

INTRODUCTION À LA RF

M. BEN ABDILLAH* ET C. JOLY

DIVISION ACCELERATEURS
GROUPE ÉLECTRONIQUE ACCÉLÉRATEURS

Sommaire:

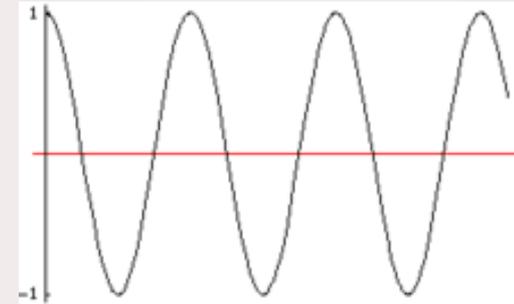
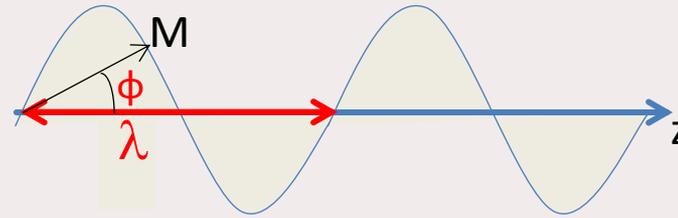
- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

**Unité mixte de recherche
CNRS-IN2P3
Université Paris-Sud**

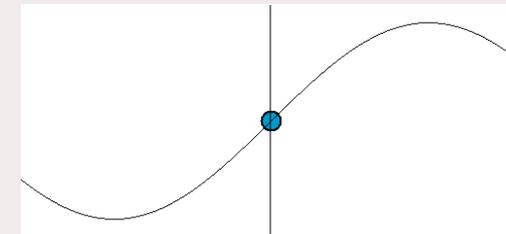
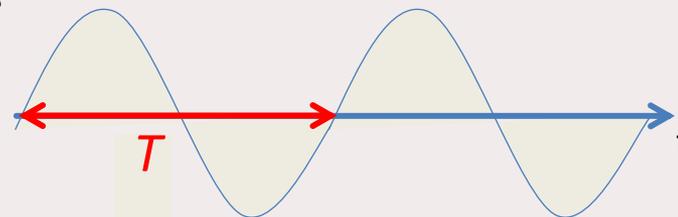
91406 Orsay cedex
Tél. : +33 1 69 15 44 99
Fax : +33 1 69 15 64 70
<http://ipnweb.in2p3.fr>

ONDE (ESPACE & TEMPS)

Une onde monochromatique (une seule fréquence) a une évolution sinusoïdale dans l'espace



En un point fixe dans l'espace, l'intensité du phénomène évolue de façon sinusoïdale



Pour une onde, on définit:

- La fréquence f
- La longueur λ
- La vitesse de propagation v
- La phase ϕ
- La période T
- La pulsation ω

$$f_{(Hz)} = \frac{1}{T_{(s)}} = \frac{\omega_{(rad \cdot s^{-1})}}{2\pi}$$

$$\lambda_{(m)} = \frac{v_{(m \cdot s^{-1})}}{f_{(Hz)}}$$

Sommaire:

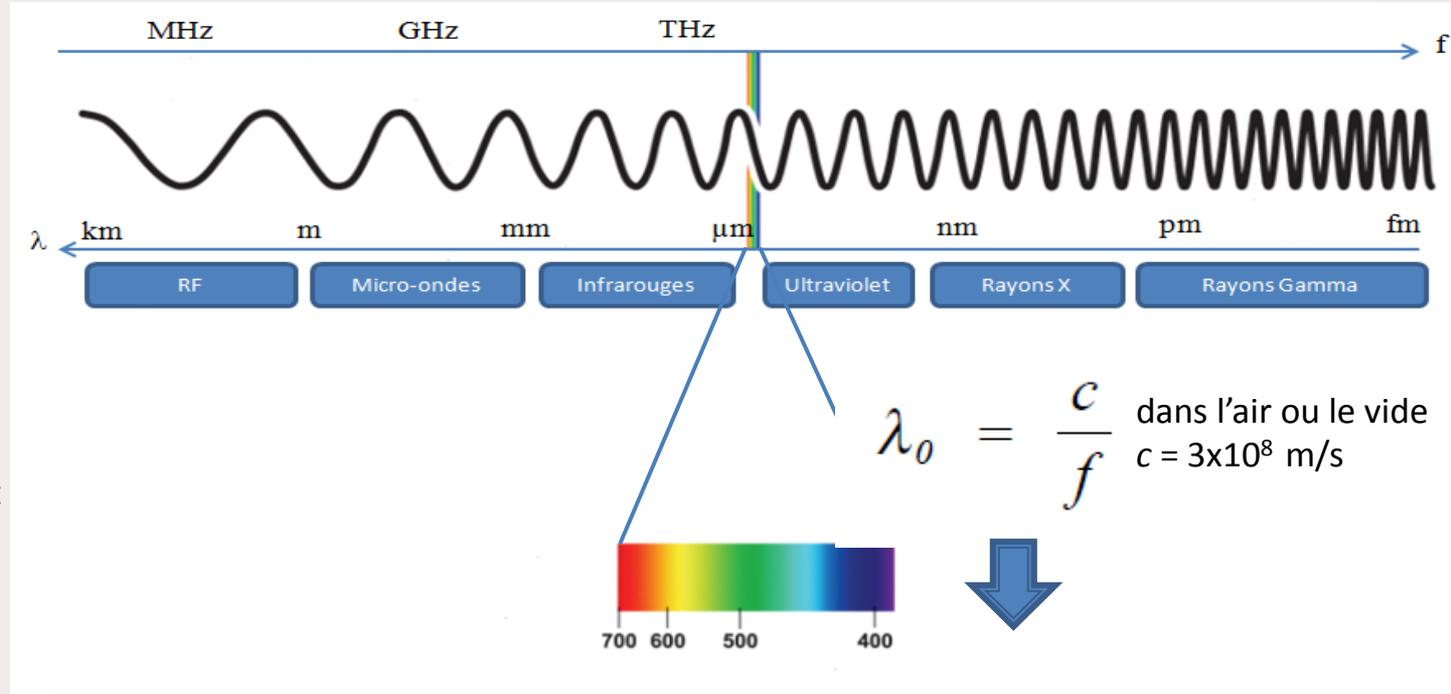
• **Onde (espace & temps)**

- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

RAPPEL SUR LES ONDES (1)

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- **Rappel sur les ondes**
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif



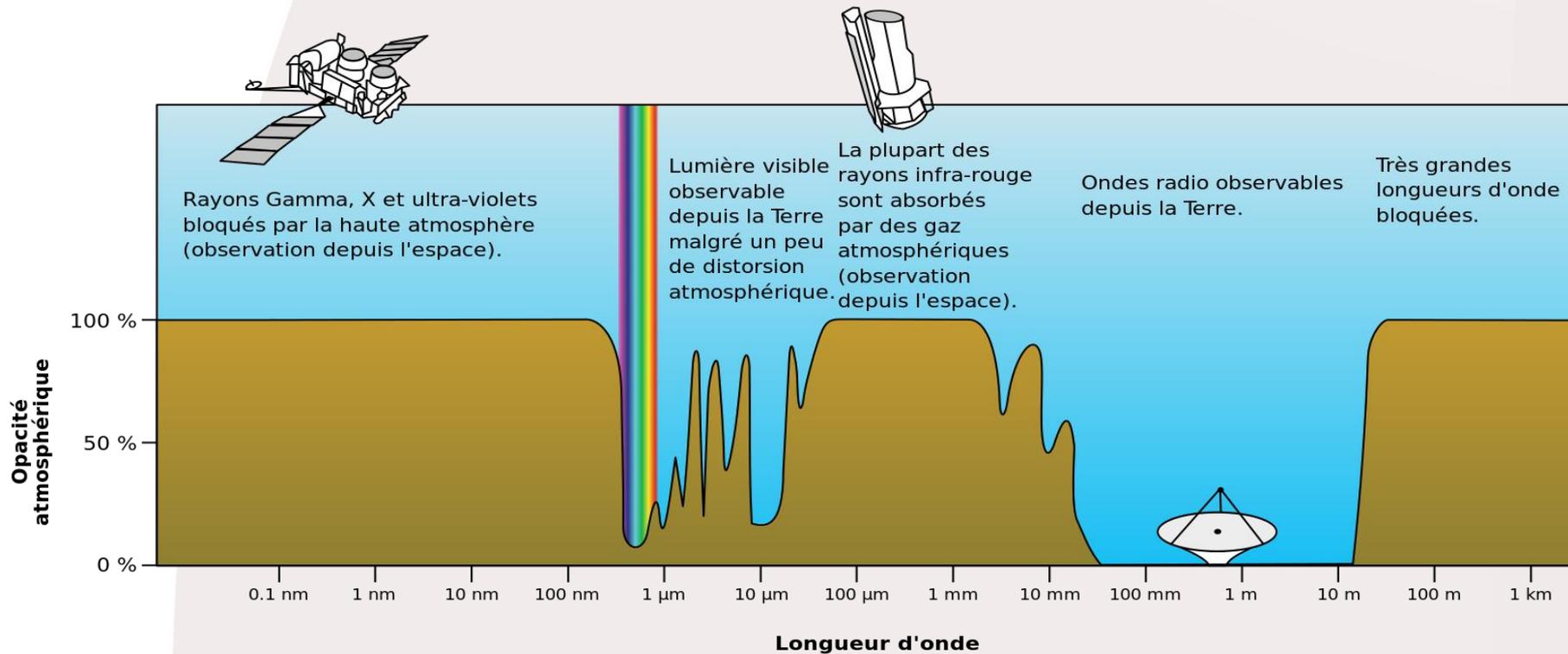
$$f_{(\text{Hz})} = \frac{1}{T_{(\text{s})}} = \frac{\omega_{(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})}}{2\pi}$$

$$\lambda_{(\text{m})} = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi v}{\omega} = \frac{v}{f}$$

Dans un diélectrique homogène ayant une permittivité relative ϵ_r ,

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

RAPPEL SUR LES ONDES(2)



Faible atténuation atmosphérique sur la bande [30Mhz ; 10GHz] : large partie de la bande de fréquences RF

RAPPEL SUR LES ONDES (3)

Onde électromagnétique	Fréquence	Longueur d'onde	Application
Rayons X	>3000 THz	<100 nm	Imagerie médicale Radiographie
Rayons UV	750 à 3000 THz	400 nm à 100 nm	Banc solaire
Lumière visible	385 THz à 750 THz	780 à 400 nm	Vision humaine, photosynthèse
Infrarouges	0,3 THz à 385 THz	1 mm à 780 nm	Chauffage
Fréquences extrêmement hautes (EHF)	30 GHz à 300 GHz	0.01 m à 1 mm	Radars, communication par satellite
Fréquences superhautes (SHF)	3 à 30 GHz	0.1 m à 0.01 m	Radars, alarmes anti-intrusion, télévision par satellite
Fréquences ultrahautes (UHF)	0.3 à 3 GHz	1 à 0.1 m	Télévision, radars, téléphones mobiles, fours à micro-ondes, hyperthermie médicale
Très hautes fréquences (VHF)	30 à 300 MHz	10 à 1 m	Télévision, radio FM
Hautes fréquences (HF)	3 à 30 MHz	100 à 10 m	Soudage, collage
Fréquences moyennes (MF)	0.3 à 3 MHz	1 km à 100 m	Radiodiffusion MO-PO, diathermie médicale
Basses fréquences (LF)	30 à 300 KHz	10 à 1 km	Radiodiffusion GO, fours à induction
Très basses fréquences (VLF)	3 à 30 kHz	100 Km à 10 km	Radio-communications
Fréquences audio (VF)	0.3 à 3 kHz	1000 Km à 100 km	Transmission de données vocales, métallurgie, chauffage par induction
Extrêmement basses fréquences (EBF-ELF)	3 Hz à 300 Hz	100 000 à 1000 km	Transport et distribution de l'électricité, électroménager
	50 Hz	6000 Km	
Champ magnétique terrestre	0 Hz (continu)	infinie	Boussole

Physique nucléaire et hadronique

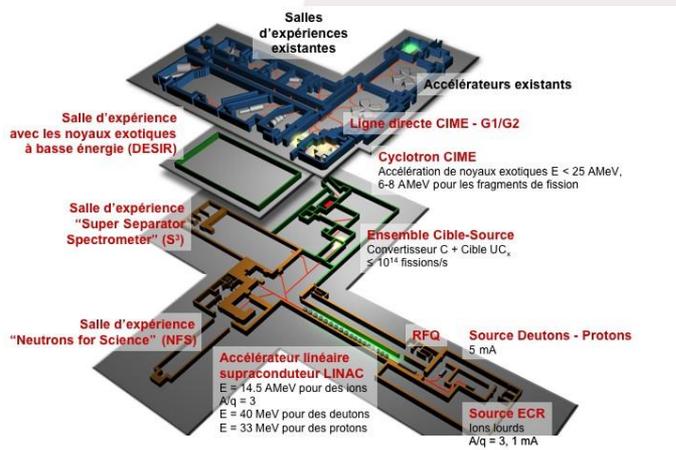
Physique des particules

Astroparticules et neutrinos

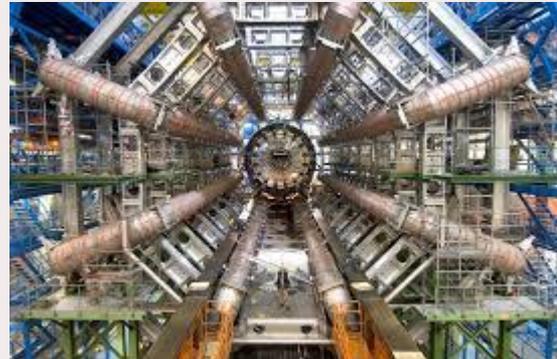
Les détecteurs

Les accélérateurs

Les télescopes



SPIRAL2



ATLAS



HESS

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- **RF et accélérateurs**
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

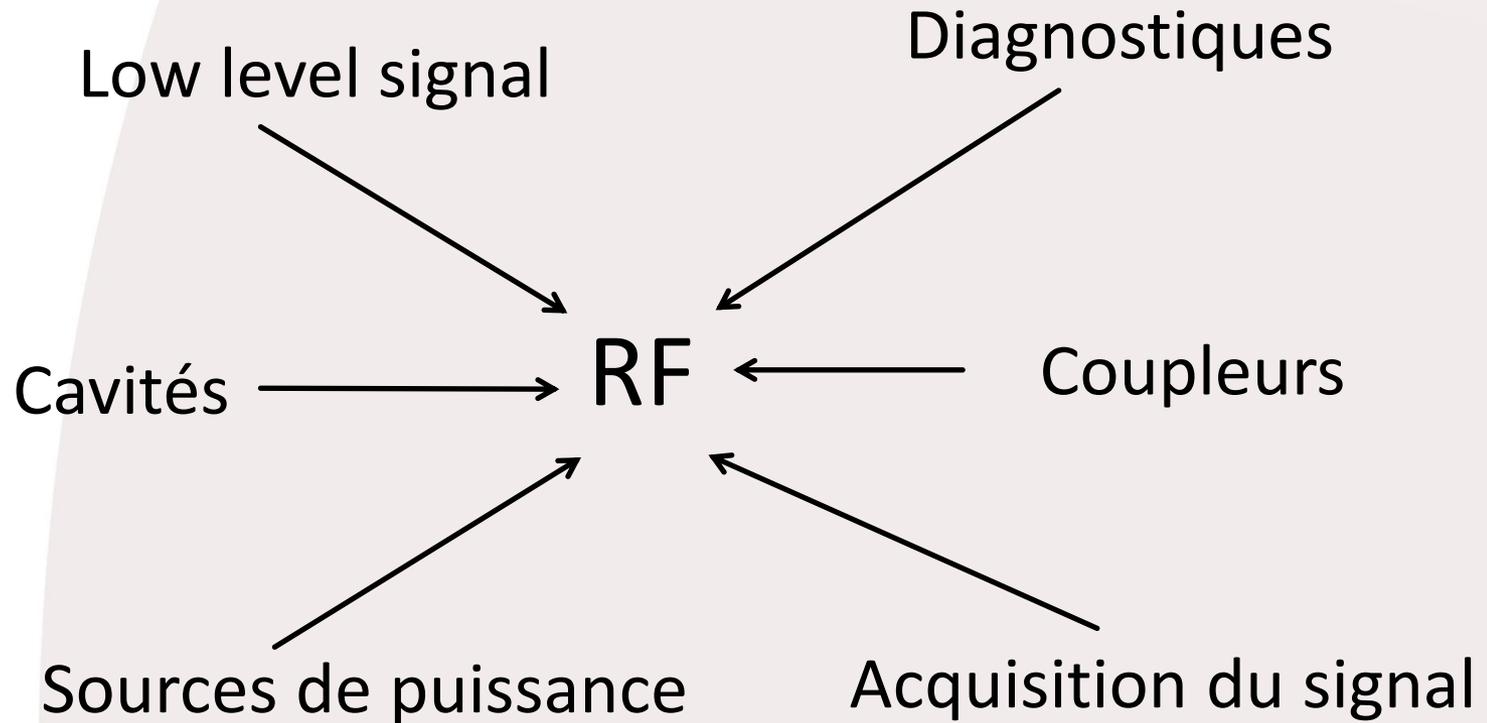
- 1864 J. Maxwell introduit la théorie des champs EM
- 1886 H. Hertz démontre expérimentalement la transmission et la détection d'une onde EM entre deux points séparés de quelque mètres
- 1924: G. Ising établit le principe selon lequel, pour accélérer des particules, il est préférable de communiquer l'énergie désirée à ces particules non pas en une seule fois, mais par de nombreuses accélérations plus modestes.
- *1930 : Premier accélérateur de particules à champ RF, un cyclotron d'E.O. Lawrence (80 keV, puis 1 MeV en 1932 (28 cm), et enfin 20 MeV en 1939 (150 cm))*

Les accélérateurs à champ électrique constant : tous les particules sont accélérées au même moment. Pour 100 keV on utilise un signal DC d'amplitude 100 kV.

Pour un signal DC 800 MV pour un accélérateur de protons, c'est tout simplement impossible

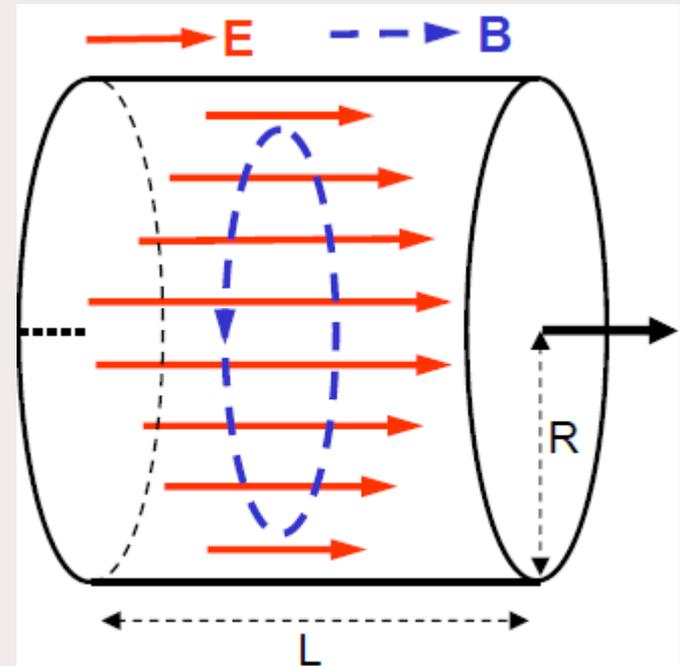
Les accélérateurs à champ RF: l'utilisation des champs RF nous permet d'accélérer les particules jusqu'au GeV

Le champ RF produit un faisceau « bunched »: les particules sont accélérés par groupes plus ou moins espacés.



