



Simulations et mesures de l'impédance de l'anneau de stockage de ThomX

Alexis Gamelin, Christelle Bruni, Thomas Chabaud, Vincent Chaumat,
Eric Guerard, Damien Le Guidec, Bruno Leluan, Pierre Lepercq,
Rodolphe Marie, Filip Rudnyckyj, Stephane Jenzer (LAL)
Moussa Elajjouri (Soleil)



Buts de l'étude

Simulation de l'impédance des éléments de l'anneau

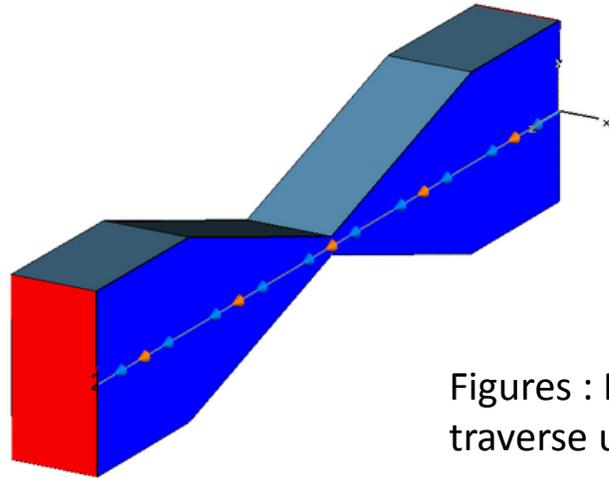
Développement d'un banc de mesure pour vérifier les simulations



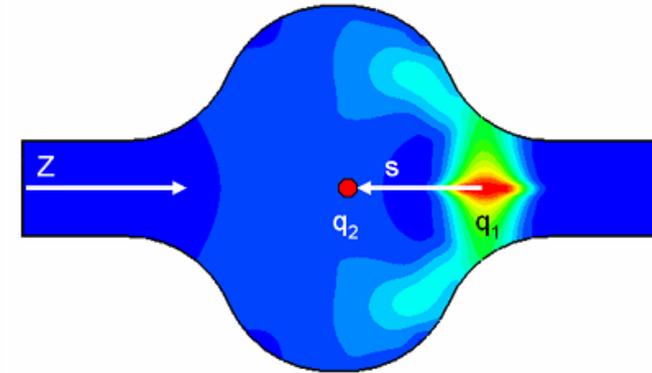
Simulation des effets de l'impédance sur la dynamique faisceau

Wakefield et Impédance

Qu'est ce qu'un champ de sillage ou wakefield ?



Figures : Norme du champ électrique lorsqu'un faisceau traverse un collimateur ou une cavité. (CST.com)



Des champs électromagnétiques sont produits lorsqu'une particule chargée traverse une chambre à vide :

- dont la section varie
 - dont la conductivité n'est pas infinie
- ➔
- Wakefield géométrique
 - Wakefield « Resistive Wall »

Ces champs EM sont produits car la charge image qui se propage le long des chambre à vide est perturbée.

Wakefield et Impédance

Le wakefield décrit la variation d'impulsion d'une charge q_2 qui suit à une distance s une charge q_1 qui produit un champ EM :

$$\vec{W}(s) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} [\vec{E} + c \vec{e}_z \times \vec{B}] dz$$

L'impédance faisceau correspond au même phénomène physique que le wakefield mais observé dans l'espace des fréquences :

$$\vec{Z}(\omega) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{W}(s) e^{-\frac{j\omega s}{c}} \frac{ds}{c}$$

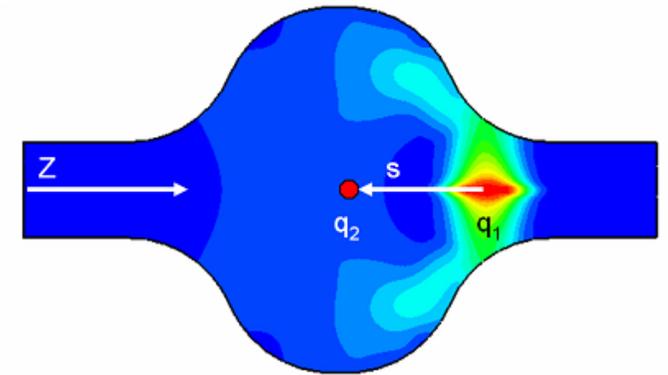


Figure : Une particule source q_1 produit un champ EM qui va impacter la particule q_2 . (CST.com)

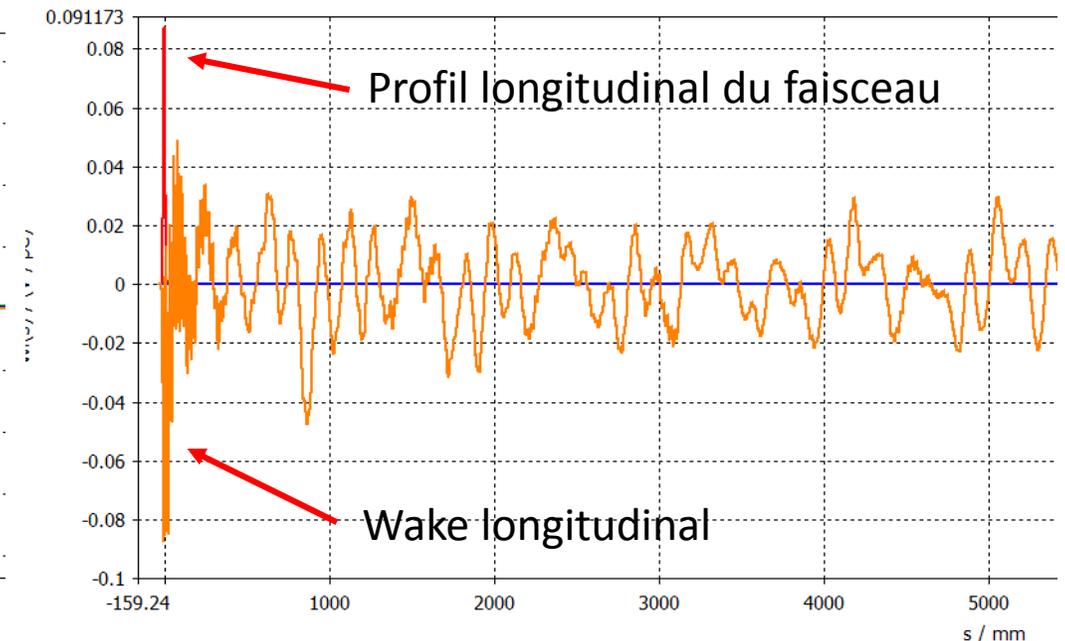
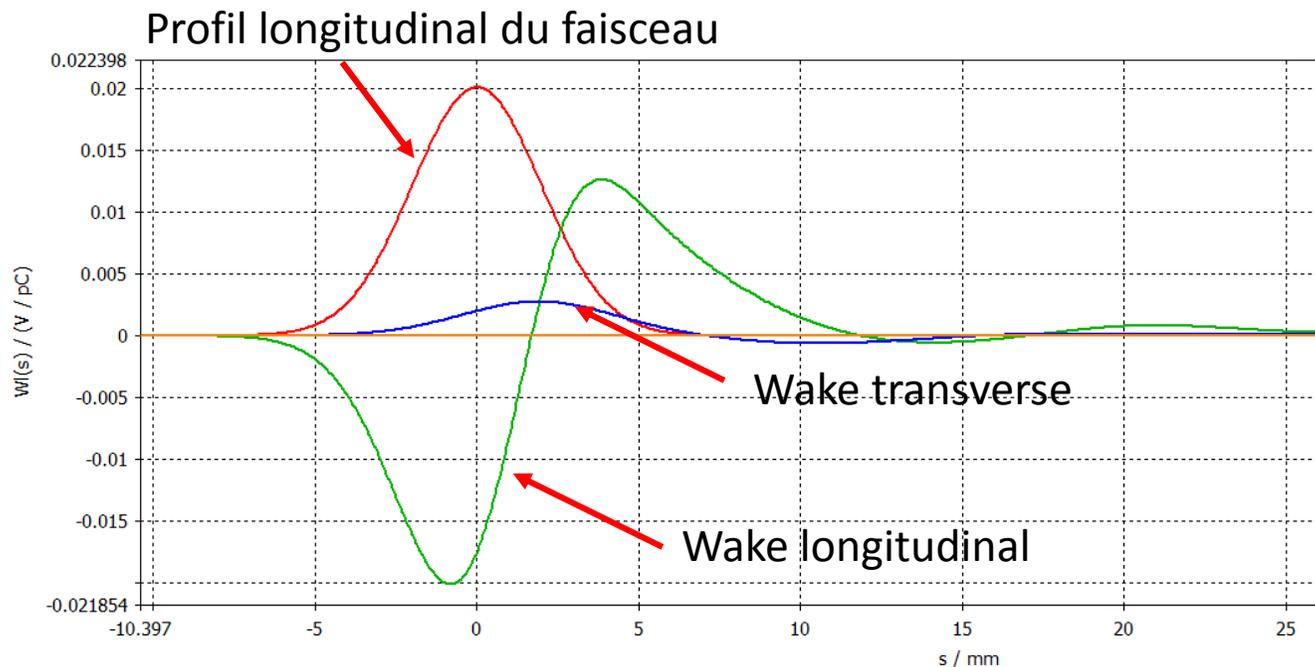
Wakefield et Impédance

On distingue 2 types de wakefield :

- Wake à portée courte
- Wake à portée longue

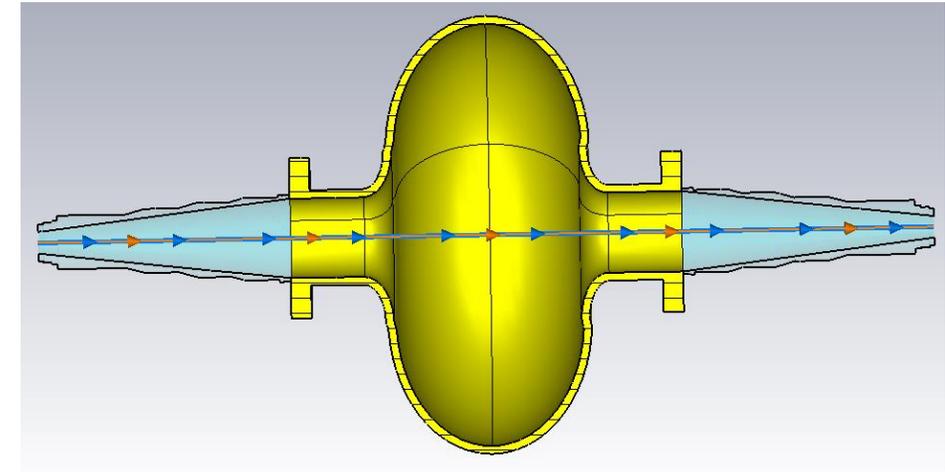


- Peu d'oscillations donc impédance « large bande », agit sur un seul tour, produit par : septum, port de pompage, soufflet, chambre IP
- Beaucoup d'oscillations donc impédance « résonante », agit sur plusieurs tours, produit par : cavité, BPM, FBT stripline



Cavité RF + Tapers

- Le wake crée par la cavité a une portée très longue, sur 100 m de wake on n'observe pas de décroissance du wake.
- L'absence de décroissance empêche d'évaluer correctement l'amplitude des pics du spectre d'impédance.

