



UNIVERSITY OF  
LIVERPOOL



# Etude et optimisation de la dynamique non linéaire et 6-dimensionnelle d'un faisceau d'électrons dans un anneau de stockage ayant une émittance ultra-faible

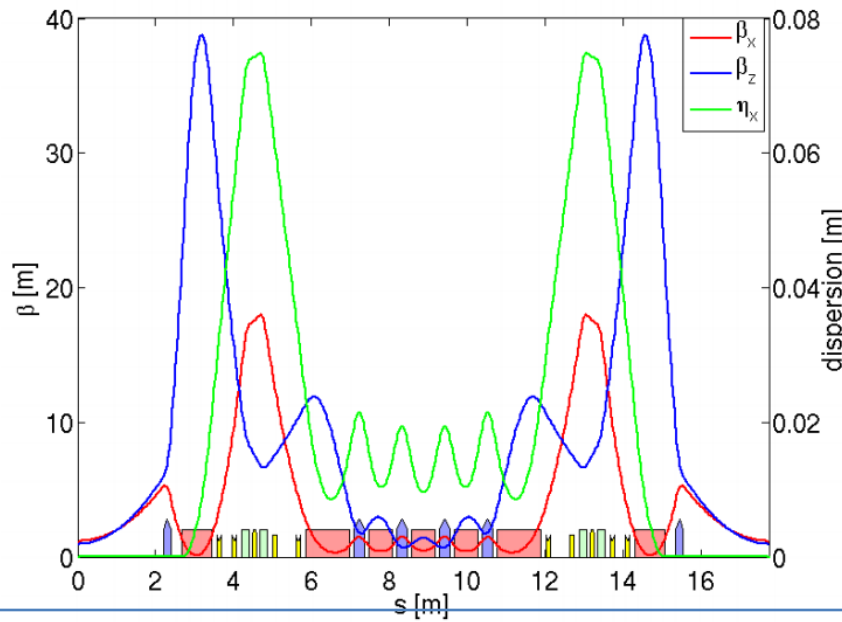
Lina HOUMMI

2 octobre 2019

Journées Accélérateurs Roscoff

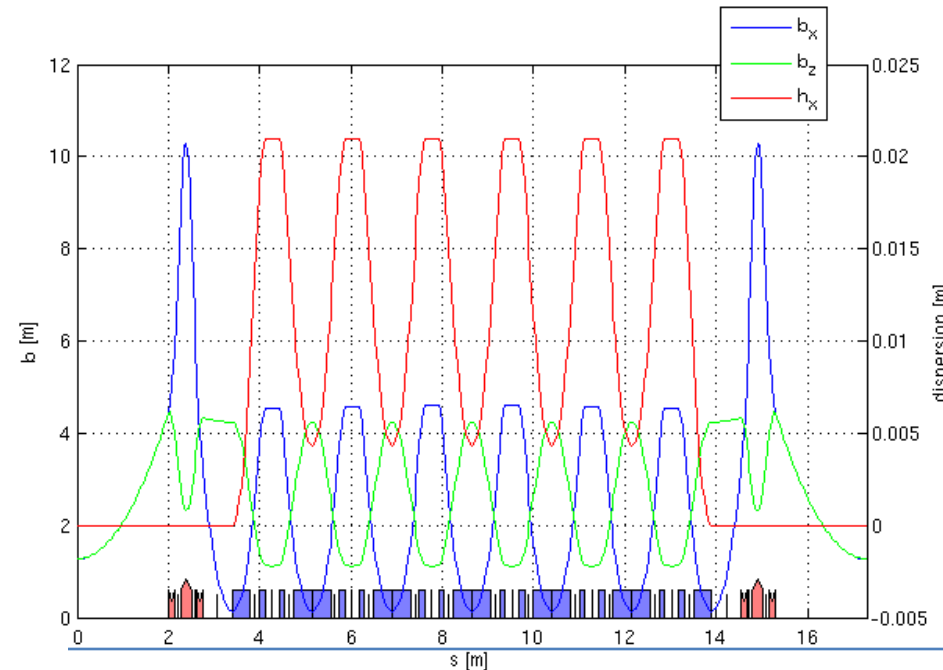


# Comparaison linéaire et développement de mailles à émittance ultra faible



**7BA BASELINE lattice 2.75GeV 20-fold symmetry**

Emittance $\varepsilon_x$	72 pm.rad
Tunes per period ( $\nu_x, \nu_z$ )	(2.76, 0.91)
Momentum compaction factor $\alpha_c$	1.47 E-4
Reverse bending angle	-0,048 degrees
Energy loss per turn	15.5 keV
$(\beta_x, \beta_z)$ @ Insertion Device	(1.0, 1.0) m



**7BA HOA lattice proposal 2.75GeV 20-fold symmetry**

Emittance $\varepsilon_x$	66 pm.rad
Tunes per period ( $\nu_x, \nu_z$ )	(3.37, 1.30)
Momentum compaction factor $\alpha_c$	5.50E-05
Reverse bending angle	-0.195 degrees
Energy loss per turn	27 keV
$(\beta_x, \beta_z)$ @ Insertion Device	

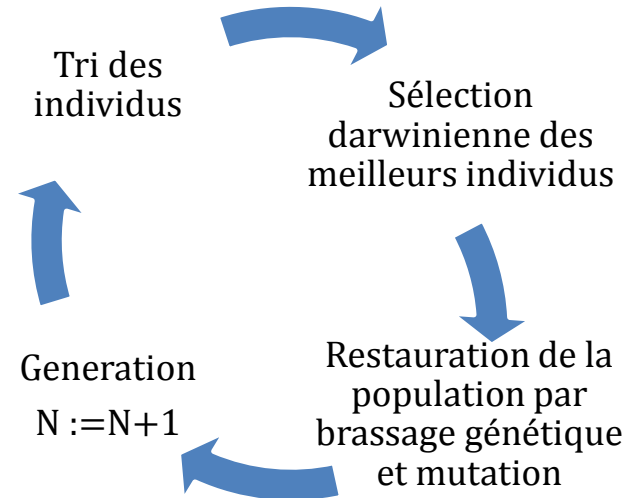
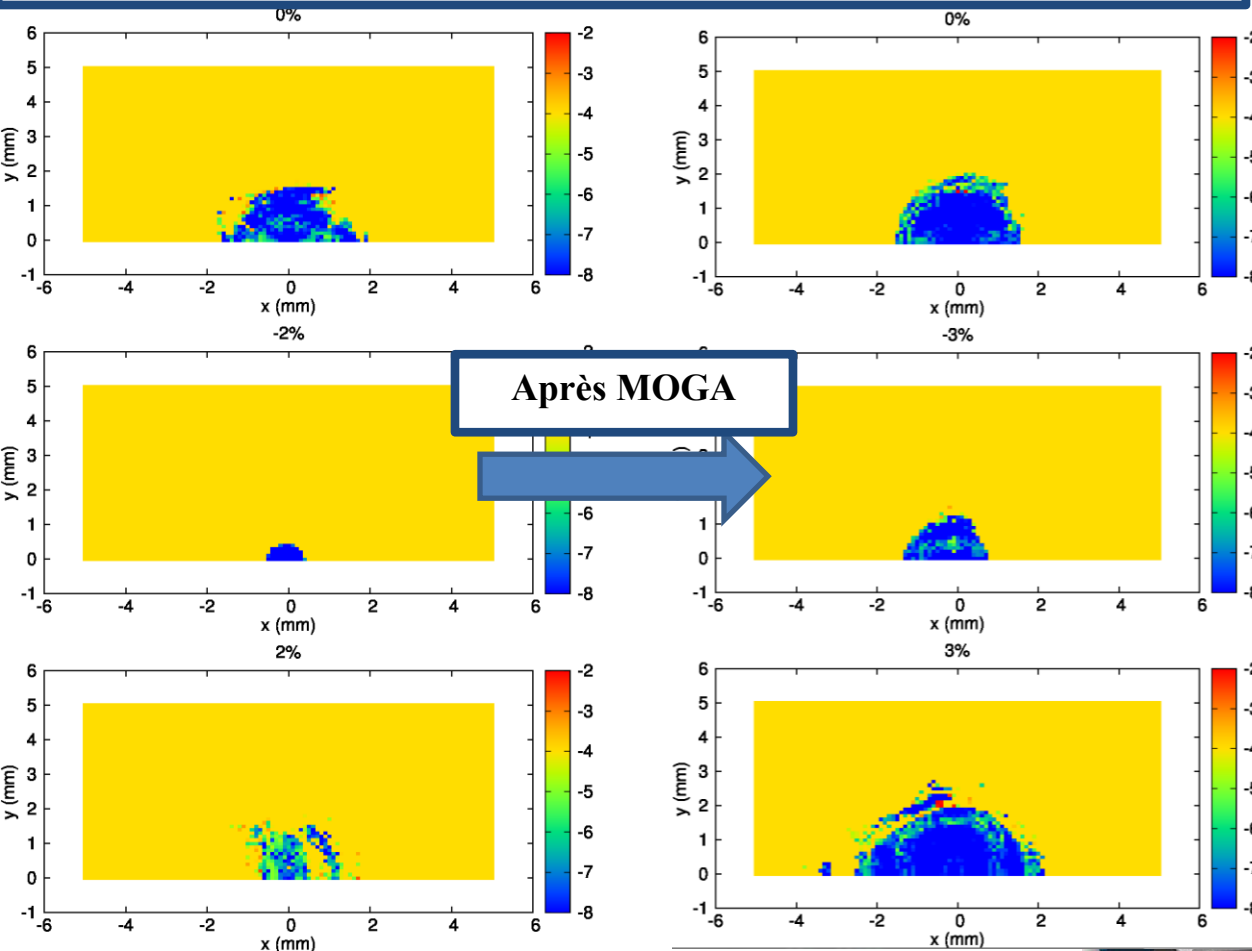


