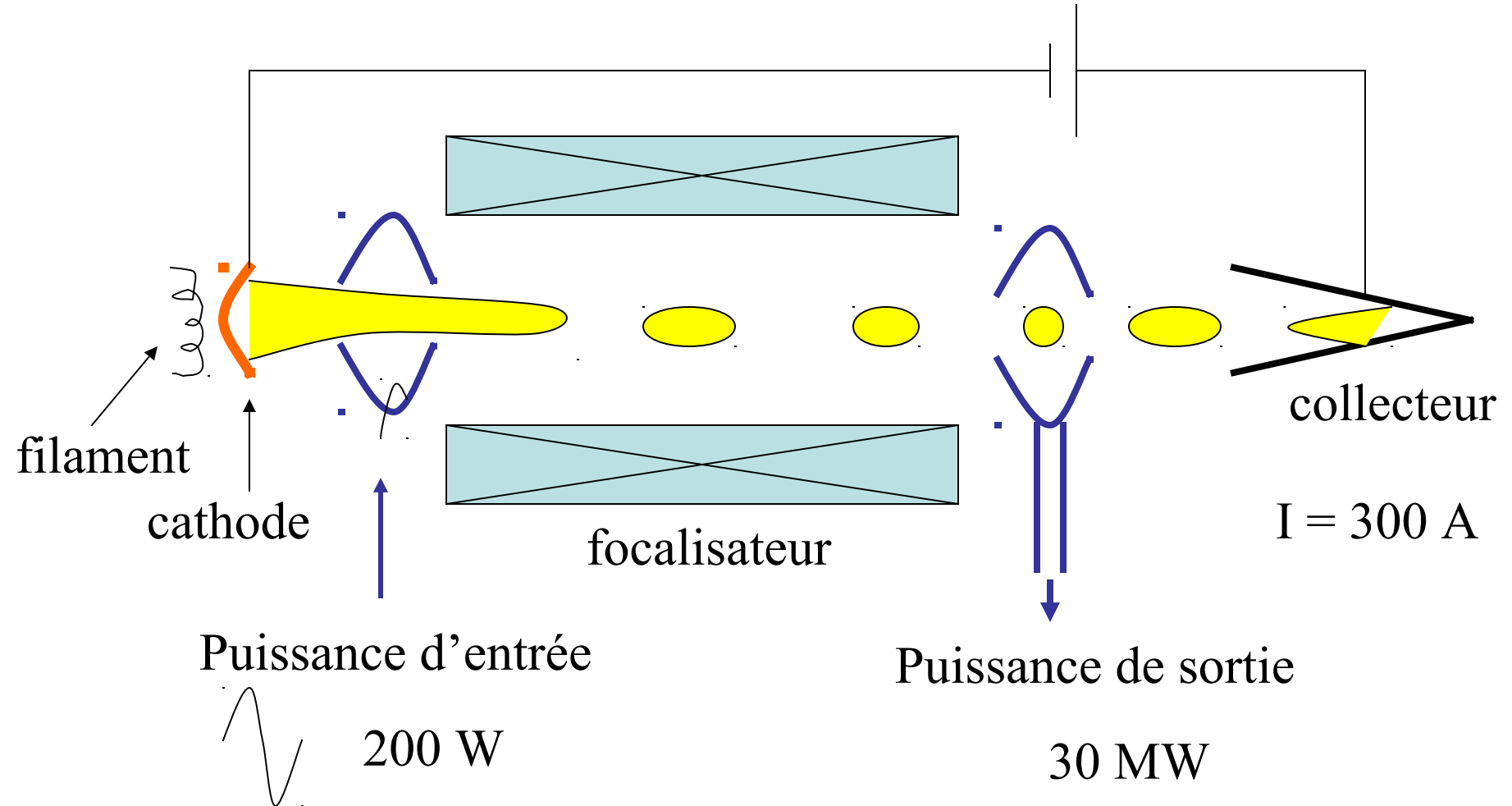


= Cavité

Le Klystron

Gain = 150 000

V (300 kV)