Cavité résonante: volume de diélectrique (souvent du vide) entouré de parois conductrices, dans lequel les champs électromagnétiques peuvent prendre diverses configurations spatiales à diverses fréquences

Ex: cavité “pillbox”



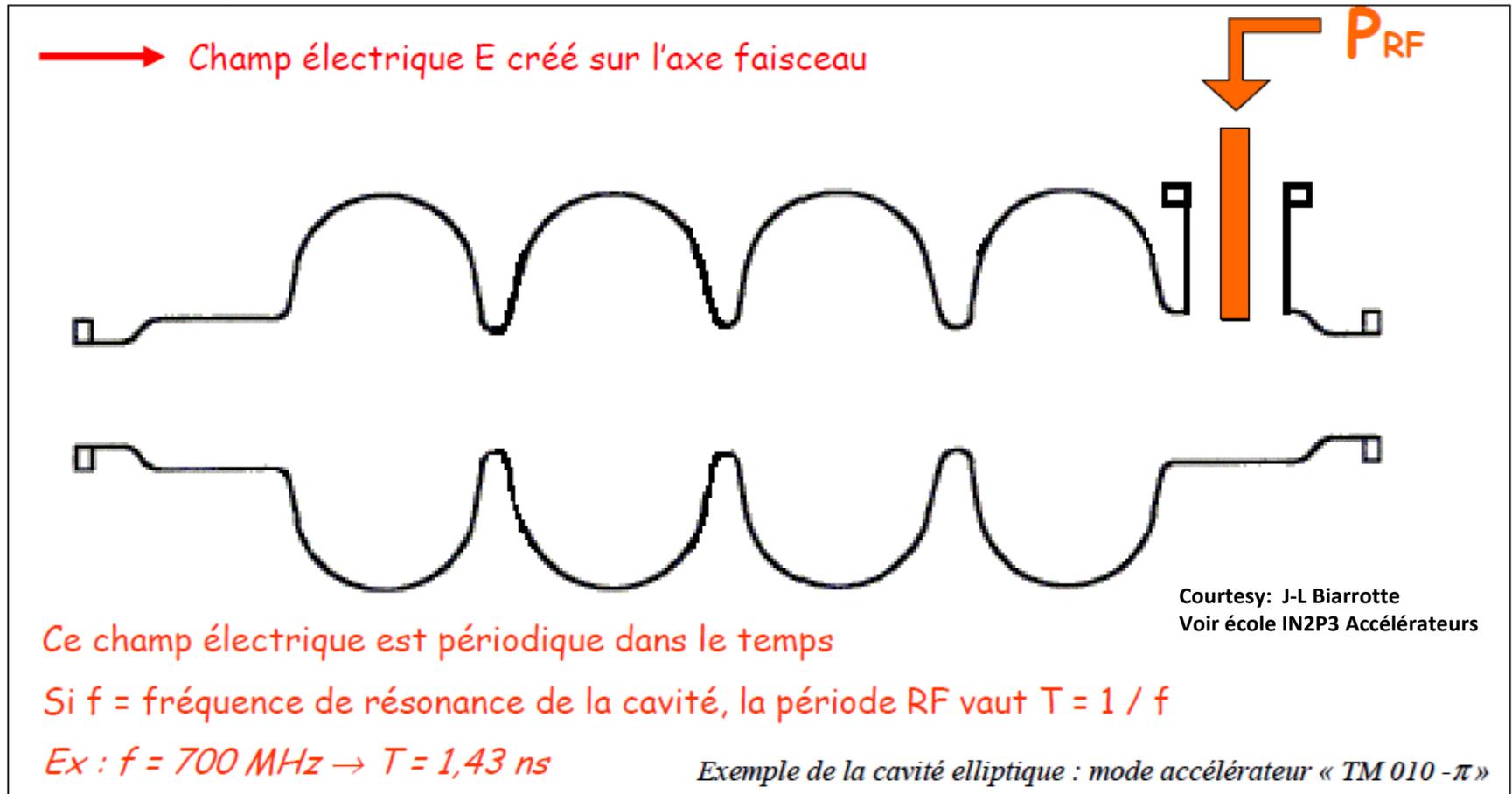
Courtesy: J-L Biarrotte
Voir école IN2P3 Accélérateurs

Cavité « pill-box » : mode TM 010

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- **Application IN2P3**
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

Principe de la cavité accélératrice: Création d'un champ électrique RF sur l'axe du faisceau, utilisable pour accélérer des particules chargées



Passage d'une particule chargée : pour une accélération efficace, il faut que le champ RF soit correctement synchronisés avec la particule à accélérer



Le couplage entre le champ RF et la faisceau est optimal

La cavité et le champ RF ont la même phase

La particule et le champ RF doivent être à la même phase.

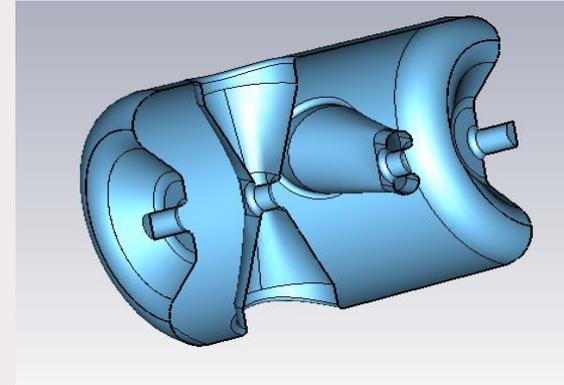


Courtesy: J-L Biarrotte
Voir école IN2P3 Accélérateurs

Cavité quart d'onde SPIRAL2 à 88MHz



Cavité SPOKE ESS à 352MHz



CMB1: stockage sous la tente
au GANIL



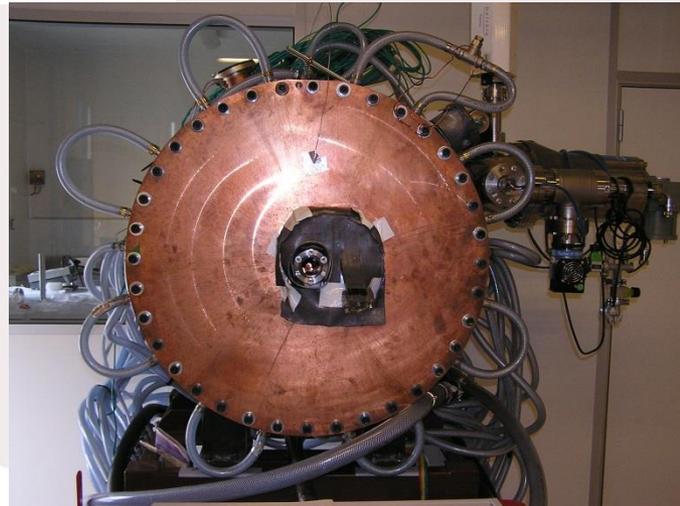
APPLICATION IN2P3 : CAVITÉS (5)



Injecteur d'ions lourds Alice (Orsay)
24.4 MHz, 56 électrodes (1970)



IPHI RFQ (Saclay) 352MHz



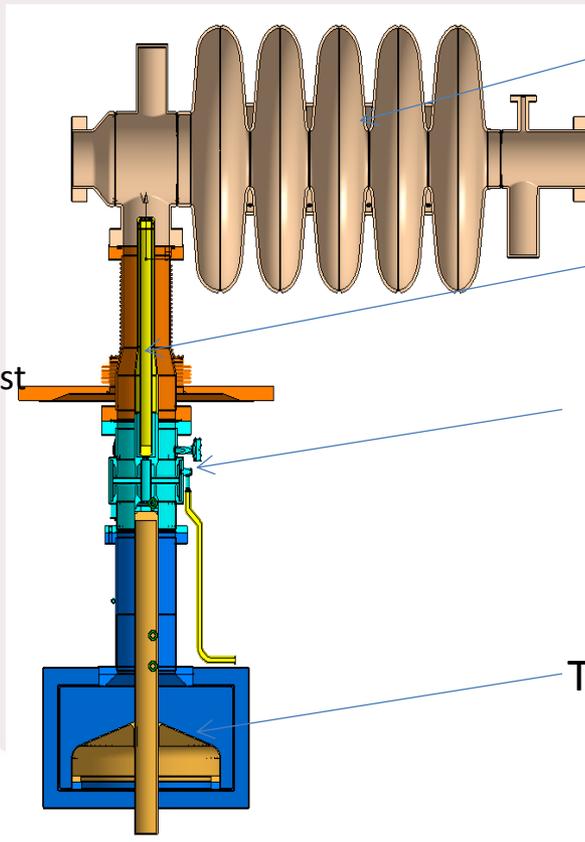
RFQ SPIRAL2

APPLICATION IN2P3 : COUPLEUR DE PUISSANCE (1)

Antenne permettant de réaliser le couplage avec la cavité et la transmission de la puissance RF pour produire le champ accélérateur

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- **Application IN2P3**
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif



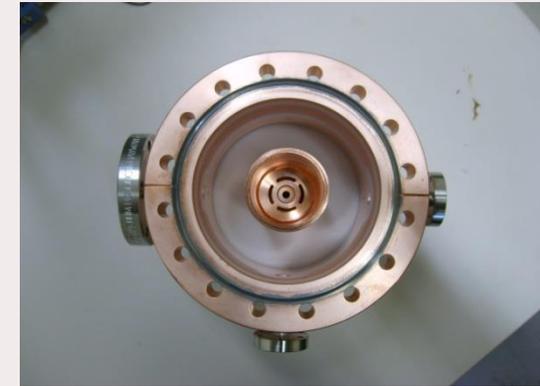
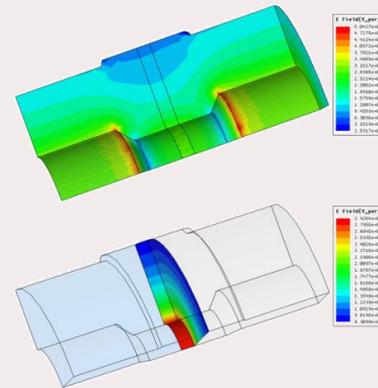
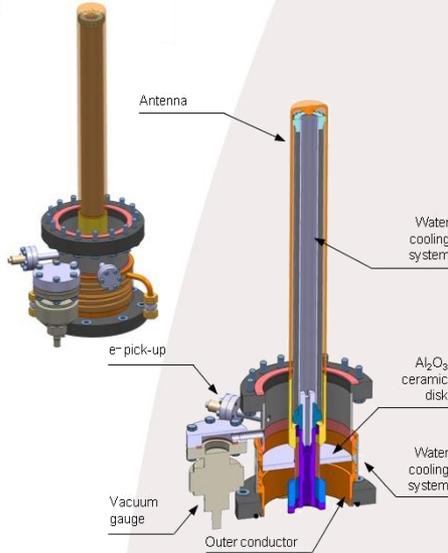
Exemple d'une cavité elliptique
5 cellules à 704MHz

Coupleur

Fenêtre céramique →
barrière de vide / pression ambiante

Transition coaxial / guide d'onde (doorknob)

APPLICATION IN2P3 : COUPLEUR DE PUISSANCE (2)

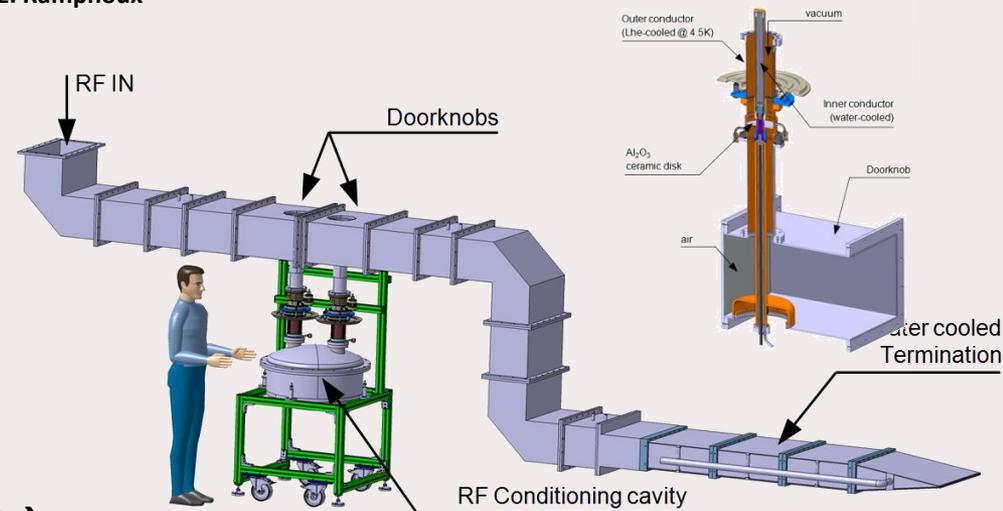


Fenêtre céramique
Coupleur 80KW@704MHz

Etude Coupleur ESS
Courtesy : E. Rampoux



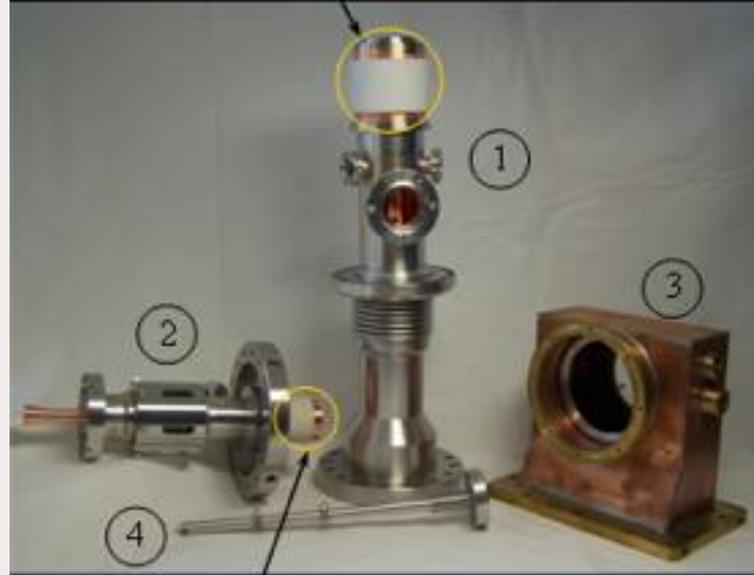
Exemple de la cavité de conditionnement à 704MHz avec ses deux coupleurs (IPNO)



APPLICATION IN2P3 : COUPLEUR DE PUISSANCE (2)



Coupleur Spiral2 (LPSC)



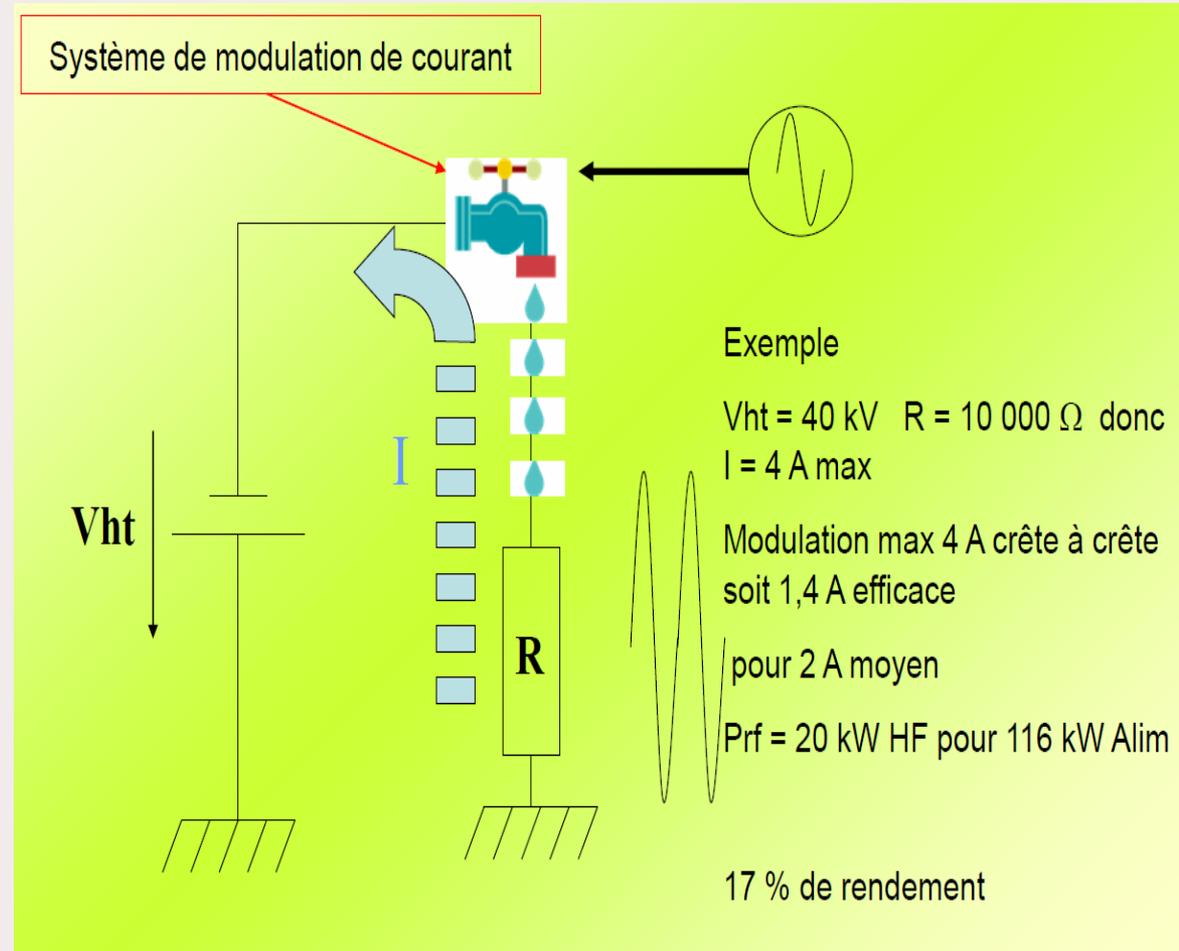
Coupleur XFEL (LAL)



Coupleur MAX (IPNO)