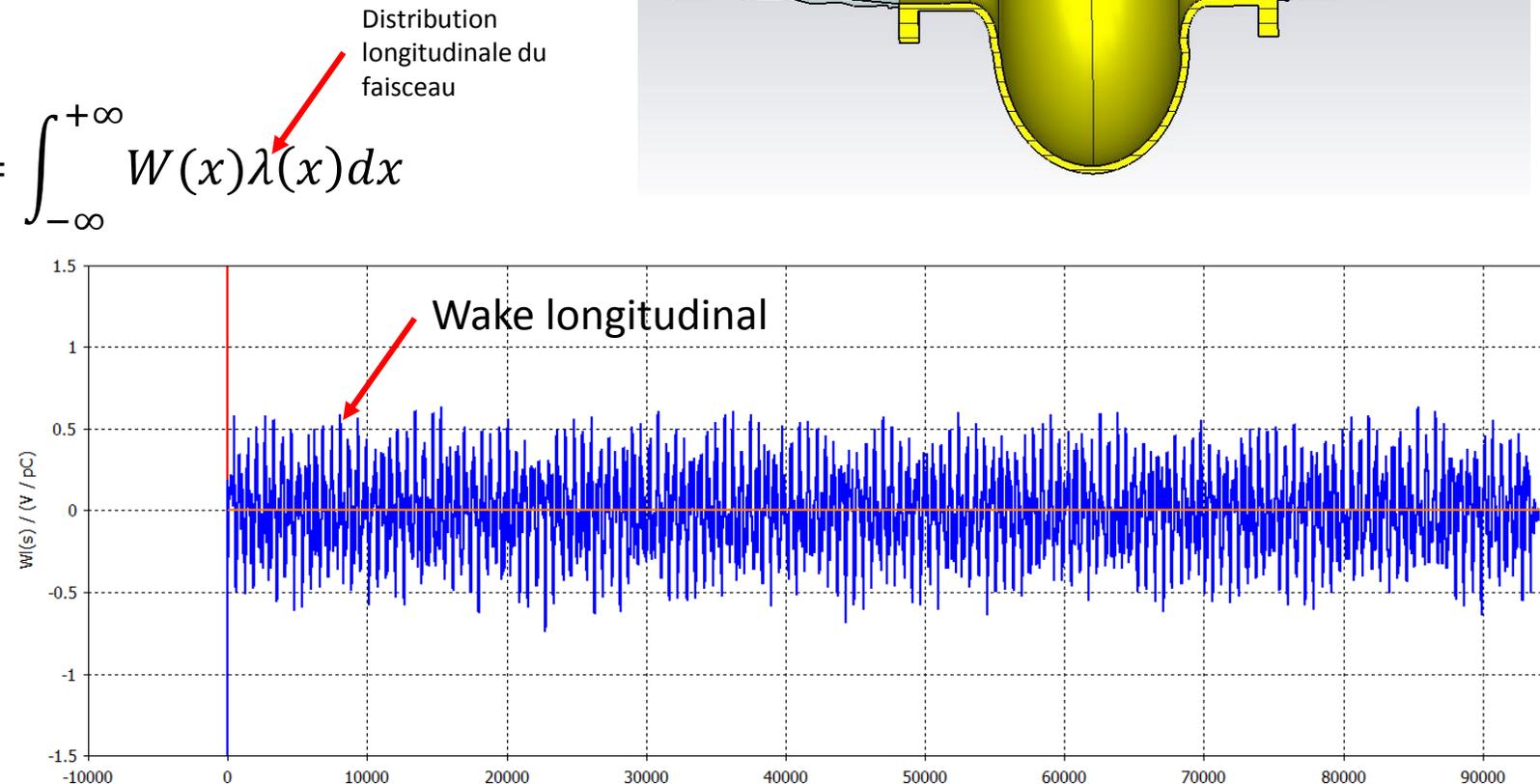


On définit le wake loss factor par :

$$k = \int_{-\infty}^{+\infty} W(x)\lambda(x)dx$$

Cela correspond à la perte d'énergie du faisceau dû au wake.

Ici $k = 1,3 \text{ V/pC}$ mais cette valeur ne prend pas en compte le champ résiduel laissé par le wake excité par le paquet pendant les tours précédents.



Cavité RF + Tapers

Cavité RF + Tapers

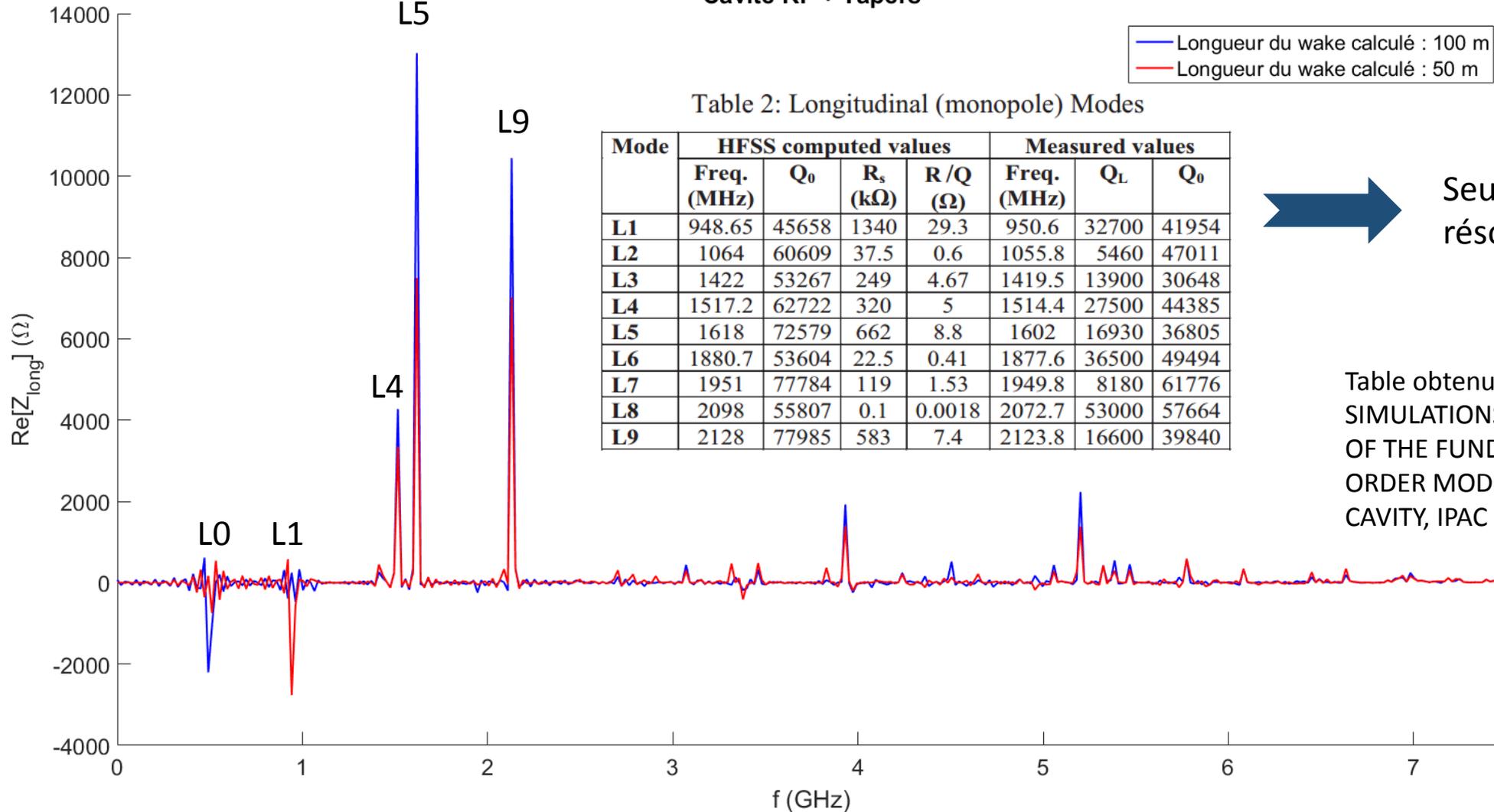


Table 2: Longitudinal (monopole) Modes

Mode	HFSS computed values				Measured values		
	Freq. (MHz)	Q ₀	R _s (kΩ)	R/Q (Ω)	Freq. (MHz)	Q _L	Q ₀
L1	948.65	45658	1340	29.3	950.6	32700	41954
L2	1064	60609	37.5	0.6	1055.8	5460	47011
L3	1422	53267	249	4.67	1419.5	13900	30648
L4	1517.2	62722	320	5	1514.4	27500	44385
L5	1618	72579	662	8.8	1602	16930	36805
L6	1880.7	53604	22.5	0.41	1877.6	36500	49494
L7	1951	77784	119	1.53	1949.8	8180	61776
L8	2098	55807	0.1	0.0018	2072.7	53000	57664
L9	2128	77985	583	7.4	2123.8	16600	39840



Seuls certains modes de résonances sont excités

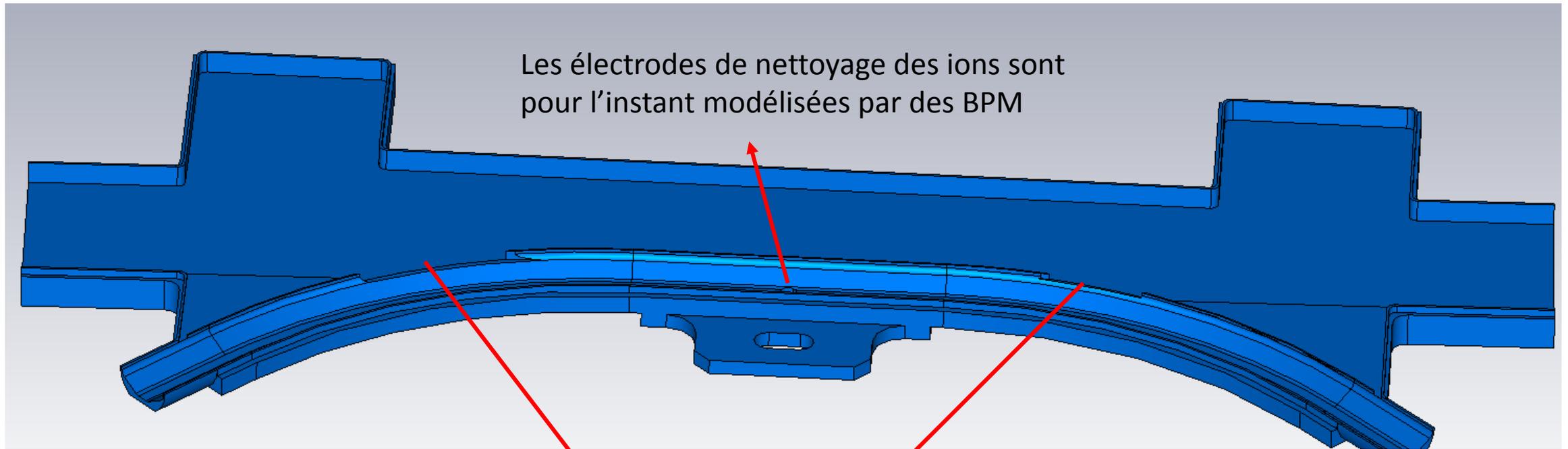
Table obtenue dans :
SIMULATIONS AND RF MEASUREMENTS
OF THE FUNDAMENTAL AND HIGHER
ORDER MODES OF THE THOMX 500 MHz
CAVITY, IPAC 2013, M. El Khaldi et al.