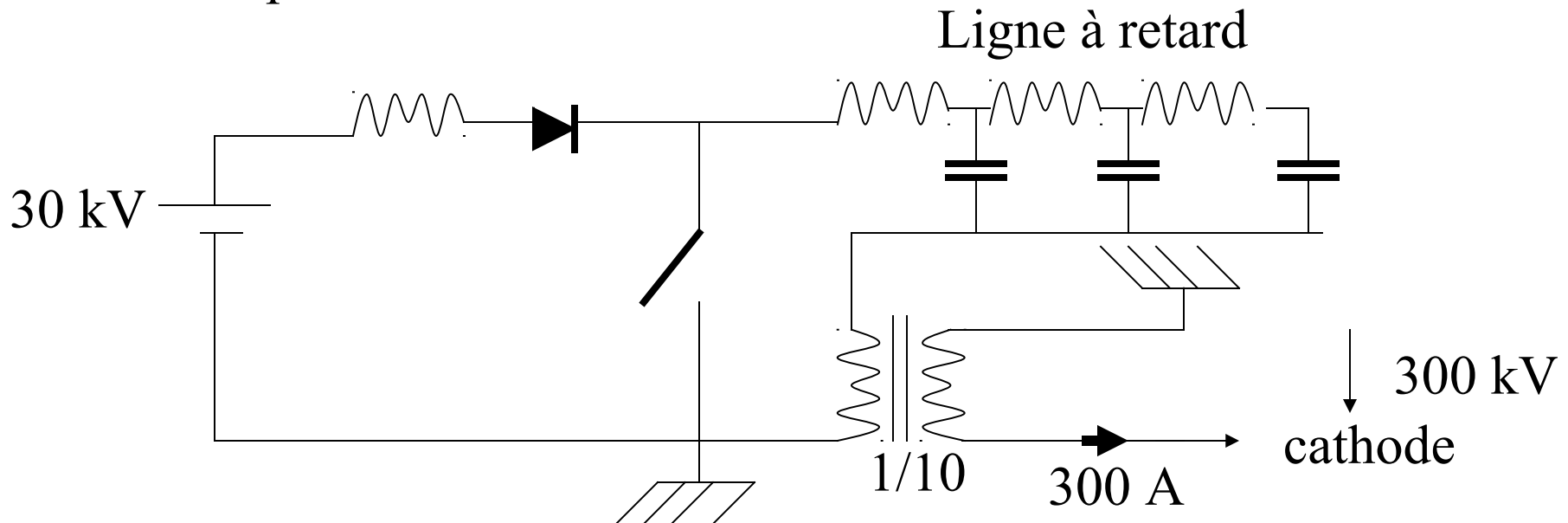
Fonctionnement en mode Pulsé

Il faut une alimentation de haute tension et fort courant pour faire fonctionner une source de puissance RF pulsé