# Algorithme Génétique Multi-Objectifs (MOGA) pour l'optimisation non linéaire 4D

MOGA-Bmad : optimisation de l'ouverture dynamique on- et off-momentum à chromaticité constante.

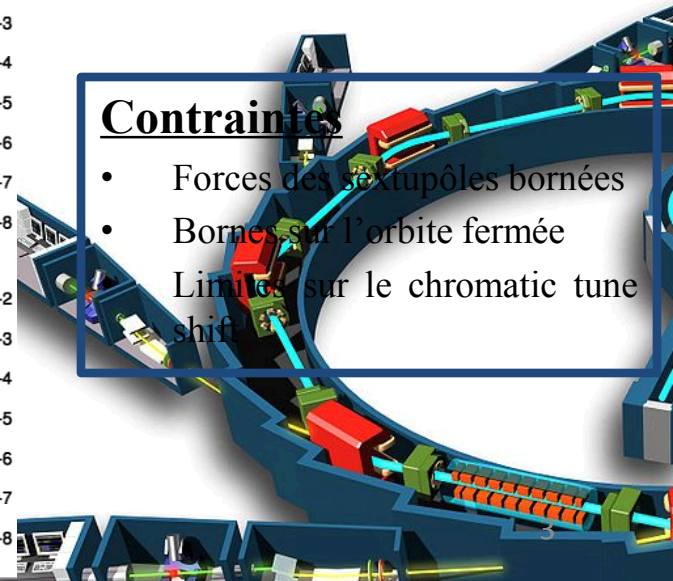
## Exemple

Optimisation de la maille 7BA-4BA à symétrie 1, avec bump de dispersion dans une section longue, en utilisant des sextupôles et des octupôles



## Contraintes

- Forces des sextupôles bornées
- Bornes sur l'orbite fermée
- Limites sur le chromatic tune shift



# Contrôle de l'espace longitudinal : restauration de l'acceptance en énergie par manipulation des ordres supérieurs du facteur de compression des moments

SFP = 'Stable Fixed Point'   
UFP = 'Unstable Fixed Point' 

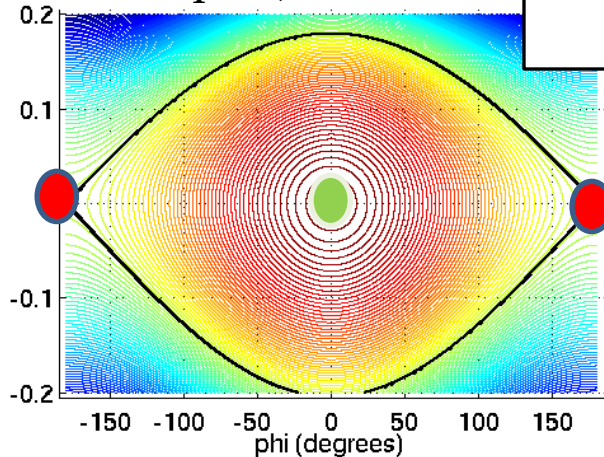
$$\alpha_c = \alpha_0 + 2\alpha_1\delta + 3\alpha_2\delta^2$$

$$\alpha_0 = 1,7E-4$$

$$\alpha_1 = 1,7E-4$$

$$\delta_{max} = 17\%$$

$$\delta_{min} = 20\%$$

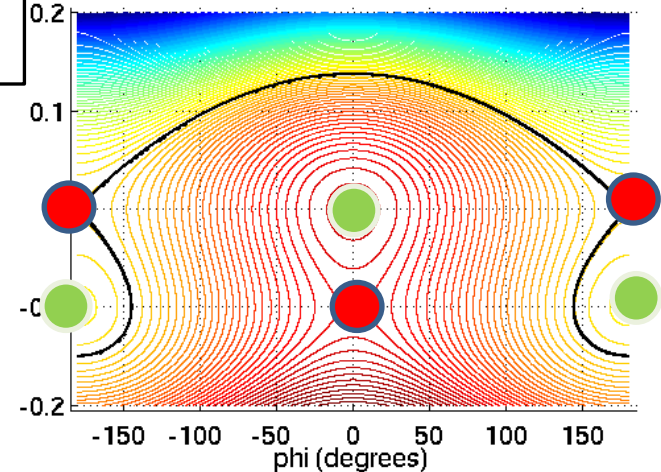


$$\delta_{max} = 13\%$$

$$\delta_{min} = 10\%$$

$$\alpha_0 = 1,7E-5$$

$$\alpha_1 = 1,7E-4$$



## Possibilité de contrôle : extension du MOGA

- Optimisation des ouvertures dynamiques transverses on- et off-momentum  
→ MOGA-Bmad
- Contrôles des caractéristiques de la zone stable longitudinale : taille, acceptance en énergie

$$\begin{cases} \alpha_0 = \frac{1}{C_0} \int_0^{C_0} -h\eta_0 ds \\ \alpha_1 = \frac{1}{C_0} \int_0^{C_0} \left[ \frac{\eta_0'^2}{2} - h\eta_1 \right] ds \\ \alpha_2 = \frac{1}{C_0} \int_0^{C_0} \left[ \eta_0'\eta_1' + h\frac{\eta_0\eta_0'^2}{2} - h\eta_2 \right] ds \end{cases}$$

# Etude de la distorsion de la trajectoire sur les mailles hybrides à ultra-faible émittance

Forte réduction de l'ouverture dynamique 6D de la maille SOLEIL de type  $-I^1$ .

Formule usuelle de l'allongement de la trajectoire, moyennée sur la phase :

$$\Delta C = -2\pi(J_x \xi_x + J_y \xi_y)$$

avec  $J_i$  la variable d'action et  $\xi_i$  la chromaticité.

