

Systeme BPM de l'accélérateur SPIRAL2

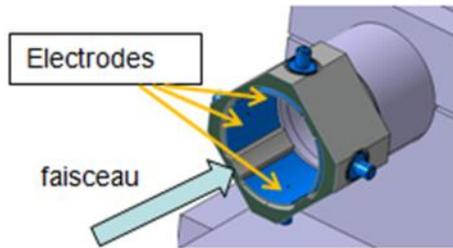
Christophe Jamet, GANIL, Caen, France

- Description et Spécifications
- Principes et Modélisation
- Signaux et mesures
- Description des chaines de mesures
- Calibration et égalisations
- Résultats après calibration
- Résultats avec faisceau
- Conclusion, actions en cours

Description et spécifications

Les BPM (Beam Position Monitor) sont des capteurs sensibles aux variations du champ électrique produit par les paquets de particules chargés d'un faisceau.

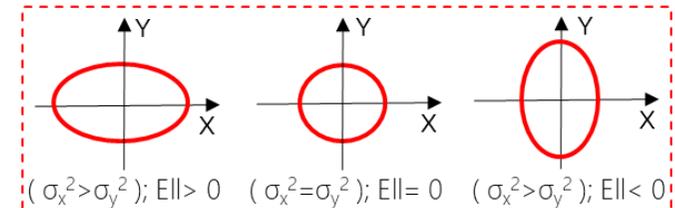
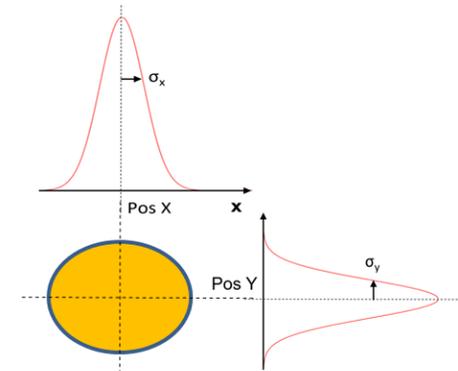
Ils existent différentes familles de BPM, les BPM de SPIRAL2 sont composés de 4 électrodes carrées.



Diamètre: 48 mm
Longueur électrodes : 39 mm
Angle électrodes: 60°

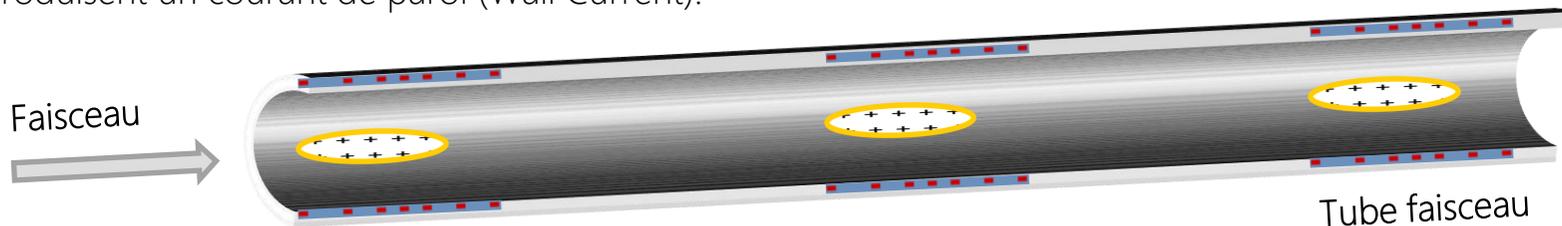
Les spécifications techniques demandées aux chaînes BPM sont:

- Gamme de fonctionnement de 150 μA à 5 mA d'intensité faisceau
- Gamme de mesure en position: ± 20 mm
- Précision en position : $\leq 150\mu\text{m}$
- Précision en ellipticité ($\sigma_x^2 - \sigma_y^2$) : $\pm 20\%$ ou $\pm 1,2\text{mm}^2$
- Précision absolue en phase: $\pm 0,5^\circ$



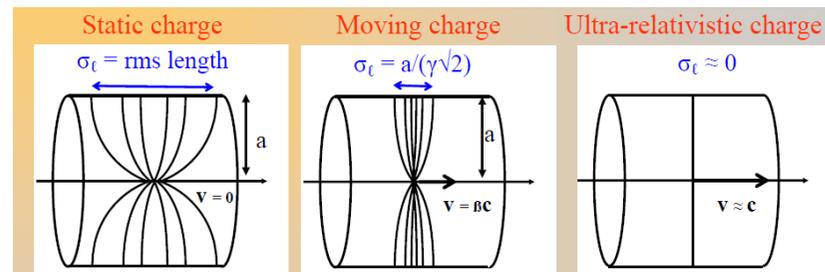
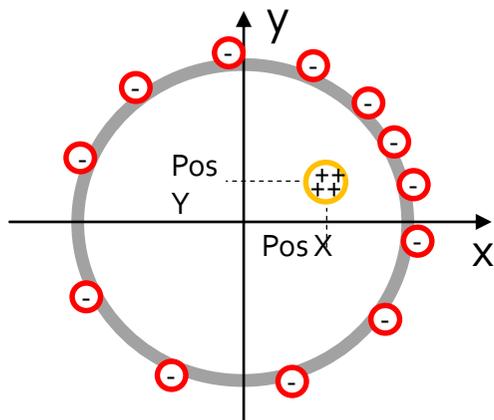
Conception et fourniture des BPM par l'IPNO (IJCLab)

Les paquets du faisceau déplacent, le long d'un tube conducteur, des charges électriques inverses (charges images), qui produisent un courant de paroi (Wall Current).



La répartition du champ électrique et des charges sur la paroi du tube est fonction de:

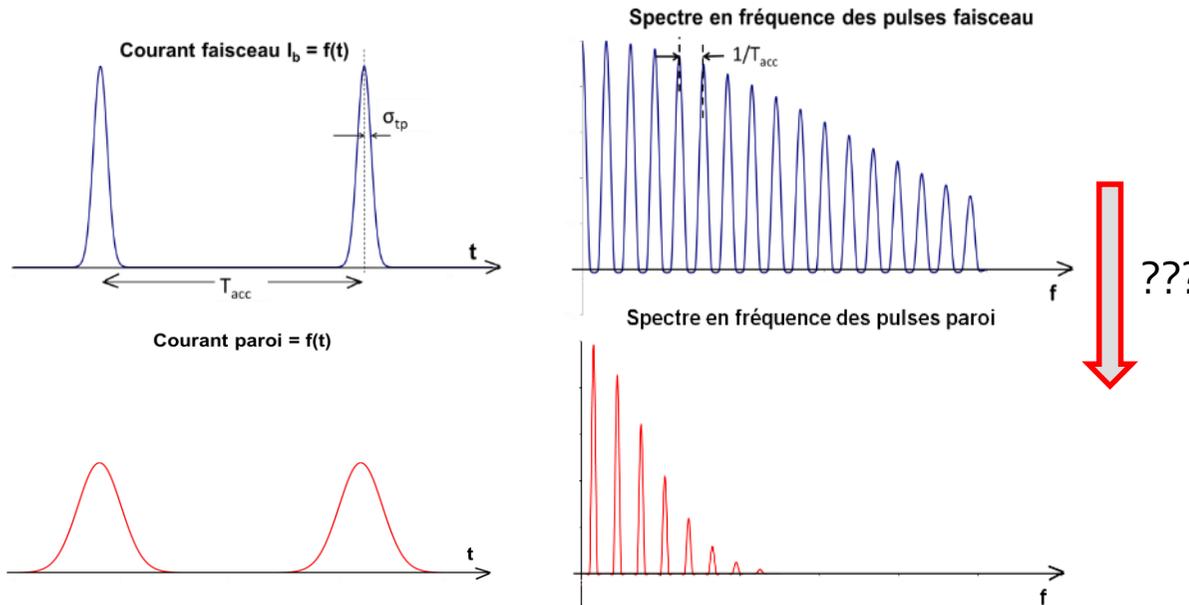
- La position transverse et la taille du faisceau dans le tube
- vitesse des particules