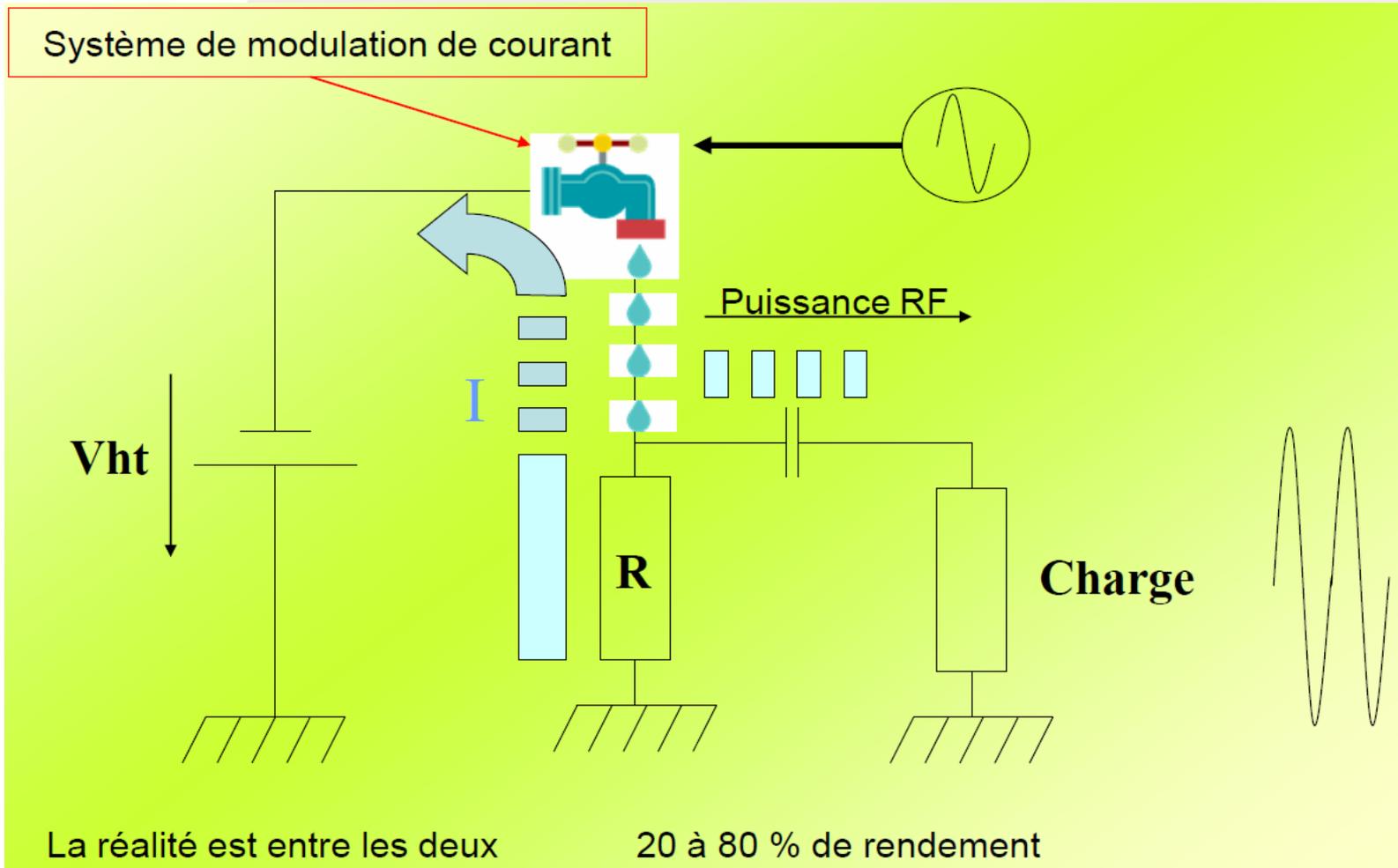
Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- **Application IN2P3**
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

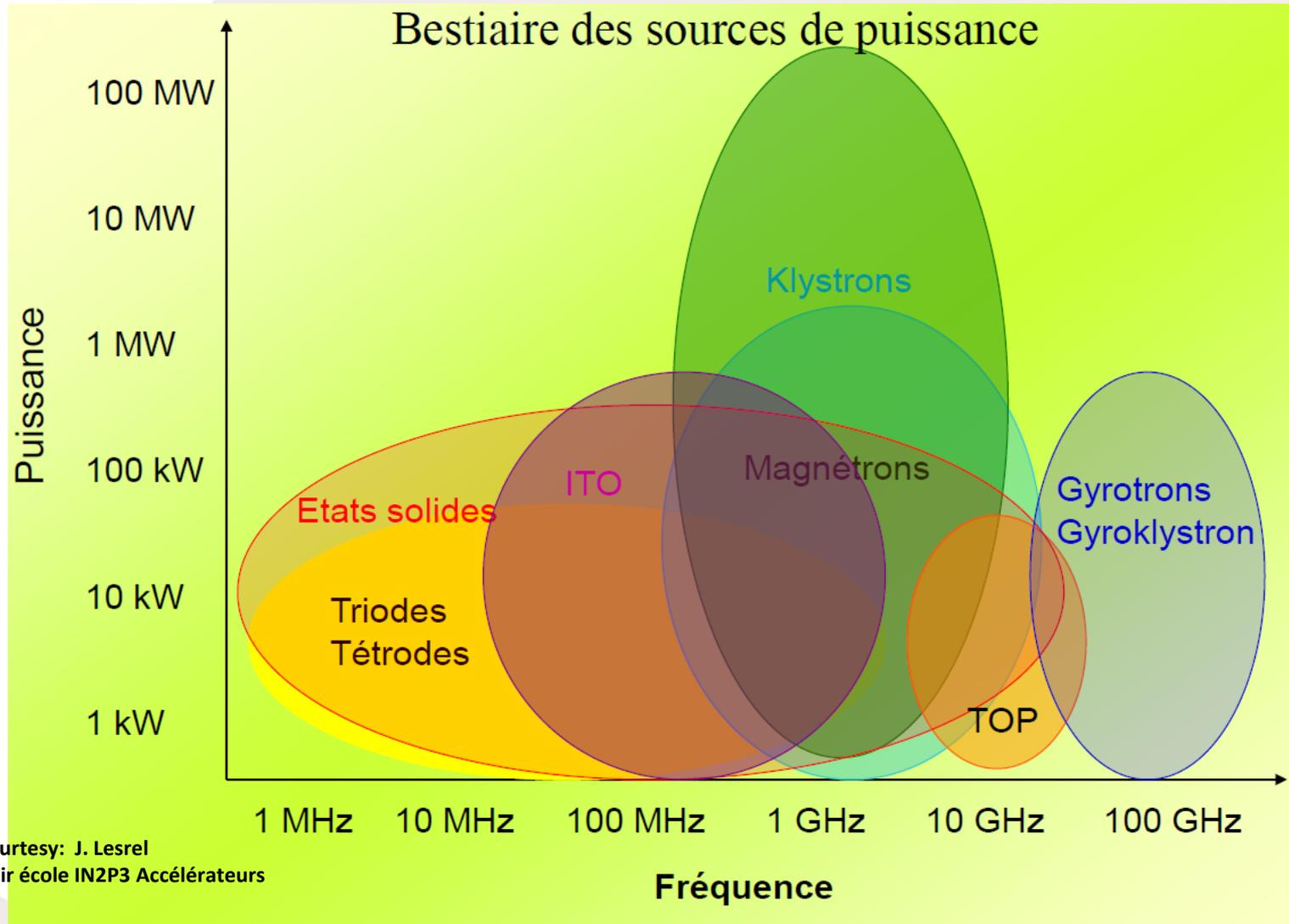


Courtesy: J. Lesrel

Plus de détails sur les sources de puissances RF voir école IN2P3 Accélérateurs 2014

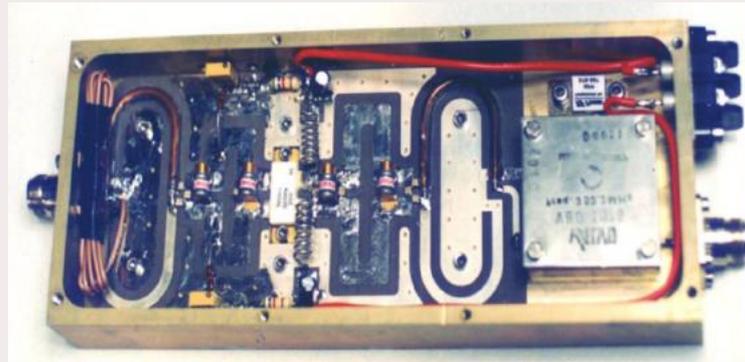


Courtesy: J. Lesrel
Voir école IN2P3 Accélérateurs





IOT (qq dizaines de KW)

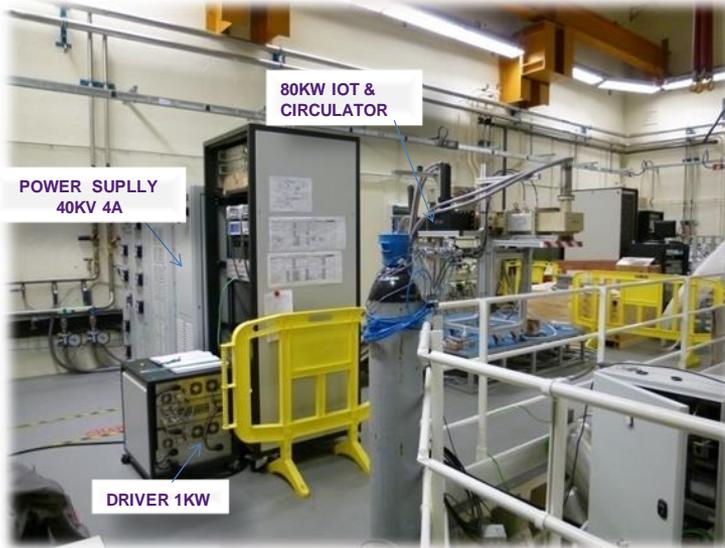


Amplificateur à état solide
Mosfet (qq centaines de W)



Klystron (qq MW)

APPLICATION IN2P3 : SOURCE RF DE PUISSANCE (5)



Source RF 80KW@704MHz à l'IPNO

Source RF 10KW@352MHz
à l'IPNO (amplificateur à
état solide) développé par
l'INFN



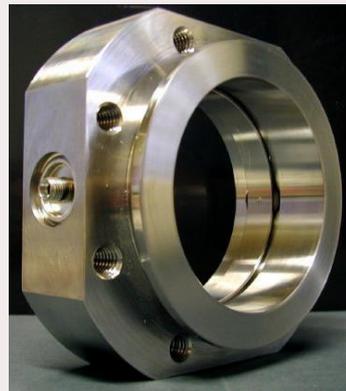
Source RF 1MW@1.3GHz au LAL

Sommaire:

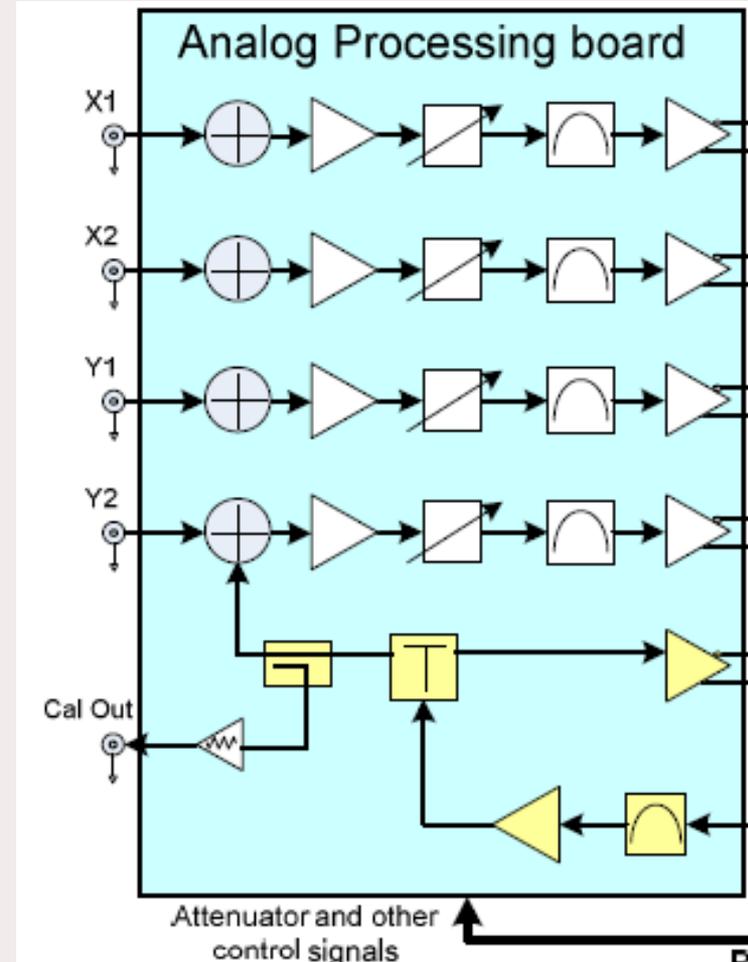
- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- **Application IN2P3**
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif



Moniteurs de position
IPNO



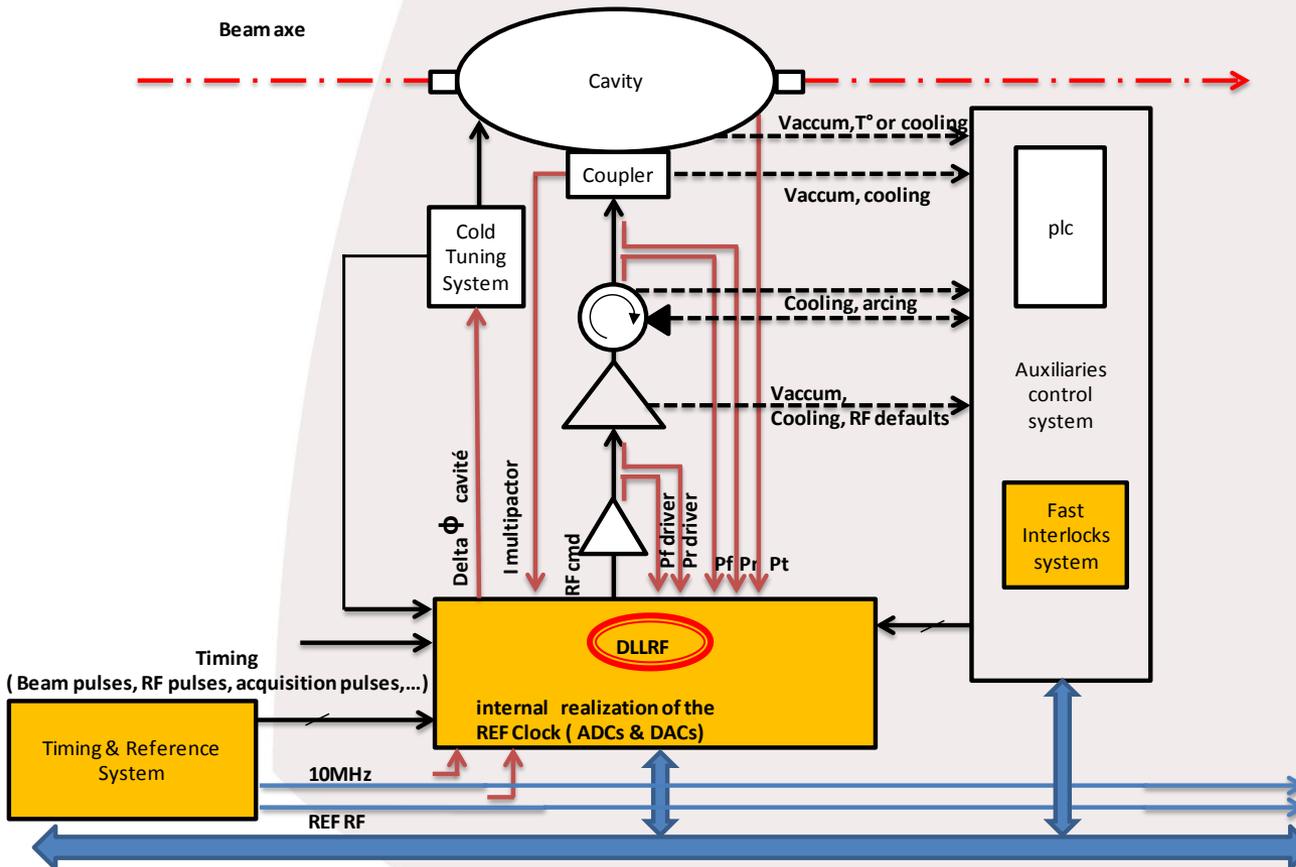
Mesureur d'intensité
de faisceau IPNO



Carte d'acquisition des signaux issus des
moniteurs de position IPNO

APPLICATION IN2P3 : LOW LEVEL RADIO FREQUENCY (1)

Typical system for an accelerating section



Système aujourd'hui principalement numérique pour l'asservissement du champ accélérateur dans la cavité



Système à fréquence fixe (numérique)

Boucle à verrouillage de phase (Phase locked loop)

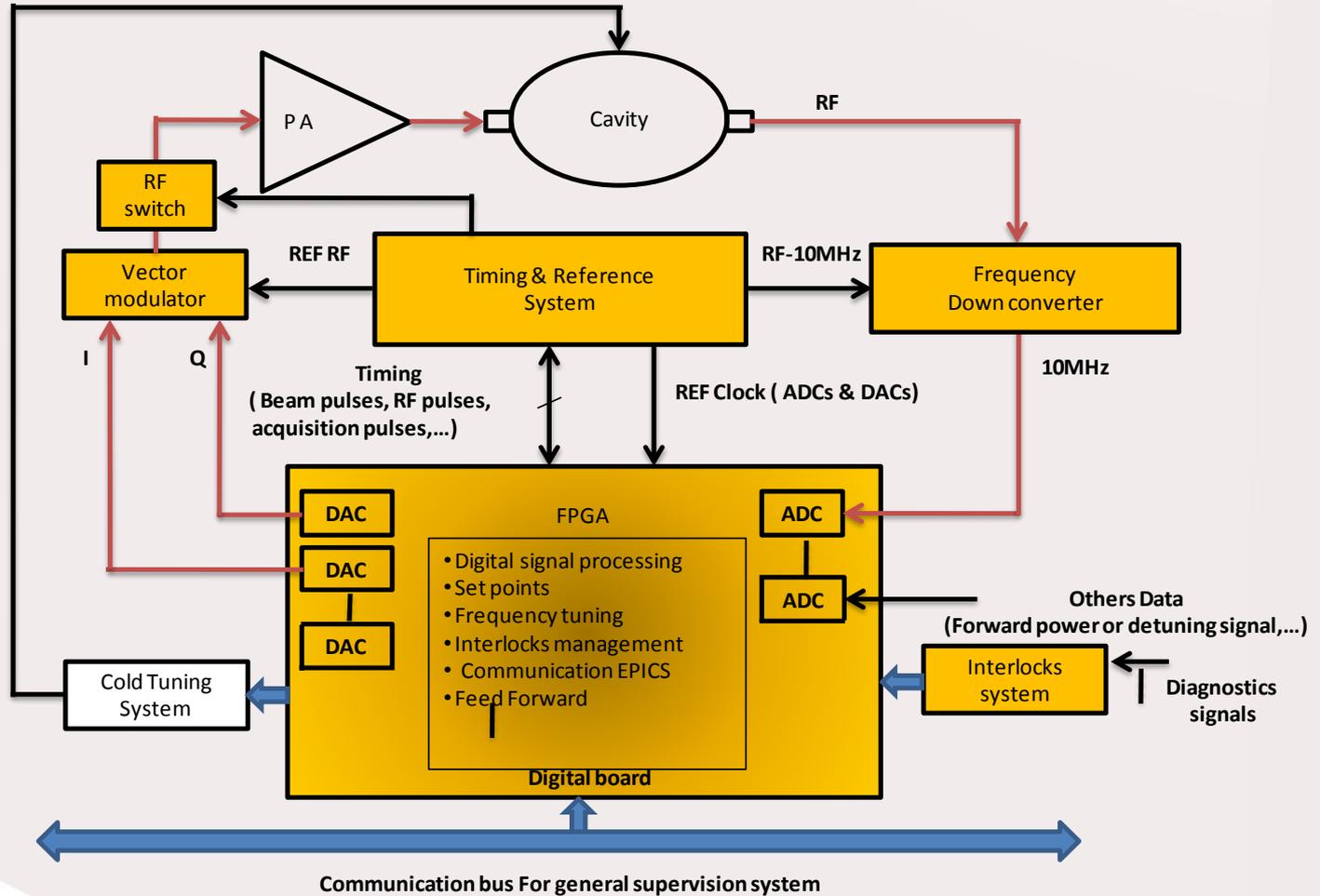
Boucle auto-oscillante (Self Exciting loop)

Utilisé à l'IPN pour tester les cavités seules (PLL ou SEL analogique) dans la gamme de 88 MHz (SPIRAL2) à 6 GHz

APPLICATION IN2P3 : LOW LEVEL RADIO FREQUENCY (2)

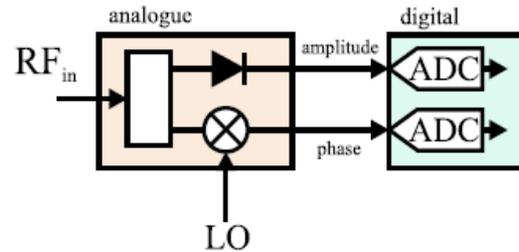
Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

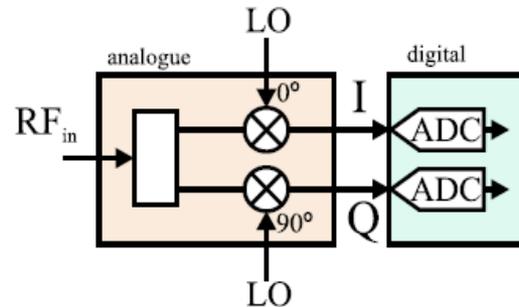


APPLICATION IN2P3 : LOW LEVEL RADIO FREQUENCY (3)

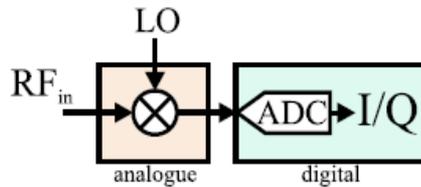
Frontaux possibles:



Acquisition en bande de base via des dispositifs de détection d'amplitude et de phase



Acquisition en bande de base via un démodulateur vectoriel :
I (In real \rightarrow partie réelle)
Q (quadrature \rightarrow partie imaginaire)



Acquisition à une fréquence numérisable, 10 MHz par exemple.