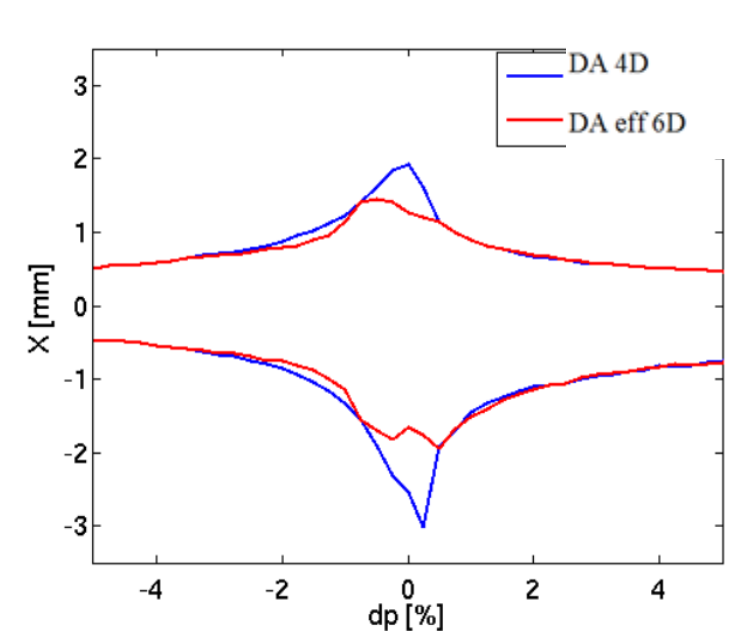
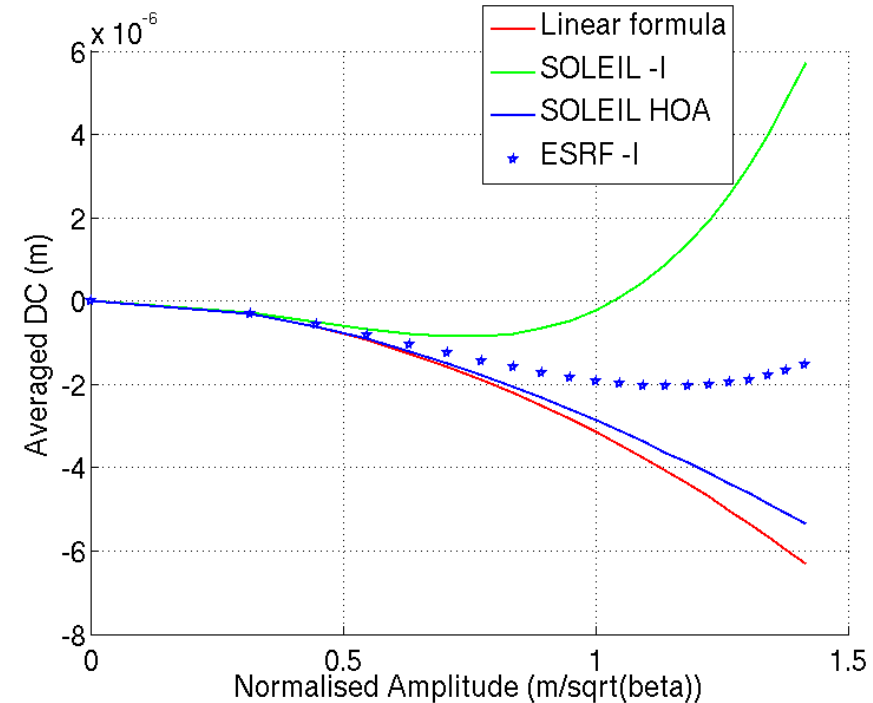


Figure 3: Horizontal dynamic aperture versus energy deviation at straight center with  $\beta_x=1.3 \text{ m.rad}^{-1}$ .

→ Programme pour réduire voire annuler cet effet et restaurer la dynamique (en cours)



Tracking 6D sous A.T. pour différentes mailles





# Les Journées accélérateurs

## Roscoff

2 - 4 octobre 2019

### Thèmes

*Présentations orales et posters*

Accélérateurs de hadrons

Accélérateurs de leptons

Accélération laser-plasma

Technologie des accélérateurs

Applications et aspects industriels



Secrétariat : Sandra Cardot  
email : [roscoff@accelerateurs.fr](mailto:roscoff@accelerateurs.fr)



**Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :**

Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Révol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),  
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM),  
Eric Giguet (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

**<http://accelerateurs.sfpnet.fr/>**



# The LHC “under pressure”

- Dynamic Pressure in the LHC -  
Detection of parasite ions and  
investigation of surface conditioning

S. Bilgen

LAL, IN2P3-CNRS, Paris-Sud University, Orsay

PhD supervisor:

G. Sattonnay – LAL

Work supervisors :

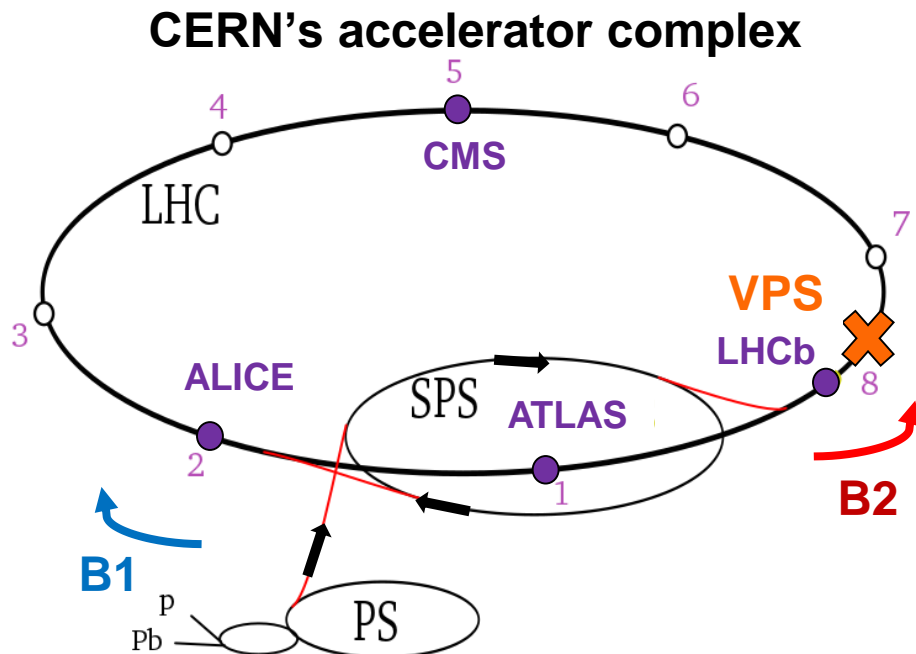
B. Mercier, C. Bruni – LAL

V. Baglin - CERN, Geneva, Switzerland

Supported by:

FCC-hh Project

# LHC RUN II Statement



## LHC characteristics

- ❖ World's largest and most powerful particle accelerator (27 km ring).
- ❖ Proton beam- PS- SPS- injection in LHC- energy ramp-collision at IP.
- ❖ CERN's mission: helps to uncover what the universe is made of and how it works.

## LHC RUN II

- Beam emittance increases
- Deterioration of the luminosity factor
- Premature dumps with occurred due to beam divergence and instabilities.

To stay operational during 2018, the LHC was limited to fewer than the nominal number of bunches

