



BPM

à cavité réentrantante

**Claire Simon, Michel Luong, Stéphane Chel, Olivier Napoly,
Jorge Novo, Dominique Roudier, Nicoleta Baboi, Dirk Noelle,
Nils Mildner et Nelly Rouvière**

***Orsay – 13 Février 2007
ILC - GDE FRANCE***



- Ce BPM est développé par le CEA/Saclay en collaboration avec DESY dans le cadre du programme Européen **CARE/SRF/WP11**.

- Il se compose d'une cavité radio-fréquence et peut être utilisé dans un **environnement propre à température cryogénique**.

- Le design de la mécanique et du traitement du signal est un compromis entre:
 - une résolution supérieure à **10 μm**

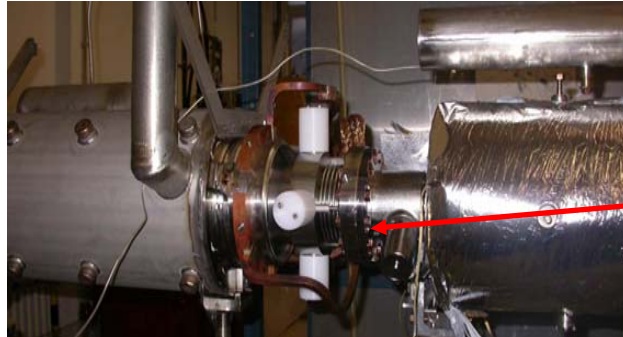
 - la possibilité de faire des mesures paquets par paquets sur le X-FEL à DESY et l'ILC.

 - Utilisation de ce système à température cryogénique.

Cavité RF réentrante (1)



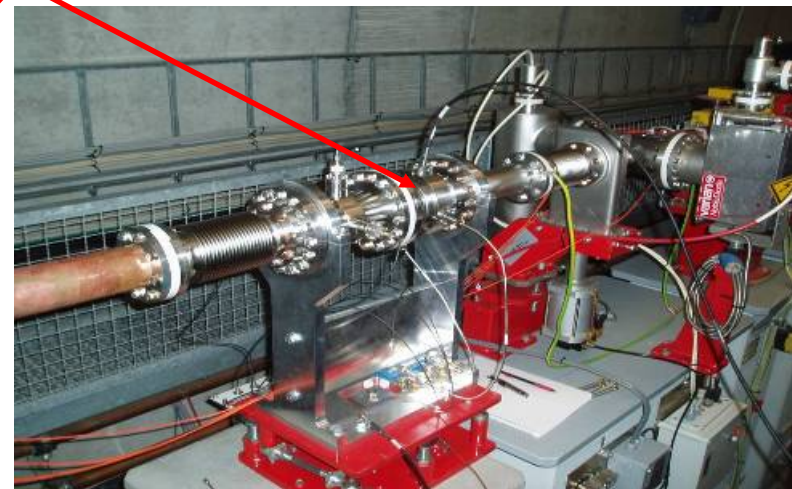
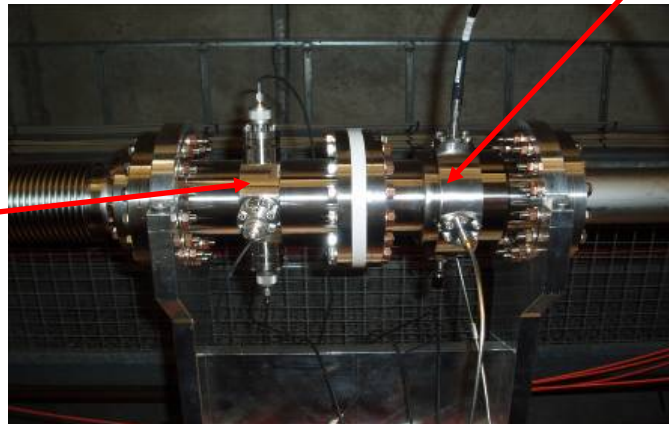
Deux exemplaires de BPMs sont installés sur le linac FLASH (DESY)



BPM à cavité réentrante installé dans un cryomodule et opérationnel à la température de 2 K.