Chambre IP

Il n'est pas possible de simuler des pièces courbes dans CST PS et dans les autres solveurs wakefield 3D existants



Il faut modéliser différemment la chambre IP

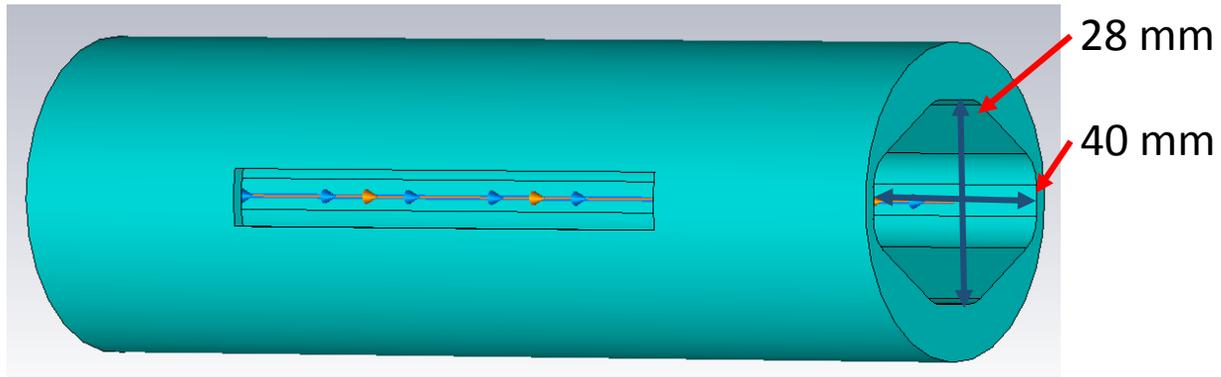


Les électrodes de nettoyage des ions sont pour l'instant modélisées par des BPM

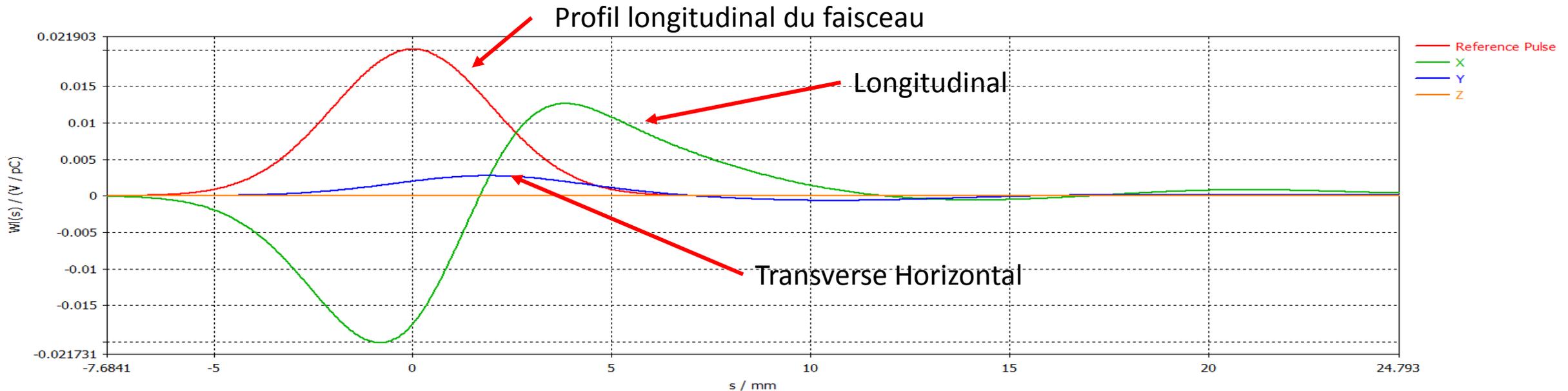
Les deux fenêtres dans les courbures sont modélisées par des fenêtres de tailles équivalentes dans des sections droites.

Chambre IP

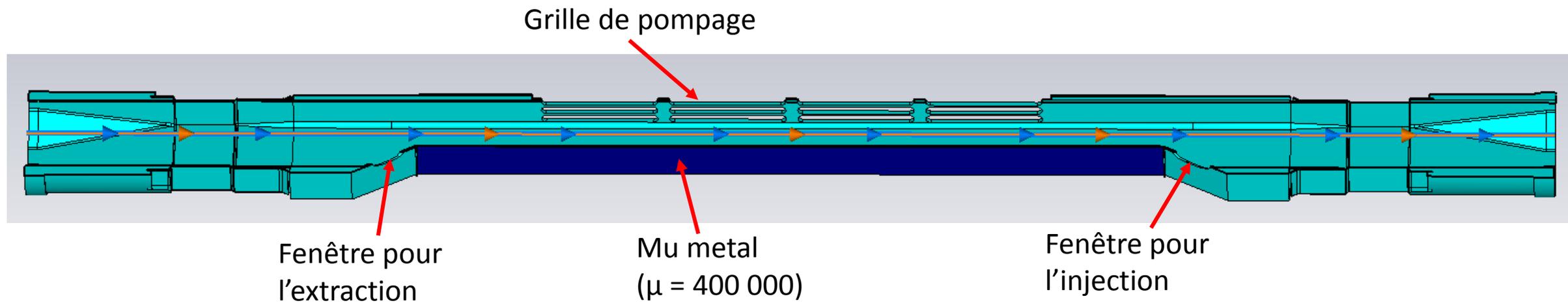
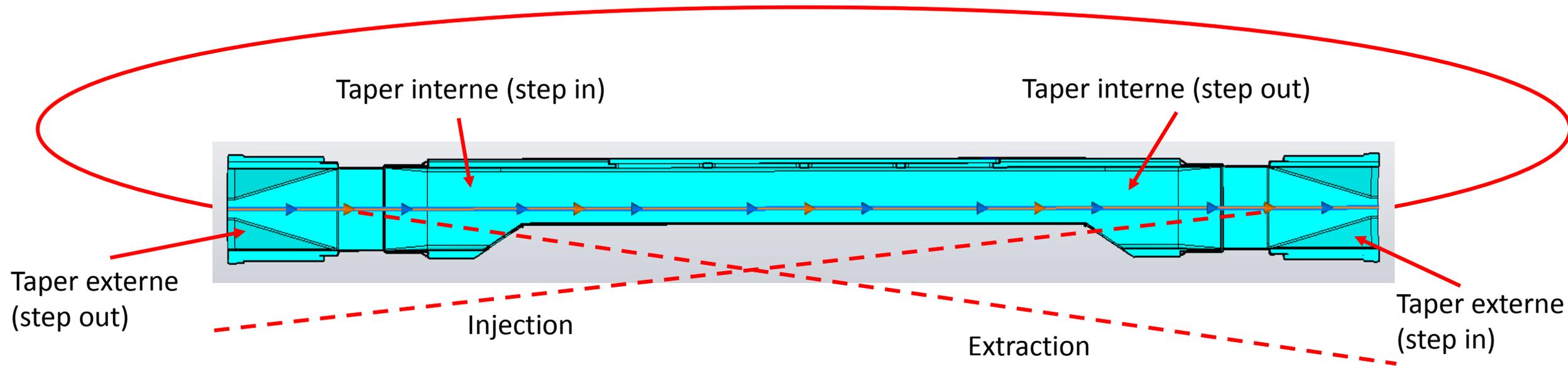
Modélisation d'une fenêtre de la chambre IP :



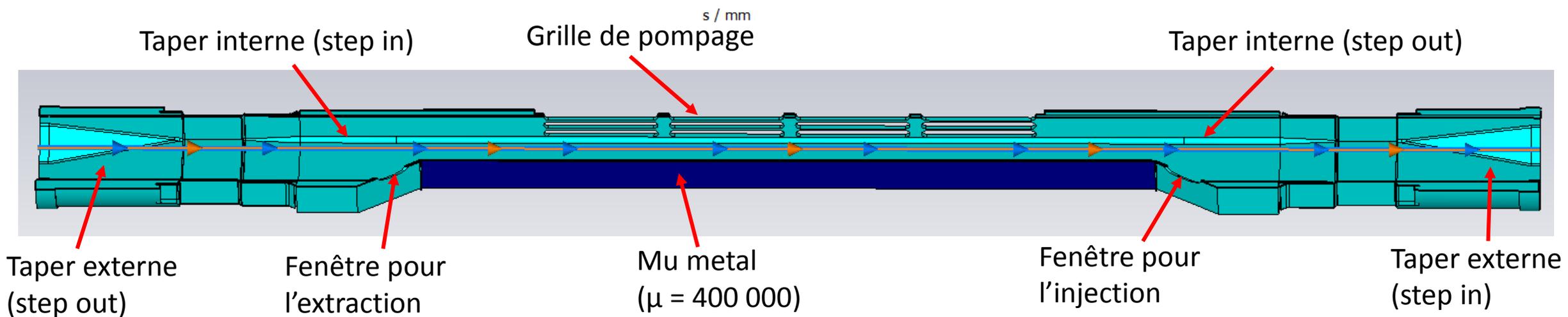
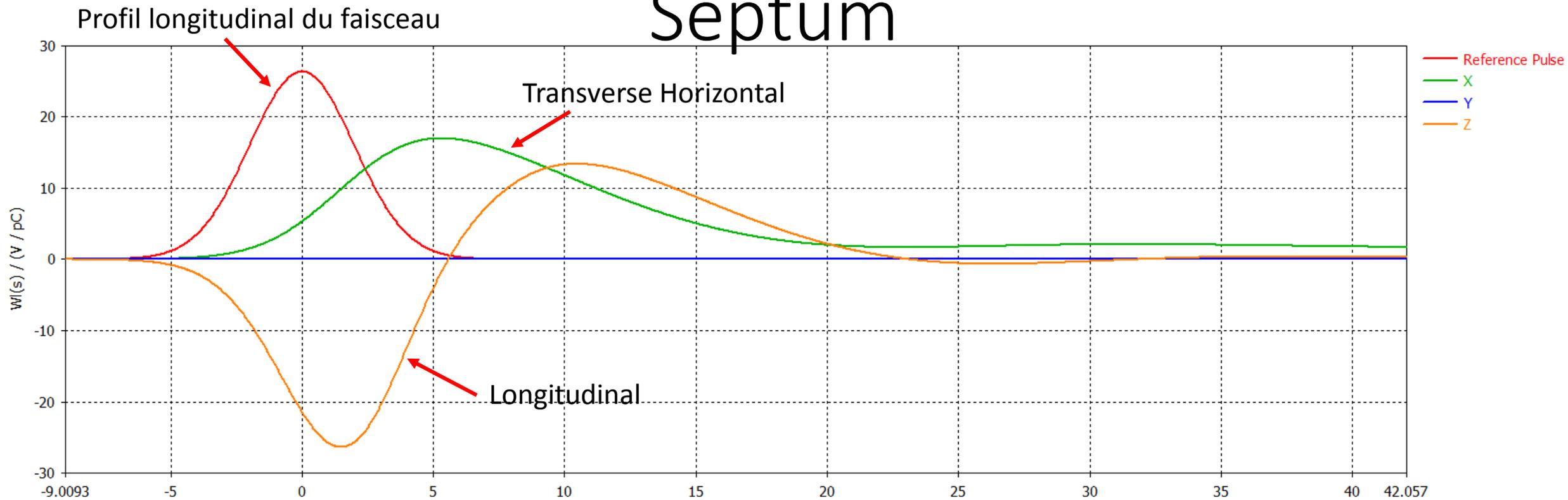
- La majorité du courant image passe par les parties verticales de la chambre à vide car elles sont plus proche du faisceau.
- La fenêtre étant placée sur la partie horizontale de la chambre, l'effet est faible : $K = 9 \text{ E-3 V/pC}$



