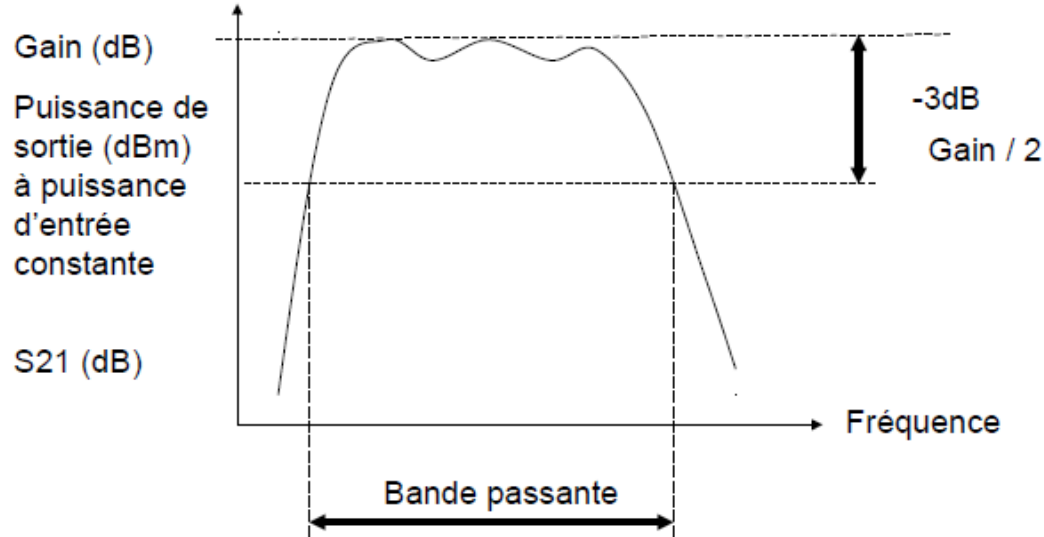


Mesures RF et Composants

Bande passante:



La bande passante c'est donc la gamme de fréquence d'une source qui fonctionne à une puissance donnée à $-n$ dB

Bien préciser :

Bande passante à -1 dB est de ± 10 MHz par exemple

Sans ces précisions, il risque d'y avoir quelques malentendus.... N'oubliez pas à 3 dB cela correspond à la moitié de la puissance

Mesures de puissance, mesures directes:



La Wattmètre

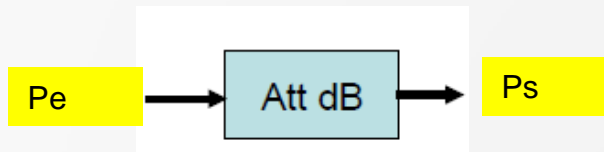
Les sondes associées:

Grande dynamique

Mais attention puissance entrée crête limitée et peuvent être fragiles (ne pas dépasser la puissance max. sous peine de destruction)