Distribution du champ électrique longitudinal d'une charge sur un tube conducteur

$v = \beta c$, sur SPIRAL2 ($0,04 < \beta < 0,26$)

Les représentations dans le domaine temporel et fréquentiel des courants sont:



$$I_b(t) = \frac{\langle I_b \rangle}{\sqrt{2\pi}\sigma_{tp}} e^{-\frac{(t)^2}{2\sigma_{tp}^2}}$$

$\langle I_b \rangle$: Intensité moyenne du faisceau

σ_{tp} : longueur temporelle des pulses faisceau

$$I_b(t) = \langle I_b \rangle \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n) \right]$$

$$\langle I_b \rangle = \frac{eN}{T}$$

$$A_n = e^{-\frac{-n^2 \omega_0^2 \sigma_{tp}^2}{2}}$$

A_n : Coefficients de la série de Fourier

$$n\omega_0 = 2\pi n F_{Acc}$$

Les pulses faisceaux sont représentés en temporel sous forme de gaussiennes.

Les amplitudes fréquentielles sont fonction des coefficients de la série de Fourier: A_n

Nous allons nous intéresser aux composantes fréquentielles du courant de paroi:

- L'harmonique 1 (h1 : Fréquence de l'accélérateur SPIRAL2: 88,0525 MHz)
- L'harmonique 2 (h2 : 176,105 MHz)

Comment évoluent les harmoniques du courant de paroi ?

Comment en déduire les sensibilités en position et en ellipticité des BPM ?

La densité de courant, produit par un faisceau pinceau en position (r, θ) , sur la surface d'un tube cylindrique à l'angle Φ_ω , à la pulsation $n\omega_0$, est donnée par l'équation (Documents[1][2]):

$$i_\omega(n\omega_0, r, \theta, \phi_\omega) = \frac{A_n \langle I_b \rangle}{\pi a} \left[\frac{I_0(gr)}{I_0(ga)} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{I_m(gr)}{I_m(ga)} \cos(m(\phi_\omega - \theta)) \right]$$

Avec:

i_ω : Niveau de l'harmonique de la densité de courant de paroi à la pulsation $n\omega_0$

$n\omega_0$: Pulsation du signal

r : Rayon du faisceau pinceau

θ : Angle du faisceau

Φ_ω : Angle sur le tube cylindrique

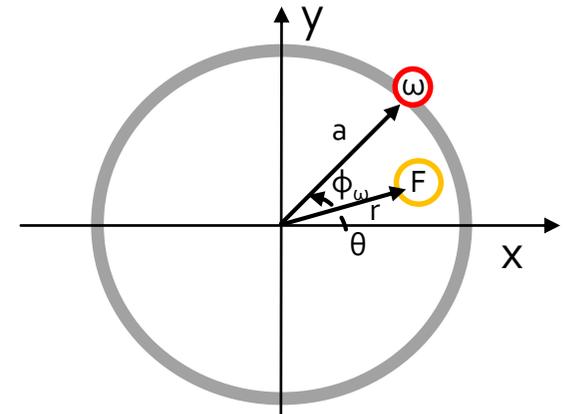
A_n : Niveau harmonique n du courant faisceau

$\langle I_b \rangle$: Courant faisceau moyen

a : Rayon du tube

$I_m()$: Fonction de Bessel modifiée d'ordre m

β : Vitesse relative



$$g = \frac{n\omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta c}$$

Fonctions de Bessel modifiées de première espèce

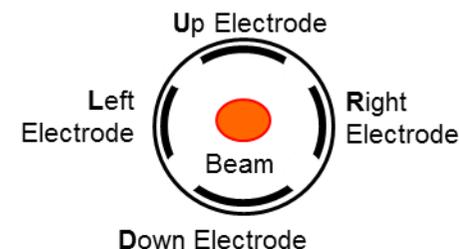
$$I_m(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!(n+m)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2n+m}$$

Wikipédia : Les fonctions de Bessel sont aussi connues sous le nom de fonctions cylindriques. Intervient dans les problèmes physiques présentant une symétrie cylindrique

A partir de cette équation, différents calculs sont effectués:

- La simplification à l'ordre 2 de l'équation
- L'intégration des courants produits par un faisceau pinceau sur l'angle d'ouverture des électrodes : $I_{wr}, I_{wl}, I_{wu}, I_{wd}$
- L'intégrale de ces courants avec des faisceaux pinceaux de distribution gaussienne, de positions centrales X_0, Y_0 et de taille σ_x et σ_y

$$I_{w(R,L,U,D)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} I_{w(r,l,u,d)}(x, y, X_0, Y_0) e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy$$



Les niveaux des harmoniques du courant de paroi sur les électrodes sont :

$$I_{wR,L} = \frac{A_n \langle I_b \rangle}{\pi} \left[\frac{\phi_0}{I_0(ga)} \pm \frac{2g}{I_1(ga)} \sin\left(\frac{\phi_0}{2}\right) X_0 + \frac{g^2 \sin(\phi_0)}{4I_2(ga)} \left((X_0^2 - Y_0^2) + (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) \right) \right]$$

$$I_{wU,D} = \frac{A_n \langle I_b \rangle}{\pi} \left[\frac{\phi_0}{I_0(ga)} \pm \frac{2g}{I_1(ga)} \sin\left(\frac{\phi_0}{2}\right) Y_0 - \frac{g^2 \sin(\phi_0)}{4I_2(ga)} \left((X_0^2 - Y_0^2) + (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) \right) \right]$$

Terme monopolaire

Terme dipolaire

Terme quadripolaire

Avec:

A_n : Niveau de l'harmonique n du courant faisceau

$\langle I_b \rangle$: courant faisceau moyen

ϕ_0 : Angle d'ouverture des électrodes (radian)