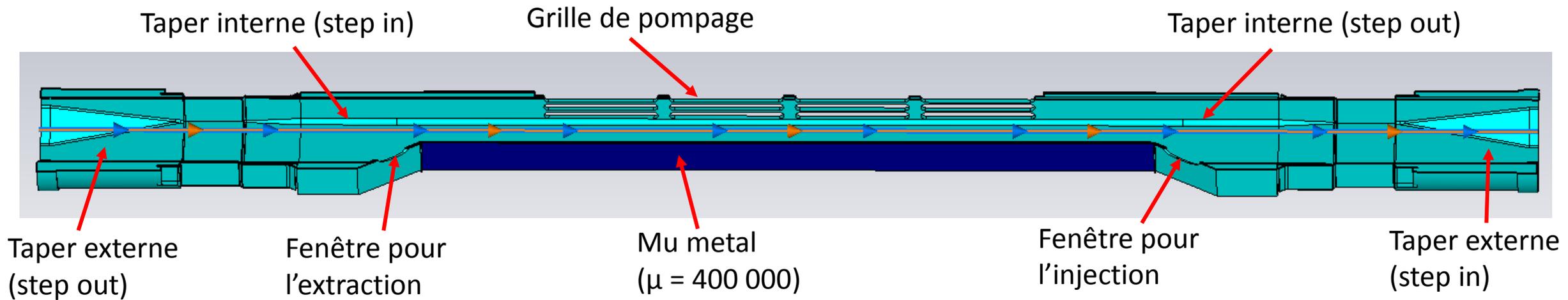
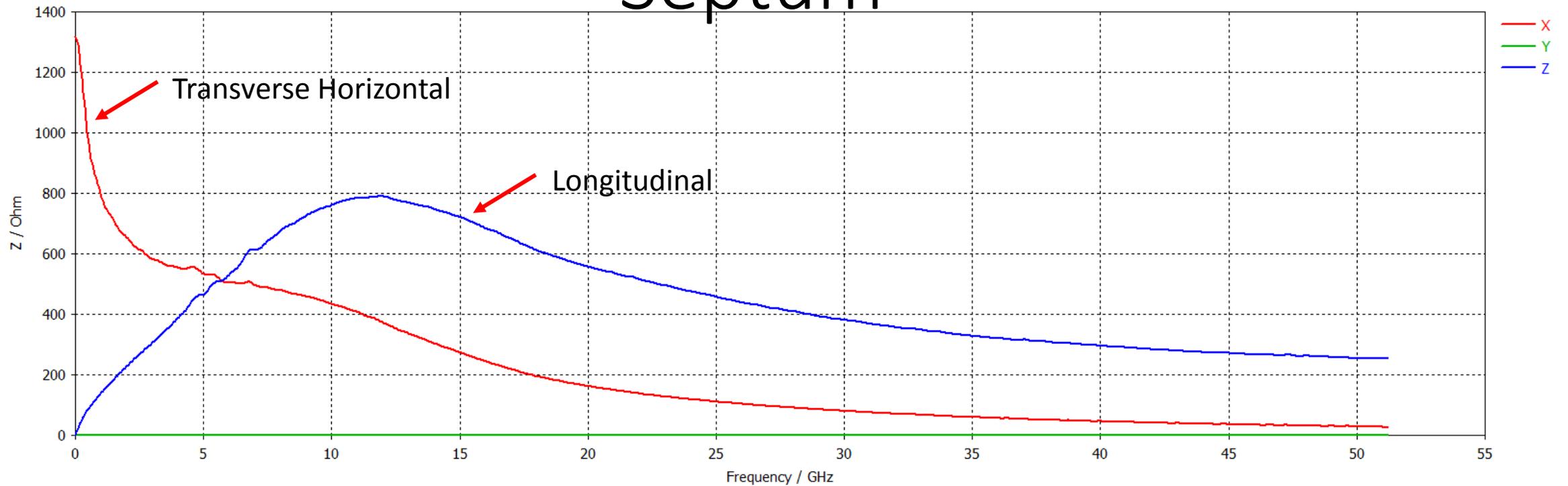
Septum



Septum



Septum



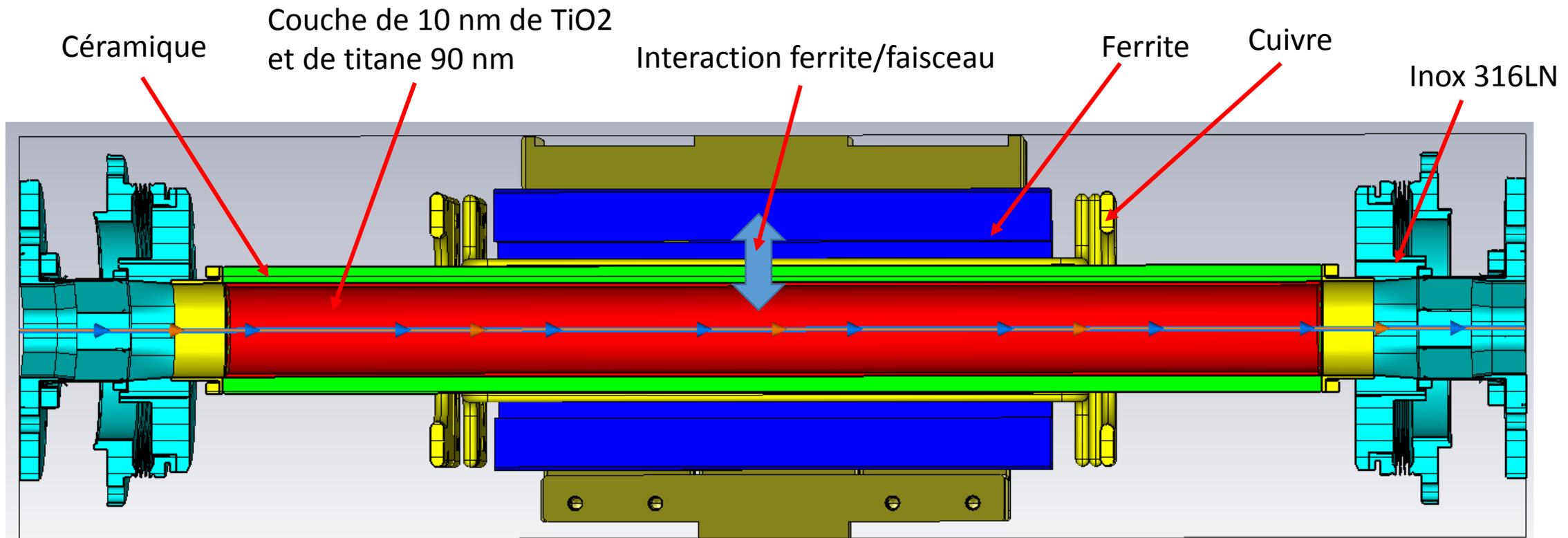
Kicker

Le kicker est la pièce la plus complexe vis-à-vis de l'estimation de l'impédance :

- Dépôt de 100 nm de titane, en partie oxydé sur 10 nm, inférieur à l'épaisseur de peau
- Chambre à vide en céramique, laissant passer les champs EM
- Ferrite va interagir avec le faisceau



A priori impossible à simuler, il faut utiliser un modèle analytique



Bilan impédance longitudinale

Nom de l'élément	Nombre dans l'anneau	Loss factor d'un élément (V/pC) pour un paquet de $\sigma = 2 \text{ mm} = 6,6 \text{ ps}$	Effet total en %
BPM4	4	2,5 E-2	0,5 %
BPM6	4	3,7 E-2	0,7 %
BPM8	8	4,9 E-2	1,9 %
Port de pompage	13	3,9 E-2	2,5 %
Soufflet	18	1,5 E-2	1,3 %
Kicker	2	?	?
Septum	1	17,85	86,4 %
Chambre IP	1	1,9 E-2	0,1 %
FBT Stripline	1	7,35 E-2	0,4 %
Cavité RF + Tapers	1	1,3	6,3 %
Total		20,66	

Principe de la mesure par fil

- La distribution de champ électromagnétique d'un faisceau ultra relativiste est très proche de celle d'une ligne coaxiale de transmission TEM.
- Il est possible de reproduire et de mesurer ces champs en insérant un fil dans l'objet à mesurer (DUT).
- Un analyseur de réseau envoie un signal test à travers l'objet à mesurer et calcule les paramètres S_{21} et S_{11} correspondant respectivement aux ondes transmises et réfléchies.
- La mesure est faite par comparaison avec la mesure d'une pièce de référence (REF) : une chambre à vide nue.

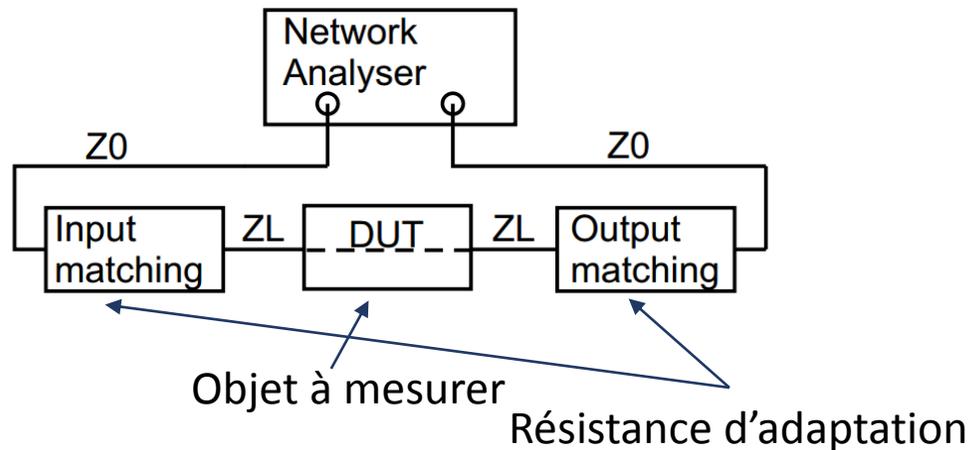


Figure : Principe de la mesure de l'impédance longitudinale

$$Z = -2Z_L \ln \frac{S_{21,DUT}}{S_{21,REF}}$$

Avec :

$$Z_L = \frac{Z_v}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \quad Z_v \approx 376 \Omega$$