Les atténuateurs

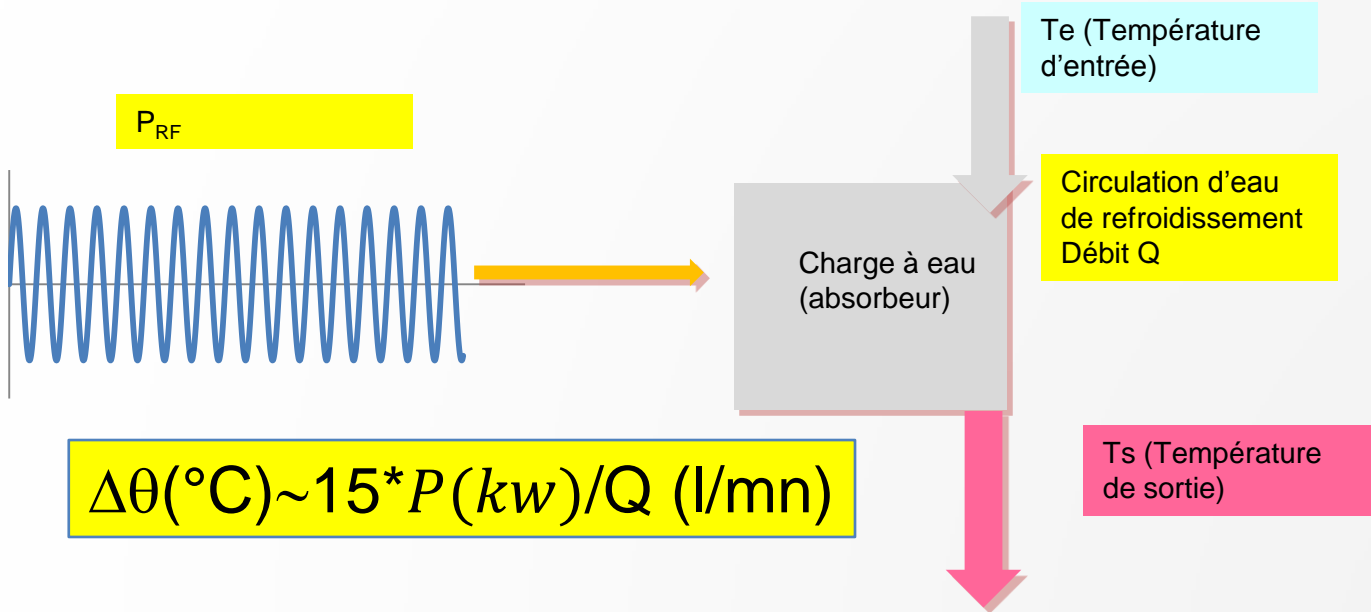


$$P_s = P_e - \text{Attenuation}$$

Les atténuateurs sont donnés en dB d'atténuation
Ainsi un atténuateur de 20 dB donne une puissance de sortie de 100 fois moins que la puissance d'entrée,

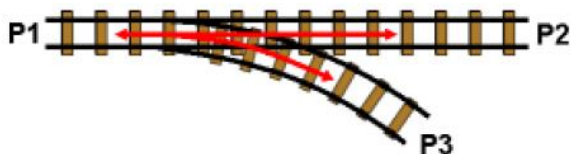
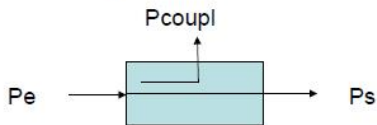
Mesures de puissance, mesures thermiques:

Une onde RF absorbée par le l'eau élève la température de celle-ci. A la manière de votre micro-onde.



Coupleurs de mesure:

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

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

Un coupler prélève une petite partie du signal, il permet de connaître la puissance circulant dans la ligne RF et d'en analyser le comportement.

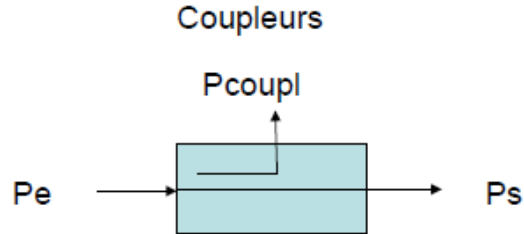
Les caractéristiques principales sont:

La valeur du couplage en dB (rapport puissance mesurée sur puissance incidente)

Les pertes d'insertion: pertes introduites

La directivité (capacité de découplage entre l'onde entrante et une onde retour (réfléchi))

Coupleurs de mesure, pertes d'insertion:



Perte d'insertion minimum (coupleur idéal)