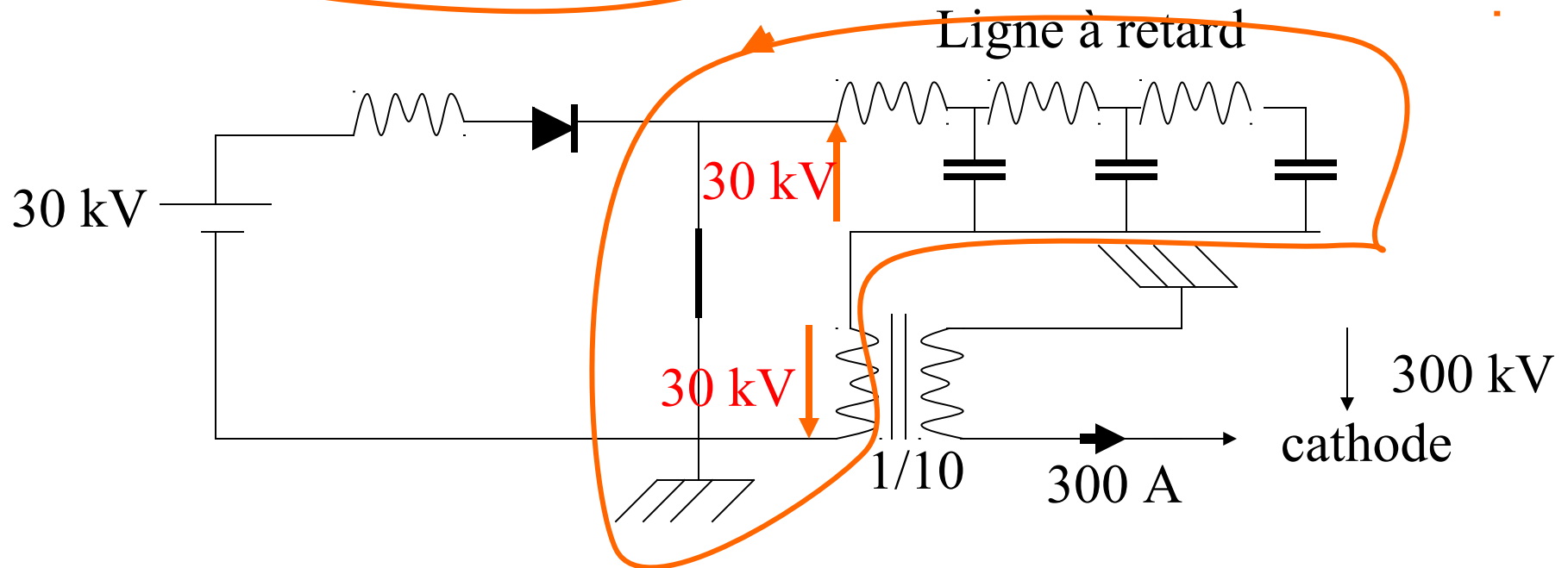
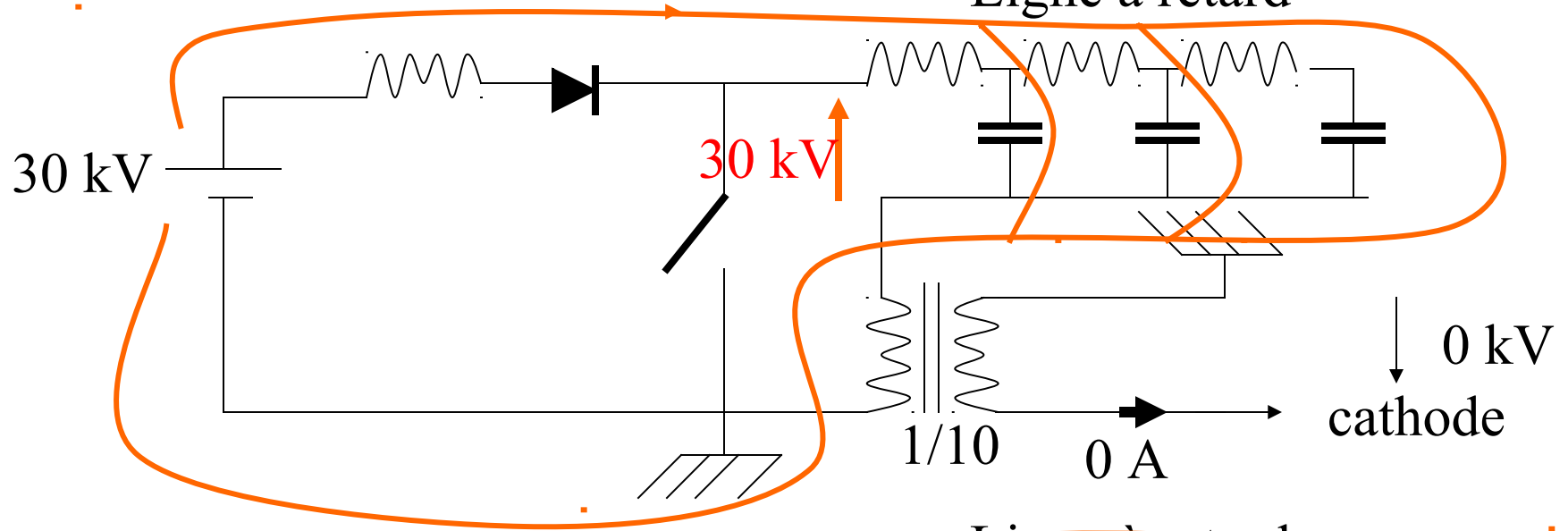
Solution : Alimentation pulsée
souvent appelé modulateur