$I_0(ga), I_1(ga), I_2(ga)$: Fonctions de Bessel modifiée à l'ordre 0, 1, 2 du terme (ga)

a: Rayon du BPM

$$g = \frac{n\omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta c}$$

Ces équations permettent de calculer les coefficients de sensibilités des BPM pour les 2 fréquences h1 et h2

Positions : $X = \frac{K}{1 + G} \frac{(I_{wR} - I_{wL})}{(I_{wR} + I_{wL} + I_{wU} + I_{wD})}$ et $Y = \frac{K}{1 + G} \frac{(I_{wU} - I_{wD})}{(I_{wR} + I_{wL} + I_{wU} + I_{wD})}$

Avec la sensibilité en position K : $K = \frac{\phi_0 a}{2 \sin(\frac{\phi_0}{2})}$

Le facteur de correction G : $(1 + G) \approx \frac{I_0(ga) \frac{ga}{2}}{I_1(ga) \frac{ga}{2}}$

Ellipticité : $Ell = (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) = \frac{S}{1 + G_E} \frac{(I_{wR} + I_{wL}) - (I_{wU} + I_{wD})}{(I_{wR} + I_{wL} + I_{wU} + I_{wD})} - (X^2 - Y^2)$

Avec la sensibilité en ellipticité S : $S = \frac{a^2 \phi_0}{2 \sin(\phi_0)}$

Le facteur de correction G_E : $(1 + G_E) \approx \frac{I_0(ga)(ga)^2}{8I_2(ga)}$

K et S sont fonction des dimensions mécaniques du BPM.
Electrodes BPM de SPIRAL2: $\Phi_0 = 60^\circ$; $a = 24$ mm

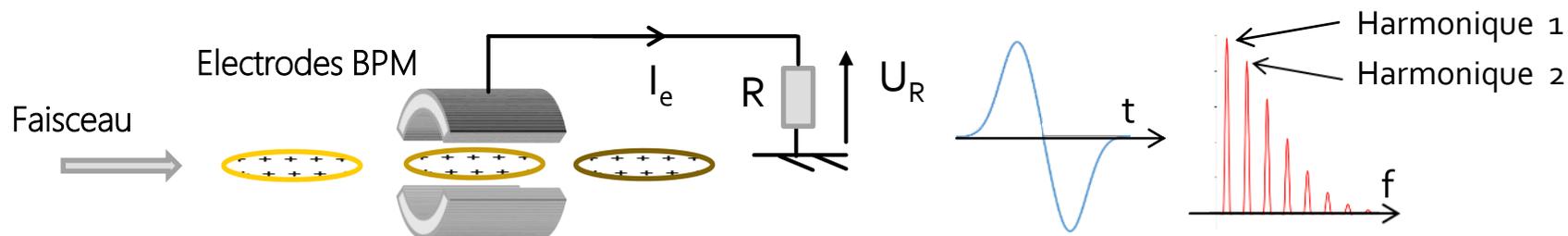
$K = 25,1$ mm $S = 348$ mm²

Beta	K / (1 + G _{h1}) (mm)	K / (1 + G _{h2}) (mm)	S / (1 + G _{Eh1}) (mm ²)	S / (1 + G _{Eh2}) (mm ²)
0,04	21,9	16,6	290	194
0,08	24,2	22,0	331	290
0,12	24,7	23,6	341	320
0,26	25,0	24,8	347	342

Coefficients de sensibilité en fonction des Beta du linac

Pour $\beta \rightarrow 1 \Rightarrow g \rightarrow 0 \Rightarrow 1 + G \rightarrow 1$
 $\Rightarrow 1 + G_E \rightarrow 1$

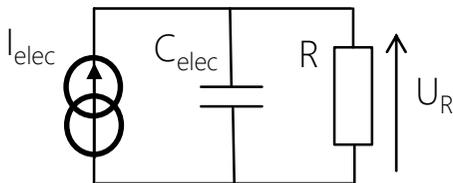
Les signaux issus des électrodes sont en fait fonction des variations de charges des électrodes.



A partir du courant de paroi, nous effectuons les calculs suivant.

$$\lambda_{paroi}(t) = \frac{I_{paroi}(t)}{\beta c} \quad Q_{elec}(t) = \int_{-\frac{L_{elec}}{2}}^{\frac{L_{elec}}{2}} \lambda_{paroi}(t - \frac{z}{\beta c}) dz \quad I_{elec}(t) = -\frac{dQ_{elec}(t)}{dt}$$

Le schéma électrique équivalent d'une électrode et les équations associées sont:



$$I_{elec}(t) = -\frac{dQ_{elec}(t)}{dt} = C_{elec} \frac{dU_R(t)}{dt} + \frac{U_R(t)}{R}$$

Les résultats des calculs donnent les équations des amplitudes des harmoniques h1 et h2 suivantes:

$$V_{h1_{eff-(elec-R,L,U,D)}} = \sqrt{2} |Z_{RC_{h1}}| I_{w(R,L,U,D)} \sin\left(\pi \frac{L_{elec}}{L_{acc}}\right)$$

$$|Z_{RC_{h1}}| = \frac{R}{\sqrt{1 + (2\pi F_{acc} RC)^2}}$$

$$V_{h2_{eff-(elec-R,L,U,D)}} = \sqrt{2} |Z_{RC_{h2}}| I_{w(R,L,U,D)} \sin\left(2\pi \frac{L_{elec}}{L_{acc}}\right)$$

$$|Z_{RC_{h2}}| = \frac{R}{\sqrt{1 + (4\pi F_{acc} RC)^2}}$$

$$R = 25 \Omega$$

$$C = 10 \text{ pF}$$

$$L_{acc} = \frac{\beta c}{F_{acc}}$$

Beta	Lacc (cm)
0,04	13,6
0,08	27,3
0,12	40,9
0,26	88,6

La somme vectorielle des 4 tensions BPM est fonction de la somme des courants:

$$I_{wR} + I_{wL} + I_{wU} + I_{wD} = \frac{4}{3} \frac{\langle I_b \rangle}{I_0(g_a)} A_n$$

$$V_{VS-h1_{eff}} = \frac{4\sqrt{2}}{3} |Z_{RC_{h1}}| \sin\left(\pi \frac{L_{elec}}{L_{acc}}\right) \frac{\langle I_b \rangle}{I_0(g_{h1} a)} A_1$$

$$g_{h1} = \frac{2\pi F_{acc} \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta c}$$

$$g_{h2} = \frac{4\pi F_{acc} \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta c}$$

$$V_{VS-h2_{eff}} = \frac{4\sqrt{2}}{3} |Z_{RC_{h2}}| \sin\left(2\pi \frac{L_{elec}}{L_{acc}}\right) \frac{\langle I_b \rangle}{I_0(g_{h2} a)} A_2$$