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

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

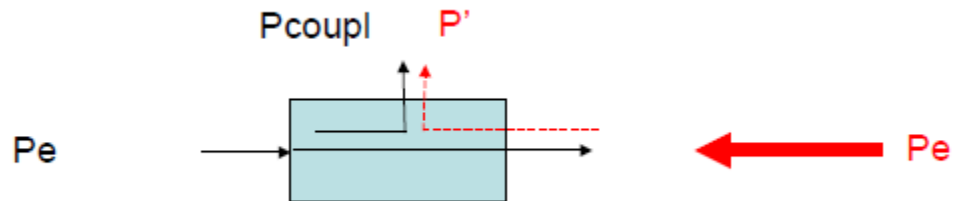
$$\text{Perte d'insertion minimum (dB)} = 10 \log_{10} [1 / (1 - 10^{-CPL/10})]$$

Un coupleur a forcément une perte d'insertion minimale qui correspond à son taux de couplage idéal. cad sans pertes électriques autres

Dans la pratique, ces pertes d'insertions peuvent être supérieures.

Coupleurs de mesure, directivité:

Quelquesoit le mode de propagation dans la pratique, il existe toujours une onde réfléchie par rapport à l'onde incidente qu'on veut mesurer.

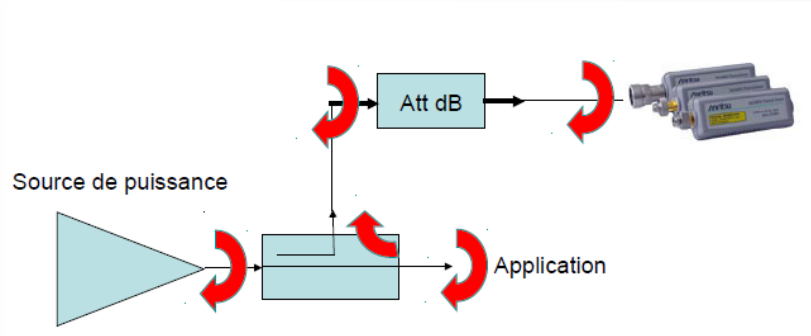


La directivité d'un coupleur, c'est sa capacité à « distinguer » la puissance réfléchie de la puissance d'entrée.

Directivité:

$$dB = 10 \cdot \log\left(\frac{P'}{P_{coupl}}\right)$$

Mesures de puissances, schéma:



Les mesures de puissance restent délicates, sources d'erreur:

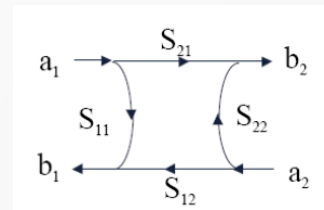
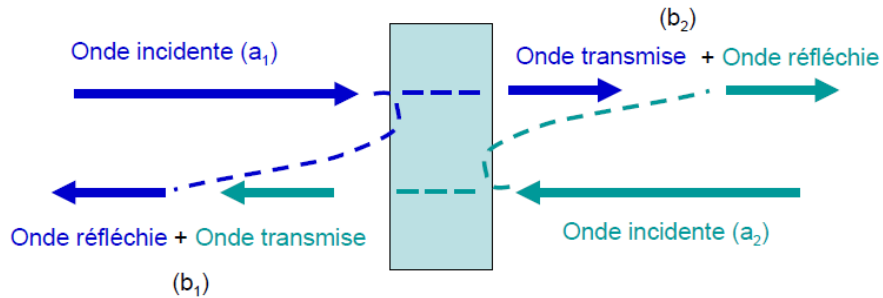
- Incertitudes sur les taux de couplages
- Influences des harmoniques
- Directivité
- Atténuation câbles

Dans tous les cas, bien étalonner la chaîne de mesure à la fréquence voulue,

- L'étalonnage se fait à très bas niveau au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel caractérisant les paramètres S (cf planches suivantes)
- Ne pas oublier qu'en règle générale, on mesure des mW pour connaître des kW ou des MW...