BPM à cavité réentrante installé sur une partie chaude du linac FLASH

BPM Bouton





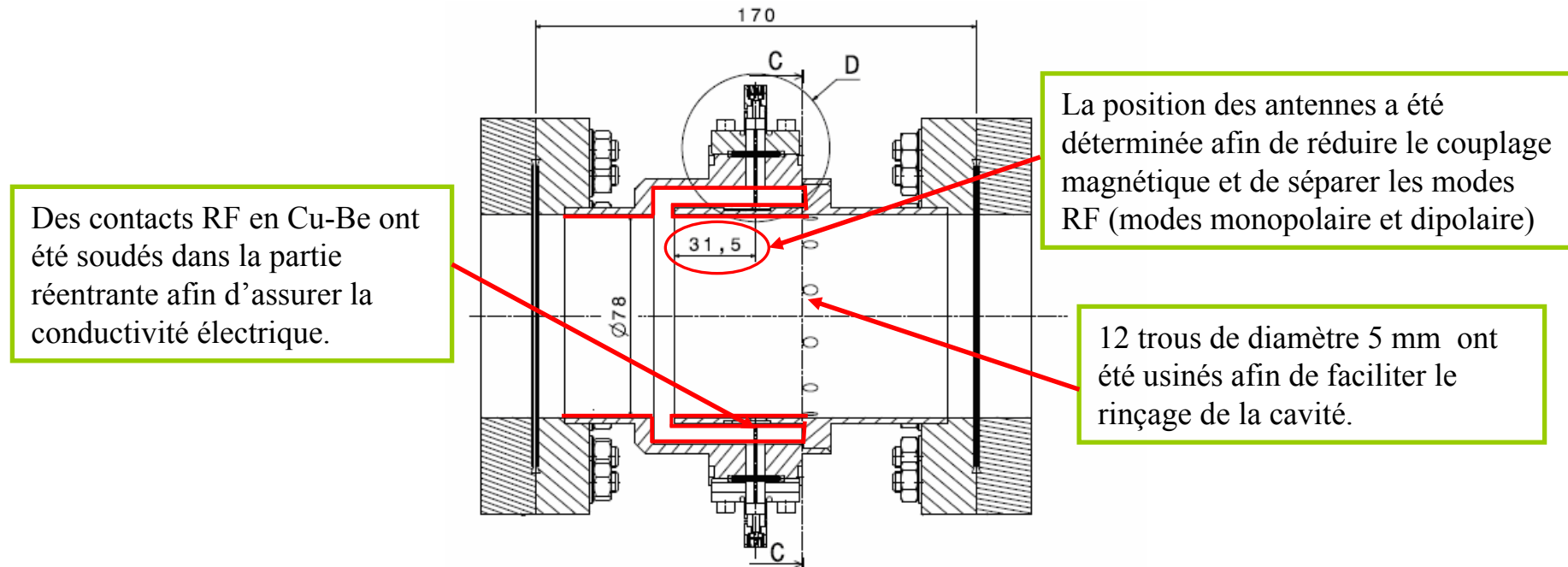
➤ Conçue autour du tube faisceau, la cavité dispose de quatre antennes qui sont en contact avec la partie réentrante réalisant ainsi un fort sur-couplage



➤ Deux antennes déterminent la position verticale du faisceau, les 2 autres la position horizontale.

➤ Sa symétrie cylindrique permet une grande précision mécanique et ses dimensions sont:

170 mm de longueur et 78 mm de diamètre.



- Besoin de valider: - l'alignement des 2 pièces
- cuivrage



➤ Passant à travers la cavité, le faisceau excite des champs electro-magnétiques.



Le signal issu du mode dipolaire dépend de la position du faisceau contrairement au signal issu du mode monopolaire qui ne dépend que de son intensité.

| Modes résonnants | F (MHz) | | | Q _i | | | (R/Q) _i (Ω) à 5 mm | (R/Q) _i (Ω) à 10 mm |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Calculé avec HFSS en "eigen mode" | Mesuré en laboratoire | Mesuré dans le tunnel | Calculé avec HFSS en "eigen mode" | Mesuré en laboratoire | Mesuré dans le tunnel | Calculé | Calculé |
| Mode monopolaire | 1250 | 1254 | 1255 | 22.95 | 22.74 | 23.8 | 12.9 | 12.9 |
| Mode dipolaire | 1719 | 1725 | 1724 | 50.96 | 48.13 | 59 | 0.27 | 1.15 |

➤ Le rapport R/Q a été calculé avec le calculateur HFSS et Matlab.
R: Impédance Shunt et Q: facteur de qualité

$$\frac{R}{Q} = \frac{V^2}{2 * \pi * f * W} \quad V = \left| \int E(z) * e^{jkz} dz \right| \quad \text{et } k=w/c$$

➤ Causé par l'usinage, la soudure et le montage, un déplacement du faisceau dans la direction "x" ne donne pas seulement une lecture dans cette direction mais aussi une lecture dans la direction "y". Cette asymétrie, appelée **cross talk**, a une isolation de 33 dB, mesurée dans le tunnel.