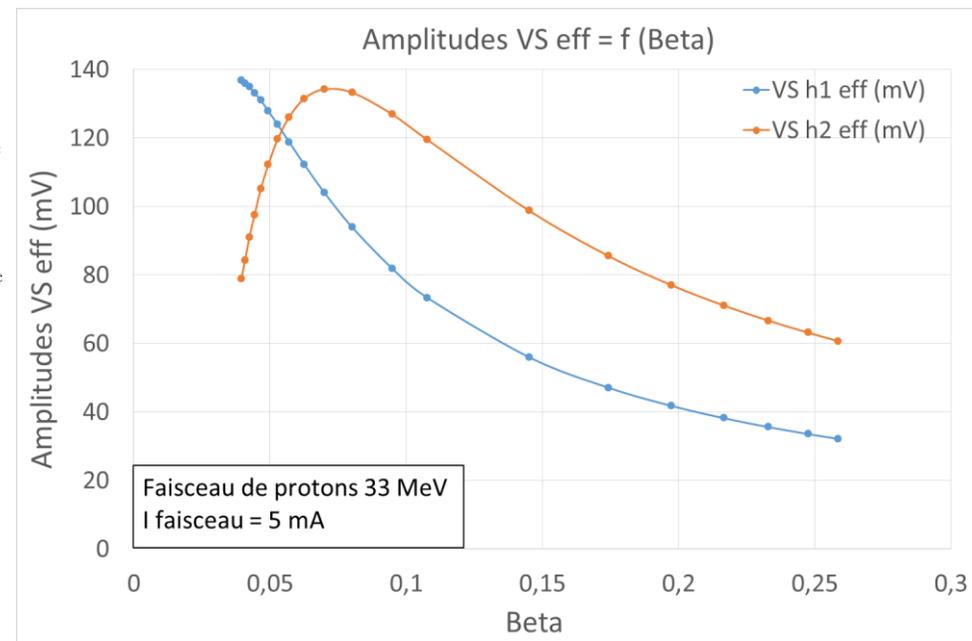
$$A_1 = e^{-2\pi^2 \sigma_{tp}^2 F_{acc}^2}$$

$$A_2 = e^{-8\pi^2 \sigma_{tp}^2 F_{acc}^2}$$

Pour un faisceau de protons à 33 MeV, avec une intensité de 5 mA,
A partir des longueurs de paquets (σ_{tp}) calculés par le logiciel Tracewin *

$$V_{VS-h1_{eff}} = \frac{4\sqrt{2}}{3} |Z_{RC_{h1}}| \sin\left(\pi \frac{L_{elec}}{L_{acc}}\right) \frac{\langle I_b \rangle}{I_0(g_{h1}a)} e^{-2\pi^2 \sigma_{tp}^2 F_{acc}^2}$$

$$V_{VS-h2_{eff}} = \frac{4\sqrt{2}}{3} |Z_{RC_{h2}}| \sin\left(2\pi \frac{L_{elec}}{L_{acc}}\right) \frac{\langle I_b \rangle}{I_0(g_{h2}a)} e^{-8\pi^2 \sigma_{tp}^2 F_{acc}^2}$$



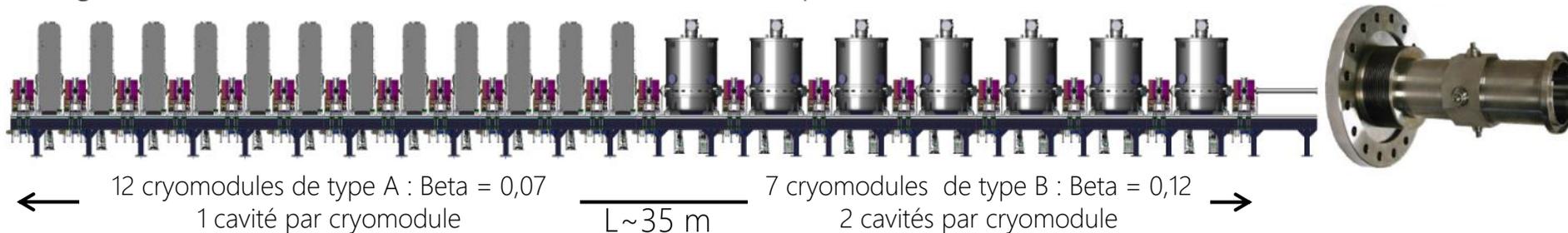
Mesures de Phases

Les phases du vecteur-somme donnent les phases « BPM », elles sont utilisées pour le réglage en phase des cavités et les mesures de vitesse du faisceau.

* Tracewin: Code de transport permettant de simuler la dynamique faisceau,

Description des chaines de mesure

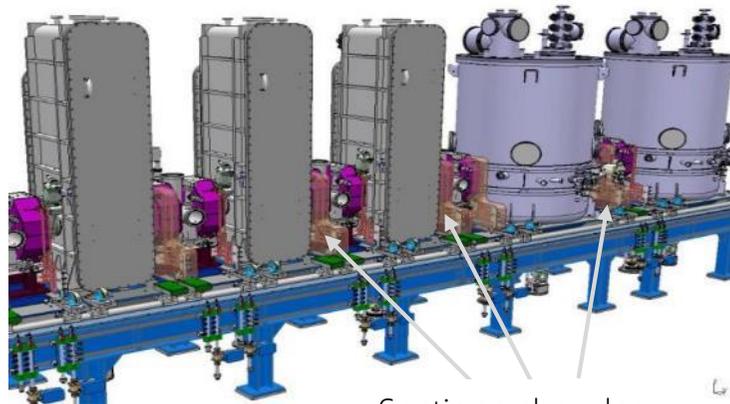
20 diagnostics BPM sont installés sur le linac, à l'intérieur des Qpoles des sections chaudes.



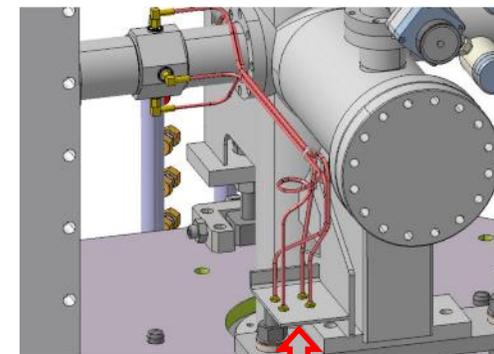
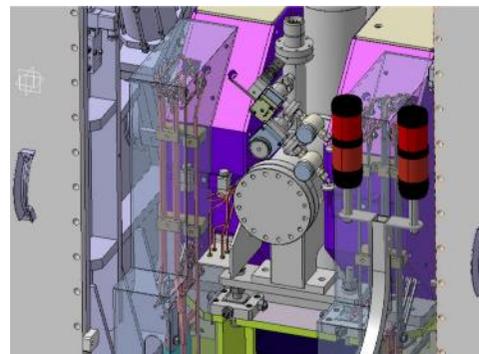
1 BPM par section chaude = 20 BPM