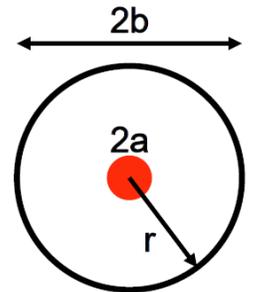
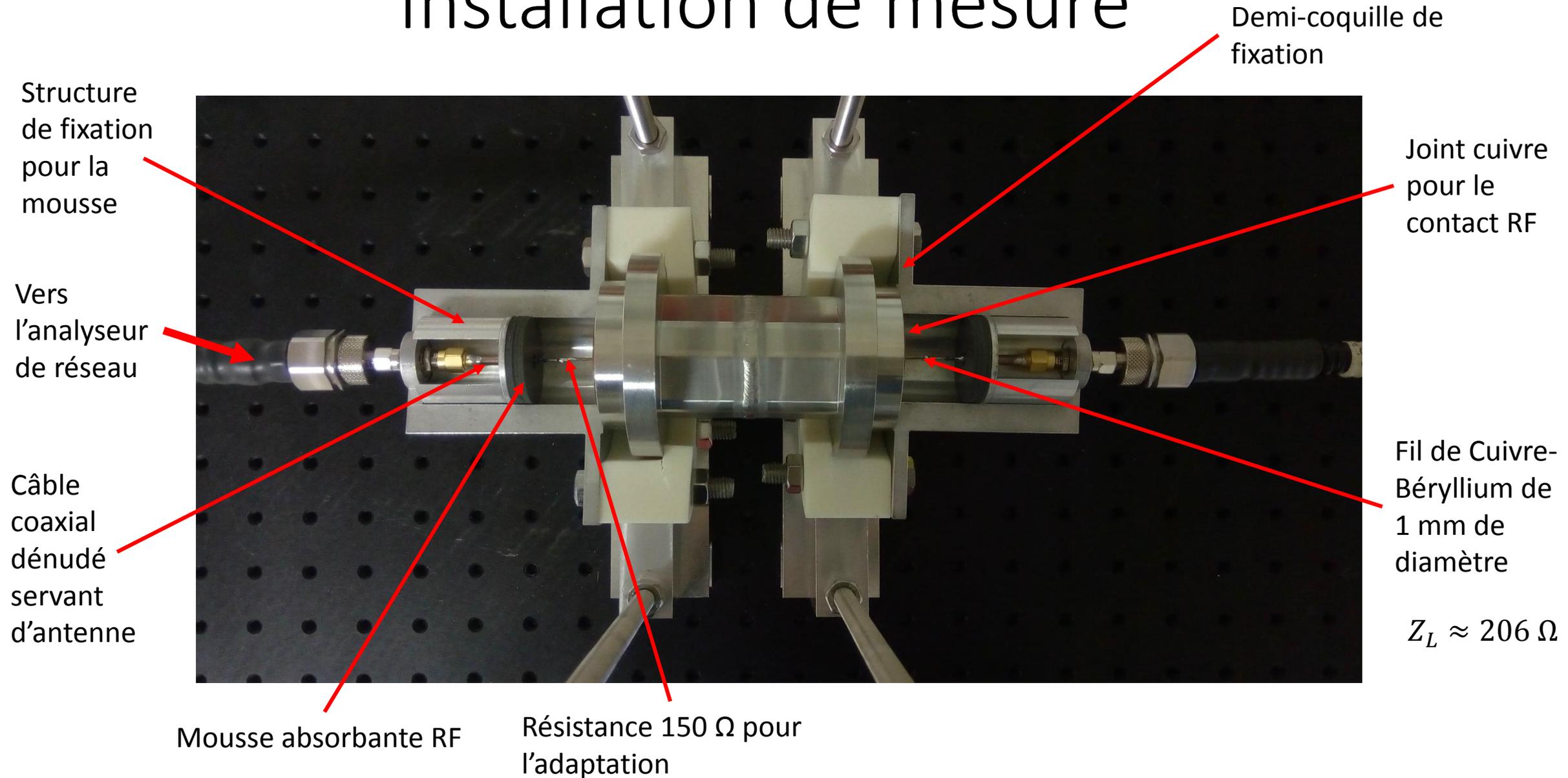


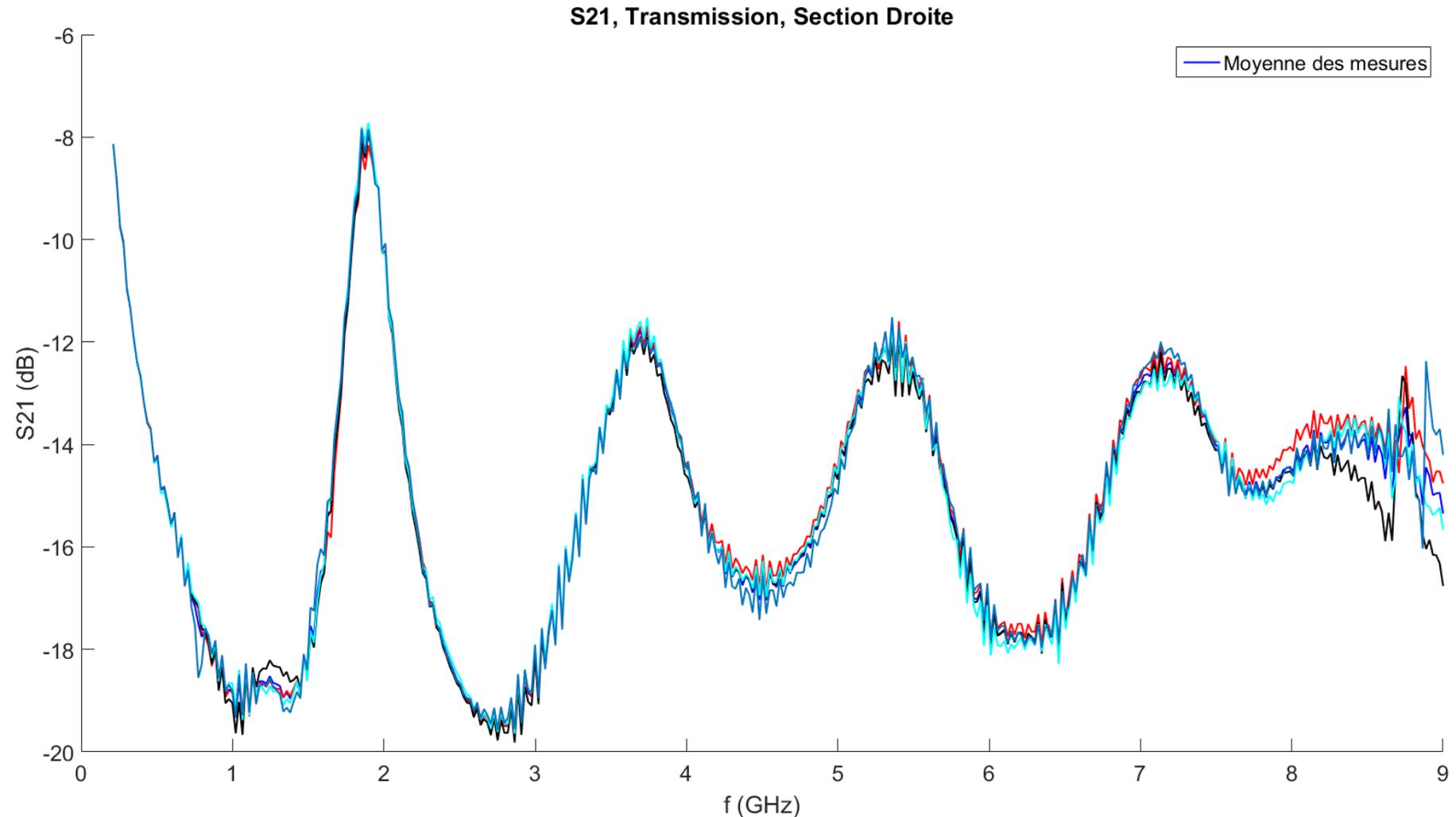
Figure : Ligne coaxiale formée par une chambre à vide circulaire et un fil

Installation de mesure



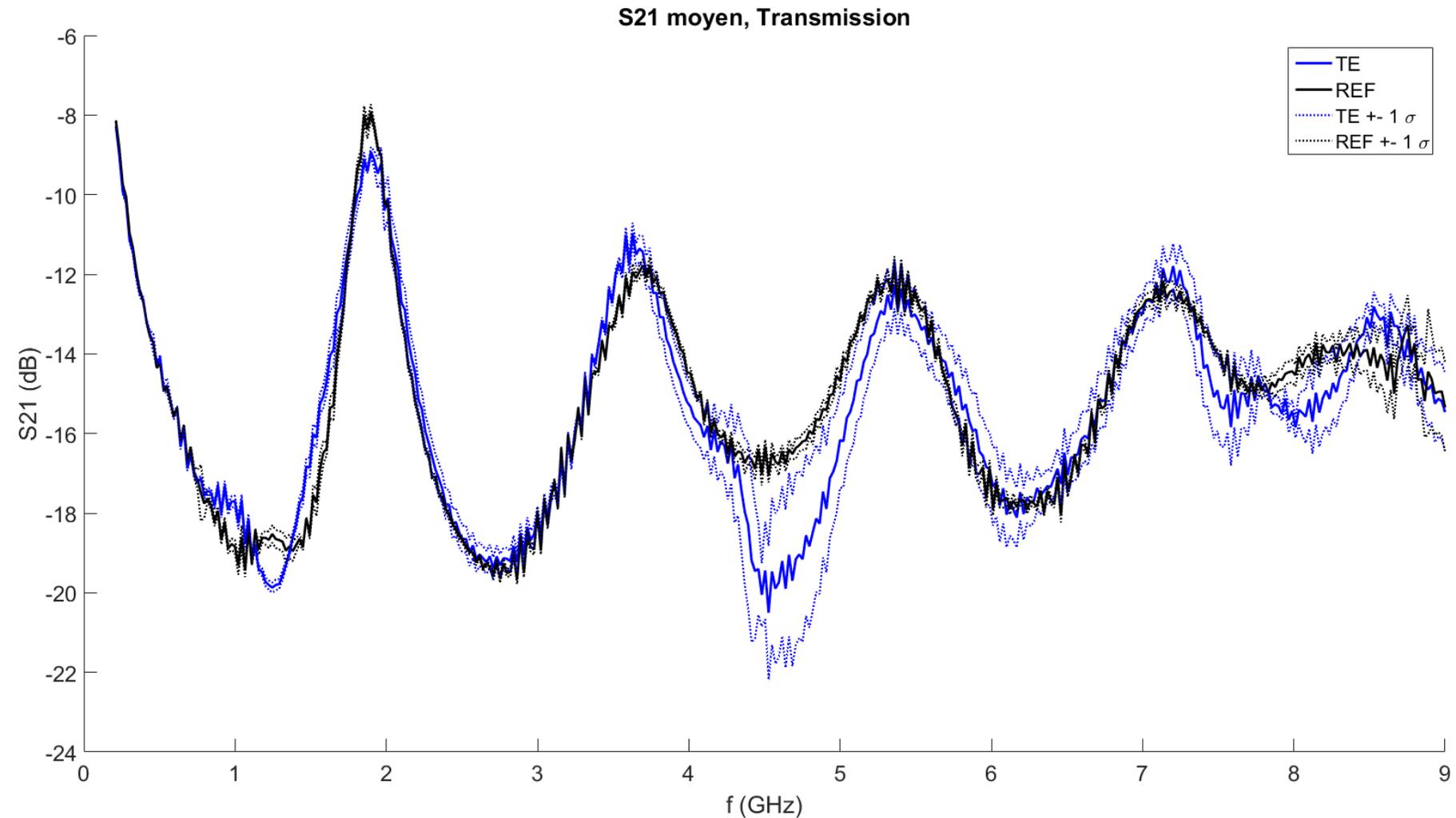
Mesure et analyse de la référence

- On effectue plusieurs mesures de la même pièce pour tester la répétabilité de la mesure.
- Plusieurs facteurs provoquent les variations : tension du fil, positionnement de la mousse absorbante, soudures, ...
- Entre chaque mesure on reprend les soudures et la tension du fil pour estimer ces biais.