Paramètres S, quadripôle:

On utilise fréquemment les paramètres S pour tous les multipôles notamment les quadripôles:



$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$
$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

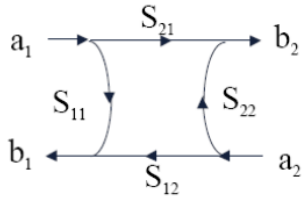
a_i, b_i, S_{ij} sont des valeurs complexes représentant l'amplitude et phases des signaux caractérisant le quadripôle

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

Intérêt: calcul matriciel permettant globalement de mettre en série les multipôles pour caractériser l'ensemble de la transmission.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = [S] \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

Paramètres S, quadripôle:

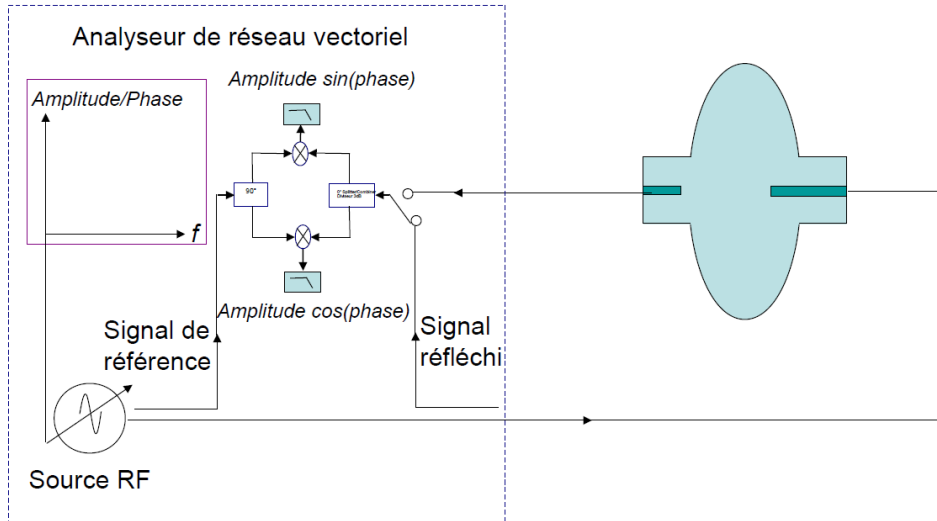
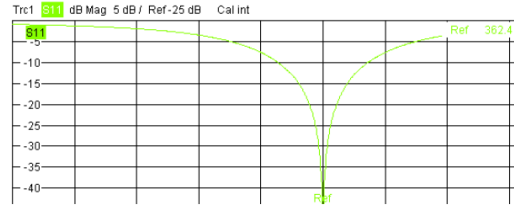


S_{11} et S_{22} caractérisent la réflexion du signal sur les ports d'accès

S_{12} et S_{21} traduisent la transmission du signal à travers le quadripôle

Mesures, analyseur vectoriel:

Exemple de mesure d'une cavité

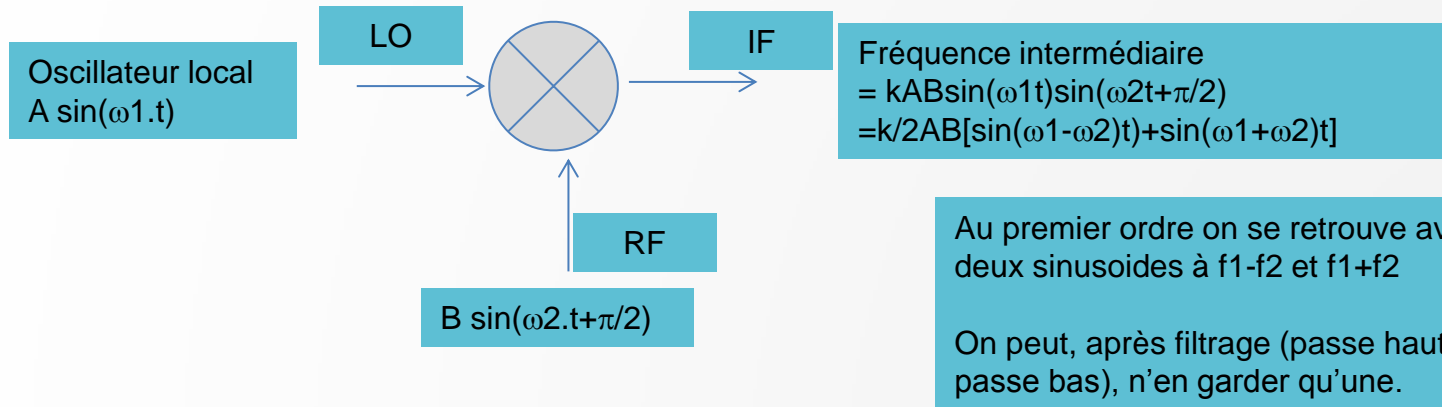


Mélangeurs:

Pour caractériser et utiliser un signal RF le mélangeur est un composant fondamental, il permet:

- Modulation , démodulation
- Changement de fréquence
- Mesure de phase
- Etc...

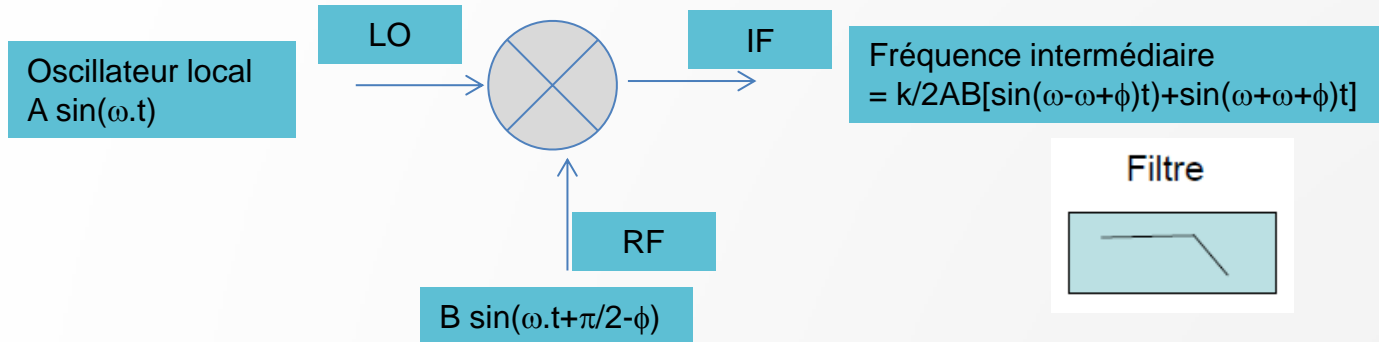
Principe (c'est un multiplicateur formé d'éléments non linéaires-diodes):



Mélangeurs cas particulier; mesure de phase:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega$$

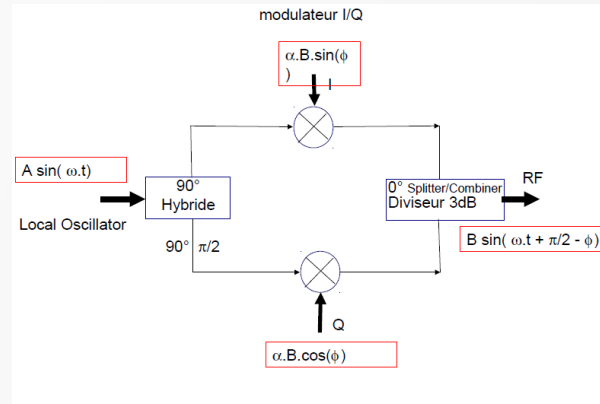
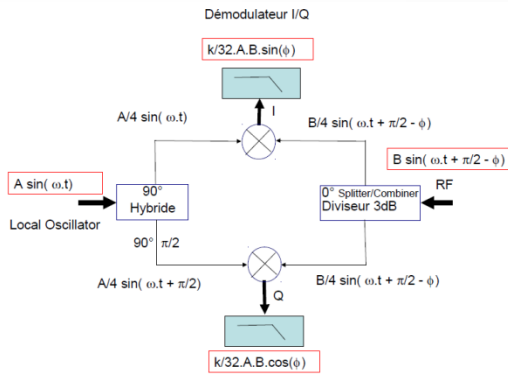
Les signaux sont déphasés