Exemple pour un klystron de 35 MW à 3 GHz

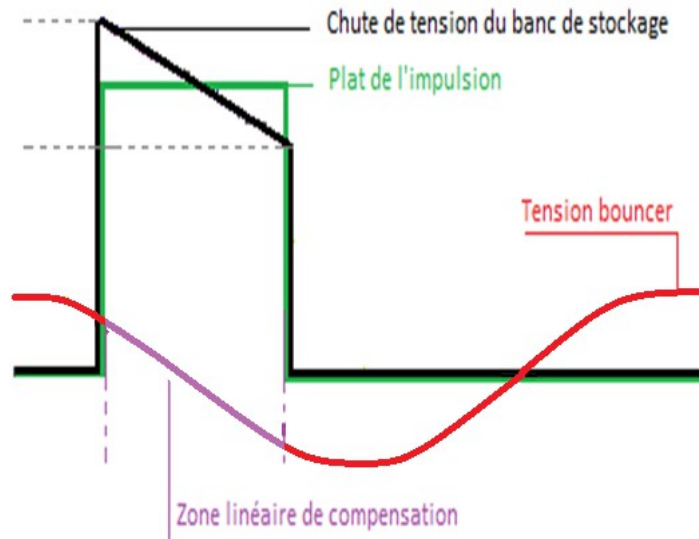
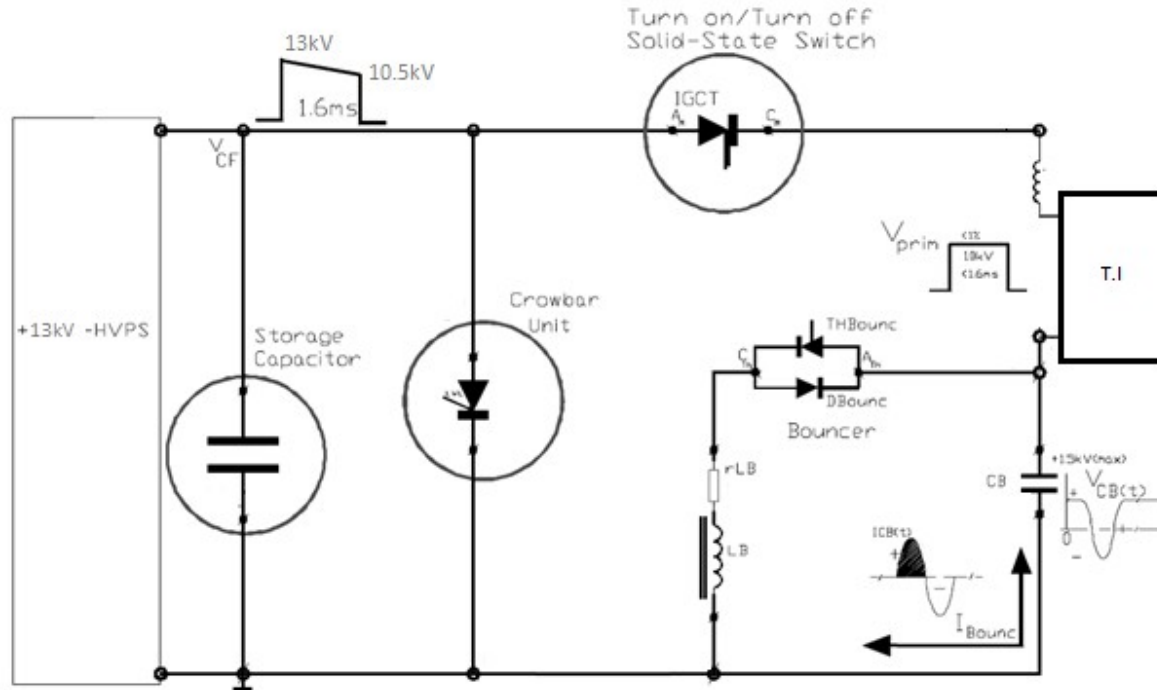
Principe:

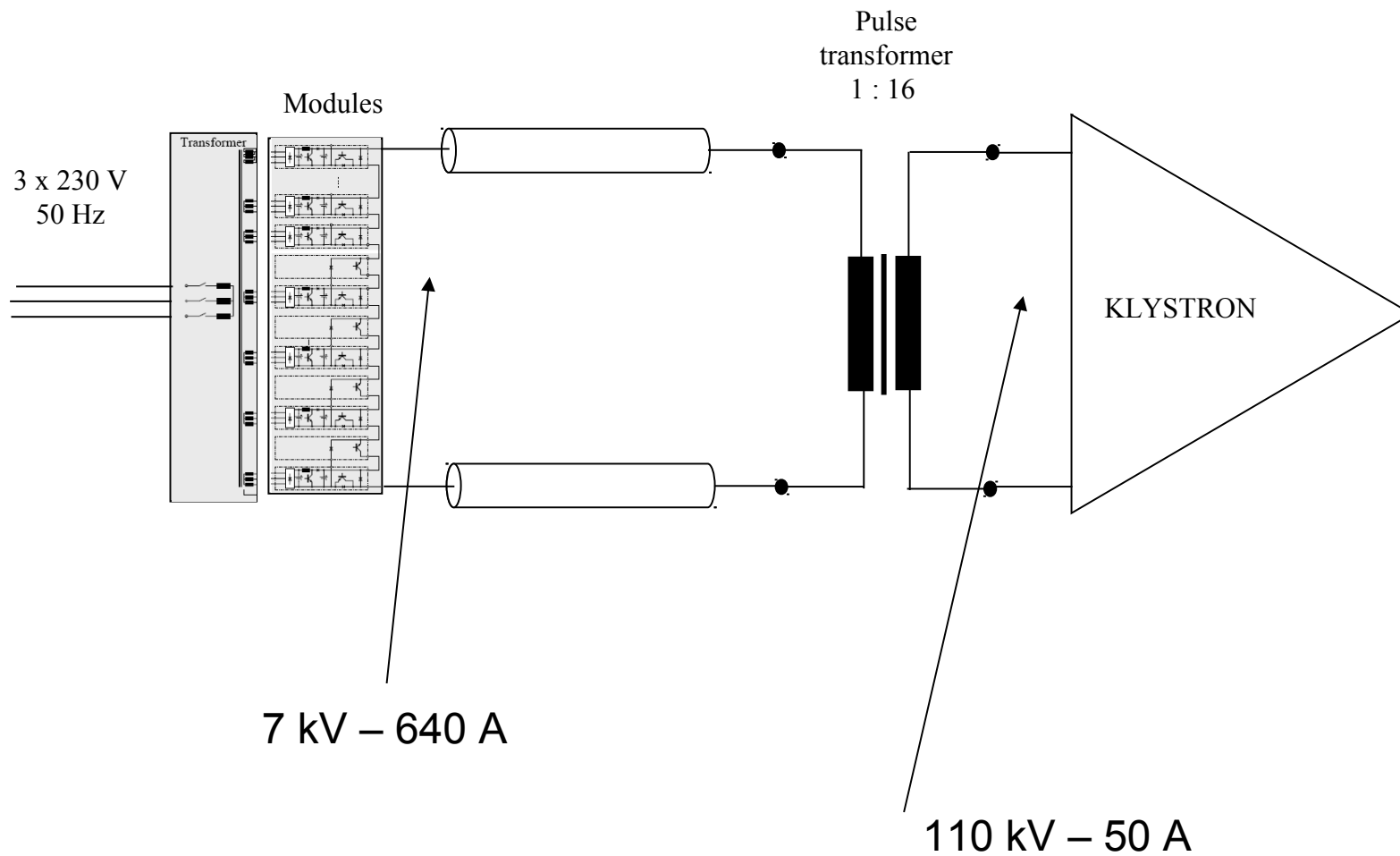


Le modulateur



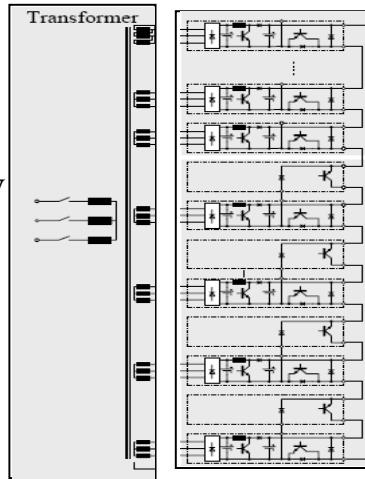
Modulateur type Bouncer

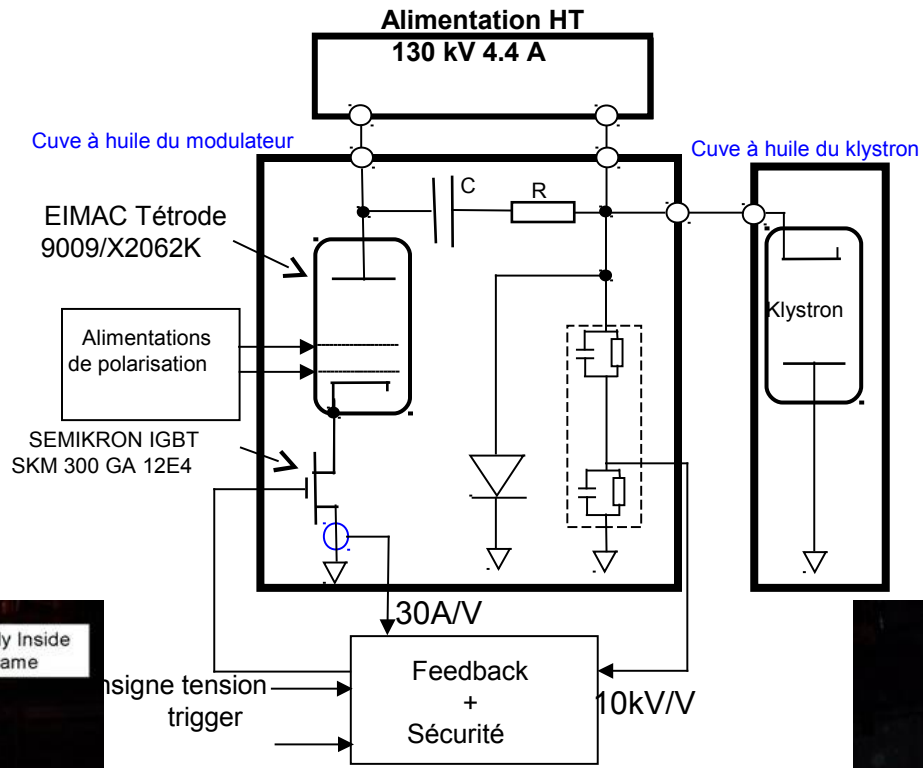