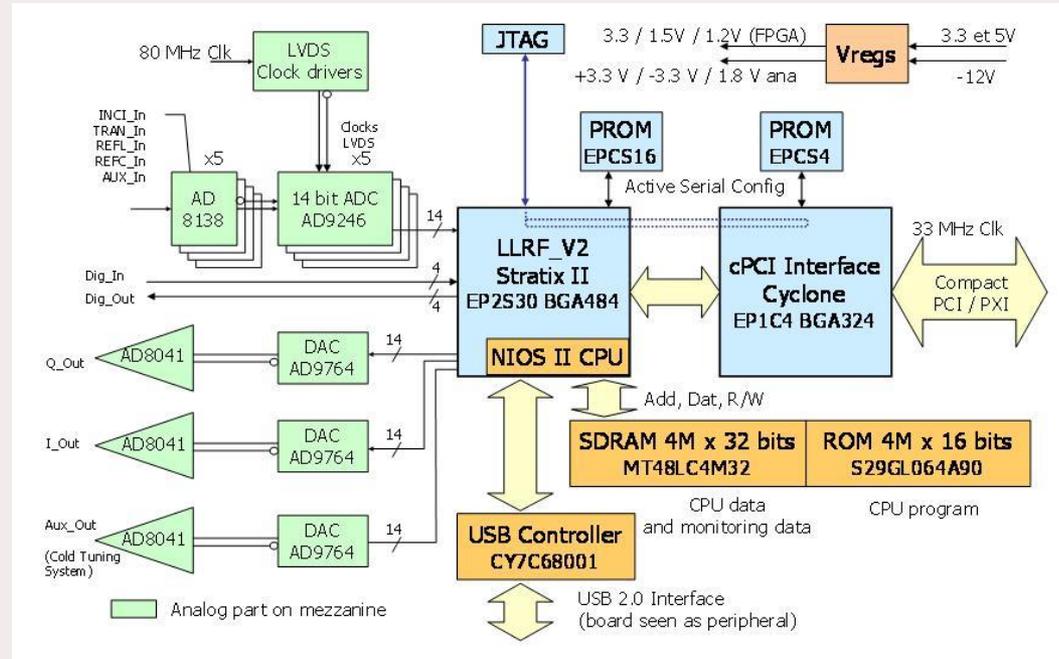
Acquisition directe du signal RF avec sous-échantillonnage ou par translation de fréquence numérique

Exemple DLLRF (IPNO)



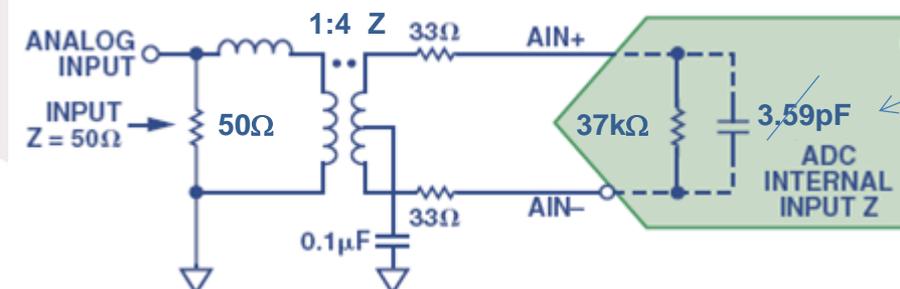
APPLICATION IN2P3 : LOW LEVEL RADIO FREQUENCY (4)

Exemple du système numérique au format PXI développé par le LPNHE en collaboration avec l'IPNO dans le cadre de sa R&D sur les cavités supraconductrices



Bruit mesuré sur les voies ADC
 → ~ 4 LSB (large bande passante)
 → Offset important

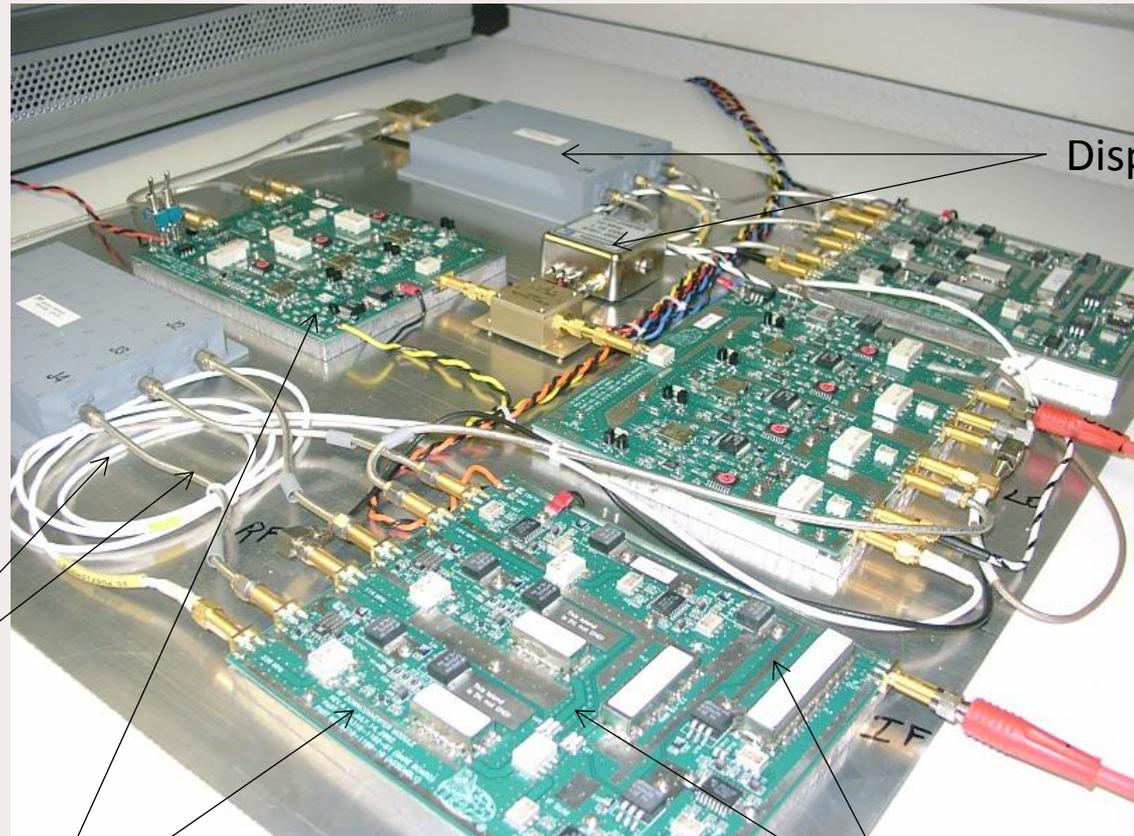
Autre architecture AD utilisée (composant passif avec bande étroite)



Négligeable à basse fréquence

Bruit mesuré
 → ~ 1.2 LSB

Tuner RF



Dispositifs RF

Câbles
coaxial RF

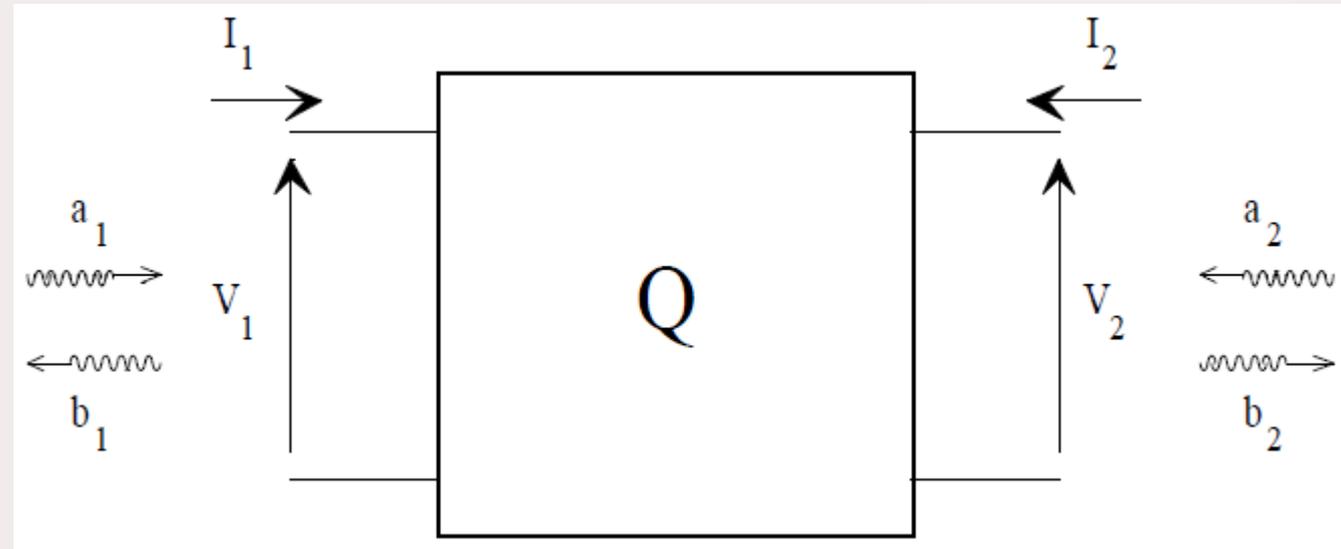
Cartes RF

Lignes de
transmission RF

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- **Paramètres S**
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

PARAMÈTRES S: UN PEU DE THÉORIE



- a1 et b1 sont les ondes incidente et réfléchiée à l'accès1
- a2 et b2 sont les ondes incidente et réfléchiée à l'accès2

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

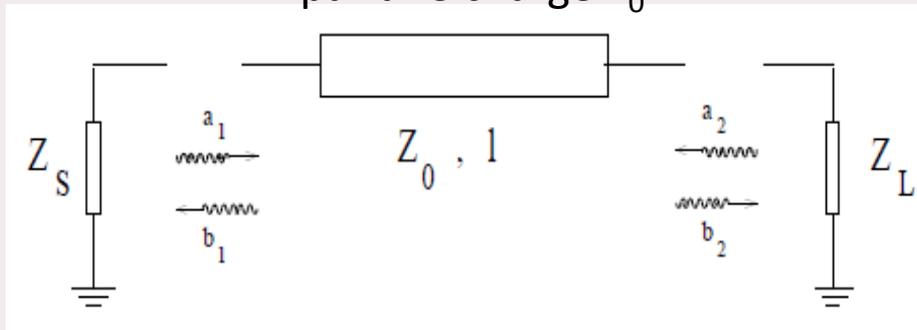
↑
Paramètres S

Courtesy: cours ESIEE

PARAMÈTRES S : ADAPTATION D'IMPÉDANCE (1)

Pour transmettre le maximum de puissance,

Composant RF modélisé
par une charge Z_0



En cas d'adaptation

Paramètre S:

$$S_{11}=S_{22}=0$$

$$S_{12}=S_{21}=1$$

PARAMÈTRES S: ADAPTATION D'IMPEDANCE (2)

Schéma adapté
→ Transmission → Onde progressive

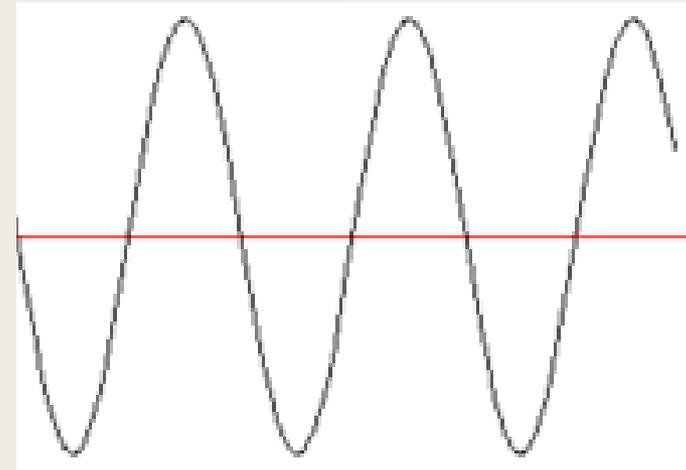


Schéma désadapté
→ Réflexions → Onde stationnaire



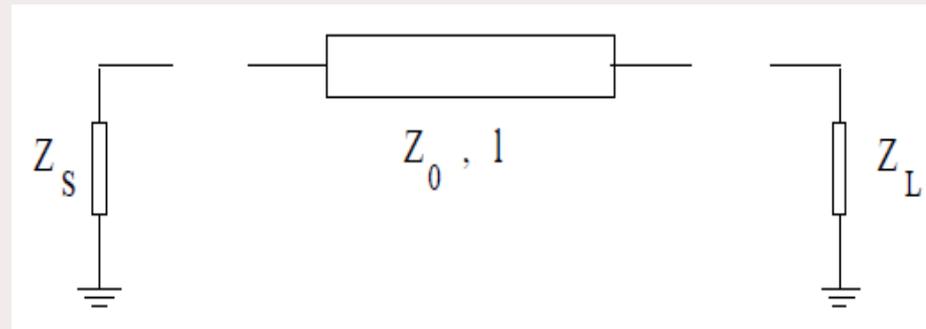
ventre

nœud

On parle alors de Taux d'Ondes Stationnaires (TOS)

PARAMÈTRES S: TOS (VSWR) (1)

Désadaptation: Taux d'Ondes Stationnaires (TOS, ROS, SWR)



$$\text{TOS} = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right|$$

TOS exprimé en dB

TOS < -10dB bonne adaptation (peu de réflexion)

TOS > -3dB forte désadaptation

PARAMÈTRES S: TOS (VSWR) (2)

$$r = \left| \frac{1 - VSWR}{1 + VSWR} \right|$$

$$VSWR = \left| \frac{1 + r}{1 - r} \right|$$

THE EFFECT OF VSWR ON TRANSMITTED POWER

VSWR	VSWR (dB)	RETURN LOSS (dB)	TRANS. LOSS (dB)	VOLT. REFL. COEFF.	POWER TRANS. (%)	POWER REFL. (%)	VSWR	VSWR (dB)	RETURN LOSS (dB)	TRANS. LOSS (dB)	VOLT. REFL. COEFF.	POWER TRANS. (%)	POWER REFL. (%)
1.00	.0	∞	.000	.00	100.0	.0	1.64	4.3	12.3	.263	.24	94.1	5.9
1.01	.1	46.1	.000	.00	100.0	.0	1.66	4.4	12.1	.276	.25	93.8	6.2
1.02	.2	40.1	.000	.01	100.0	.0	1.68	4.5	11.9	.289	.25	93.6	6.4
1.03	.3	36.6	.001	.01	100.0	.0							
1.04	.3	34.2	.002	.02	100.0	.0	1.70	4.6	11.7	.302	.26	93.3	6.7
							1.72	4.7	11.5	.315	.26	93.0	7.0
1.05	.4	32.3	.003	.02	99.9	.1	1.74	4.8	11.4	.329	.27	92.7	7.3
1.06	.5	30.7	.004	.03	99.9	.1	1.76	4.9	11.2	.342	.28	92.4	7.0
1.07	.6	29.4	.005	.03	99.9	.1	1.78	5.0	11.0	.356	.28	92.1	7.9
1.08	.7	28.3	.006	.04	99.9	.1							
1.09	.7	27.3	.008	.04	99.8	.2	1.80	5.1	10.9	.370	.29	91.8	8.2
							1.82	5.2	10.7	.384	.29	91.5	8.5
1.10	.8	26.4	.010	.05	99.8	.2	1.84	5.3	10.6	.398	.30	91.3	8.7
1.11	.9	25.7	.012	.05	99.7	.3	1.86	5.4	10.4	.412	.30	91.0	9.0
1.12	1.0	24.9	.014	.06	99.7	.3	1.88	5.5	10.3	.426	.31	90.7	9.3
1.13	1.1	24.3	.016	.06	99.6	.4							
1.14	1.1	23.7	.019	.07	99.6	.4	1.90	5.6	10.2	.440	.31	90.4	9.6
							1.92	5.7	10.0	.454	.32	90.1	9.9
1.15	1.2	23.1	.021	.07	99.5	.5	1.94	5.8	9.9	.468	.32	89.8	10.2
1.16	1.3	22.6	.024	.07	99.5	.5	1.96	5.8	9.8	.483	.32	89.5	10.5
1.17	1.4	22.1	.027	.08	99.4	.6	1.98	5.9	9.7	.497	.33	89.2	10.8
1.18	1.4	21.7	.030	.08	99.3	.7							
1.19	1.5	21.2	.033	.09	99.2	.8	2.00	6.0	9.5	.512	.33	88.9	11.1
							2.50	8.0	7.4	.881	.43	81.6	18.4
1.20	1.6	20.8	.036	.09	99.2	.8	3.00	9.5	6.0	1.249	.50	75.0	25.0
1.21	1.7	20.4	.039	.10	99.1	.9	3.50	10.9	5.1	1.603	.56	69.1	30.9
1.22	1.7	20.1	.043	.10	99.0	1.0	4.00	12.0	4.4	1.938	.60	64.0	36.0
1.23	1.8	19.7	.046	.10	98.9	1.1							
1.24	1.9	19.4	.050	.11	98.9	1.1	4.50	13.1	3.9	2.255	.64	59.5	40.5
							5.00	14.0	3.5	2.553	.67	55.6	44.4
1.25	1.9	19.1	.054	.11	98.8	1.2	5.50	14.8	3.2	2.834	.69	52.1	47.9
1.26	2.0	18.8	.058	.12	98.7	1.3	6.00	15.6	2.9	3.100	.71	49.0	51.0
1.27	2.1	18.5	.062	.12	98.6	1.4	6.50	16.3	2.7	3.351	.73	46.2	53.8
1.28	2.1	18.2	.066	.12	98.5	1.5							
1.29	2.2	17.9	.070	.13	98.4	1.6	7.00	16.9	2.5	3.590	.75	43.7	56.2
							7.50	17.5	2.3	3.817	.76	41.5	58.5
1.30	2.3	17.7	.075	.13	98.3	1.7	8.00	18.1	2.2	4.033	.78	39.5	60.5
1.32	2.4	17.2	.083	.14	98.1	1.9	8.50	18.6	2.1	4.240	.79	37.7	62.3
1.34	2.5	16.8	.093	.15	97.9	2.1	9.00	19.1	1.9	4.437	.80	36.0	64.0
1.36	2.7	16.3	.102	.15	97.7	2.3							
1.38	2.8	15.9	.112	.16	97.5	2.5	9.50	19.6	1.8	4.626	.81	34.5	65.5
							10.00	20.0	1.7	4.807	.82	33.1	66.9
1.40	2.9	15.6	.122	.17	97.2	2.8	11.00	20.8	1.6	5.149	.83	30.6	69.4
1.42	3.0	15.2	.133	.17	97.0	3.0	12.00	21.6	1.5	5.466	.85	28.4	71.6
1.44	3.2	14.9	.144	.18	96.7	3.3	13.00	22.3	1.3	5.762	.86	26.5	73.5
1.46	3.3	14.6	.155	.19	96.5	3.5							
1.48	3.4	14.3	.166	.19	96.3	3.7	14.00	22.9	1.2	6.040	.87	24.9	75.1
							15.00	23.5	1.2	6.301	.88	23.4	76.6
1.50	3.5	14.0	.177	.20	96.0	4.0	16.00	24.1	1.1	6.547	.88	22.1	77.9
1.52	3.6	13.7	.189	.21	95.7	4.3	17.00	24.6	1.0	6.780	.89	21.0	79.0
1.54	3.8	13.4	.201	.21	95.5	4.5	18.00	25.1	1.0	7.002	.89	19.9	80.1
1.56	3.9	13.2	.213	.22	95.2	4.8							
1.58	4.0	13.0	.225	.22	94.9	5.1	19.00	25.6	.9	7.212	.90	19.0	81.0
							20.00	26.0	.9	7.413	.90	18.1	81.9
1.60	4.1	12.7	.238	.23	94.7	5.3	25.00	28.0	.7	8.299	.92	14.8	85.2
1.62	4.2	12.5	.250	.24	94.4	5.6	30.00	29.5	.6	9.035	.94	12.5	87.5