**LHC**  
27 km, 8.33 T  
13 TeV, 2556 b

**LHC**  
27 km, 8.33 T  
14 TeV, 2808 b

**FCC-hh**  
80 km, 20 T  
100 TeV, 10600 b

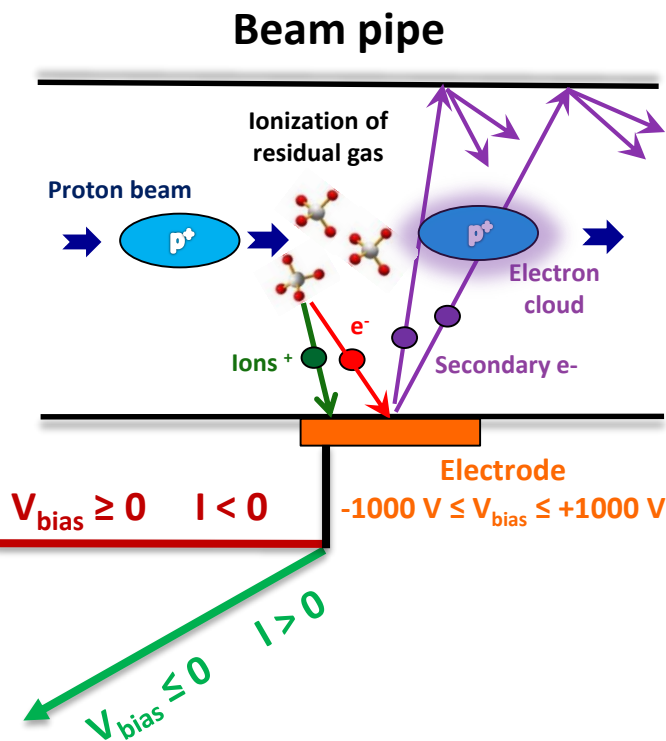
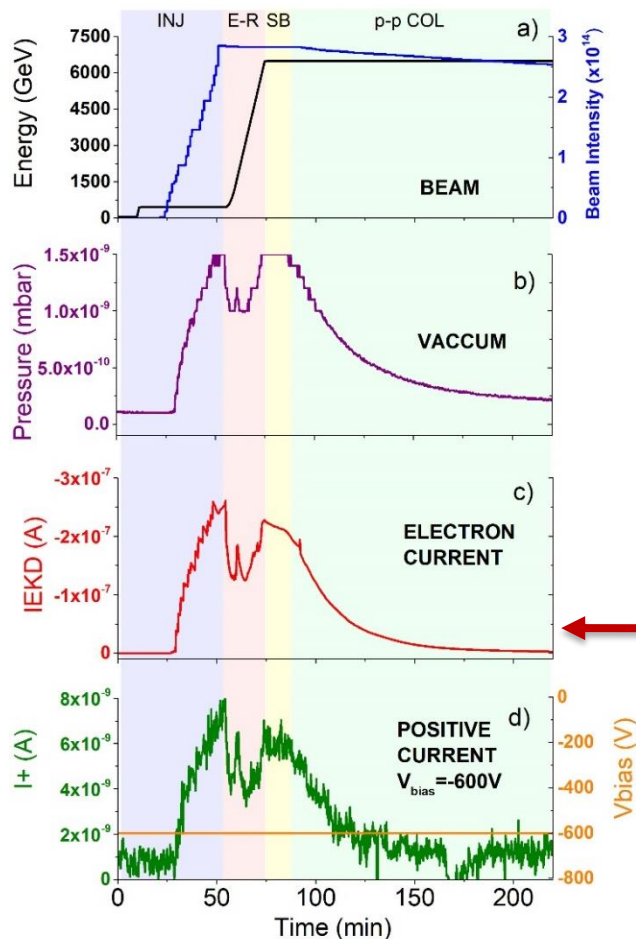
Dynamic pressure :

Stimulated desorption? Secondary particles? collective effects ?  
Electron cloud? Ions ? Influence of surfaces?

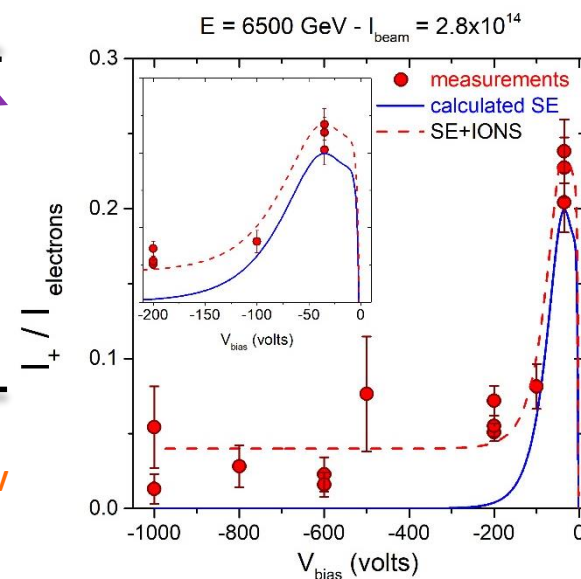


## Ionic current measured in the VPS of the LHC during RUN II

### Standard fill for physics



### Measurements with $V_{bias}$ scanning compared to calculated SE contribution



② The ion current represents 4% of the electron current.

① A positive ion current was detected.

## DYVACS - DYnamic VACuum Simulations

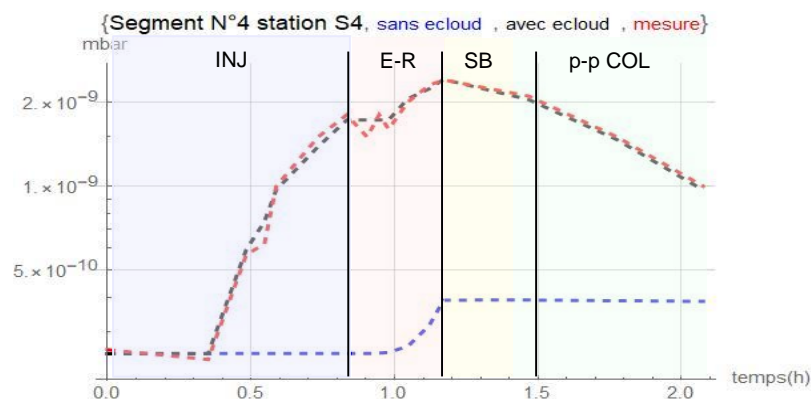
Analytical model of the dynamic pressure based on VASCO code

$n=1D$  gas density

$$C \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \eta_i \left( \underbrace{\sigma_{i-p} \cdot \frac{I_{beam}}{e}}_{\text{by p beam}} + \underbrace{\sigma_{i-e} \cdot \Gamma_e \cdot L}_{\text{by EC}} \right) \cdot n + \underbrace{\eta_e \Gamma_e}_{\text{Photon Desorption}} + \underbrace{\eta_{ph} \Gamma_{ph}}_{\text{Thermal Desorption}} + \underbrace{a \cdot q_{th}}_{\text{Pumping Flux}} - S \cdot n = 0$$

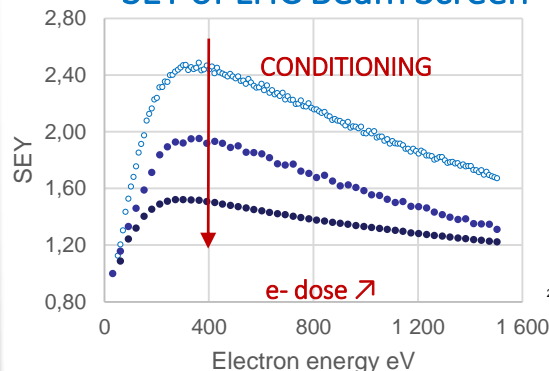
Molecular Diffusion      Ionic Desorption      Electronic Desorption (e<sup>-</sup> Cloud)      Pumping Flux

- Considering EC build-up: ↗ Electronic desorption
- Residual gas ionized by EC: ↗ ionic desorption

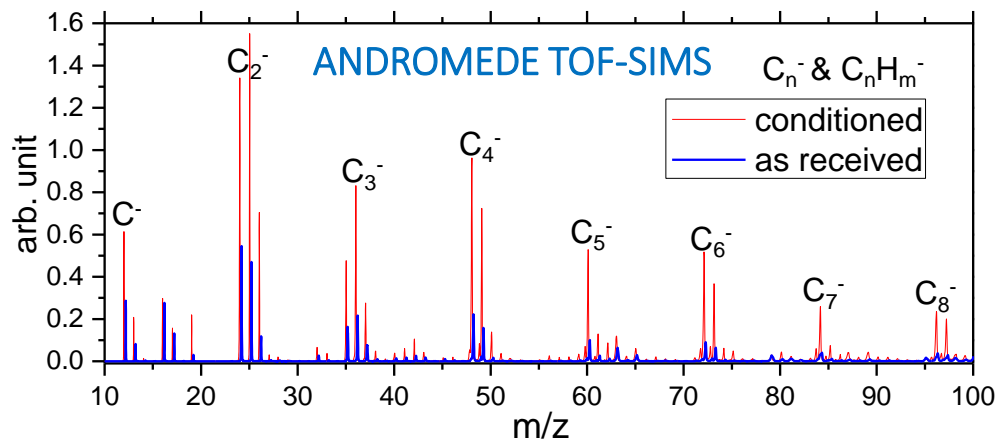
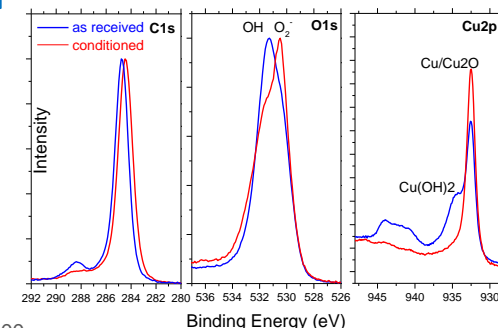


## Surface Analysis

### SEY of LHC Beam Screen



### XPS



- ⑤ Conditioning effect and graphitization: Beam pipe surface chemistry is modified by interactions with electrons (EC).