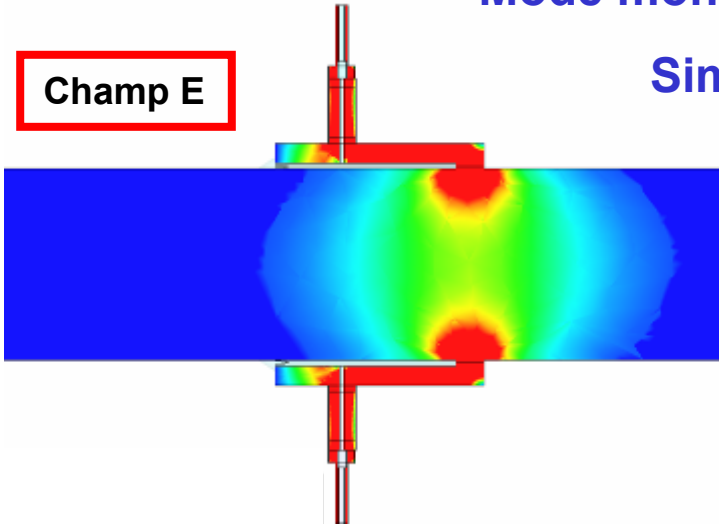
Cavité RF et champs électro-magnétiques (1)



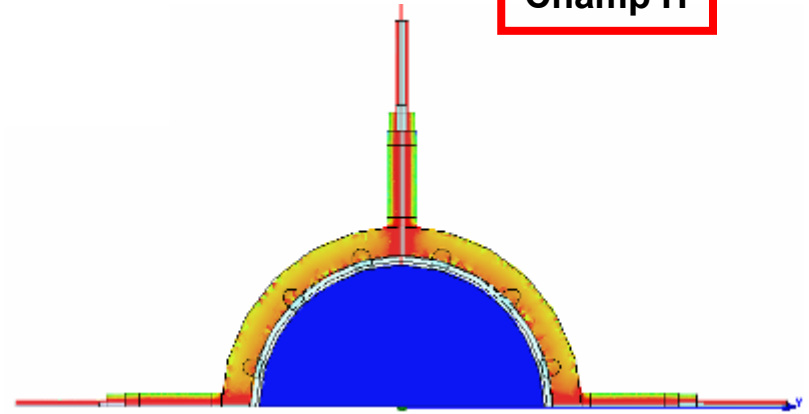
Mode monopolaire ($f = 1255 \text{ MHz}$)