Cryomodules A

Cryomodules B



Sections chaudes



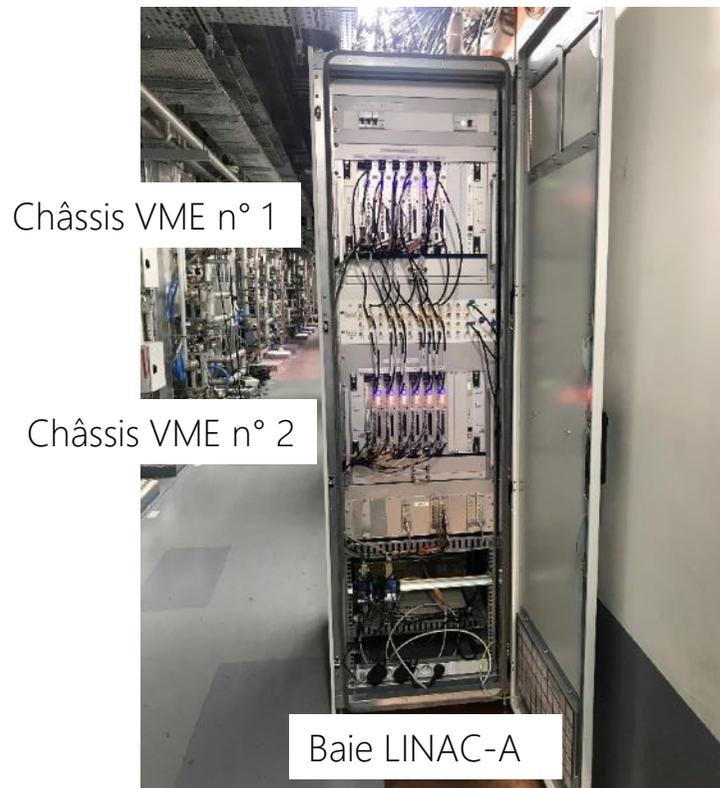
Section chaude avec Qpoles / sans Qpoles

4 cables semi-rigide transportent les signaux sur une platine externe

Les électroniques de mesures sont placées dans 2 baies installées dans un couloir à coté du linac. La distance entre les BPM et les électroniques est de 23 m.

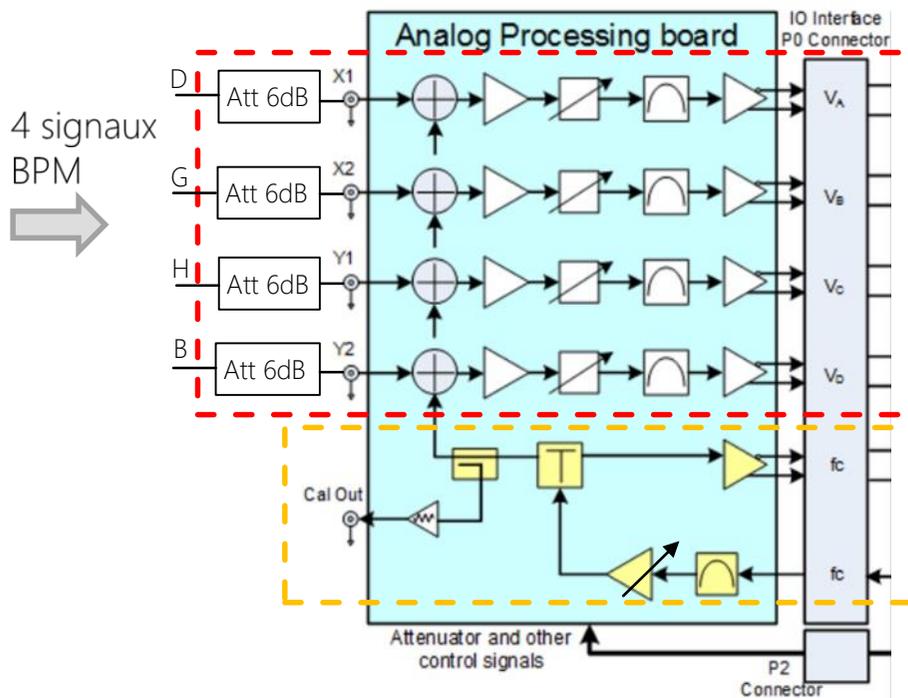
Un module BPM est composée de 2 cartes au standard VME:

- Une carte numérique
- Une carte analogique



Conception et fourniture des modules BPM par le laboratoire indien BARC

Les cartes analogiques assurent les fonction suivantes:



Sur les 4 voies:

- Sélection et filtrage de la fréquence de mesures :
 - $h1$ (88,0525 MHz) ou $h2$ (176,105 MHz)
- Ajustement du gain par des atténuateurs programmables

↔ Carte numérique

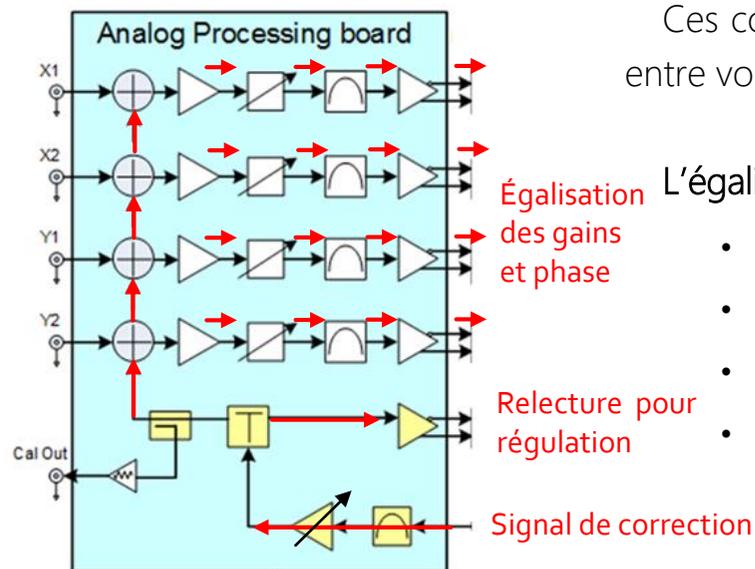
- Ajout d'un signal d'égalisation sur les 4 voies pour effectuer l'égalisation des gains et phases par la carte numérique

Pour répondre aux exigences de précision (écart en gain $< 0,5\%$, en phase $< +/- 0,5^\circ$), deux techniques sont utilisées:

- La calibration
- L'égalisation en temps réel des gains et des phases

La calibration consiste à:

- Injecter 4 signaux identiques en amplitudes et phase à un niveau donné (≈ -20 dBm)
- A calculer les coefficients de correction en amplitude et en phase des 4 voies



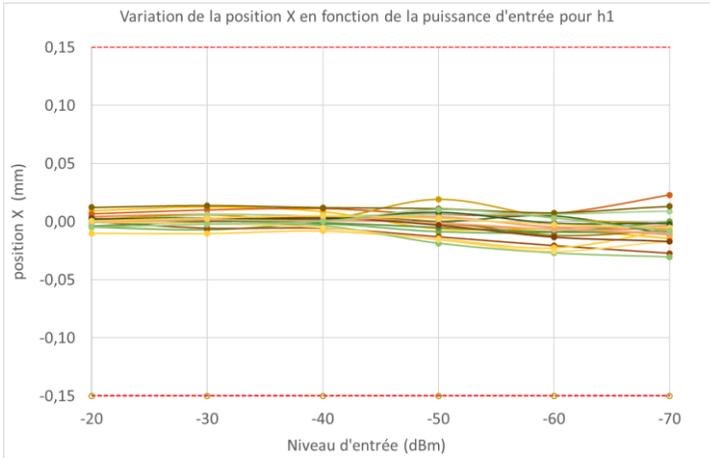
Ces coefficients sont chargés au démarrage des cartes BPM pour corriger les écarts entre voies et entre cartes.