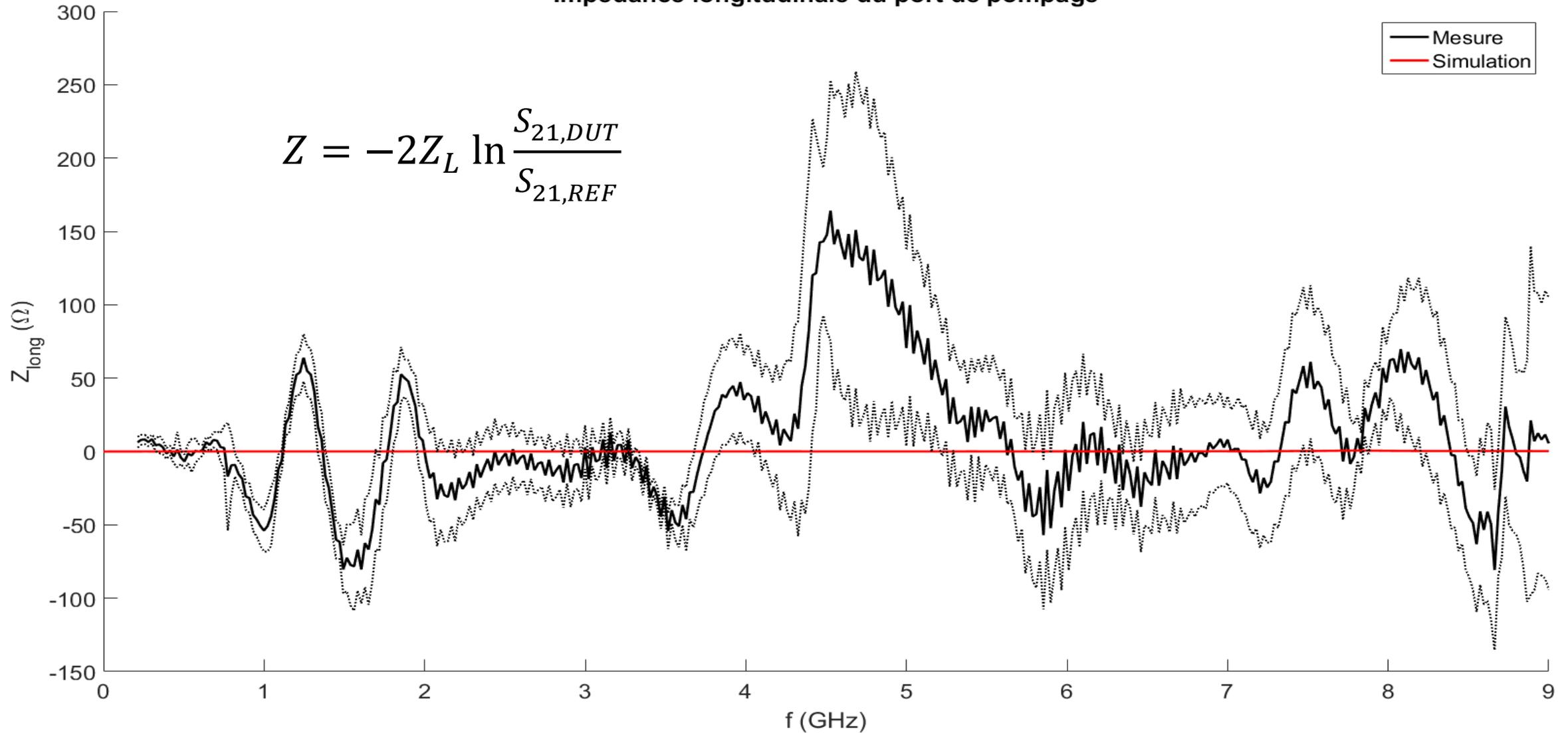
Mesure d'un port de pompage (TE)

- On prend la moyenne de plusieurs mesures du S21
- La déviation standard sur chaque série de mesure donne une indication de l'erreur : $\pm 100 \Omega$

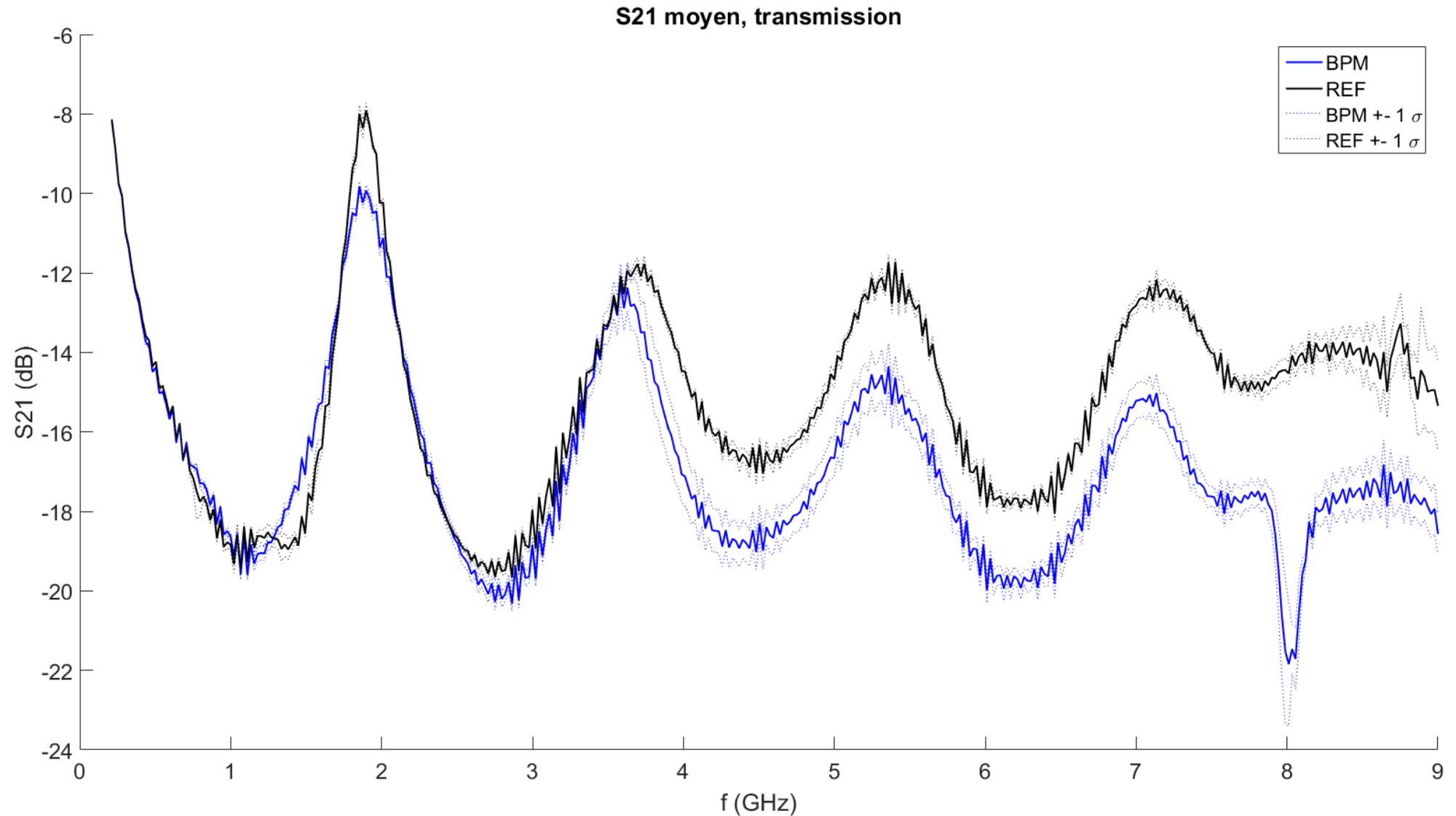


Impédance mesurée du port de pompe

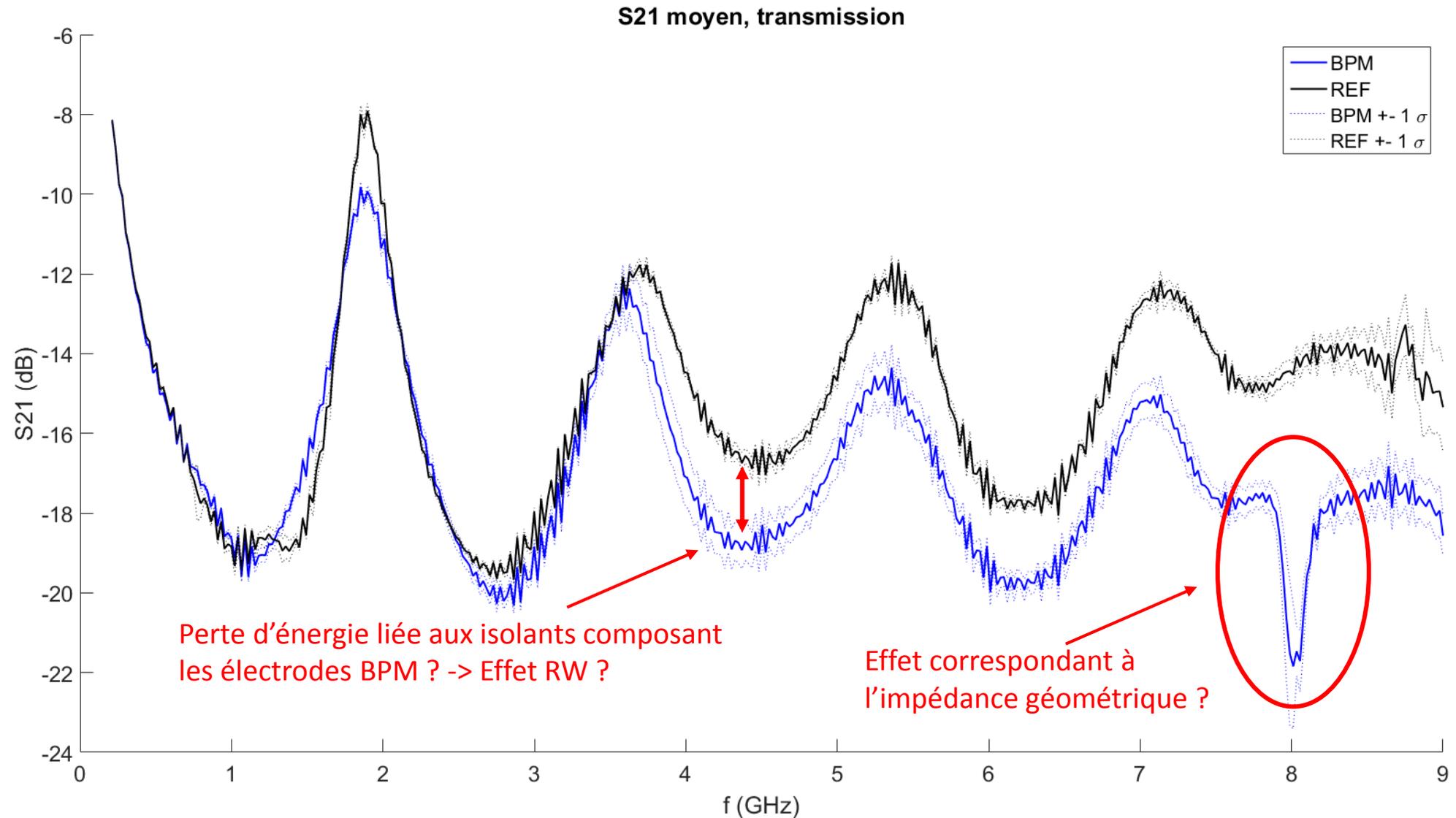
Impedance longitudinale du port de pompe