Simulé avec HFSS

Champ E



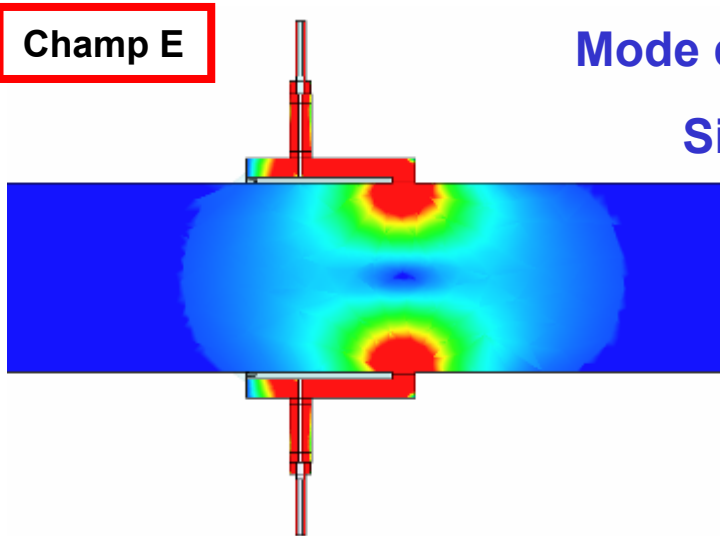
Champ H



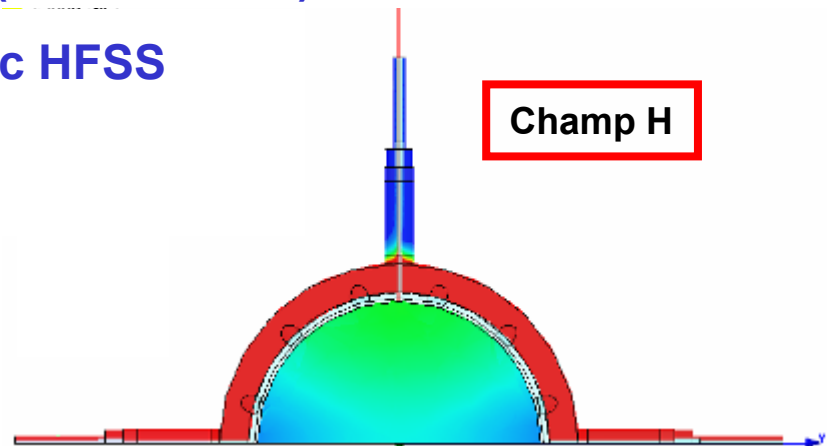
Champ E

Mode dipolaire ($f = 1724 \text{ MHz}$)

Simulé avec HFSS



Champ H

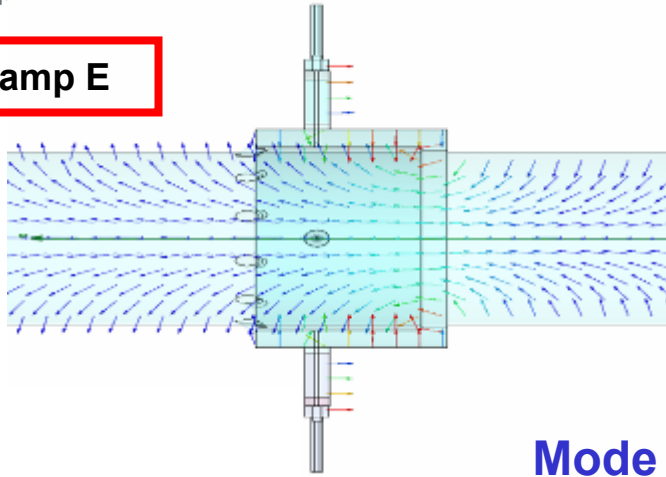




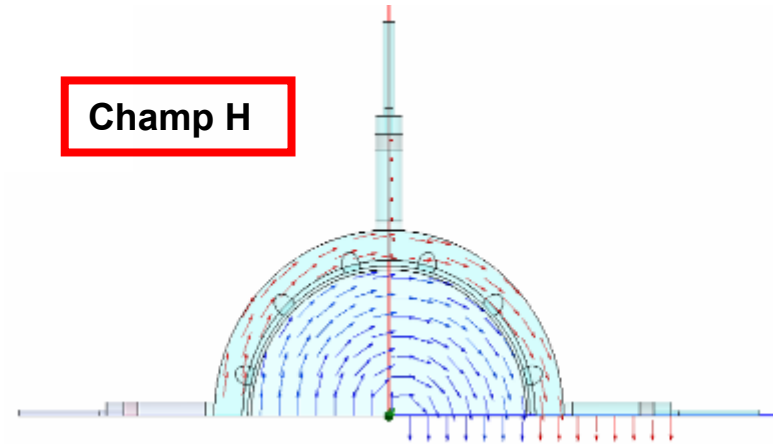
Mode monopolaire ($f = 1255 \text{ MHz}$)