- ③ DYVACS simulations are in good agreement with measurements performed in the VPS of the LHC.
- ④ DYVACS can be used to predict dynamic pressure of future accelerators.

## Issue

Dynamic phenomena as stimulated desorption, secondary particle creation and some collective effects induce a beam quality degradation and limit accelerator performances.

## Results

- ① A positive ion current was detected.
- ② The ion current represents 4% of the electron current.
- ③ Simulations are in good agreement with measurements performed in the VPS.
- ④ DYVACS can be used to predict dynamic pressure of future accelerators.
- ⑤ Conditioning: Beam pipe surface chemistry is modified by interactions with e-.

## Perspectives

- Further investigations of Conditioning & stimulated desorption (e- and ions) are necessary.
- Experimental data needed as input for DYVACS.
- Prediction of dynamic pressure for the FCC project.





**Roscoff**  
2 - 4 octobre 2019



**Thank you for  
your attention !**



# Les Journées accélérateurs

## Roscoff

2 - 4 octobre 2019

### Thèmes

*Présentations orales et posters*

Accélérateurs de hadrons

Accélérateurs de leptons

Accélération laser-plasma

Technologie des accélérateurs

Applications et aspects industriels



Secrétariat : Sandra Cardot  
email : [roscoff@accelerateurs.fr](mailto:roscoff@accelerateurs.fr)



**Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :**

Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Révol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),  
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM),  
Eric Giguët (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

**<http://accelerateurs.sfpnet.fr/>**



# Étude des effets du champ de fuite des quadripôles finaux de HL-LHC sur des observables mesurées avec le faisceau

Thomas Pugat<sup>1</sup>,

B. Dalena<sup>1</sup>, L. Bonavantura<sup>2</sup>, A. Simona<sup>2</sup>,  
R. De Maria<sup>3</sup>, V. K. Berglyd Olsen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEA - DRF/Irfu/DACM/LEDA



<sup>2</sup>MOX, Politecnico di Milano



<sup>3</sup>CERN



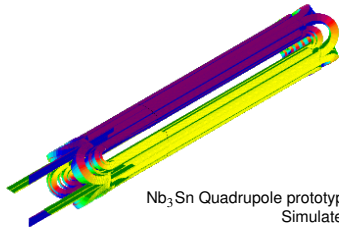
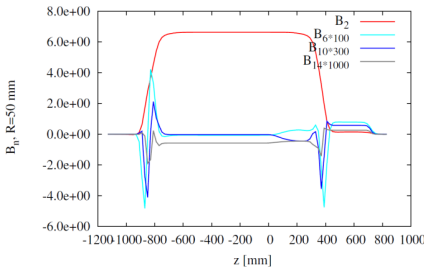
**PhD Thesis:** 17 April 2018 - 17 April 2021



# Thèse: Dynamique faisceau pour les évolutions du LHC

Afin d'améliorer la conception et les performances des futurs collisionneurs circulaires hadroniques, j'étudie l'impact des distributions longitudinales des harmoniques non-linéaires des aimants sur la dynamique du faisceau.

En particulier, je considère le cas des quadrupôles de focalisation des régions interactions où la fonction bêta-tronique est très élevée.



Nb<sub>3</sub>Sn Quadrupole prototype for HL-LHC  
Simulated with ROXIE  
Courtesy of CERN magnet group

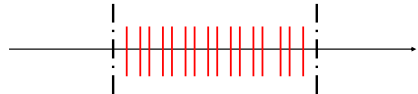
- Développer une fonction de transfert non-linéaire "réaliste" pour les études de dynamique faisceau.
- Utiliser des cartes magnétiques calculées ou mesurées.
- Déterminer des observables sensibles à la description longitudinale des harmoniques du champ.

# Modèle de fonction de transfert non-linéaire

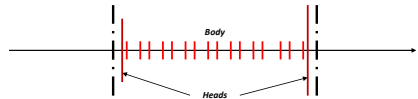
- 1 **HE (Hard Edge):** 16 "Kick and Drift" de forces multipôlaire intégrées identiques ( $\int B_n dz$ ).
- 2 **HE+Heads:** Similaire à HE avec une partie des forces intégrées dans des kick additionnels aux extrémités des quadripôles.
- 3 **Lie2:** Fonction de transfert non-linéaire dérivée de l'algèbre de Lie. Les extrémités sont modélisées en calculant le potentiel vecteur avec  $dz = 2cm$ .
  - **ND0:** Les harmoniques pures du quadripôle.
  - **ND6:** avec jusqu'à la 6<sup>ème</sup> dérivée du gradient.

La force intégrée des multipôles est la même pour tous les modèles (hors dérivées des gradients). Les harmoniques non naturelles sont modélisées comme HE dans les 3 cas.

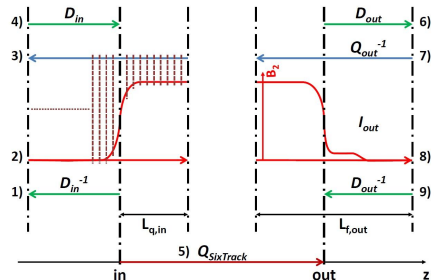
HE:



HE+Heads:



Lie2:



# Context des études

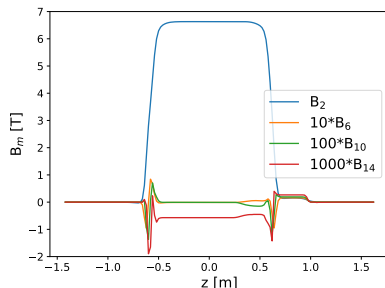
## Objectifs:

Étudier l'impact d'une description plus réaliste des harmoniques magnétiques des quadripôles des Triplet Finaux (IT) de HL-LHC sur des observables mesurées avec le faisceau:

- Le décalage du nombre d'onde avec l'amplitude  
(Amplitude Detuning, ici)
- L'ouverture dynamique  
(Dynamic Aperture, DA, voir le poster)

## Amplitude Detuning théorique:

$$\Delta Q_u = \underbrace{(\partial Q_u / \partial 2J_u)}_{b_4, b'_2, b''_2} 2J_u + \underbrace{\left( \frac{1}{2} \partial^2 Q_u / \partial (2J_u)^2 \right)}_{b_6, b'_4, b''_4, b'''_2, b''''_2} (2J_u)^2$$



Harmoniques normales échantillonnées avec  $\Delta z = 2$  cm pour le prototype de quadripôle de l'IT. Grâce à E. Todesco et S. Izquierdo Bermudez.

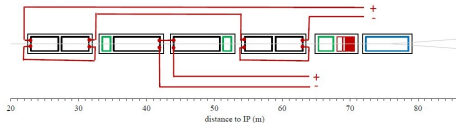
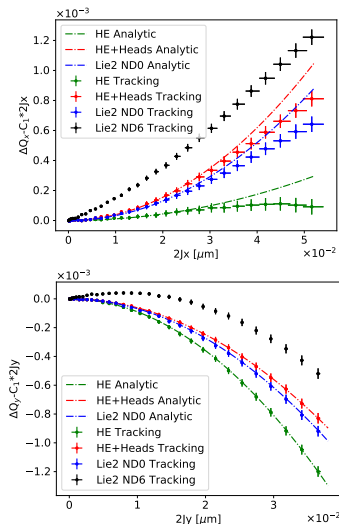


Schéma de l'alimentation des Triplet Finaux.