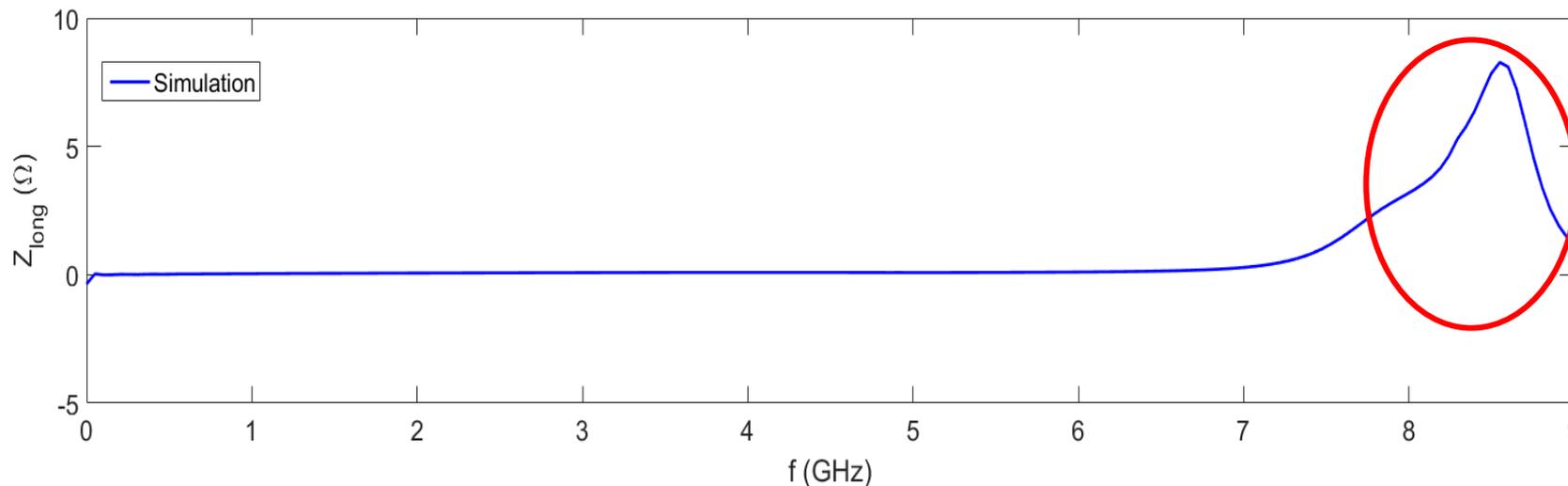
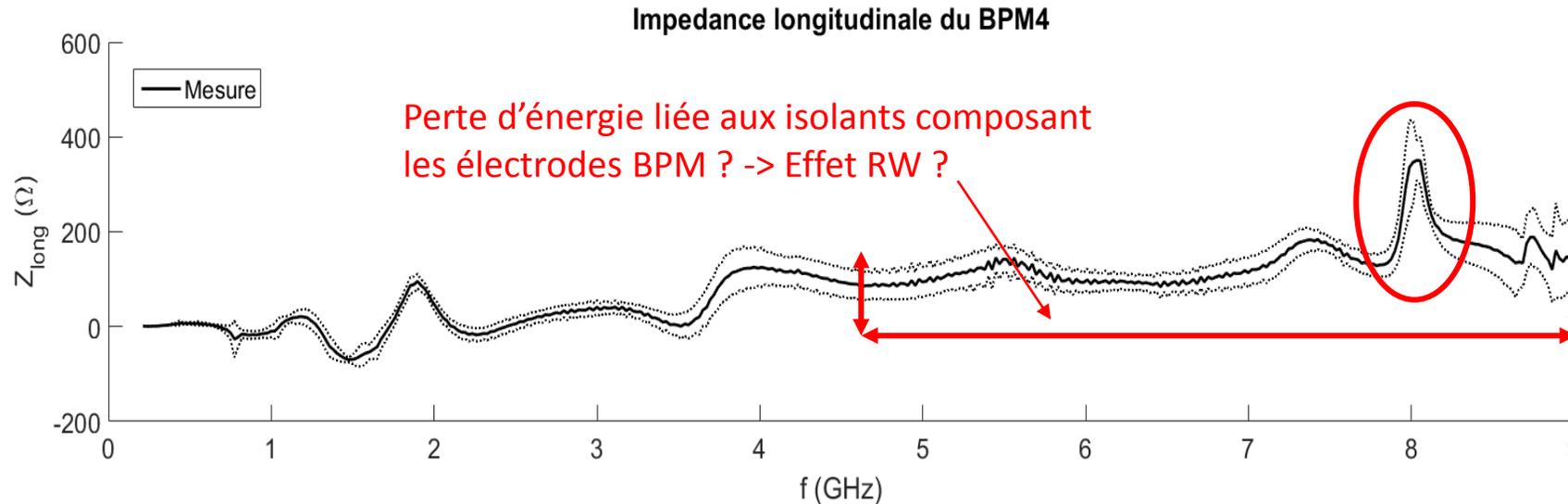
Mesure du BPM4



Mesure du BPM4



Impédance mesurée du BPM4



Mesure/Simulation :

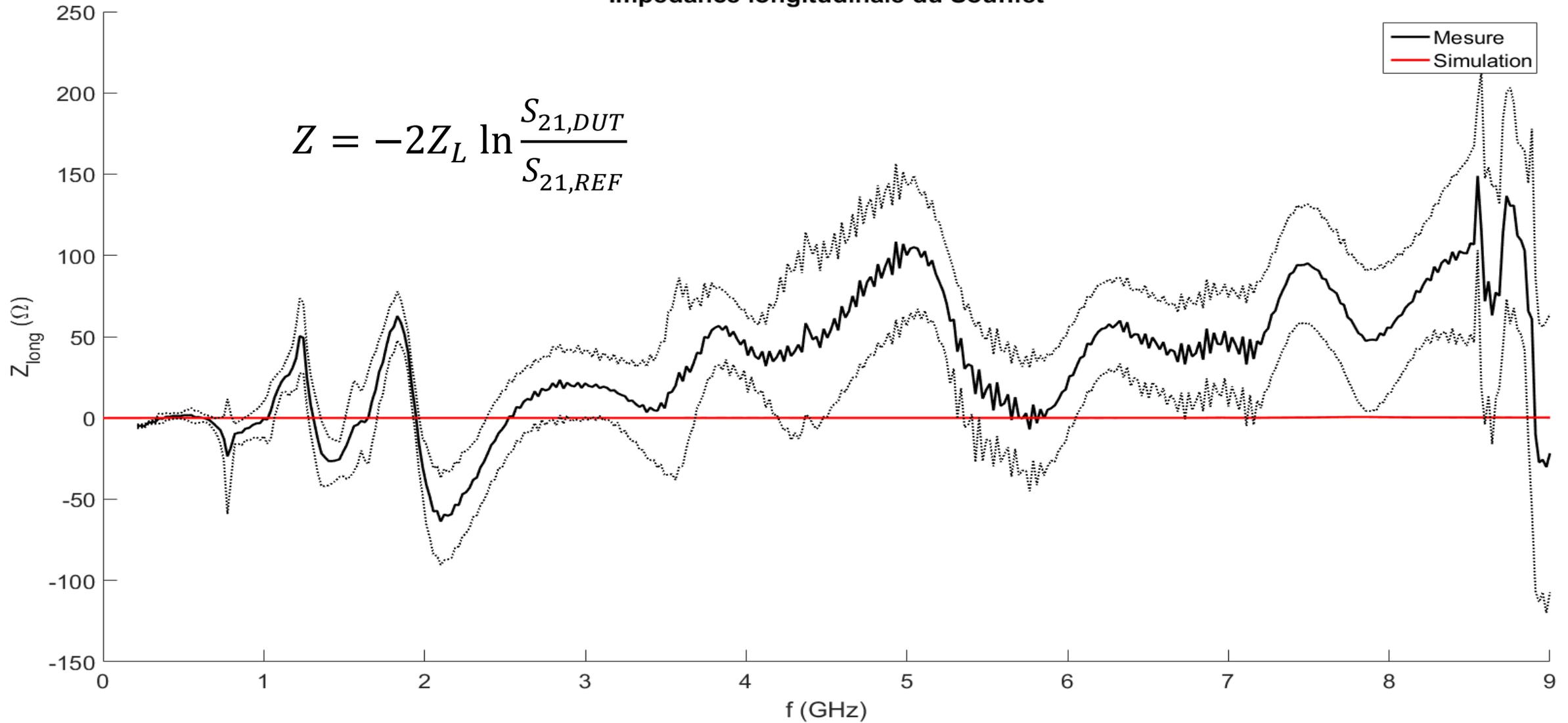
- Amplitude très différente
- Fréquence du pic obtenu en simulation proche de la mesure

Hypothèses :

- L'amplitude des simulations est incorrecte
- Le post-traitement de la mesure donne une amplitude surévaluée
- On ne connaît pas la sensibilité des mesures vis-à-vis des variations mécaniques

Impédance mesurée du soufflet

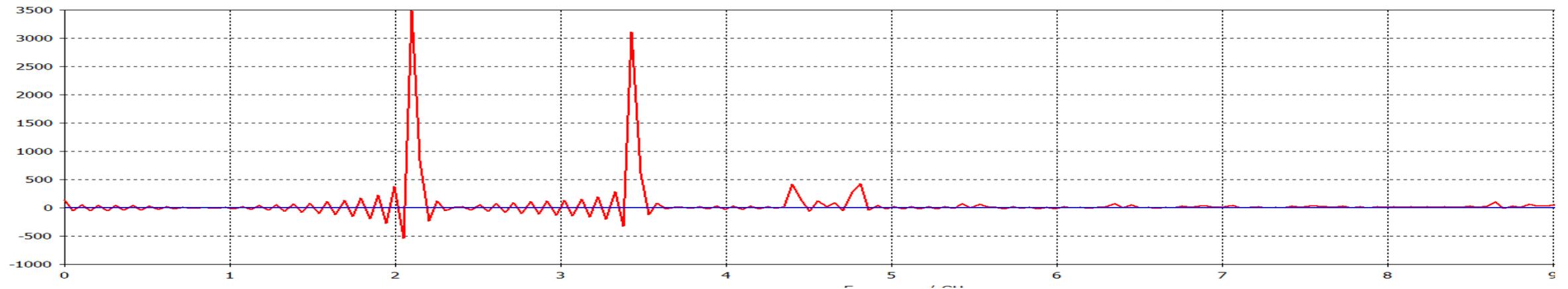
Impedance longitudinale du Soufflet



Mesure du soufflet sans doigts RF



1D Results\Particle Beams\ParticleBeam1\Wake impedance [Real Part]



Effet sur la dynamique faisceau

- Pour pouvoir connaître explicitement les effets des wake, il est nécessaire de simuler la dynamique faisceau en prenant en compte ces effets.
- Seulement le wakefield dépend de la distribution longitudinale du faisceau (supposée Gaussienne en simulation), il faut donc s'affranchir de cette limite pour simuler la dynamique.
- Une méthode basé sur la déconvolution et le traitement numérique des wake a été développée et comparée aux méthodes existantes. Cette méthode permet d'extraire la fonction de wake et de reconstruire un wake quelque soit la distribution longitudinale du faisceau.