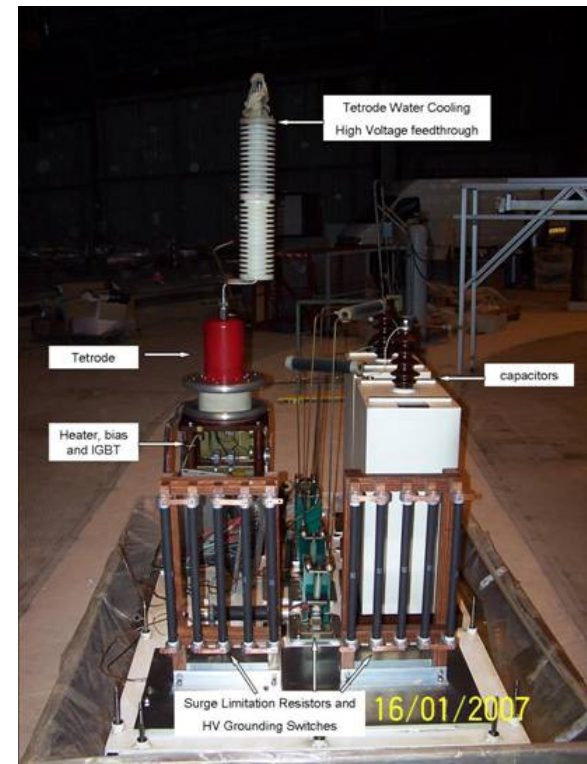
1,6 ms à 50 Hz

Modules





*modulateur du CEA/DAPNIA
installé à Saclay*



Merci de votre attention

Jean Lesrel

lesrel@ipno.in2p3.fr