PARAMÈTRES S: dBm (PUISSANCE) ET dB (RATIO)

Power to Voltage Conversion Table

P (dBm)	P (mW)	V _{RMS} (V)	V _p (V) ¹	V _{pp} (V)	P (dBm)	P (mW)	V _{RMS} (V)	V _p (V) ¹	V _{pp} (V)
-30	0.001	0.007	0.010	0.020	0	1.000	0.224	0.316	0.632
-29	0.001	0.008	0.011	0.022	1	1.259	0.251	0.355	0.710
-28	0.002	0.009	0.013	0.025	2	1.585	0.282	0.398	0.796
-27	0.002	0.010	0.014	0.028	3	1.995	0.316	0.447	0.893
-26	0.003	0.011	0.016	0.032	4	2.512	0.354	0.501	1.002
-25	0.003	0.013	0.018	0.036	5	3.162	0.398	0.562	1.125
-24	0.004	0.014	0.020	0.040	6	3.981	0.446	0.631	1.262
-23	0.005	0.016	0.022	0.045	7	5.012	0.501	0.708	1.416
-22	0.006	0.018	0.025	0.050	8	6.310	0.562	0.794	1.589
-21	0.008	0.020	0.028	0.056	9	7.943	0.630	0.891	1.783
-20	0.010	0.022	0.032	0.063	10	10.000	0.707	1.000	2.000
-19	0.013	0.025	0.035	0.071	11	12.589	0.793	1.122	2.244
-18	0.016	0.028	0.040	0.080	12	15.849	0.890	1.259	2.518
-17	0.020	0.032	0.045	0.089	13	19.953	0.999	1.413	2.825
-16	0.025	0.035	0.050	0.100	14	25.119	1.121	1.585	3.170
-15	0.032	0.040	0.056	0.112	15	31.623	1.257	1.778	3.557
-14	0.040	0.045	0.063	0.126	16	39.811	1.411	1.995	3.991
-13	0.050	0.050	0.071	0.142	17	50.119	1.583	2.239	4.477
-12	0.063	0.056	0.079	0.159	18	63.096	1.776	2.512	5.024
-11	0.079	0.063	0.089	0.178	19	79.433	1.993	2.818	5.637
-10	0.100	0.071	0.100	0.200	20	100.000	2.236	3.162	6.325
-9	0.126	0.079	0.112	0.224	21	125.893	2.509	3.548	7.096
-8	0.158	0.089	0.126	0.252	22	158.489	2.815	3.981	7.962
-7	0.200	0.100	0.141	0.283	23	199.526	3.159	4.467	8.934
-6	0.251	0.112	0.158	0.317	24	251.189	3.544	5.012	10.024
-5	0.316	0.126	0.178	0.356	25	316.228	3.976	5.623	11.247
-4	0.398	0.141	0.200	0.399	26	398.107	4.462	6.310	12.619
-3	0.501	0.158	0.224	0.448	27	501.187	5.006	7.079	14.159
-2	0.631	0.178	0.251	0.502	28	630.957	5.617	7.943	15.887
-1	0.794	0.199	0.282	0.564	29	794.328	6.302	8.913	17.825
0	1.000	0.224	0.316	0.632	30	1000.000	7.071	10.000	20.000

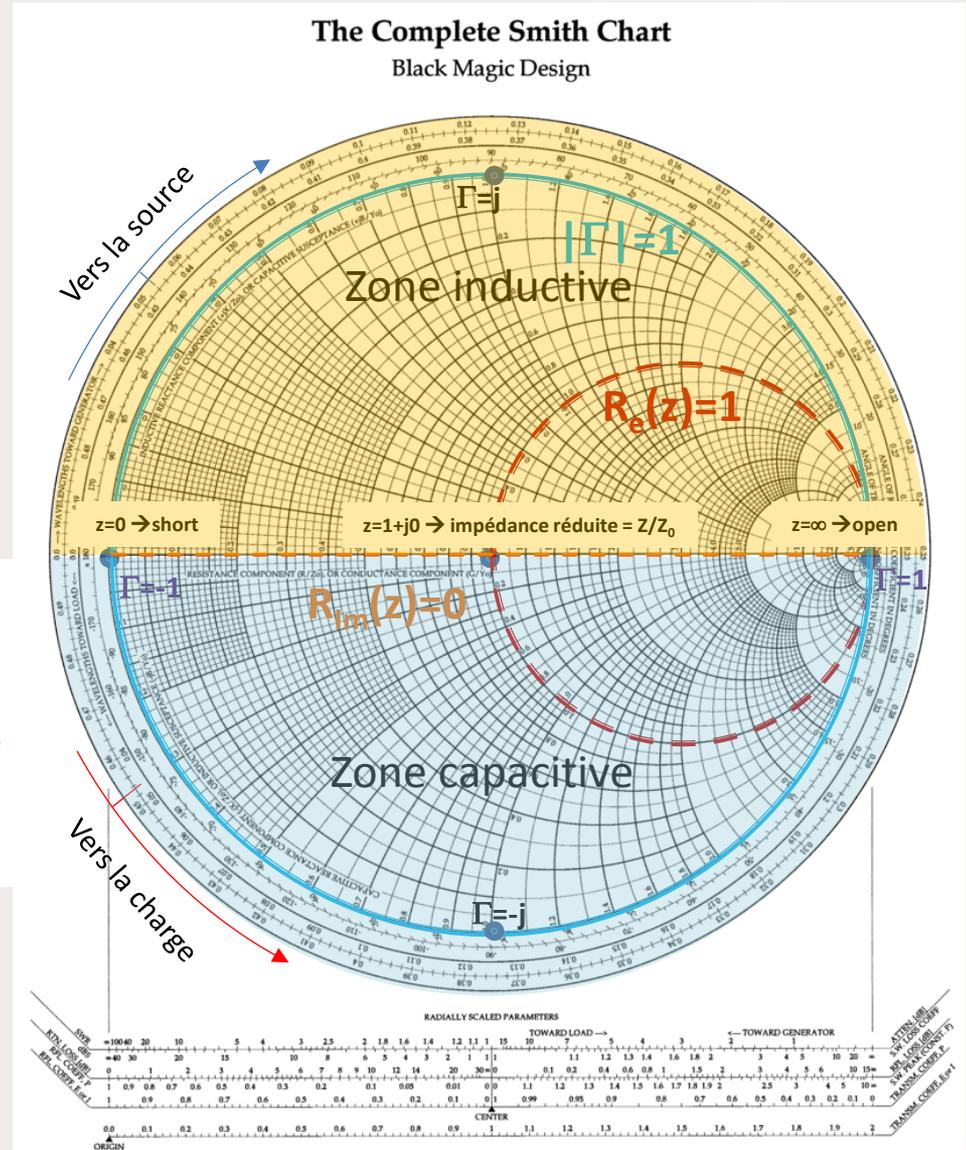
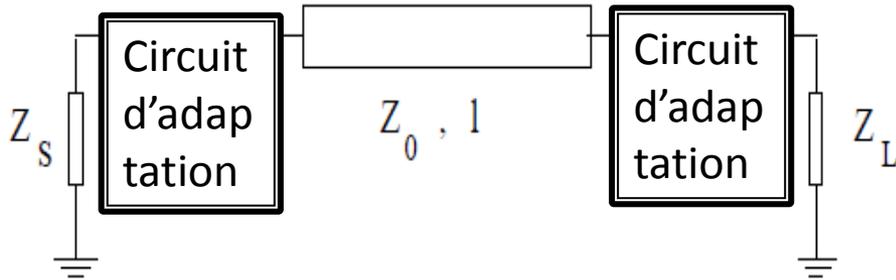
¹For Square wave signal, V_s = V_{RMS}.
Note: The converted voltages in the above table are for R = 50 Ω

$$P_{(dBm)} = 10 \log \left(\frac{P_1}{1mW} \right)$$

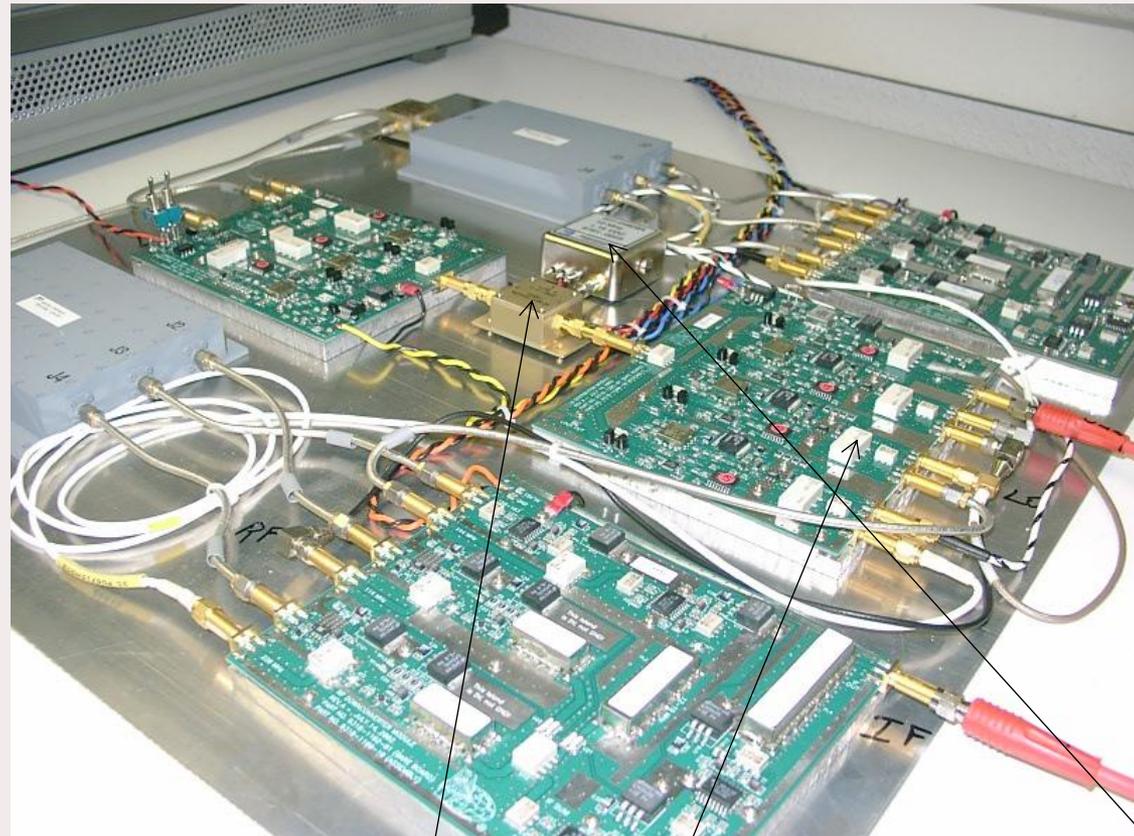
$$a_{(dB)} = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = 20 \log \left(\frac{U_1}{U_2} \right)$$

L'abaque de Smith est un aide 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.

Source Wikipédia



Tuner RF



Mélangeur

Filtre

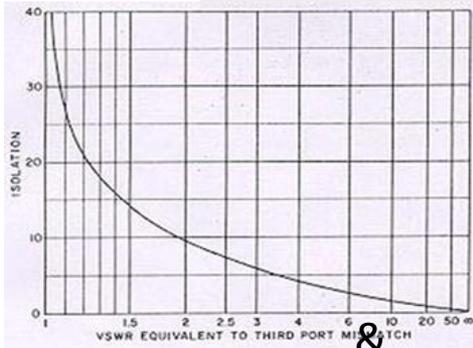
Circulateur

Sommaire:

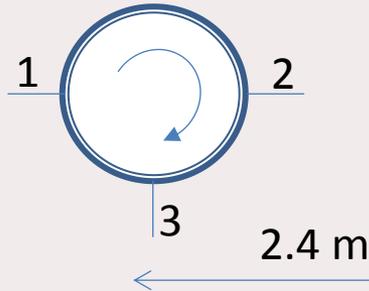
- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- **Dispositifs RF**
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

DISPOSITIFS RF: LE CIRCULATEUR

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



&
Perte d'insertion



3MW_p (6kW_{moy}) @ 325MHz
Version guide d'onde



AFT
microwave



500W_p (50W_{moy})
@ 700MHz
Version SMA

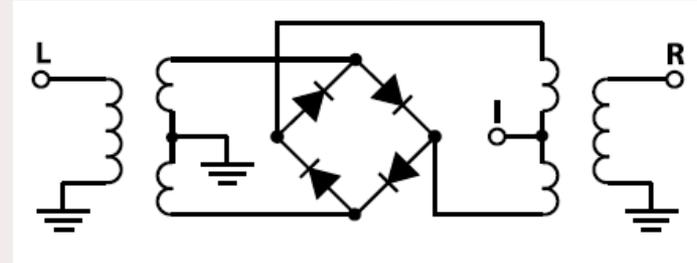
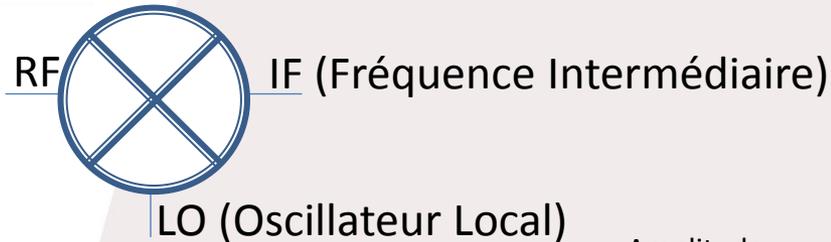
Applications :

- Protections contre les ondes réfléchies
- Duplexage
- Isolateur si port 3 avec charge

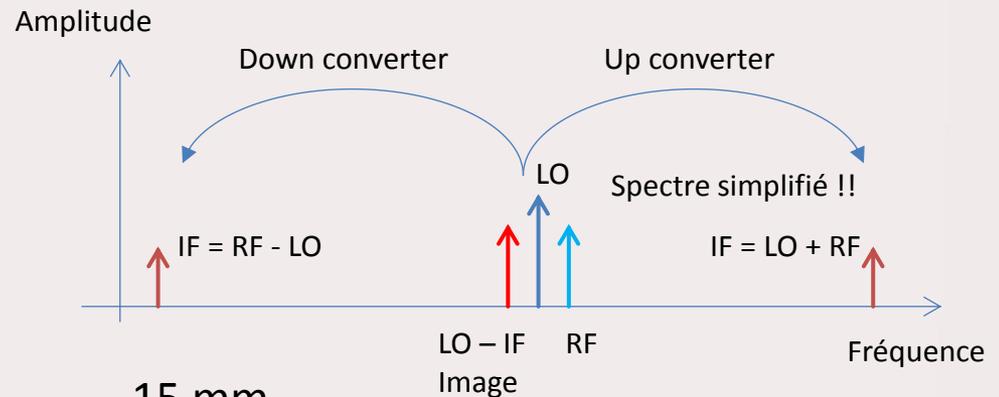
Caractéristiques typiques:

- Pertes d'insertion: 0.2 à 0.4
- Isolation : 20dB
- TOS
- Etc.