Si ϕ petit, signal de sortie proportionnel à ϕ

Modulateur démodulateur I/Q:

Le mélangeur (mixer) permet de réaliser de nombreuses fonctions parmi celles-ci on a le modulateur/demodulateur I/Q qui permet de réaliser de nombreuses autres fonctions, et d'avoir de nombreuses informations sur signal utile notamment pour le LLRF, et qui permet aussi une modulation du signal



Coefficient de réflexion:

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

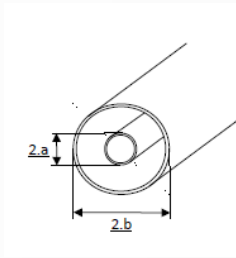
$$ROS = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}$$

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.

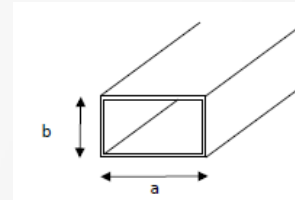
Lignes de transmissions/guides d'ondes:

Pour transmettre la RF, il existe trois grands moyens principaux:

- Les câbles (mais limité en puissance et fortement atténuateur), cas particulier d'une ligne coaxiale
- Les lignes coaxiales
- Les guides d'ondes



Ligne coaxiale



Guide d'onde rectangulaire

Lignes de transmissions coaxiales:

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

Le standard le plus utilisé est le type EIA.

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

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.

Guides d'ondes:

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 :

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

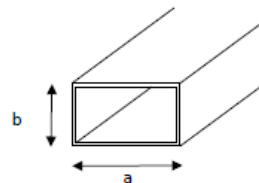
Avec c la célérité (299 792 458 m/s),

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.

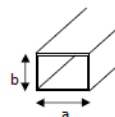
La bande passante commence à 1.25 f_c et se termine la fréquence de coupure du premier mode supérieur (moins quelques %).



Guides d'ondes:

Les standards et dimensions des guide d'onde

WG	EIA-WR	IEC-R	Fc (GHz)	F _{low} (GHz)	F _{high} (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



Abaque de smith (pour information):

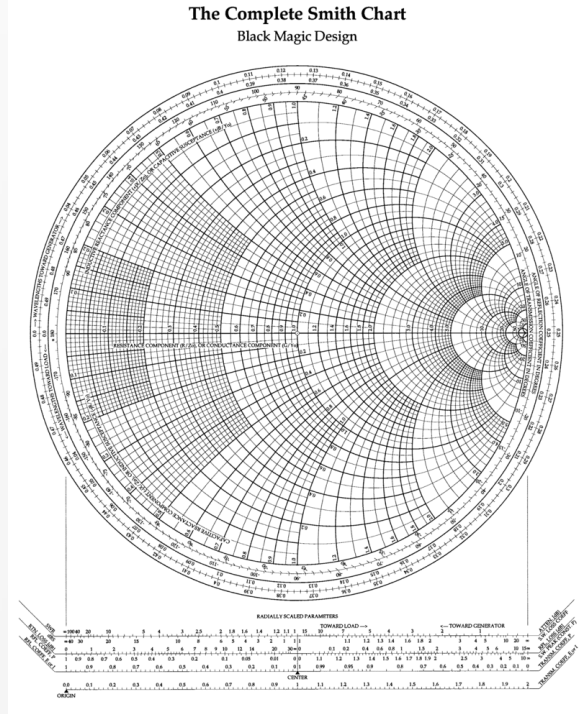
« L'abaque de Smith est une représentation graphique reliant le rapport des ondes guidées incidentes et réfléchies le long d'un guide de propagation, à la variation d'impédance caractéristique le long de ce guide »