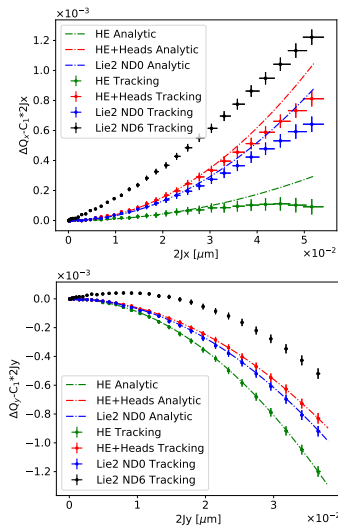
# Contribution à l'Amplitude Detuning



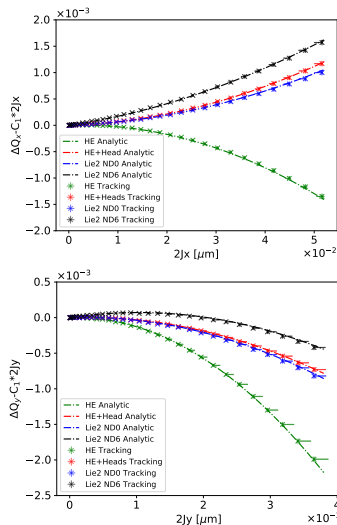
Amplitude Detuning avec toutes les harmoniques ( $b_3, b_4, b_5, b_6, \dots$  + aléatoire) dans l'IT sans la correction du  $b_6$ .



# Contribution à l'Amplitude Detuning



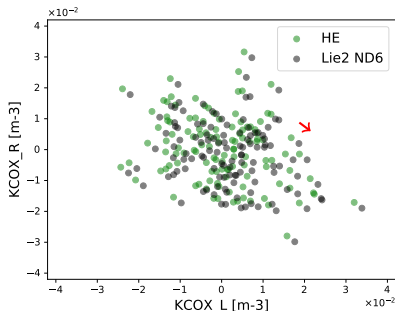
Amplitude Detuning avec toutes les harmoniques ( $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$ ,  $b_6$ , ... + aléatoire) dans l'IT sans la correction du  $b_6$ .



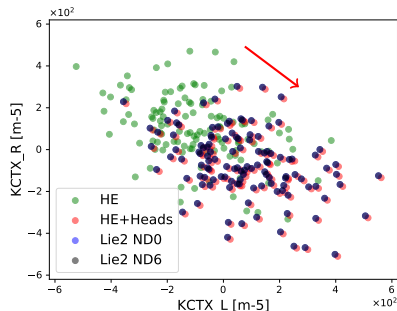
Amplitude Detuning avec uniquement l'harmonique  $b_6$  (+ aléatoire  $b_6$ ) dans l'IT sans la correction du  $b_6$ .

# Forces des correcteurs non-linéaires

Forces intégrées pour les correcteurs **octupolaires** (appelées KCOX) calculées pour les modèles HE et Lie2 ND6, avec 60 graines.



Forces intégrées pour les correcteurs **dodécapolaires** (appelées KCTX) calculées pour les 4 modèles, avec 60 graines.



Il y a un décalage systématique dans la force des correcteurs d'ordre supérieur ( $b_4$ ,  $b_6$ ) dépendant du modèle. Les valeurs restent néanmoins dans les spécifications.

# Conclusion et Perspectives

## Conclusion:

- L'Amplitude Detuning de 2<sup>ème</sup> ordre est sensible à la distribution longitudinale des harmoniques.
- Le modèle HE+Heads est une approximation rapide et efficace de la distribution longitudinale des harmoniques.
- Les dérivées jusqu'à la 2<sup>ème</sup>-ordre du gradient principal (octupole-like) impactent le Amplitude Detuning linéaire.
- Une déviation par rapport à un Amplitude Detuning purement de 2<sup>ème</sup> ordre apparaît qui pourrait être expliquée par des harmoniques d'ordre supérieur.
- Les forces des correcteurs calculées avec le nouveau modèle restent dans les spécifications.
- Le modèle Lie2 a été implémenté dans SixTrack.

## Perspectives:

- Répéter les analyses pour le LHC et FCC (si les harmoniques du champ sont disponibles).
- Étudier des techniques de réduction de bruit dans le spectre des mesures tour par tour des BPMs pour améliorer les mesures sur le faisceau: méthode Bayésienne, Machine Learning, ...
- Est-ce que d'autres observables ( $\beta$ -beating, avance de phase, RDTs) sont sensibles aux non-linéarités et au modèle?

# Bibliographie

- [1] *Fringe Field Modeling for the High Luminosity LHC Large Aperture quadrupole*,  
B. Dalena *et al.*,  
in *Proc. IPAC'14*, Dresden, Germany, June 2014, paper TUPRO002, pp. 993-996.
- [2] *Accurate and Efficient Tracking in Electromagnetic Quadrupoles*,  
T. Pognat *et al.*,  
in *Proc. IPAC'18*, Vancouver, Canada, June 2014, paper THPAK004, pp. 3207-3210.
- [3] *Accurate computation of transfer maps from magnetic field data*,  
M. Venturini, A. J. Dragt,  
*Nucl. Instr. Meth.*, vol. 427, pp. 387-392, May 1999.
- [4] SixTrack,  
<http://sixtrack.web.cern.ch/SixTrack>
- [5] *High order time integrators for the simulation of charged particle motion in magnetic quadrupoles*,  
A. Simona *et al.*,  
*Comp. Phys. Comm.*, vol. 239, pp. 33-52, Feb. 2019.
- [6] *HLLHC V1.0: HL-LHC Layout and Optics Models for 150 mm Nb3Sn Triplets and Local Crab-cavities*,  
R. De Maria *et al.*,  
in *Proc. IPAC'13*, Shanghai, China, May 2013, paper TUPFI014, pp. 1358-1360.
- [7] *Dynamic aperture studies for HL-LHC V1.0*,  
Y. Cai *et al.*,  
CERN-ACC-2018-0054.
- [8] *Report from LHC MDs 1391 and 1483: Tests of new methods for study of nonlinear errors in the LHC experimental insertions*,  
E. H. Maclean *et al.*,  
CERN, Geneva, Switzerland, Rep.  
CERN-ACC-Note-2018-0035, Jan. 2017
- [9] *Report from LHC MD 2158: IR-nonlinear studies*,  
E. H. Maclean *et al.*,  
CERN, Geneva, Switzerland, Rep.  
CERN-ACC-2018-0021, Mar. 2018
- [10] *Detailed review of the LHC optics commissioning for the nonlinear era*,  
E. H. Maclean *et al.*,  
CERN, Geneva, Switzerland, Rep.  
CERN-ACC-2019-0029, Feb. 2019
- [11] MADX, <https://mad.web.cern.ch/mad>
- [12] *Tune Dependence on Momentum and Betatron Amplitudes*,  
A. W. Chao and M. Tigner,  
in *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, 2nd printing, 1999, pp. 73
- [13] *SIXTRACK VERSION 5: STATUS AND NEW DEVELOPMENTS*,  
R. De Maria *et al.*,  
in *Proc. IPAC'19*, Melbourne, Australia, May 2019, paper WEPTS043, pp. 3200-3203



# Les Journées accélérateurs

## Roscoff

2 - 4 octobre 2019

### Thèmes

*Présentations orales et posters*

Accélérateurs de hadrons

Accélérateurs de leptons

Accélération laser-plasma

Technologie des accélérateurs

Applications et aspects industriels



Secrétariat : Sandra Cardot  
email : [roscoff@accelerateurs.fr](mailto:roscoff@accelerateurs.fr)



**Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :**

Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Révol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),  
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM),  
Eric Giguet (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

**<http://accelerateurs.sfpnet.fr/>**





# Étude de l'instabilité de couplage des modes transverses dans le grand collisionneur de hadrons du CERN

D.Amorim

Superviseur CERN: N.Biancacci

Directeur de thèse: J.-M. De Conto

Remerciements:

S.Antipov, X.Buffat, E.Carideo, L.Carver, T.Levens, A.Mereghetti, E.Métral,  
N.Mounet, A.Oeftiger, B.Salvant, M.Soderen, D.Valuch, LHC-OP and Injectors-OP