Simulé avec HFSS

Champ E



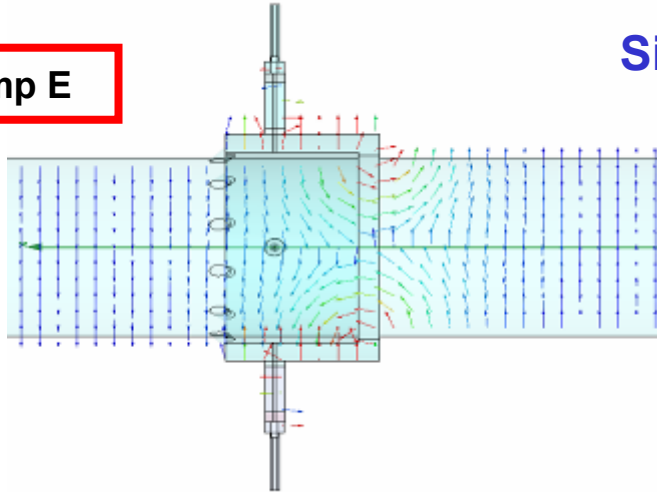
Champ H



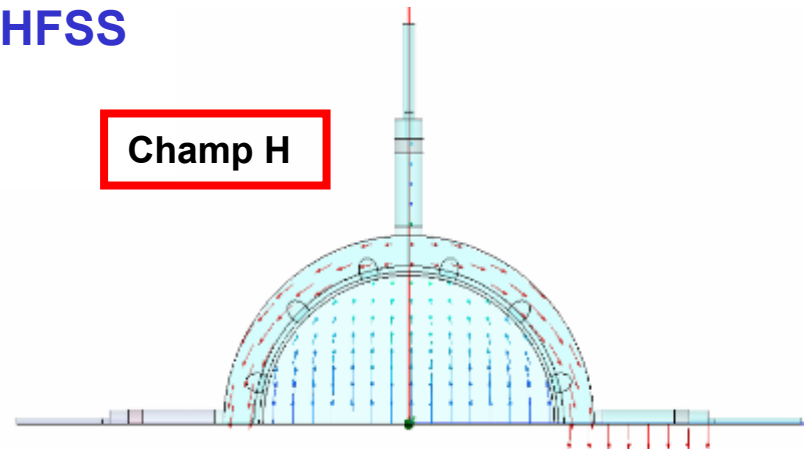
Mode dipolaire ($f = 1724 \text{ MHz}$)