L'égalisation, sur chaque carte, consiste à:

- Injecter un signal d'égalisation à une fréquence proche de h_1 ou h_2 sur les 4 voies
- Réguler le niveau d'égalisation pour qu'il soit proche des niveaux BPM
- Corriger les écarts en amplitude et en phase des signaux d'égalisation
- Reporter les corrections sur les amplitudes et phases des signaux BPM

Résultats après calibration 2021

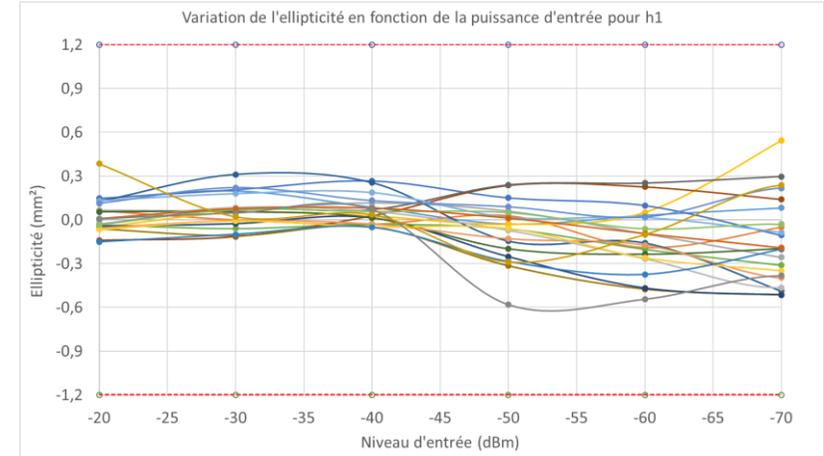
En fonction des niveaux injectés (de -20 à -70 dBm qui équivaut à une intensité faisceau d'environ 5 mA à 100 μ A)



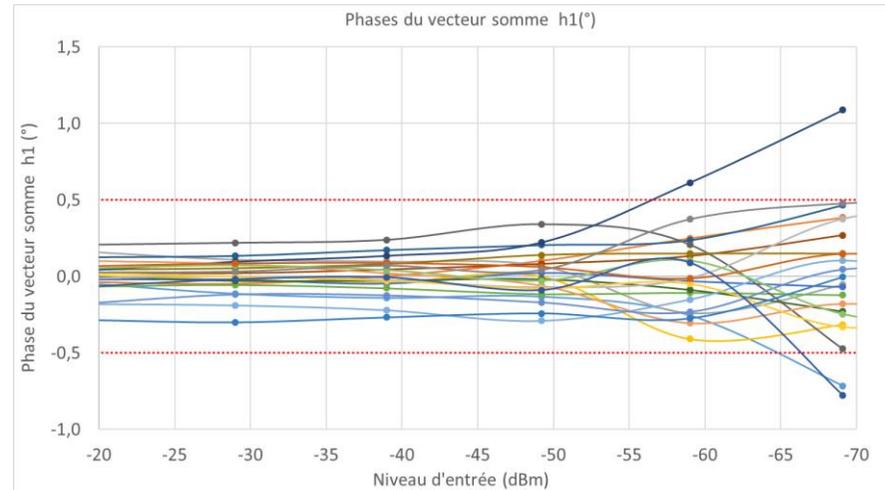
Position



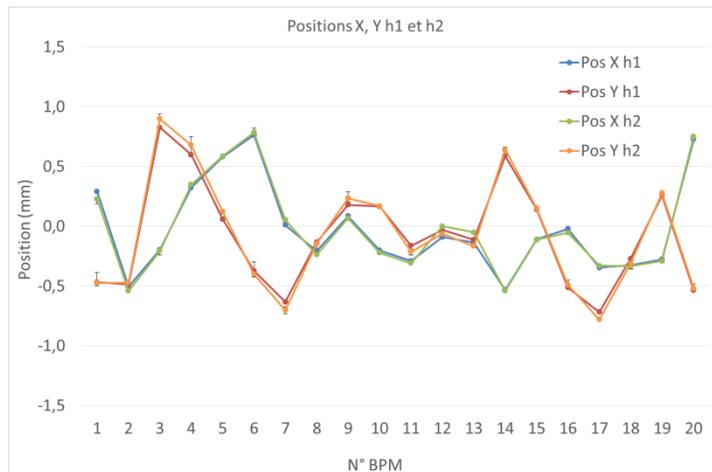
Ellipticité



Phase



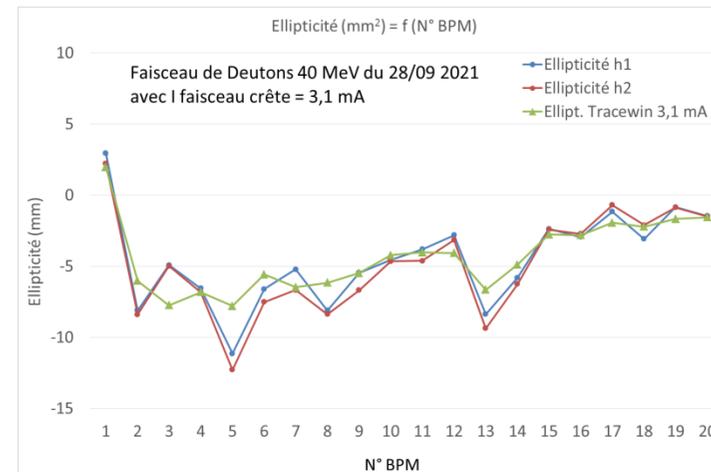
Faisceau de Deutons de 3,1 mA à 40 MeV



Position



Ellipticité



Différences d'ellipticité entre les mesures et les valeurs Tracewin: Non-linéarités BPM ou différence entre faisceau réel et Tracewin ?