Journées accélérateurs 2019

Roscoff, France

2 Octobre 2019

# La luminosité est la grandeur clé dans un collisionneur

$M$  nombre de paquets

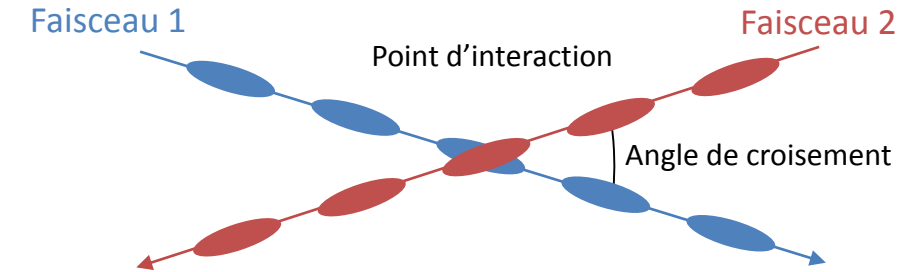
$N_b$  intensité du paquet

$f_0$  fréquence de révolution

$\sigma_{x,y}$  taille transversale

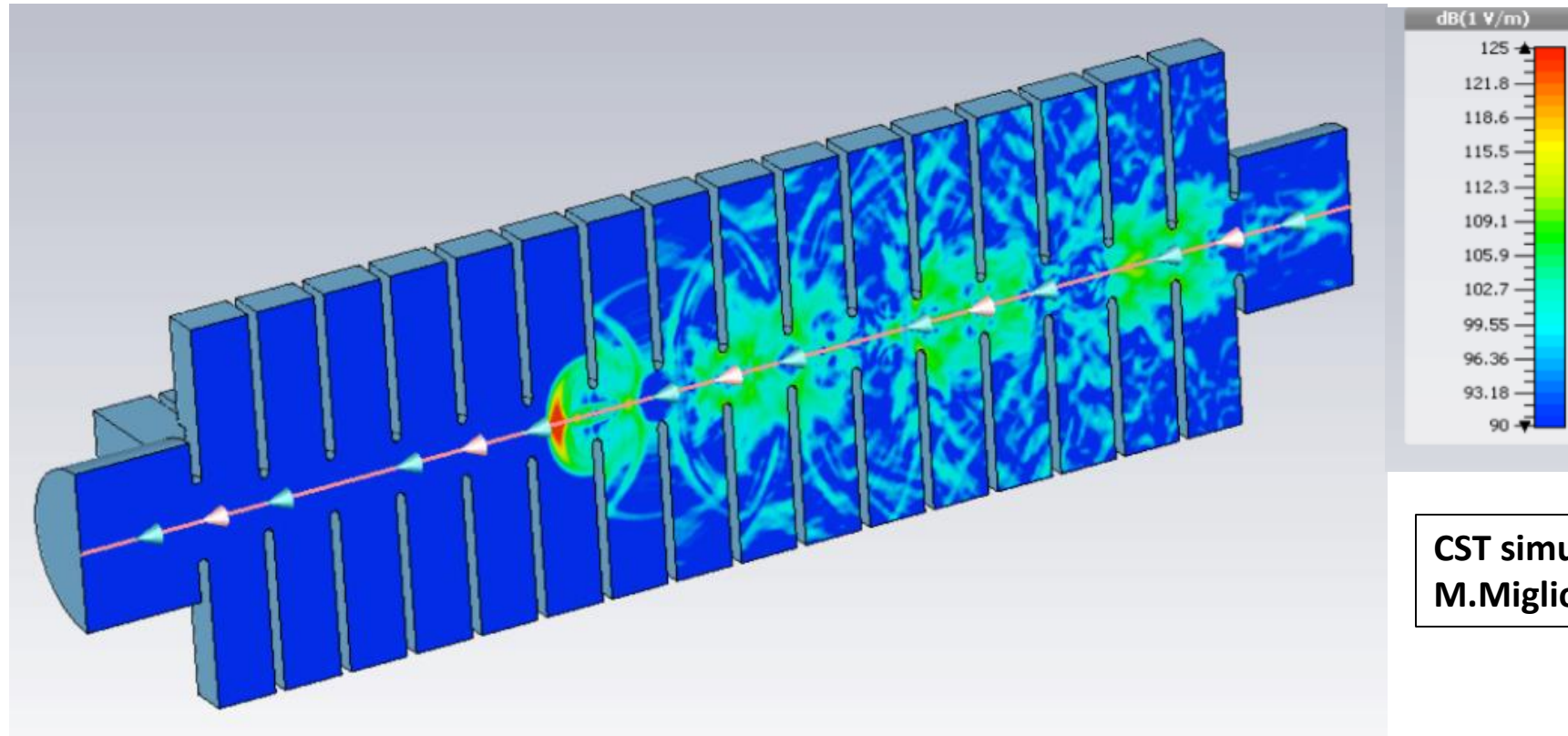
$F$  facteur de réduction (angle de croisement)

$$\mathcal{L} = \frac{f_0 M N_b^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y} F$$



- Le projet de LHC Haute Luminosité (HL-LHC) prévoit d'augmenter celle-ci d'un facteur 5
  - En augmentant l'intensité des paquets
  - En réduisant la taille des paquets et l'angle de croisement

# Le faisceau interagit électromagnétiquement avec son environnement

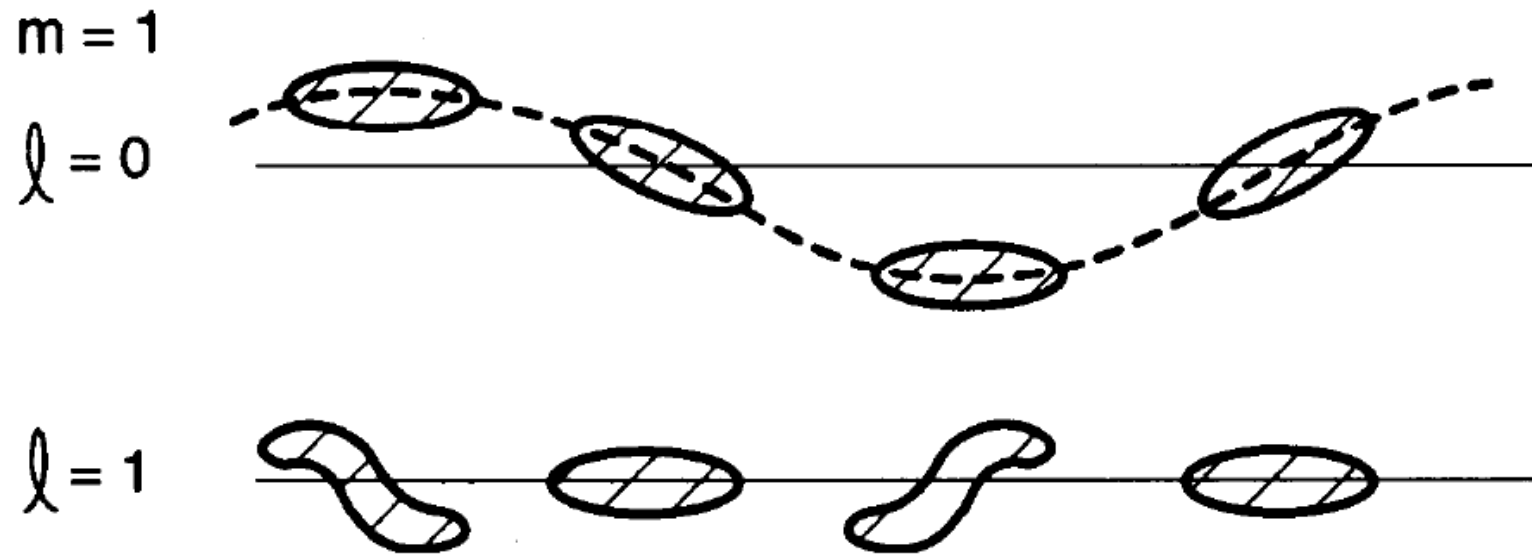


CST simulation,  
M.Migliorati

- L'impédance de la machine caractérise ces champs électromagnétiques
- Ces champs peuvent perturber les paquets suivants, voir le paquet lui-même
- Ces effets peuvent être atténués en optimisant les équipements de la machine