Simulé avec HFSS

Champ E



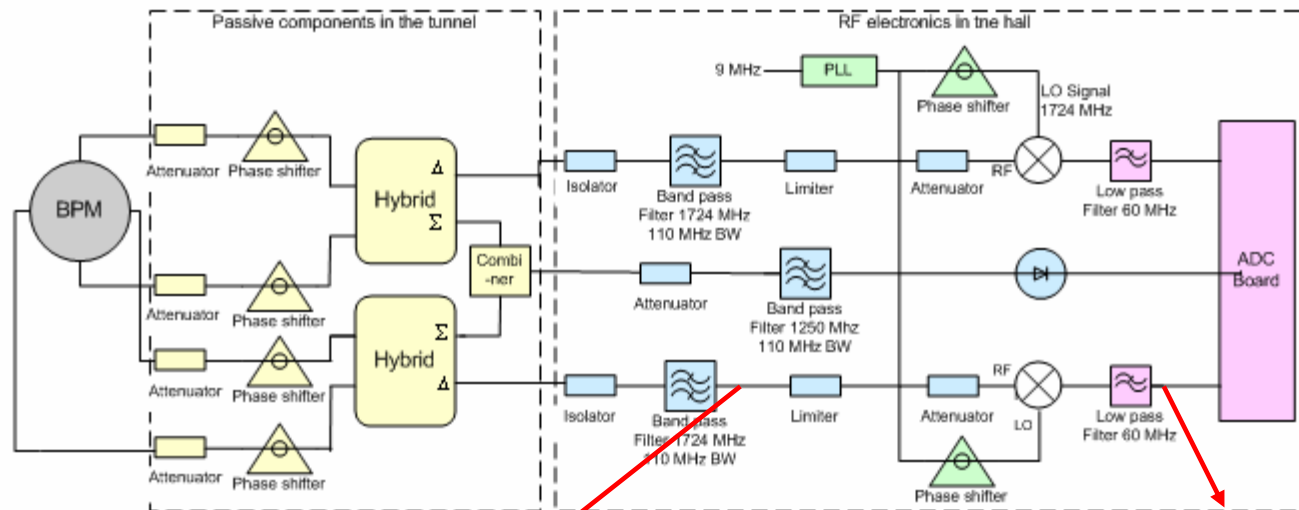
Champ H



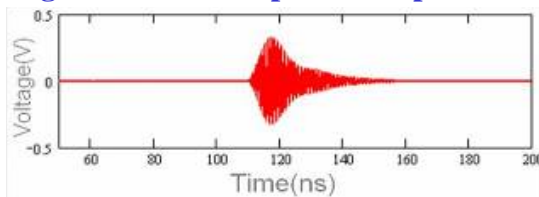
Traitement du signal



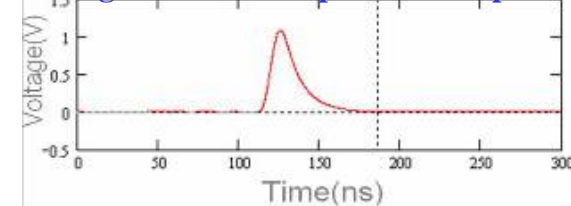
- La réjection du mode monopolaire, sur le canal Δ s'effectue en 3 étapes:
 - une réjection basée sur un coupleur hybride ayant une isolation supérieure à 20 dB dans la bande de fréquence 1-2 GHz.
 - un filtre passe-bande centré à la fréquence du mode dipolaire. Sa bande passante de 110 MHz limite aussi le bruit.
 - la détection synchrone.



Signal RF simulé après filtre passe bande



Signal IF simulé après le filtre passe bas





- Afin de connaître les performances du BPM, un modèle (**cavité+traitement du signal**) est élaboré avec l'outil Mathcad et est basé sur des transformées de Fourier.
- La simulation couvre une bande de 0 à 20 GHz.
- Chaque mode de la cavité est modélisé par un circuit RLC et la réponse de la cavité BPM en mode "single bunch" dépend de la fréquence f_i et du couplage Q_i .

$$S_i = \Phi(t) \left[V_i \exp\left(-\frac{w_i \cdot t}{2 \cdot Q_i}\right) \cos\left(w_i \cdot t - \frac{w_i \cdot \sin(a_i \cdot t)}{2 \cdot Q_i \cdot a_i}\right) \right]$$

avec

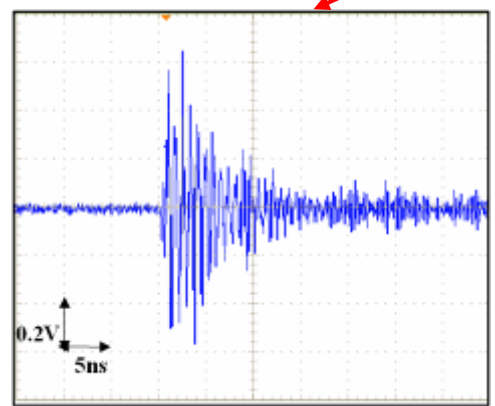
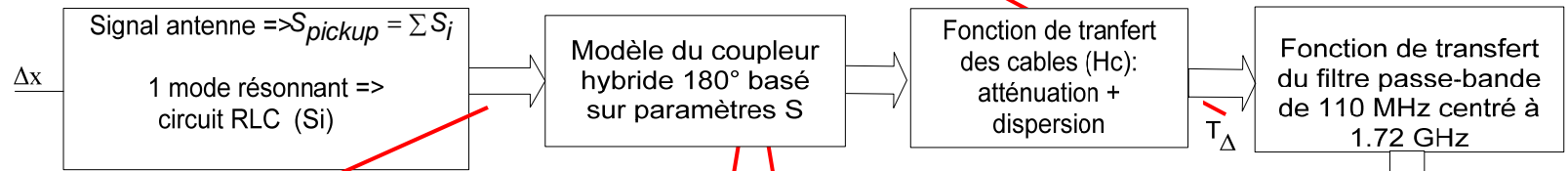
$$a_i = w_i \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_i^2}} \quad \text{et} \quad V_i = \sqrt{\frac{w_i^2 \cdot (R/Q)_i \cdot q^2 \cdot R_0}{\zeta_i \cdot Q_i}}$$

où $\Phi(t)$ = fonction heaviside, q = charge, $R_0 = 50 \, \Omega$, et $\zeta_i = 4$ si c'est un mode monopolaire où $\zeta_i = 2$ si c'est un mode dipolaire.