DISPOSITIFS RF: LE MÉLANGEUR



Level	LO Power Range (dBm)
Very High	+27 to +15
High	+20 to +13
Medium	+13 to +10
Low	+10 to +3



Mini-Circuits
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

Version mélangeur passif

Applications :

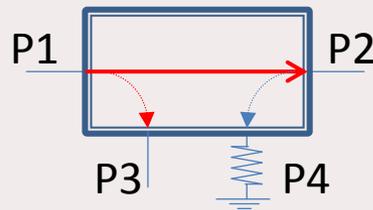
- Transposition de fréquence
- Multiplieur
- Détecteur de phase

Caractéristiques typiques:

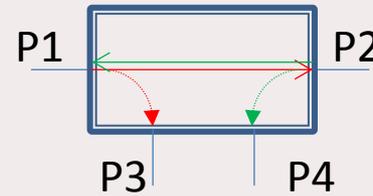
- Pertes d'insertion : 6dB
- Isolation (IF_LO & LO_RF) : 40
- Puissance d'entrée
- Facteur de bruit NF = IL + 0.5 dB

DISPOSITIFS RF: LE COUPLEUR

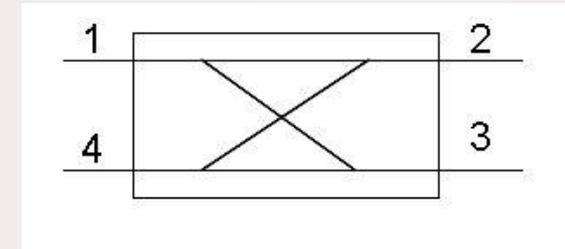
$$S = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & 0 & S_{34} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & 0 \end{bmatrix}$$



Coupleur directionnel



Coupleur Bidirectionnel



Symbole IEEE



ADC-10-4+



Facteur de Couplage (dB)	pertes d'insertion (dB)
5	1,65
10	0,46
20	0,043
30	0,0043
40	0,00043

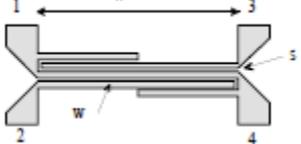
Caractéristiques typiques:

Applications :

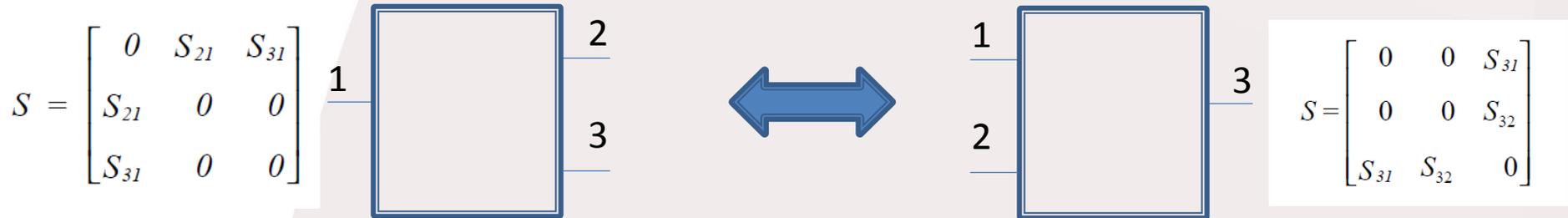
- Mesures de puissance, de TOS
- Mesure et asservissement de niveau d'une source en fonction de sa charge

- Pertes d'insertion
- Couplage
- Directivité : > 25dB, 40dB très bien!
- Bande passante
- Puissance

Coupleur lange



DISPOSITIFS RF: DIVISEUR (SPLITTER) ET COMBINEUR DE PUISSANCE



Diviseur

Combineur

ZBSC-615+



Nombre de port de sortie	Perte théorique en sorties (dB)
2	3
3	4.8
4	6
5	7
6	7.8
8	9
10	10

ADP-2-1W+



Applications :

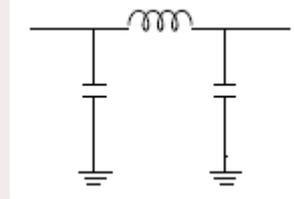
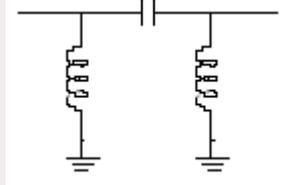
- Additionner ou soustraire des signaux
- "Splitter" un signal en plusieurs voies

Caractéristiques typiques:

- Couplage, Isolation
- Bande passante
- Puissance
- Déphasage et atténuation entre les voies

DISPOSITIFS RF: DÉPHASEUR

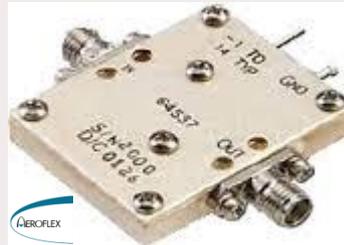
$$S = \begin{pmatrix} 0 & \exp^{j\Phi} \\ \exp^{j\Phi} & 0 \end{pmatrix}$$



Digital



Analogique



Mécanique



Applications :

- Modulation FM, PM
- Démodulation FM, PM
- PLL

Caractéristiques typiques:

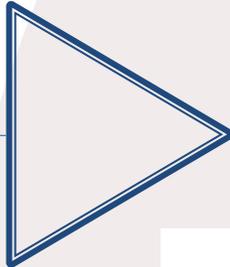
- Pertes d'insertion
- Bande passante
- Gamme de déphasage
- type et plage de commande (Manuel, analogique ou numérique)

GALI-74+



Mini-Circuits
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED

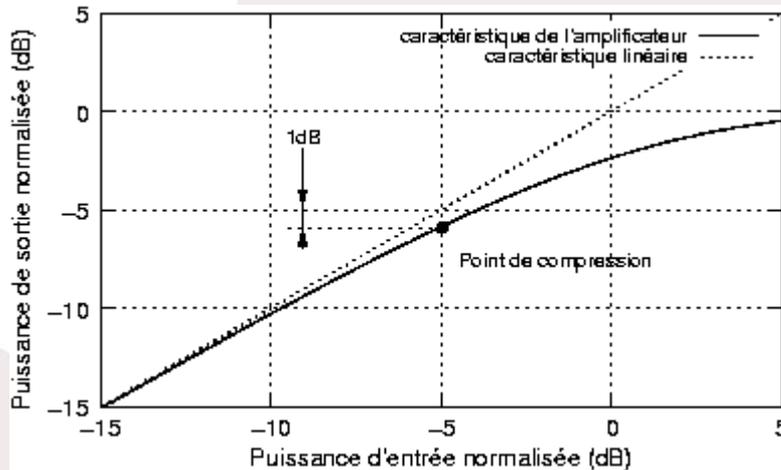
In



Out



Hyperfréquences

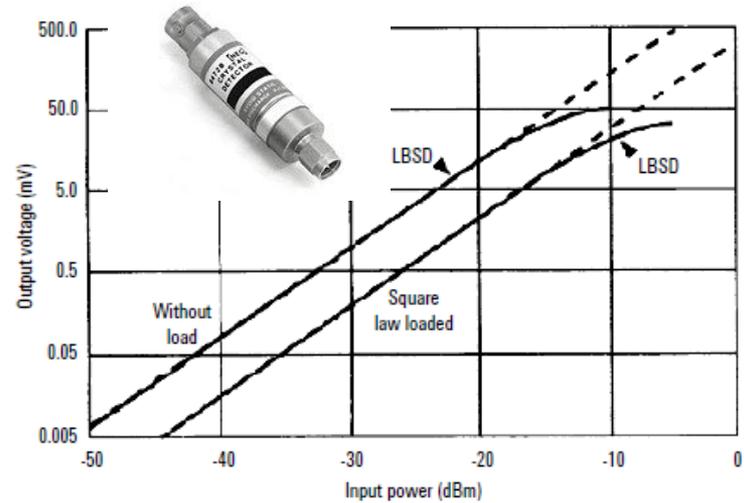
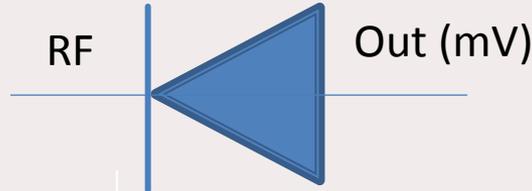
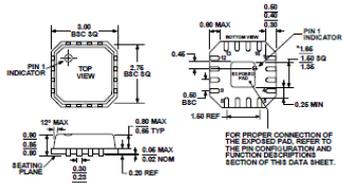


Caractéristiques typiques:

- Gain et bruit (NF)
- Bande passante
- P_{1dB}
- Puissances d'entrée et de sortie

Applications :

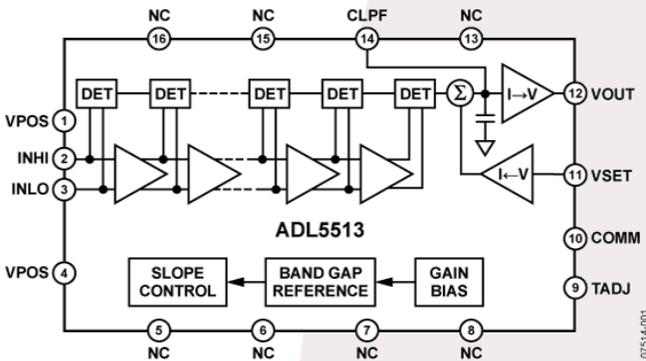
- Récepteur faible bruit
- Amplificateur de puissance
- Préamplificateur



Low-Barrier Schottky Diode

Caractéristiques typiques:

- Puissance d'entrée max
- Bande passante
- TOS en entrée
- Coefficient dB/mV
- Précision



Log Amplifiers

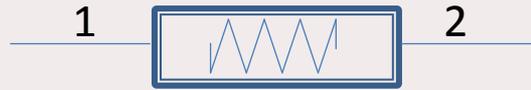
Applications :

- Acquisition de puissance
- Protection d'un étage d'entrée



LES COMPOSANTS : ATTÉNUATEUR

$$S = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} \\ S_{12} & 0 \end{bmatrix}$$



Fixe



Variable



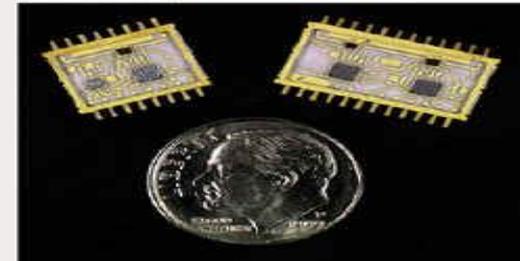
1kW 30dB

Haute précision



Hyperfréquences

Fig. 1 Relative sizes of the five-bit and six-bit attenuators.



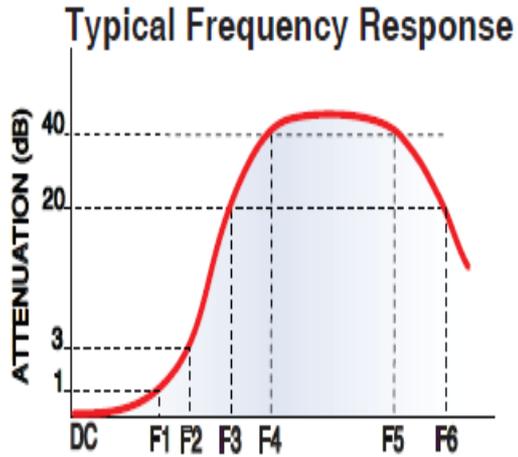
Applications :

- Protection d'un appareil de mesure
- Réduction ou Egalisation des niveaux de puissance

Caractéristiques typiques:

- Pertes d'insertion
- Bande passante
- Puissance
- SWR
- précision et stabilité de la valeur

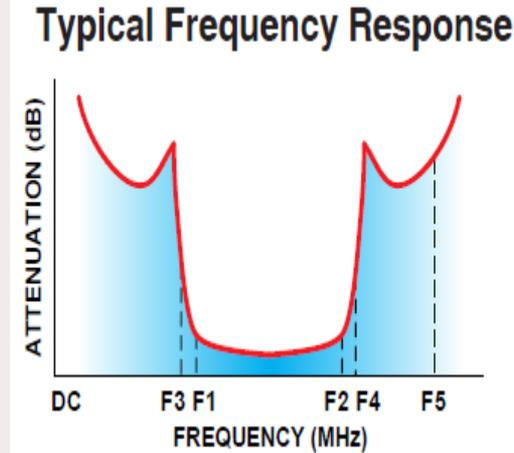
Filtres passe-bas



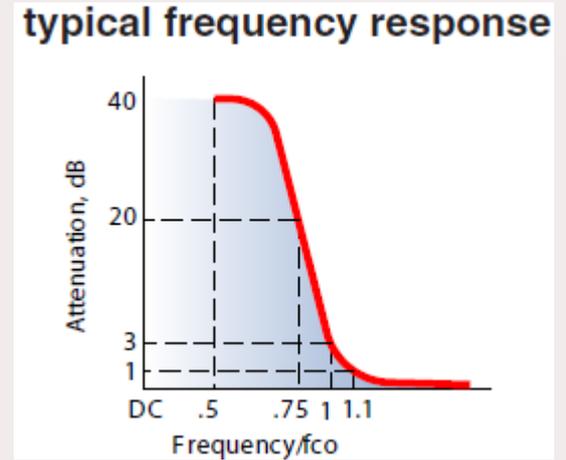
Applications :

- « nettoyer » des signaux
- PLL, LLRF ...

Filtre passe-bande



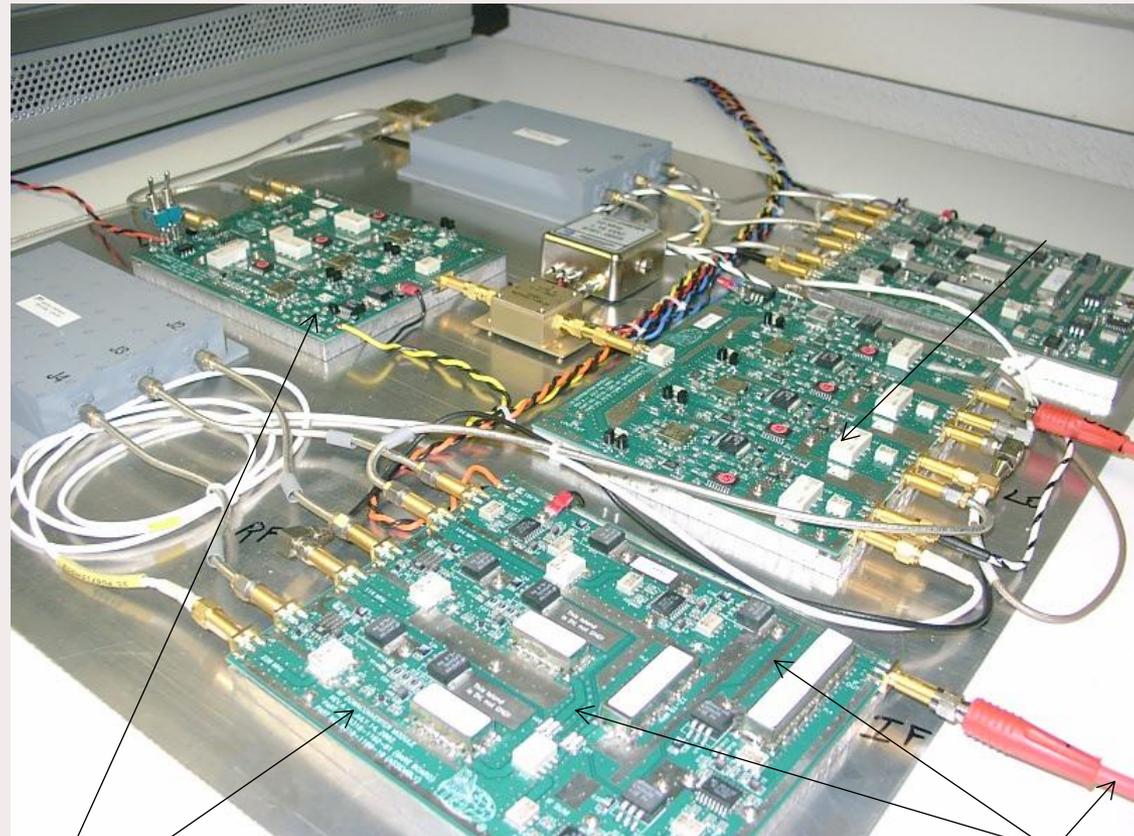
Filtre pass-haut



Caractéristiques typiques:

- Pertes d'insertion
- Ondulation
- Courbe de rejection
- Puissance

Tuner RF



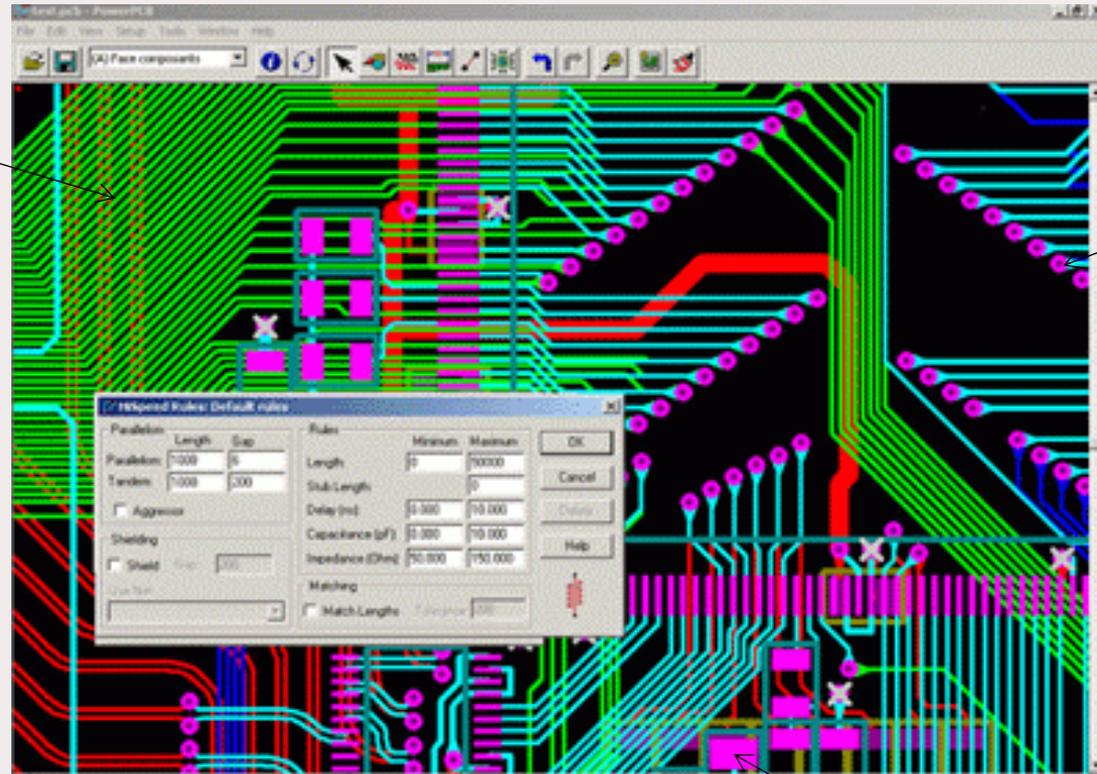
Cartes RF

Lignes de transmission RF
Microstrip, coaxial

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- **Lignes de transmissions**
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif

Lignes de transmission

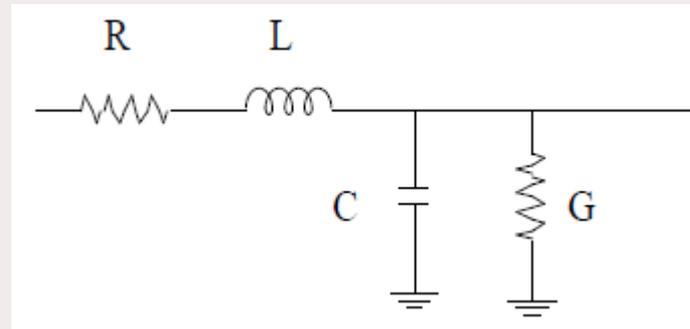


Vias

- Layout multicouches
- Une couche par couleur, des lignes de transmission sur chaque couche
- Vias pour connecter des couches entre elles
- Des empreintes pour les composants