Faisceau de Deutons de 3,1 mA à 11 MeV

Les dernières cavités du linac sont éteintes et désaccordées

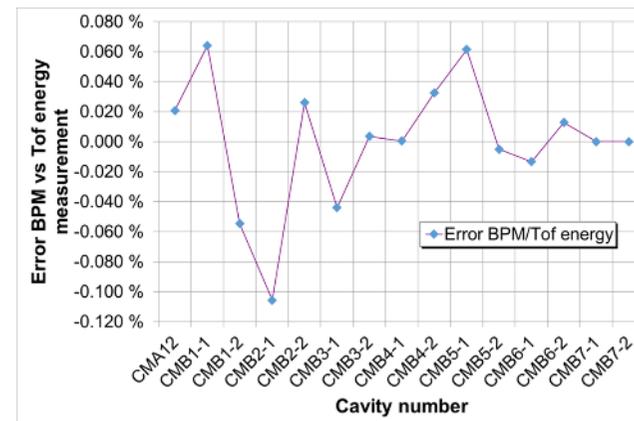
⇒ même vitesse de faisceau sur plusieurs BPM

Les mesures d'énergie calculées à partir des phases BPM sont comparées aux mesures d'énergie du système TOF* à la sortie du linac.

Les écarts inférieurs à +/- 0,1 % valident la précision des mesures en phase et en énergie des BPM.

TOF*: Time Of Flight , système de mesure par temps de vol

Energie



Système BPM opérationnel  Important car le réglage du linac se fait principalement avec les BPM

La modélisation des BPM permet de définir en fonction du Beta:

- les sensibilités en position et ellipticité
- les amplitudes des signaux

Pour chaque faisceau, les sensibilités des différents BPM sont paramétrées en fonction des beta théoriques.

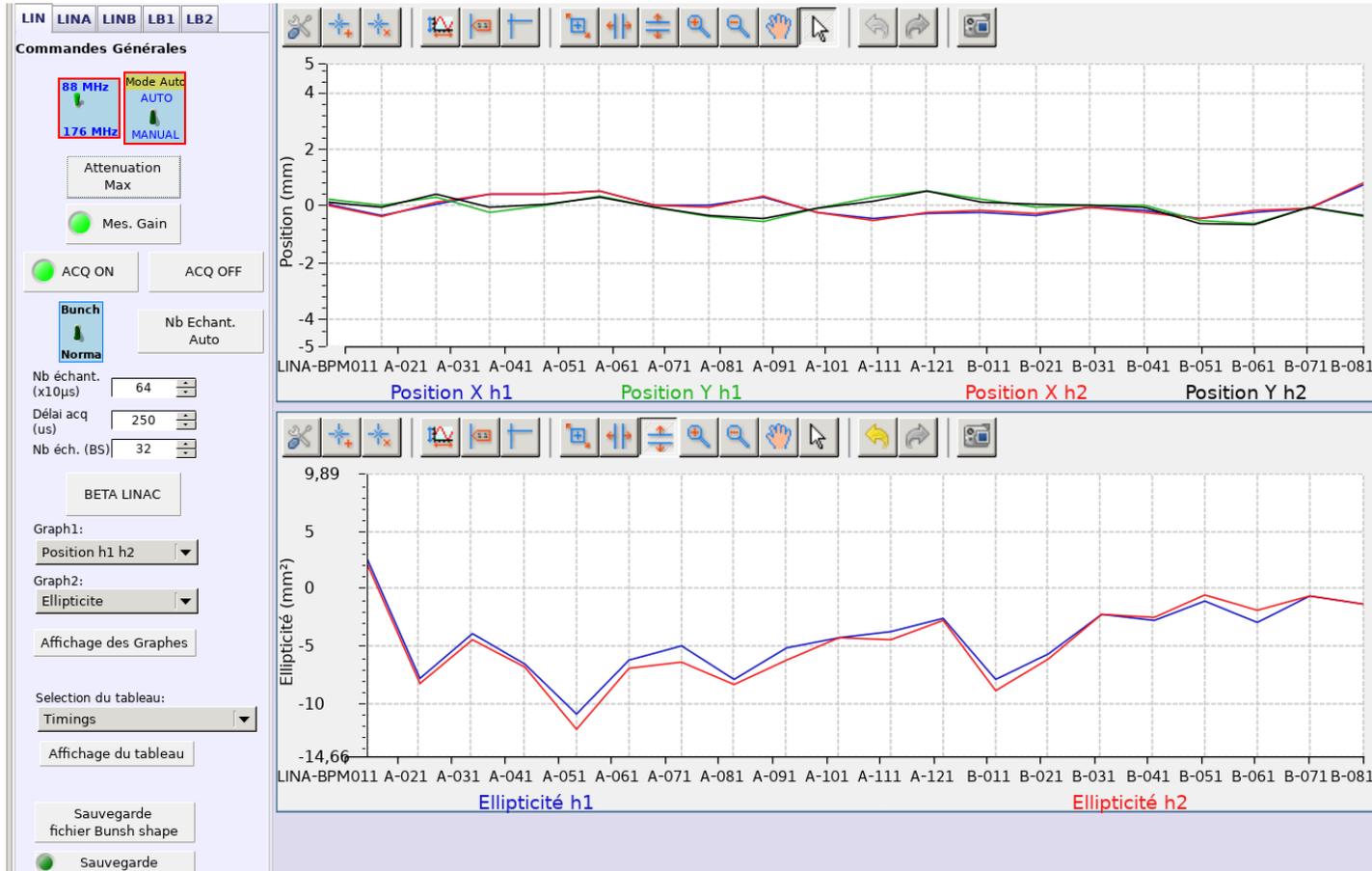
Les principales modifications et améliorations ont été:

- Des précautions importantes dans l'installation et l'appairage des câbles
- L'adaptation 50Ω des BPM
- Les améliorations CEM
- La calibration fine des gains et des phases des modules électroniques

La sensibilité doit encore être améliorée pour les faisceaux de basses-intensités vers la salle S3 ($\approx 10 \mu\text{A}$).

Les actions en cours ou prévues sont:

- Une augmentation de la sensibilité pour les basses intensités
- Une diminution des perturbations RF
- Une automatisation des calibrations
- La mesure des longueurs temporelles des paquets