Modèle Mathcad (2)

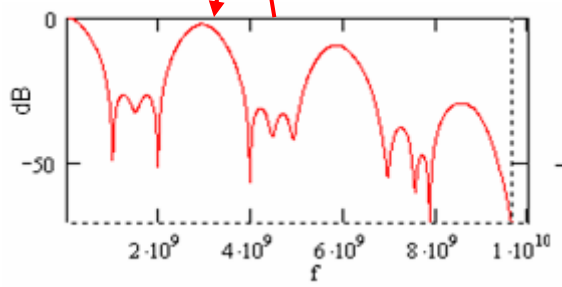


$$T_{\Delta} = [((S_m - S_d)H_c.H_{diff1}) + ((S_m + S_d)H_c.H_{diff2})]$$



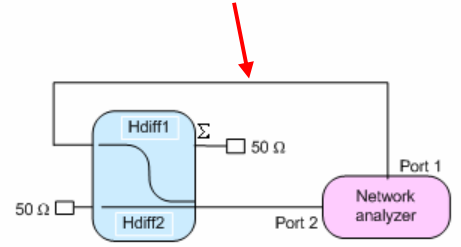
Signal mesuré sur une antenne

La puissance maximale du signal "sum" après les cables a été mesurée et est autour de 36 dBm. Par la simulation cette puissance vaut 34 dBm => modèle Mathcad validé

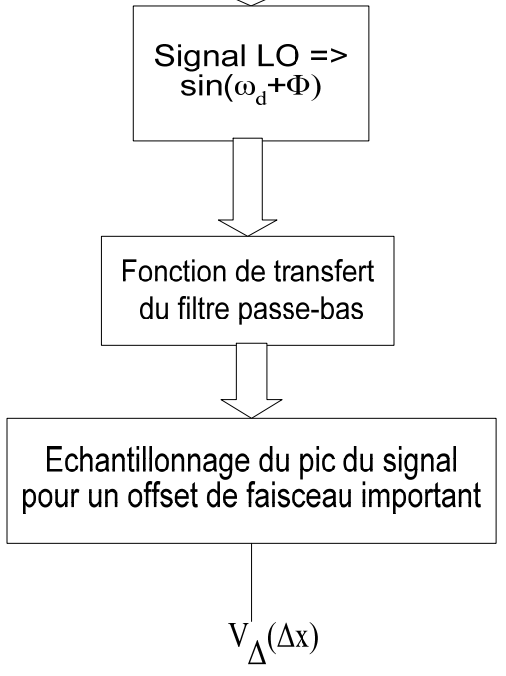


$$I_{hybrid} = 20 * \log(|H_{diff1} + H_{diff2}|)$$

Isolation de l'hybride 180°



Mesure des paramètres S de l'hybride 180°





➤ Le signal est donné par le modèle Mathcad (cavité+ traitement du signal).



➤ Le bruit est déterminé par le bruit thermique, le bruit venant du traitement du signal mais on est limité par le bruit à l'entrée de l'ADC.

Simulation du BPM réentrant avec un offset du faisceau de 10 mm

| Système | Résolution simulée (μm) |
|---|--------------------------------------|
| 75 m câbles - Bruit ADC=200 μm crête | 3.65 |

Résolution ~ 4 μm avec une dynamique de mesure de +/- 10 mm.

➤ **Prochain développement électronique:** ajout d'un amplificateur pour diminuer la dynamique de mesure mais améliorer la résolution

| Système | Résolution simulée (μm) |
|---|--------------------------------------|
| 75 m câbles - Bruit ADC=200 μm crête | 0.45 |