Empreintes

LIGNES DE TRANSMISSION: MODÈLE ÉLECTRIQUE



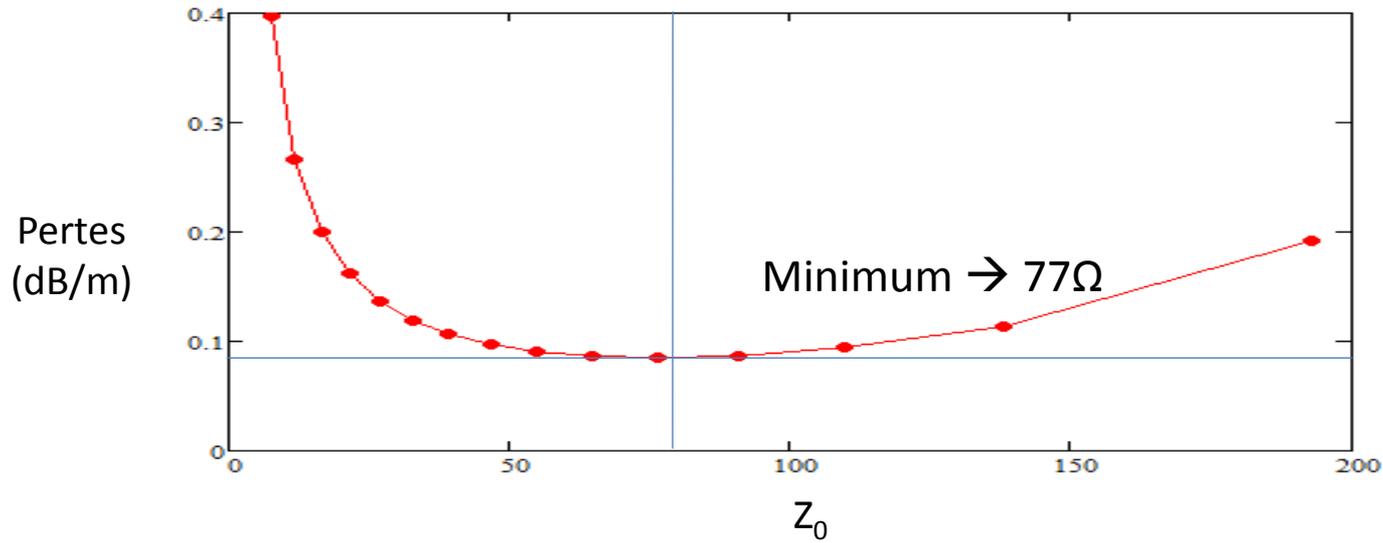
Modèle électrique d'une ligne de transmission

$$\text{Impédance caractéristique } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

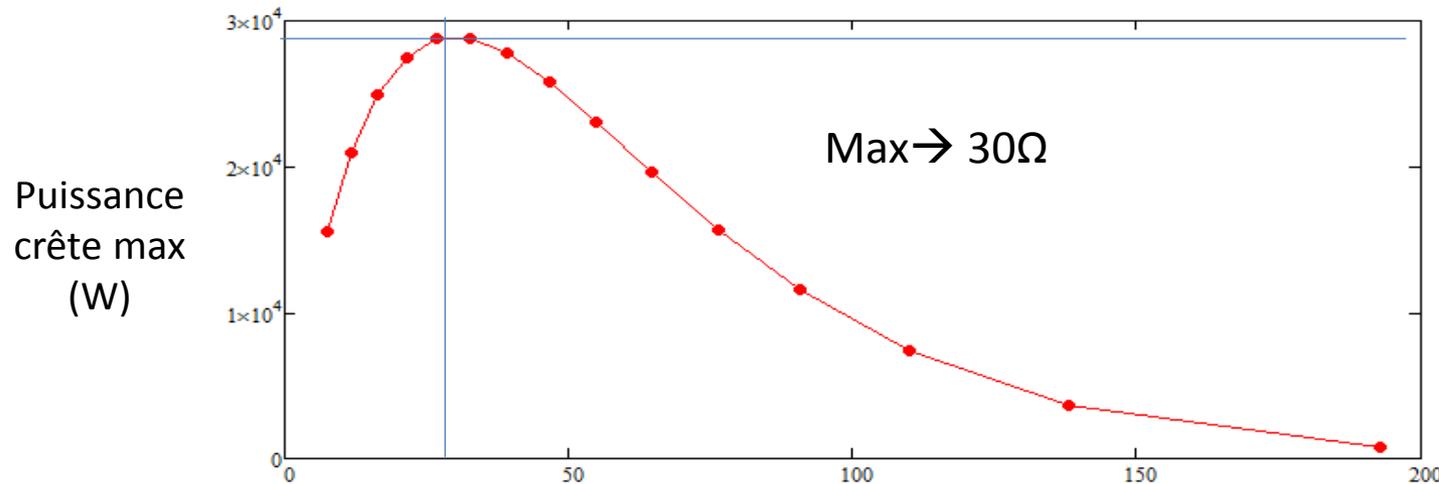
Courtesy: cours ESIEE

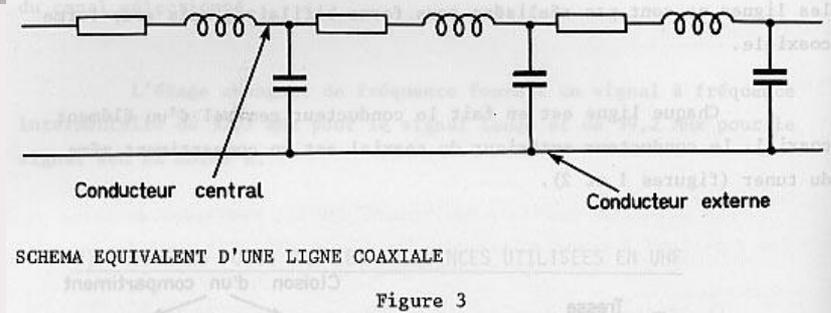
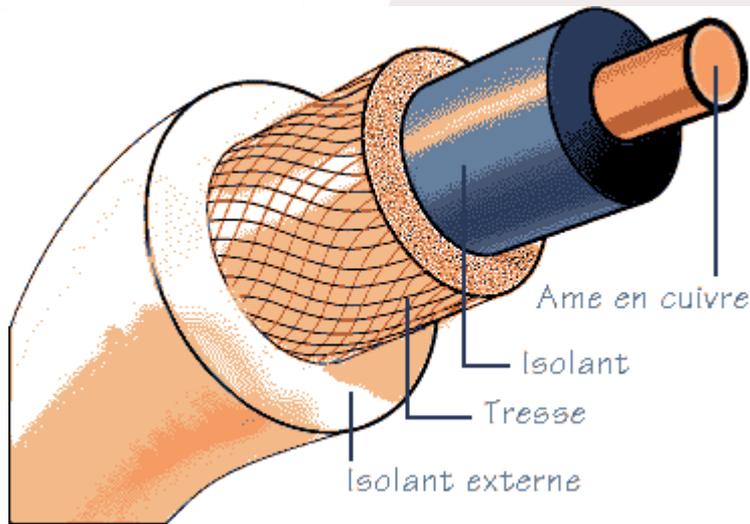
LIGNES DE TRANSMISSION: LIGNE 50OHM

(cas d'un câble coaxial dans l'air) avec un champ électrique de claquage de 1MV/m



Compromis entre
la valeur moyenne (53.5 Ω)
et
la valeur géométrique (48 Ω)



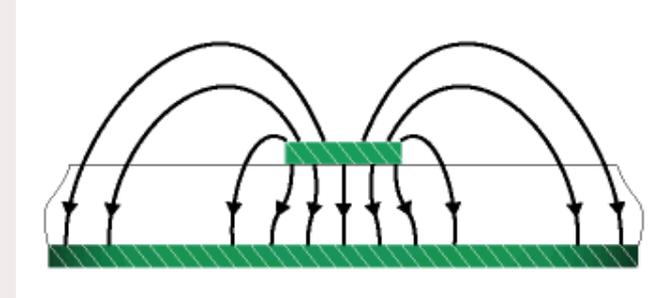
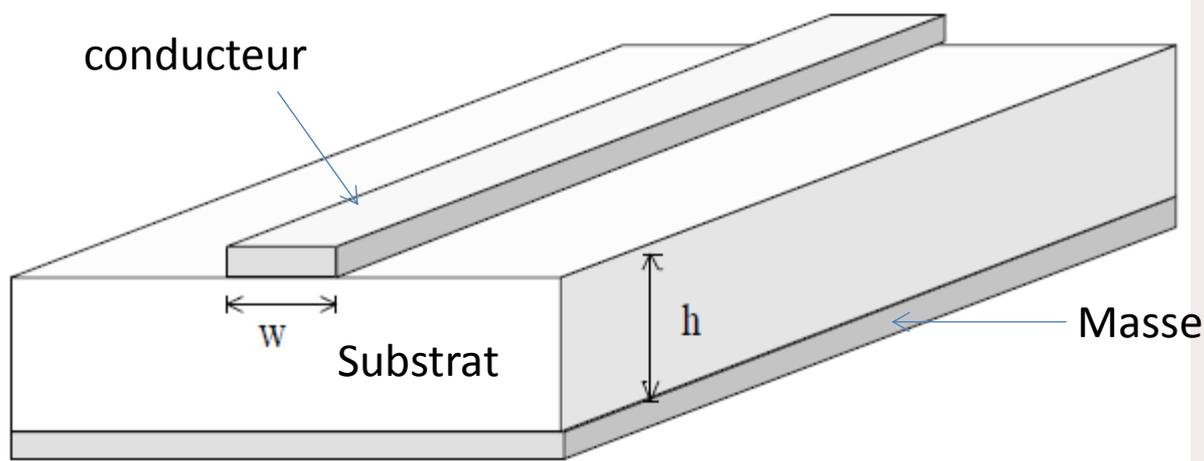


Avantages:

- Simple à réaliser, adaptée aux circuits connectés
- Peu de pertes dans le conducteur
- Propagation homogène
- Insensible aux perturbations électromagnétiques

Inconvénients

- Difficile à manipuler et à raccorder (poids, rigidité, connectique délicate)
- Déphasage sensible aux matériaux choisis



Avantages:

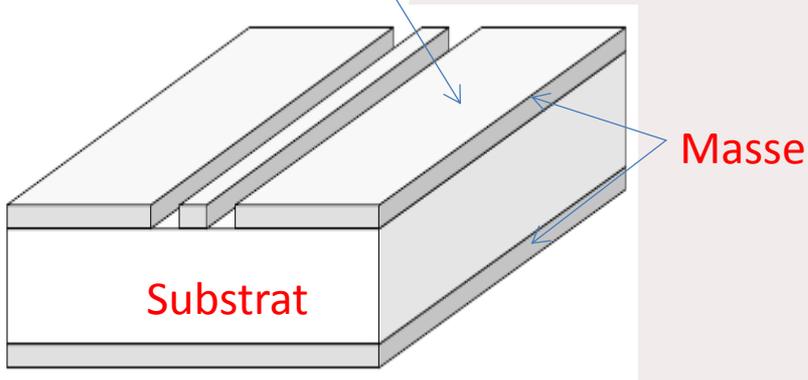
- Simple à réaliser, adaptée aux circuits deux couches
- Connectique simple, peu de pertes dans le conducteur

Inconvénients

- Propagation inhomogène
- Sensible aux perturbations électromagnétiques
- Pertes plus importants seul le substrat choisi
- Déphasage contrôlé

LIGNES DE TRANSMISSION : LIGNE COPLANAIRE, LIGNE À FENTE

conducteur



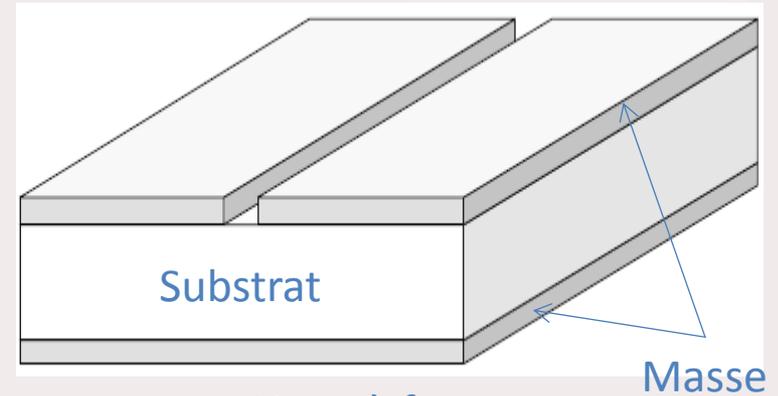
Ligne coplanaire

Avantages:

- Simple à réaliser
- Adaptée aux circuits deux couches
- Connectique moins simple
- Propagation plus homogène

Inconvénients

- Sensible aux perturbations électromagnétiques
- Pertes plus importants selon le substrat choisi



Ligne à fente

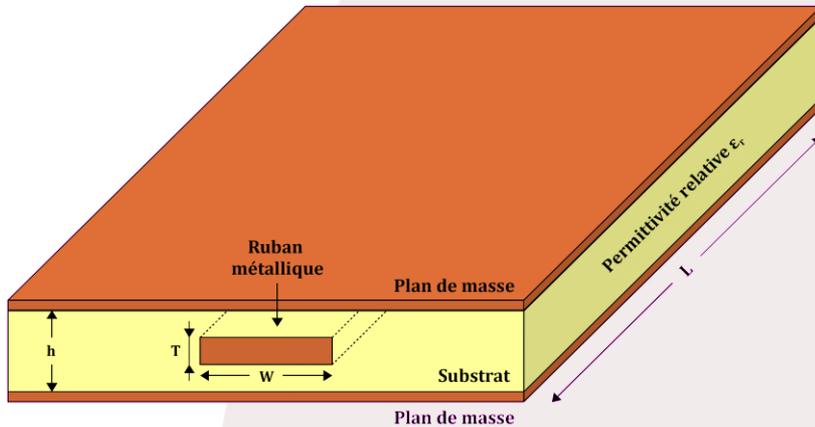
Avantages:

- Simple à réaliser
- Adaptée aux antennes
- Connectique complexe
- Propagation très homogène

Inconvénients

- Sensible aux perturbations électromagnétiques
- Pertes plus importants selon le substrat choisi

LIGNES DE TRANSMISSION : LIGNE TRIPLAQUE, GUIDE D'ONDE



Ligne triplaque

Avantages:

- Simple à réaliser
- Adaptée aux circuits multicouches
- Insensible aux perturbations électromagnétiques
- Propagation très homogène

Inconvénients

- Connectique moins simple
- Pertes plus importants selon le substrat choisi



guide d'onde

Avantages:

- Très complexe à réaliser
- Adaptée aux antennes
- Connectique complexe
- Propagation très homogène

Inconvénients

- Insensible aux perturbations électromagnétiques

AUTRES LIGNES DE TRANSMISSION

[Microstrip Transmission Line](#)

[Edge-Coupled Symmetric Microstrip](#)

[Transmission Lines](#)

[Edge-Coupled Asymmetric Microstrip](#)

[Transmission Lines](#)

[Lange Coupler](#)

[Stripline Transmission Line](#)

[Edge-Coupled Stripline Transmission Lines](#)

[Broadside-Coupled Stripline Transmission Lines](#)

[Offset-Coupled Stripline Transmission Lines](#)

[Offset Stripline Transmission Line](#)

[Suspended Substrate Transmission Line](#)

[Edge-Coupled Suspended Substrate](#)

[Transmission Lines](#)

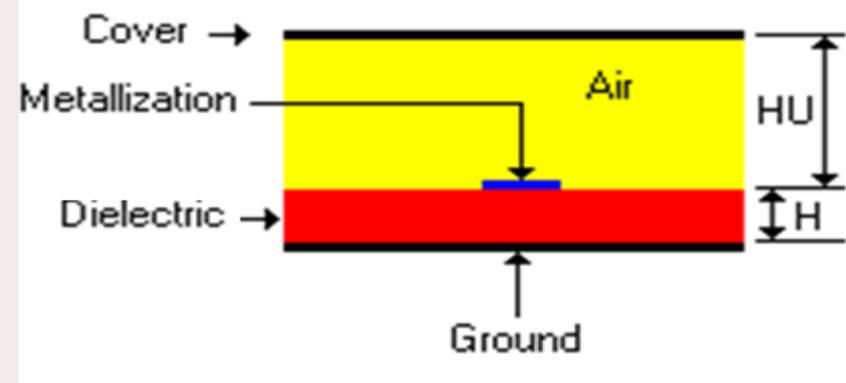
[Coplanar Waveguide](#)

[Grounded Coplanar Waveguide](#)

[Coaxial Cable](#)

LIGNES DE TRANSMISSION : SIMULATEURS (1)

Inclus dans : Ansys designer RF, Cadence



Microstrip single

Dimensions

W 1

P 10

Frequency 1

Analysis Auto Calculate OFF Reset All Synthesis 1

Substrate

H 10mil Er 9.8

HU 1000mil TAND 0.0001

MSat 0 TANM 0

MRem 0

Metallization

Layers	Metal Name	Code	Resistivity	Thickness
Bottom	gold		2.43902	0.675m
Middle	*None*			
Top	*None*			
RGH				

Electrical

Z0 50

E 45

Units

Dimension mm

Frequency GHz

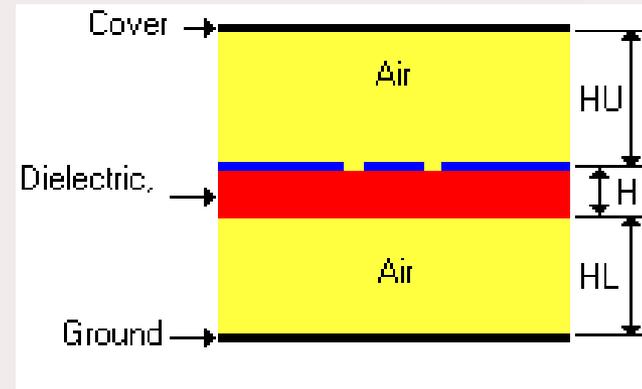
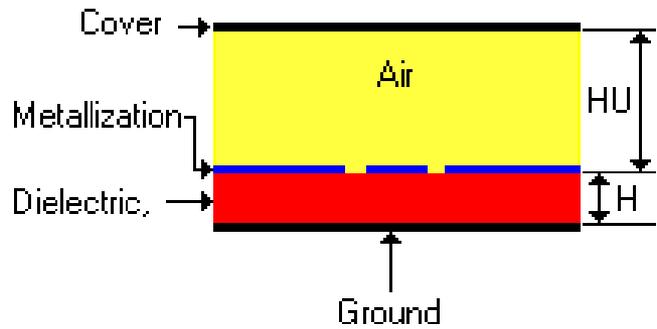
Impedance Ohm

Electrical Length Deg

Resistivity uOhm*cm

Details>> Place Close

LIGNES DE TRANSMISSION : SIMULATEURS (2)



Grounded Coplanar Waveguide

Dimensions: W 1, W/D, G, P 10

Electrical: Z0 50, E 45

Units: Dimension mm, Frequency GHz, Impedance Ohm, Electrical Length Deg, Resistivity uOhm*cm

Substrate: H 1mm, ER 2.2, HU 25mm, TAND 0

Metallization: Layers Metal Name Code Resistivity Thickness
 Bottom gold 2.43902 0mil
 Middle *None*
 Top *None*
 RGH 0mil

Buttons: Analysis, Auto Calculate OFF, Reset All, Synthesis, Place, Close

Coplanar Waveguide

Dimensions: W 1, W/D, G, P 10

Electrical: Z0 50, E 45

Units: Dimension mm, Frequency GHz, Impedance Ohm, Electrical Length Deg, Resistivity uOhm*cm