C'est une représentation dans le plan complexe des impédances réduites (Z/Z_0)

Z_0 impédance caractéristique de la ligne

- Un point de l'abaque représente une impédance
- Le centre de l'abaque représente une résistance pure (égale à Z_0 , ou TOS de 1)
- La ligne horizontale représente les résistances pures
- Des cercles centrés sur Z_0 sont à TOS fixes

l'utilisation complète de cette abaque dépasserait le temps imparti ici...



Petit retour sur les sources: modulateur

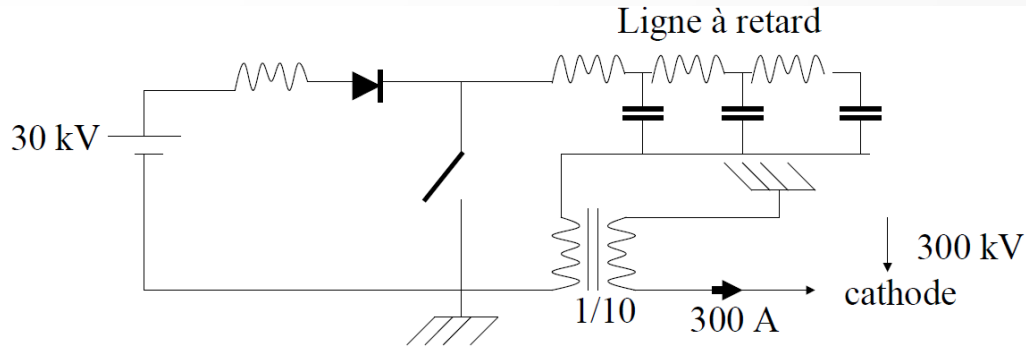
- Les sources de puissances pulsées nécessitent une alimentation haute tension et fort courant qui est pulsée (valeurs typiques de qqcs dizaines de kV à quelques centaines, et quelques ampères, gamme ordre de grandeur 100)
 - bien évidemment le but étant d'avoir une RF aussi constante que possible aussi bien en amplitude (c'est directement le champ accélérateur) qu'en phase (synchronisme de l'accélération)
- C'est plus vite dit que fait...ces « alimentations » s'appellent des modulateurs car il faut « moduler » la haute tension et les courants associés.
- Il existe de nombreuses « topologies » de modulateurs qui dépendent de :
- La HT et le courant nécessaires
 - La fréquence de répétition
 - La stabilité du pulse appliqué au tube
 - Et ... le prix

Les familles les plus courantes

- Ligne à retard (PFN) et transformateur d'impulsion
- « bouncer » avec transfo d'impulsion également
- Pulse step modulateur....