Simulation du BPM réentrant avec un offset du faisceau de 1 mm

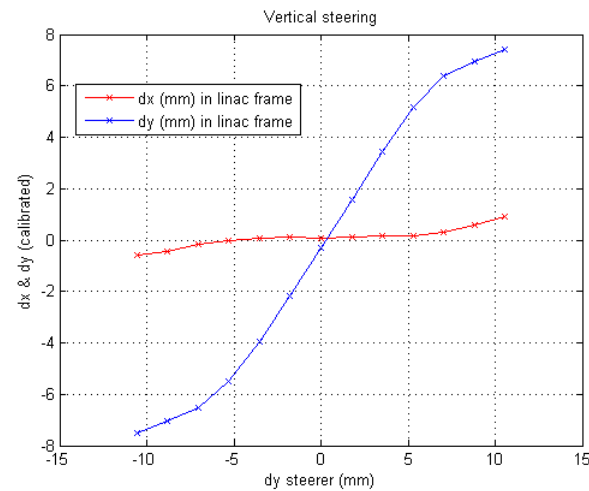
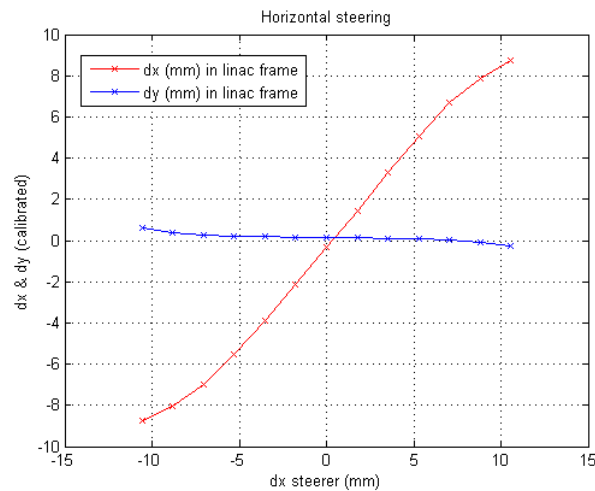
Résolution < 1 μm avec une dynamique de mesure de +/- 1 mm



➤ La position relative du faisceau est déterminée en utilisant une matrice de transfert entre le steerer et le BPM



➤ Les tests faisceaux effectués à température ambiante sont très **encourageants**.



Calibration avec faisceau effectuée dans le déplacement horizontal (à gauche) et vertical (à droite)

- **Bonne linéarité de +/- 5 mm**
- **Mesure de la résolution : corrélation de la lecture d'un BPM dans un plan et de la lecture des autres BPMs dans le même plan (utilisation de la régression linéaire)**
- **Résolution RMS autour de 4 μm pour le canal Y et 8 μm pour le canal X**

Résolution Temporelle



➤ “Damping time” donné par la formule suivante :

$$\tau = \frac{1}{\pi * BW}$$

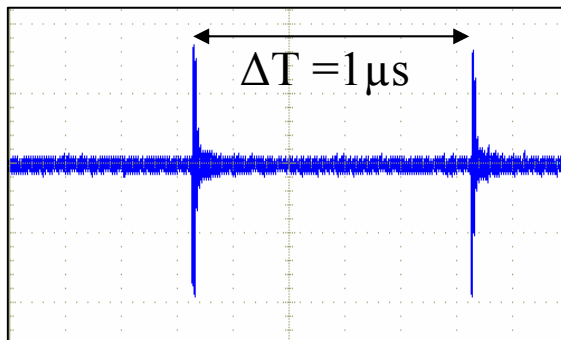
Avec $BW = \frac{f_d}{Q_d}$

f_d : fréquence du mode dipolaire

Q_d : facteur de qualité du mode dipolaire

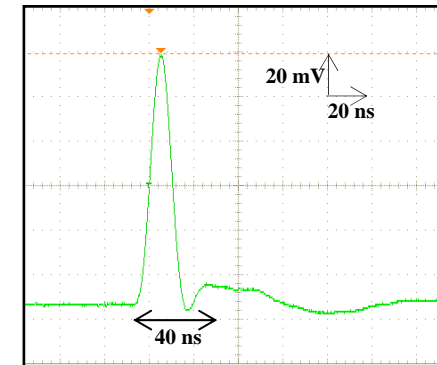
| | Damping Time (cavité) | Résolution temporelle cavité+ électronique |
|-----|--------------------------|---|
| BPM | 9.4 ns | 40 ns |

Résolution temporelle du BPM réentrant



Signal RF mesuré sur une antenne

Signal à la sortie du traitement du signal



Possibilité de faire des mesures paquet par paquet



- ❖ **Caractéristiques du BPM à cavité réentrante:**
 - **Opérationnel dans un environnement propre**
 - **Opérationnel à températures cryogénique et ambiante**
 - **Large diamètre du tube faisceau (78 mm)**
 - **Résolution de position supérieure à 10 μm avec une dynamique de déplacement de ± 5 mm**
 - **Résolution temporelle autour de 40 ns**

- ❖ **Ce BPM apparaît comme un bon candidat pour être installé dans les cryomodules du XFEL (DESY) et de l'ILC.**