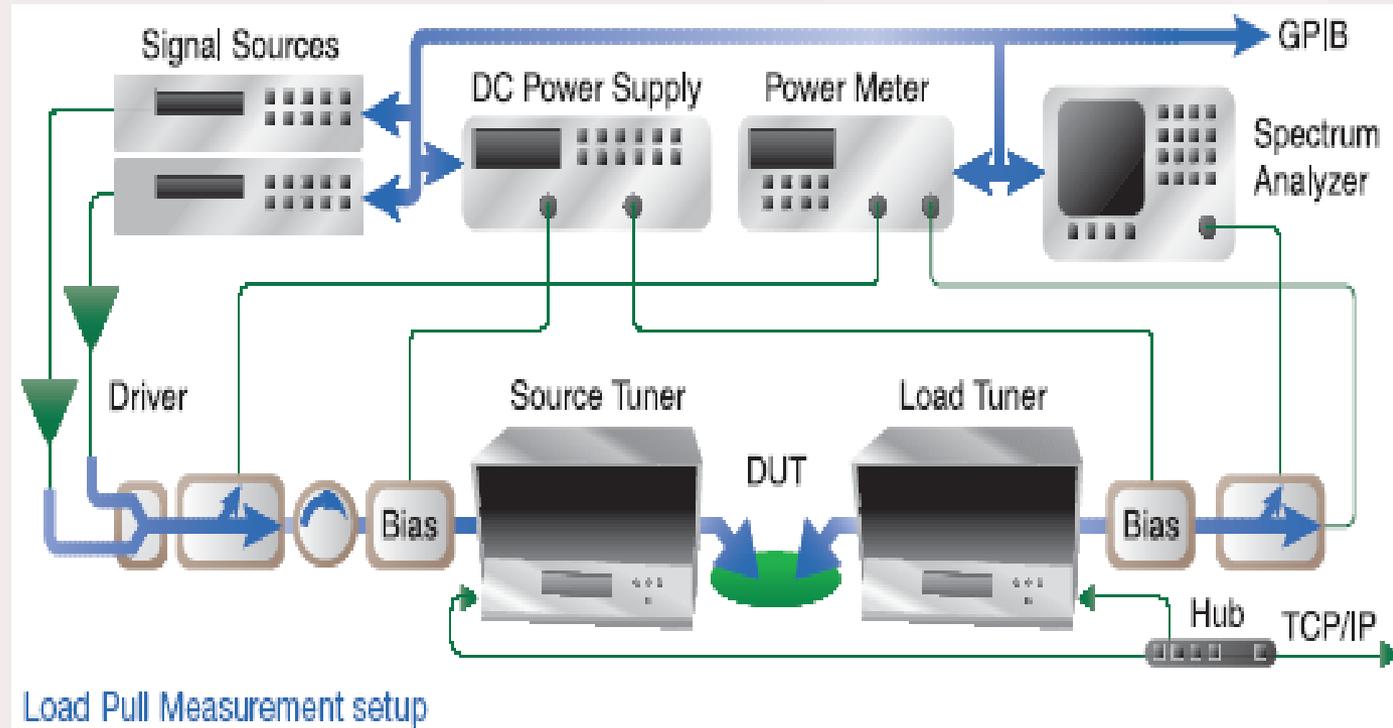
Substrate: H 1mm, ER 2.2, HU 25mm, HL 25mm, TAND 0

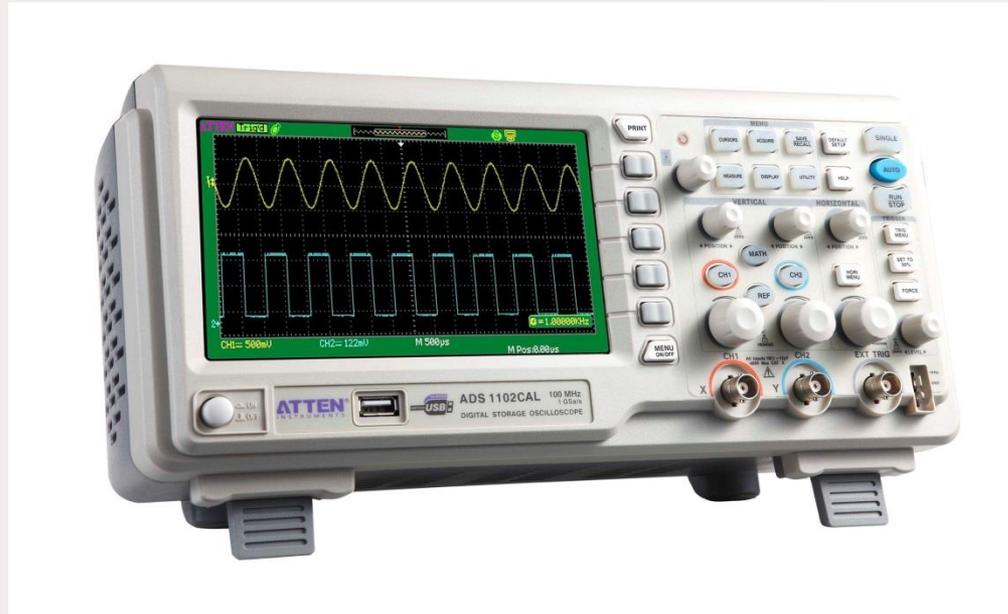
Metallization: Layers Metal Name Code Resistivity Thickness
 Bottom gold 2.43902 0mil
 Middle *None*
 Top *None*
 RGH 0mil

Buttons: Analysis, Auto Calculate OFF, Reset All, Synthesis, Place, Close

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- **Appareils de mesure RF**
- Règles de routage et de test
- Exemple récapitulatif





Connu de tous !

Rôle : présentation de la forme temporelle d'un signal

Caractéristiques typiques: bande passante, nombre de symboles/s, puissance autorisée

Précautions:

- Respecter la puissance autorisée
 - Contrôler le niveau du trigger
 - Bien noter la configuration utilisée
- Facilités: sauvegarde des données, mémorisation, curseurs, pilotable à distance ...

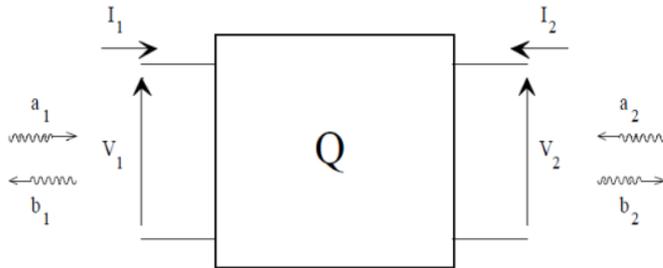
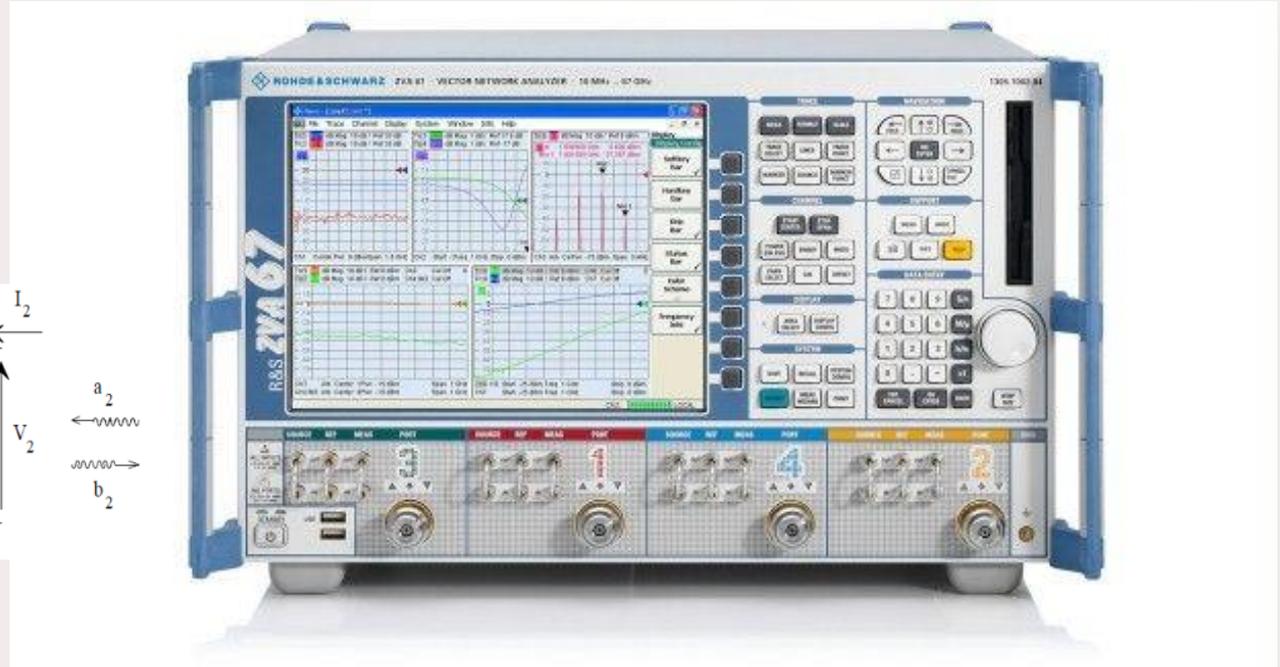


Rôle : présentation de la forme spectrale (fréquentielle) d'un signal
Caractéristiques typiques: bande passante, nombre de symboles/s, puissance autorisée, stabilité de la référence, plancher de bruit

Précautions:

- Intégrer un DC block pour protéger l'entrée d'un signal DC
- Respecter la puissance autorisée
- Bien noter la configuration utilisée (puissance, moyenne...)

Facilités: sauvegarde des données, mémorisation, curseurs, pilotable à distance ...



Rôle : Mesure des propriétés d'un quadripôle.

Caractéristiques typiques: bande passante, bruit de phase, puissance autorisée

Précautions:

- Respecter la puissance autorisée
- Etalonnage de l'analyseur en fonction de la mesure voulue
- Bien noter la configuration utilisée (puissance, fréquence, moyenne ...)

Facilités: sauvegarde des données, d'un étalonnage, mémorisation, curseurs, pilotable à distance, mesures diverses ...



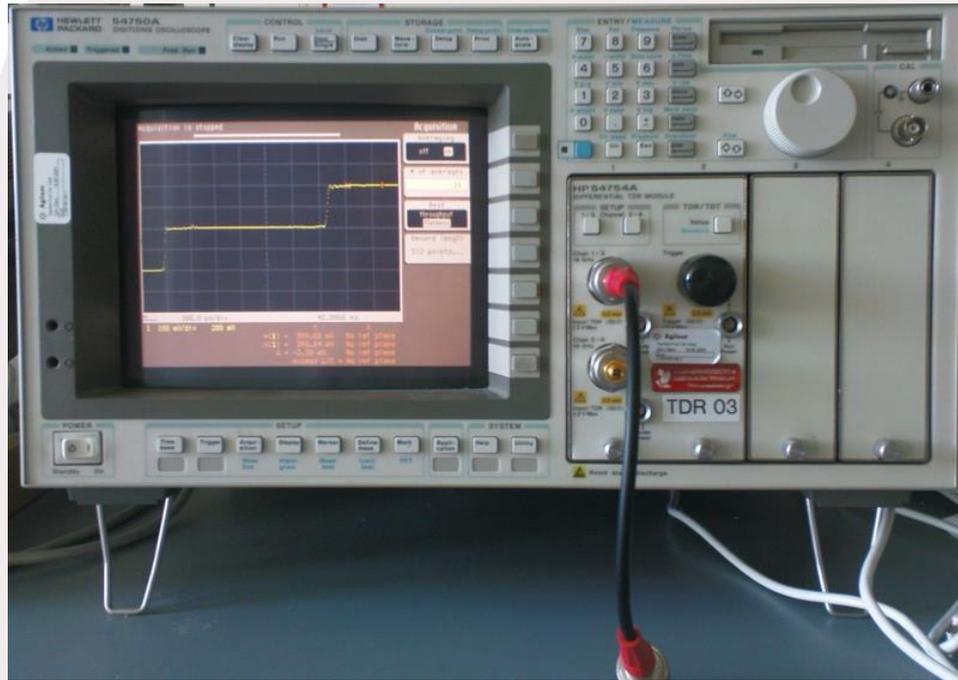
Rôle : Mesure la puissance d'un signal donné.

Caractéristiques typiques: bruit, puissance autorisée, plage de mesure

Précautions:

- Respecter la puissance autorisée
- Etalonnage de la sonde
- Bien noter la configuration utilisée (puissance, moyenne de mesures, type de moyenne)

Facilités: sauvegarde des données, pilotage à distance



Rôle : présentation de la réponse temporelle d'un module, détection des impuretés dans une ligne de transmission.

Caractéristiques typiques: bande passante, puissance autorisée

Précautions:

- Respecter la puissance autorisée
- Faire attention aux décharges électrostatiques
- Bien noter la configuration utilisée (nombre de symboles par seconde, moyenne...)

Facilités: sauvegarde des données, mémorisation, curseurs, pilotable à distance ...

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- **Règles de routage et de test**
- Exemple récapitulatif

Règles de routage:

- Longueur calculée en fonction du déphasage voulu
- Espacement suffisant entre les lignes (éviter les risques de diaphonie)
- Le moins de vias possible, angles semi droit ou arrondi
- Séparation signaux DC et signaux RF

Règles de test:

- Respecter la plage de fréquence de test
- Respecter la plage de puissance de test
- Calibrer les instruments de mesure (analyseur de réseau, sonde de puissance mètre ...)
- En cas de mesure de phase, utiliser des générateurs à faible bruit de phase
- En cas de mesure différentielle, calibrage non nécessaire
- Protéger les instruments de mesures (DC block, porter un bracelet ESD pour l'utilisation d'un réflectomètre ...)
- Protéger les amplificateurs de puissance (mettre des charges 50Ohm à la sortie si c'est à l'air)
- Mettre des charges 50Ohm sur les sorties 50Ohm à l'air

EXEMPLE RÉCAPITULATIF: DISTRIBUTION DE RÉFÉRENCE RF

But: réaliser un module fournissant 20 signaux de références à 88,0525MHz et 20 autres signaux de référence à 176,105MHz

Sommaire:

- Onde (espace & temps)
- Rappel sur les ondes
- Thématiques de l'IN2P3
- RF et accélérateurs
- Application IN2P3
- Paramètres S
- Dispositifs RF
- Lignes de transmissions
- Appareils de mesure RF
- Règles de routage et de test
- **Exemple récapitulatif**

Cahier des charges:

Puissance d'entrée du module : 27 dBm

Puissance de sortie de chaque signal : entre 4 et 6dBm

Différence en puissance entre les signaux <1dB

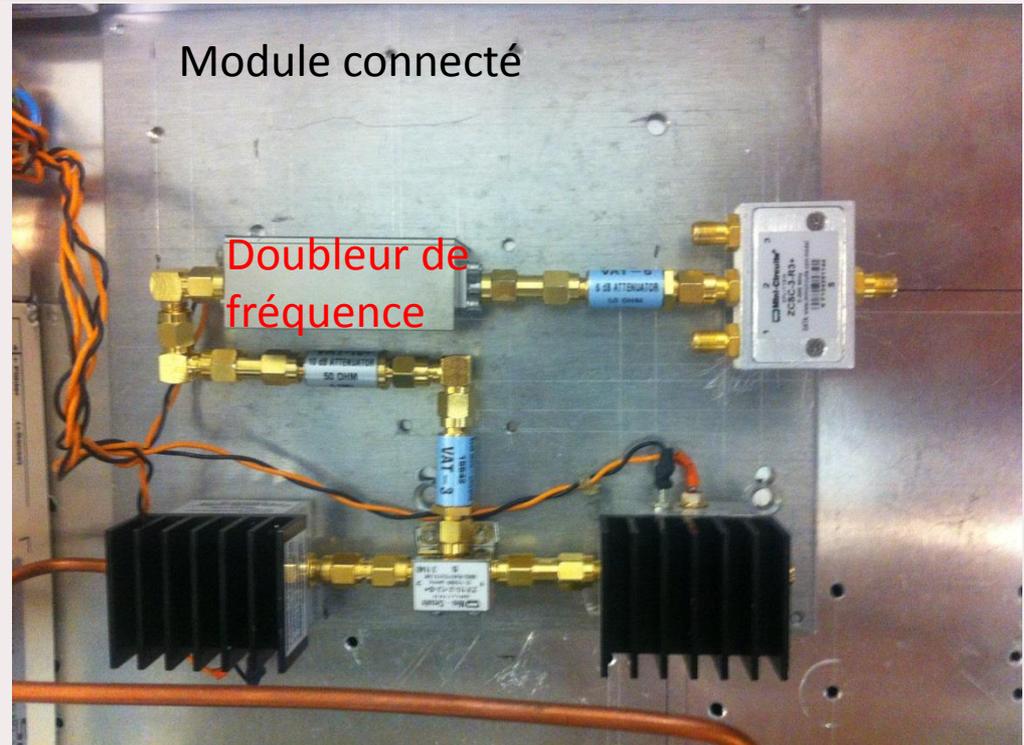
Différence en phase entre les signaux <5°

Tenir dans une baie de 19 pouces



EXEMPLE RÉCAPITULATIF: DISTRIBUTION DE RÉFÉRENCE RF

Design



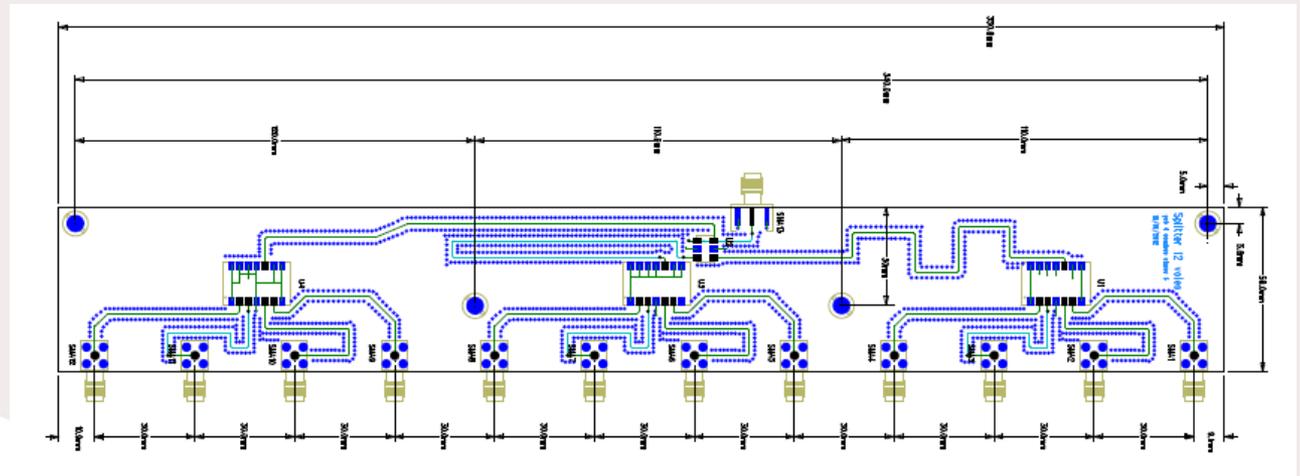
Carte splitter 12 voies



EXEMPLE RÉCAPITULATIF: DISTRIBUTION DE RÉFÉRENCE RF

Layout:

- choisir la bonne largeur de ligne de transmission pour avoir une impédance caractéristique de 50Ω
- Le signal est acheminé de l'entrée de chaque carte jusqu'aux 12 sorties sur des lignes de transmission qui ont **la même longueur** pour obtenir la même phase sur les 12 signaux de sortie



EXEMPLE RÉCAPITULATIF: DISTRIBUTION DE RÉFÉRENCE RF

Mise au point:

- Les splitters ont été choisis pour avoir un déphasage minimum entre leurs sorties
- Le doubleur de fréquence est choisie pour sa stabilité en phase
- Les valeurs des atténuateurs sont choisis en compromis entre deux critères:
 - Avoir sensiblement la même puissance sur tous les signaux de sorties (à 88,0525MHz et à 176,105MHz)
 - Être dans une plage de puissance où l'amplificateur est linéaire

Test :

- Calibrage de l'analyseur de réseau
- Calibrage des sondes de puissance mètre pour la mesure de puissance
- Caractérisation à 88,0525MHz
- Caractérisation à 176,105 MHz
- Test de tenue en température du module

**MERCI DE
VOTRE
ATTENTION**