Modulateur à lignes à retard

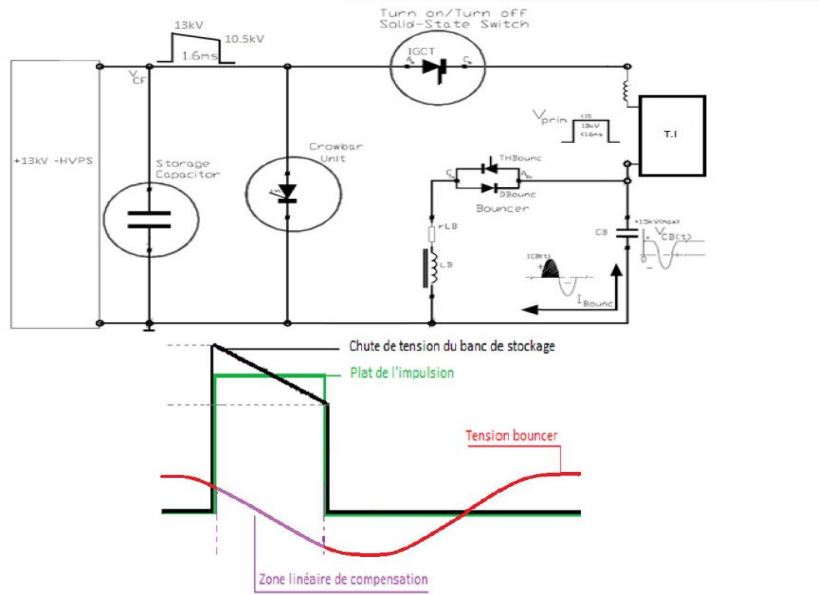
- On charge une ligne à retard (ensemble de condensateurs et self) en un temps relativement long par rapport au pulse voulu
- On décharge ensuite brutalement au primaire d'un transfo d'impulsion (élévation de tension)
- Qui lui-même se décharge dans le tube



- Avantage:
 - Simple sur le principe
- Inconvénient: plus le pulse est long et moins on ne maîtrise le « plat » de l'impulsion

Modulateur « bouncer »

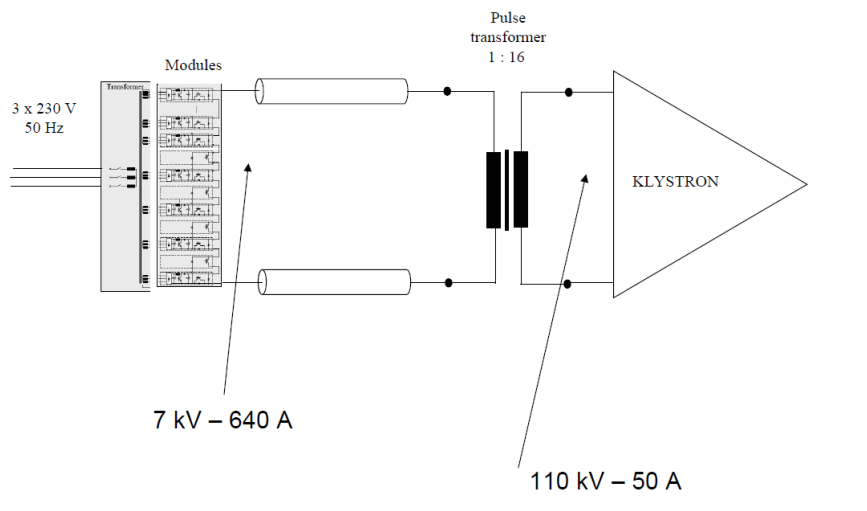
- Pour compenser une chute sur le plat de l'impulsion on va « redonner » de l'énergie à celle-ci



- Avec ce compensateur qu'est le condensateur de bouncer, on vient redonner du plat,
- Comme on ne vient que compenser la chute de tension principale, le circuit de bouncer ne stocke pas trop d'énergie

Pulse step modulateur

- On met en « série » des modules élémentaires haute tension qui mettent l'impulsion en forme



Généralités modulateur

- Points durs pour tous les modulateurs:
 - Commutation de puissance en cas de transformateur d'impulsion (quelques 100 A au secondaire donnent rapidement des milliers au primaires)
 - Qui dit $\frac{di}{dt}$, fort dit des tensions parasites et des champs électriques très perturbant donc des ennuis sur les cartes électroniques entre autre
 - Il faut maîtriser un plat d'impulsion dont souvent la mesure est compliquée (<< au %, cad souvent quelques volts sur des milliers)
 - Il faut également minimiser l'énergie que voit le tube lorsque lui-même flash...un flash interne peut arriver (et il arrive) il ne faut pas pour autant tout casser d'où des systèmes de protection de type crowbar.