Wakefield

$$W_p(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(t-x)\lambda(x)dx$$

Fonction de wake

Profil longitudinal du faisceau

Transformée de Fourier et transformée de Fourier inverse

$$W_f(t) = FT^{-1} \left[\frac{FT[W_p(t)]}{FT[\lambda(t)]} \right]$$

Fonction de wake

Conclusion et perspectives

Bilan de l'impédance longitudinale quasi complet :

- Impédance longitudinale globalement très faible
- Le septum possède une impédance large bande correspondant à 86 % de l'effet total
- L'impédance des kickers est encore inconnue

Premières mesures d'impédance longitudinale :

- Les premières mesures sont en accord avec les simulations
- Le bruit sur la mesure est important ($\pm 100 \Omega$)
- Les mesures seront plus faciles sur des pièces présentant une impédance plus élevée

Effet sur la dynamique faisceau :

- Nouvelle méthode d'extraction de la fonction de wake qui fera l'objet d'une publication

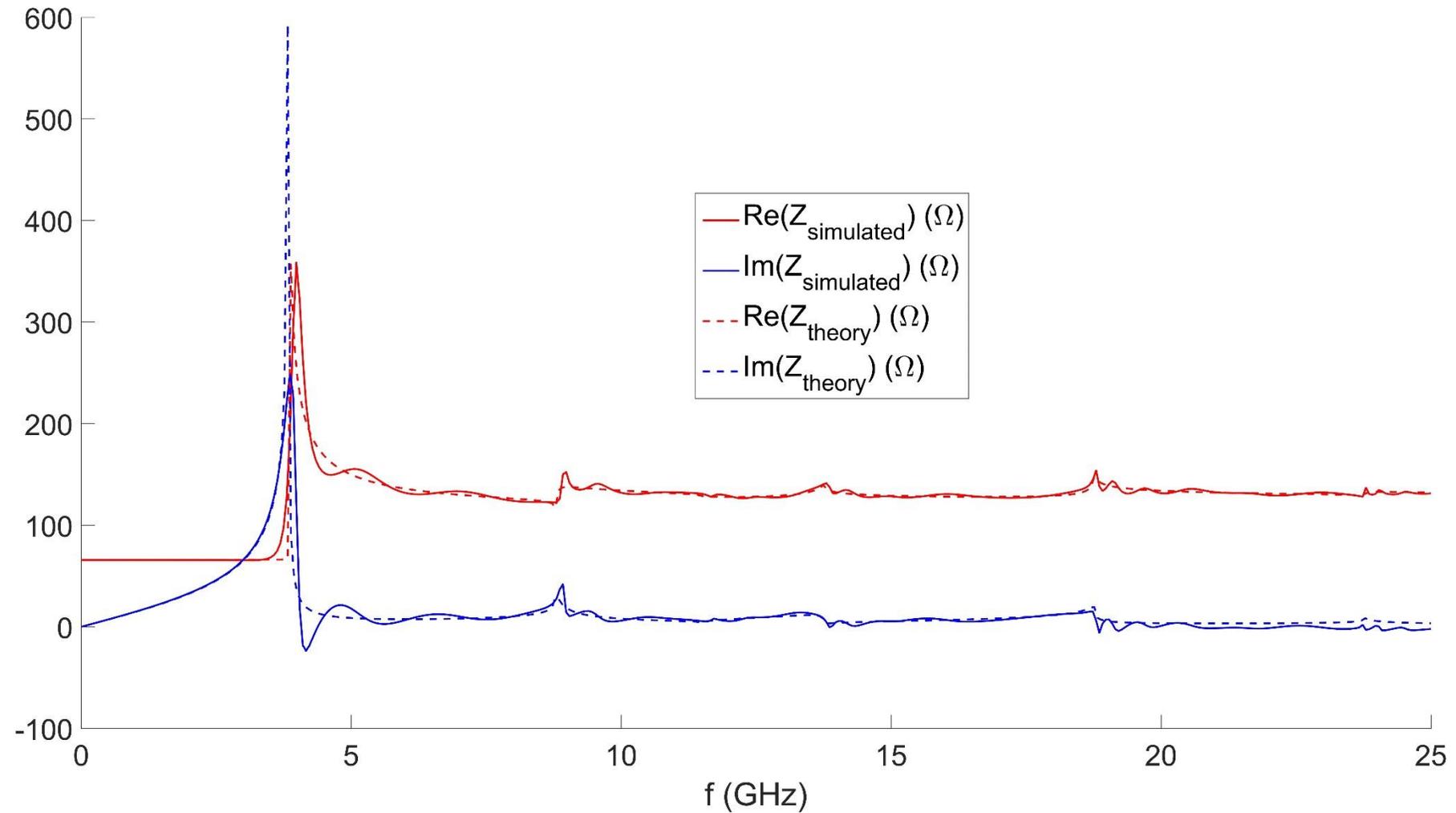
Objectifs généraux pour 2017 :

- Mesure de l'impédance longitudinale des pièces disponible de l'anneau
- Estimation de l'impédance transverse des éléments de l'anneau à partir de simulations
- Premières estimations de l'effet de l'impédance sur la dynamique faisceau

Merci de votre attention !

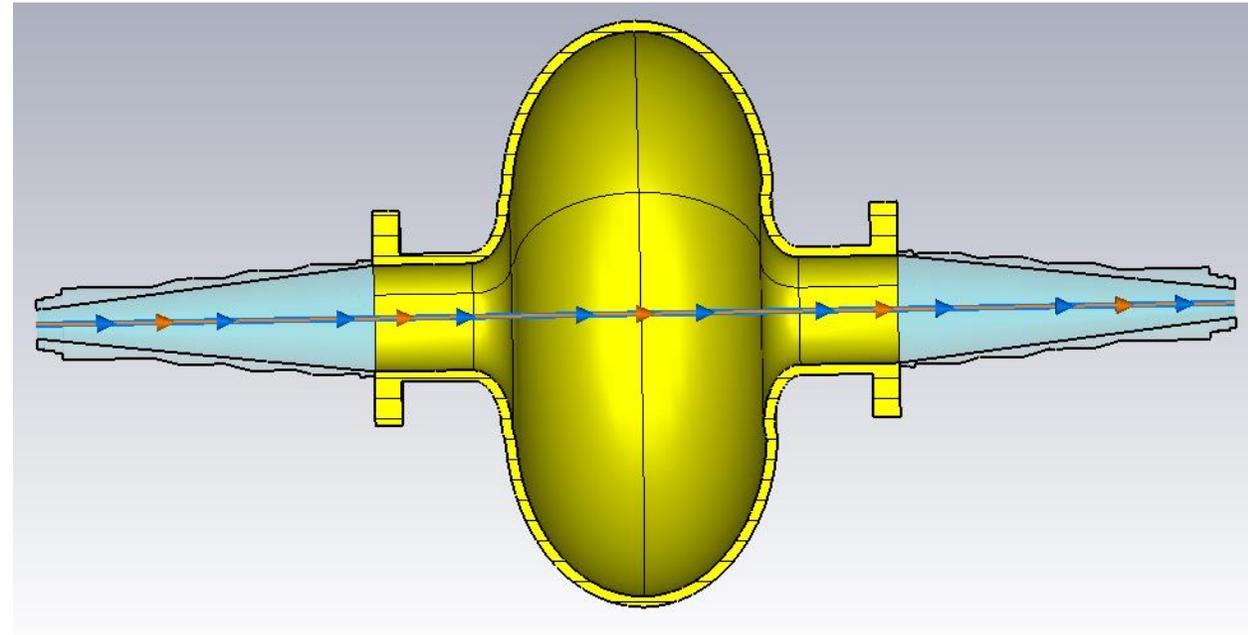
Et merci aux personnes qui ont aidé à la réalisation de cette étude

Exemple de benchmark : cas du step out



Simulation wakefield avec CST PS

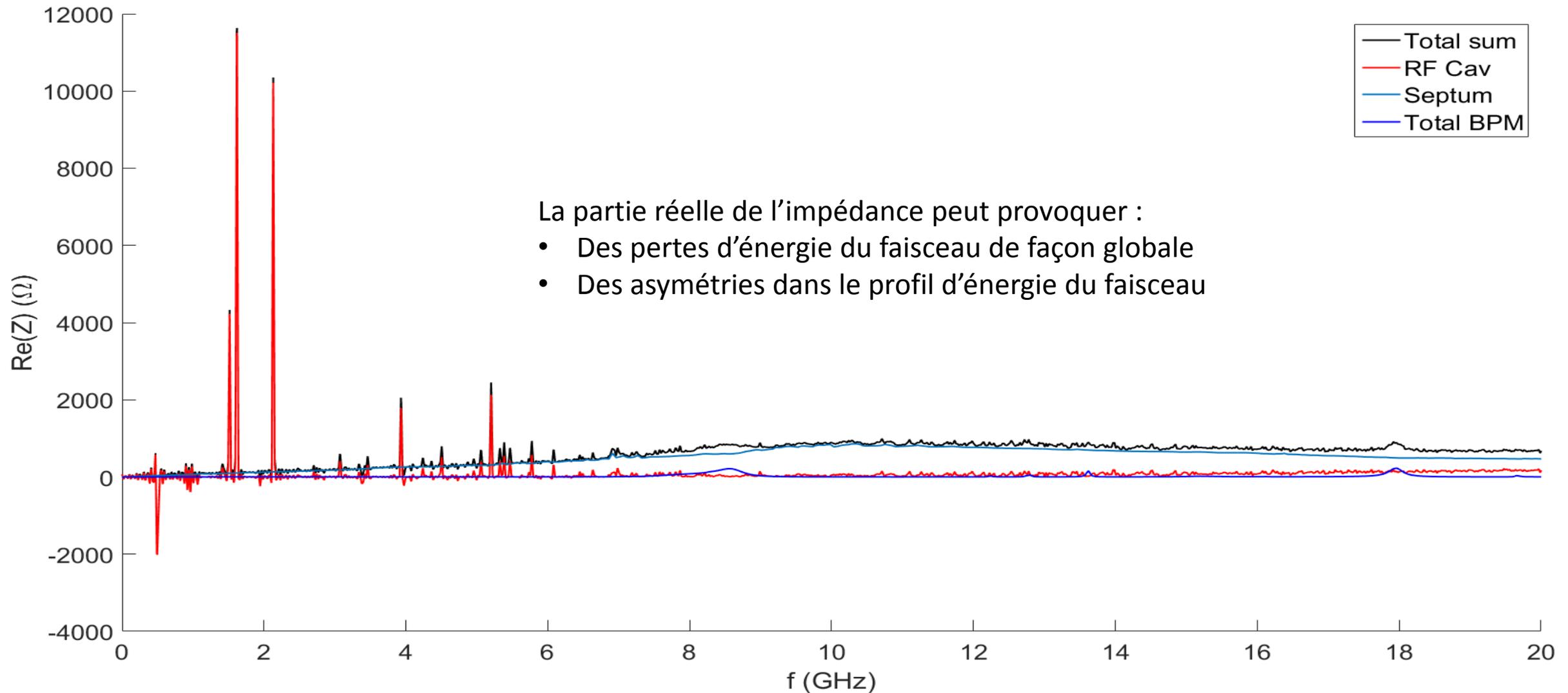
- CST simule le faisceau comme un courant traversant des structures 3D (ligne bleue) et calcule les champ EM à l'intérieur de la structure dans le domaine temporel. Ensuite CST intègre le champ le long de la ligne orange pour obtenir le wakefield.
- CST calcule le wakefield et obtient l'impédance par transformée de Fourier.
- Plus le faisceau simulé est court, plus le maillage devra être fin et plus la fréquence excitée maximale sera grande.



Lier simulations d'impédance et simulations de dynamique faisceau

Méthode	Déconvolution	Petit wake potentiel	Par résonateur
Signal de rapport sur bruit dans la reconstruction du wake (dB)	26	16	8
Fonctionne en haute fréquence	Oui	Difficile, nécessaire de simuler à très haute fréquence	Oui
Wake à portée longue	Oui	Oui	Oui
Wake à portée courte	Oui	Oui	Non a priori, impossible d'ajuster l'impédance

Partie réelle de l'impédance longitudinale



Partie imaginaire de l'impédance longitudinale