Merci

Collaboration : IPNO (IJCLab) , BARC et GANIL/SPIRAL2

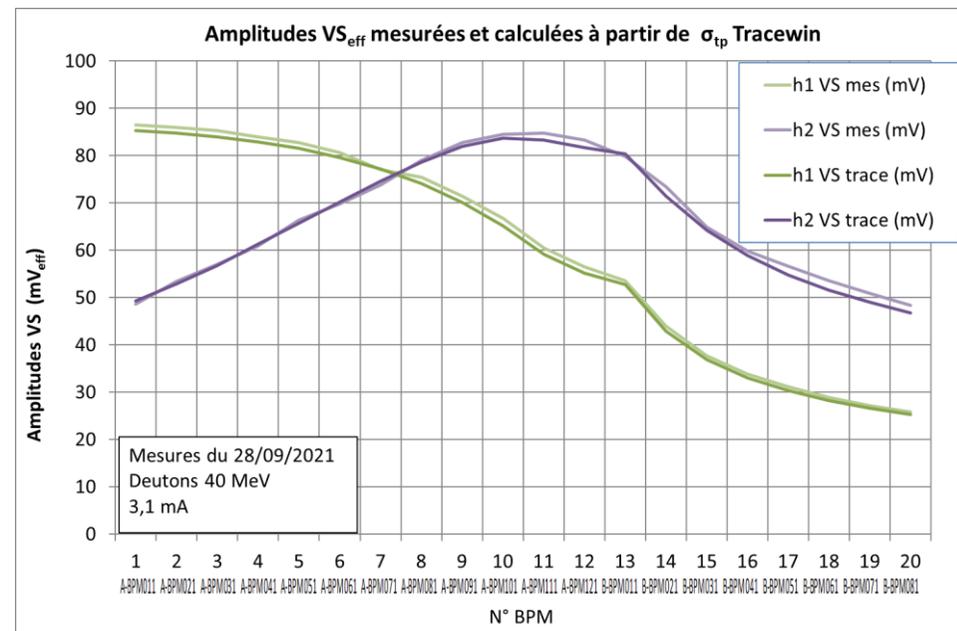
- [1] R. E. Shafer, "Beam Position Monitor Sensitivity for Low-beta; Beams", in Proc. 1994 Linear Accelerator Conf. (LINAC'94), Tsukuba, Japan, Aug. 1994, paper TH-84, pp. 905-907.
- [2] J.H Cupérus, "Monitoring of particle beam at high frequencies", Nuclear Instrument and Methods, vol. 145, pp. 219-231, 1977.
- [3] G. Joshi et al., "An offset tone based gain stabilization technique for mixed-signal RF measurement systems", Nucl. Instr. Meth. A, vol. 795, pp. 399-408, 2015.
- [4] C. Jamet and P. Legallois, "Commissioning and Results of SPIRAL2 BPMs", presented at the 9th Int. Beam Instrumentation Conf. (IBIC'21), Pohang, Korea, Sep. 2021, paper MOPP35.
- [5] P. Ausset et al., "Operation of the Beam Position Monitor for the Spiral 2 Linac on the Test Bench of the RFQ", in Proc. 5th Int. Beam Instrumentation Conf. (IBIC'16), Barcelona, Spain, Sep. 2016, pp. 642-645.
- [6] M. Wendt, "BPM Systems", CERN Accelerator School: Beam Instrumentation, 2-15 June 2018 , Tuusula, Finland.
- [7] J-C Denard., "Beam Current Monitors", CERN Accelerator School on Beam Diagnostics 28 May –6 June 2008, Dourdan, France
- [8] D. Uriot and N. Pichoff, "Status of TraceWin Code", in Proc. 6th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'15), Richmond, VA, USA, May 2015, pp. 92-94.

Faisceau de Deutons de 3,1 mA à 40 MeV

Comparaisons des amplitudes du vecteur-somme mesurées et calculées à partir des formules :

$$V_{VS-h1_{eff}} = \frac{4\sqrt{2}}{3} |Z_{RC_{h1}}| \sin\left(\pi \frac{L_{elec}}{L_{acc}}\right) \frac{\langle I_b \rangle}{I_0(g_{h1}a)} e^{-\pi^2 \sigma_{tp}^2 F_{acc}^2}$$

$$V_{VS-h2_{eff}} = \frac{4\sqrt{2}}{3} |Z_{RC_{h2}}| \sin\left(2\pi \frac{L_{elec}}{L_{acc}}\right) \frac{\langle I_b \rangle}{I_0(g_{h2}a)} e^{-8\pi^2 \sigma_{tp}^2 F_{acc}^2}$$



$\langle I_b \rangle$: Intensité faisceau mesuré par un transformateur ACCT

σ_{tp} : Longueurs temporelles des paquets fournis par le logiciel Tracewin

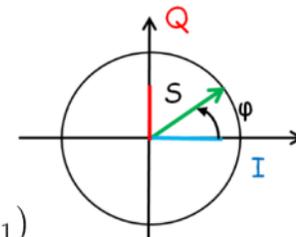
Les signaux BPM, filtrés et amplifiés par la carte analogique sont sinusoidaux, aux fréquences $h1$ ou $h2$

$$s_{h1}(t) = S_{h1} \cos(2\pi Ft + \varphi_{h1})$$

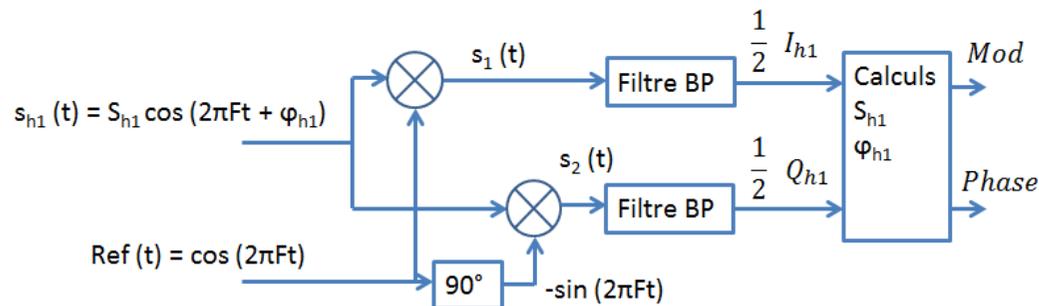
$$s_{h2}(t) = S_{h2} \cos(4\pi Ft + \varphi_{h2})$$

La représentation I-Q fait intervenir les termes « In-Phase » et « Quadrature-Phase »

$$s_{h1}(t) = I_{h1} \cos(2\pi Ft) - Q_{h1} \sin(2\pi Ft) \quad \text{avec} \quad I_{h1} = S_{h1} \cos(\varphi_{h1}) \quad \text{et} \quad Q_{h1} = S_{h1} \sin(\varphi_{h1})$$



La démodulation I-Q consiste retrouver les termes I et Q des signaux BPM pour calculer les modules et phases. Ce traitement du signal est effectué par un FPGA après numérisation des signaux.



$$s_1(t) = S_{h1} \cos(2\pi Ft + \varphi_{h1}) * \cos(2\pi Ft) \quad \Rightarrow \quad s_1(t) = \frac{1}{2} S_{h1} \left[\cos(2 * 2\pi Ft + \varphi_{h1}) + \cos(\varphi_{h1}) \right]$$

$$S_{1\text{filtre}} = \frac{1}{2} S_{h1} \cos(\varphi_{h1}) = \frac{1}{2} I_{h1}$$

$$S_{2\text{filtre}} = \frac{1}{2} S_{h1} \sin(\varphi_{h1}) = \frac{1}{2} Q_{h1}$$

$$Mod = 2\sqrt{S_{1\text{filtre}}^2 + S_{2\text{filtre}}^2} = S_{h1} \quad \text{et} \quad Phase = \text{tg}^{-1}\left(\frac{S_{2\text{filtre}}}{S_{1\text{filtre}}}\right) = \varphi_{h1}$$