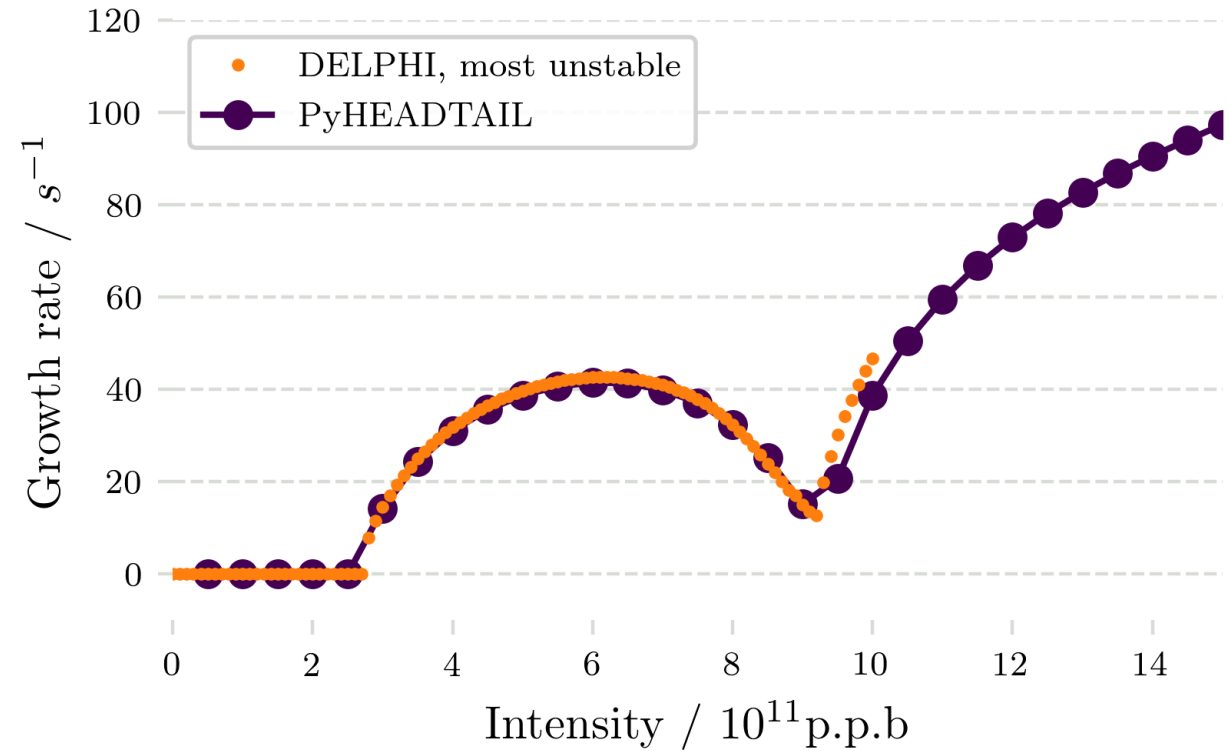
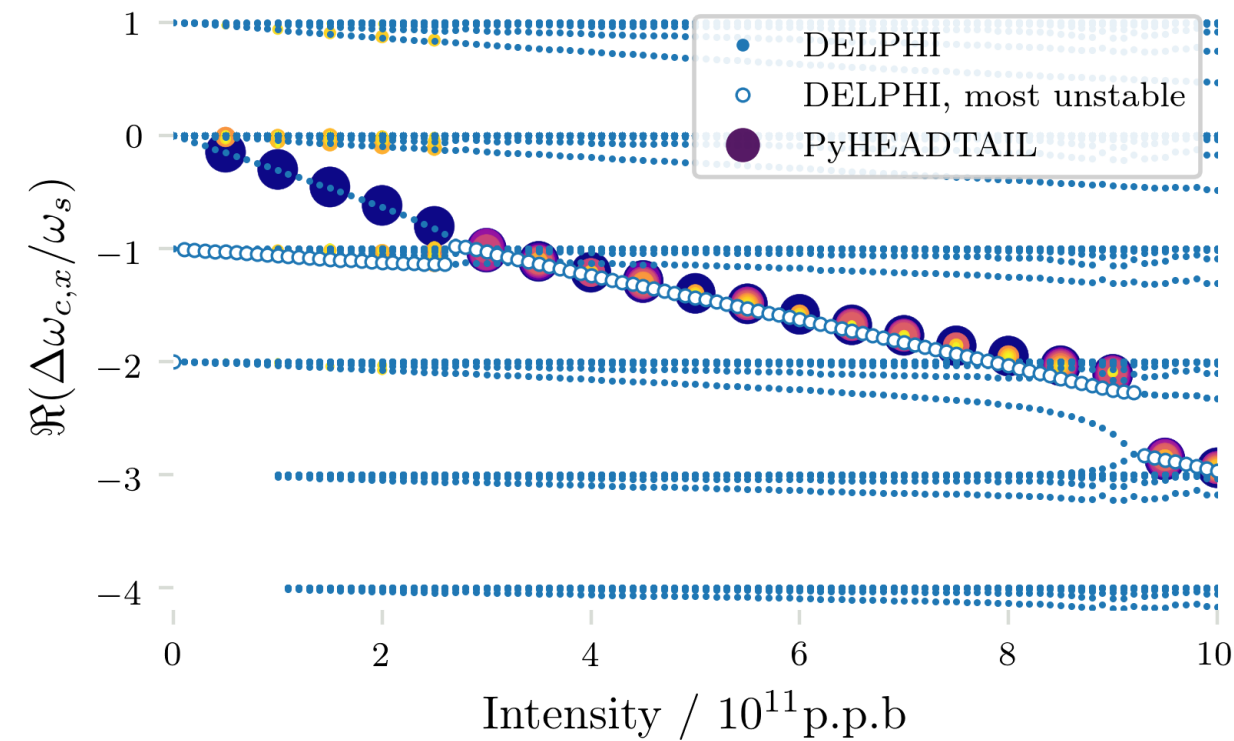
# A haute intensité, les paquets peuvent se mettre à osciller

- Peut causer des **pertes d'intensité**, une **augmentation** de la **taille** des paquets voir des **extractions non prévues** du faisceau



# Les modes d'oscillation peuvent être simulés avec différentes approches

- Analytique: résolution de l'équation de Vlasov (ex: code DELPHI)
- Tracking avec des code macroparticules (ex: code PyHEADTAIL)

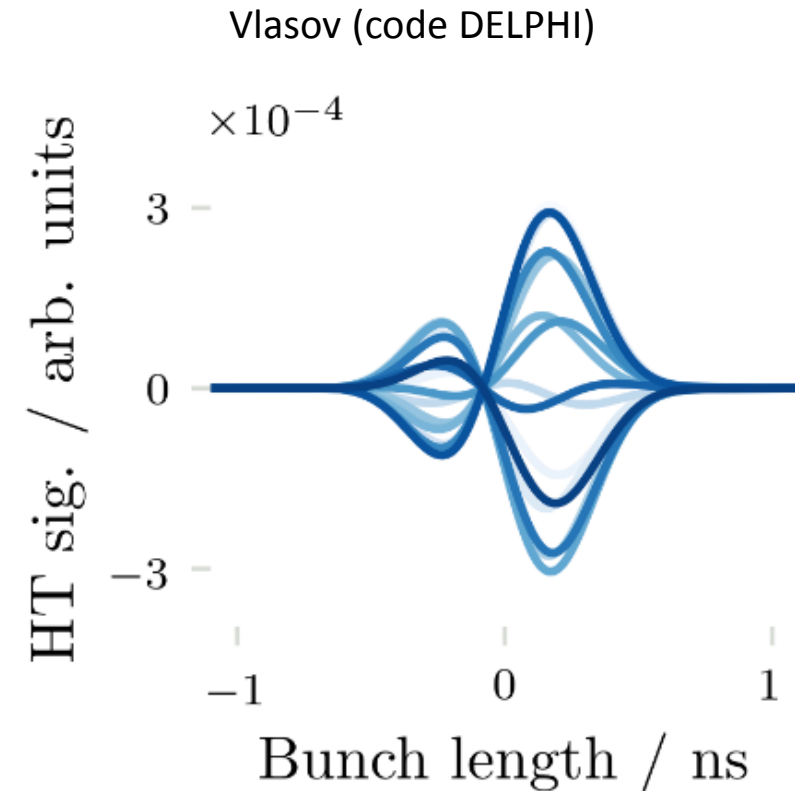
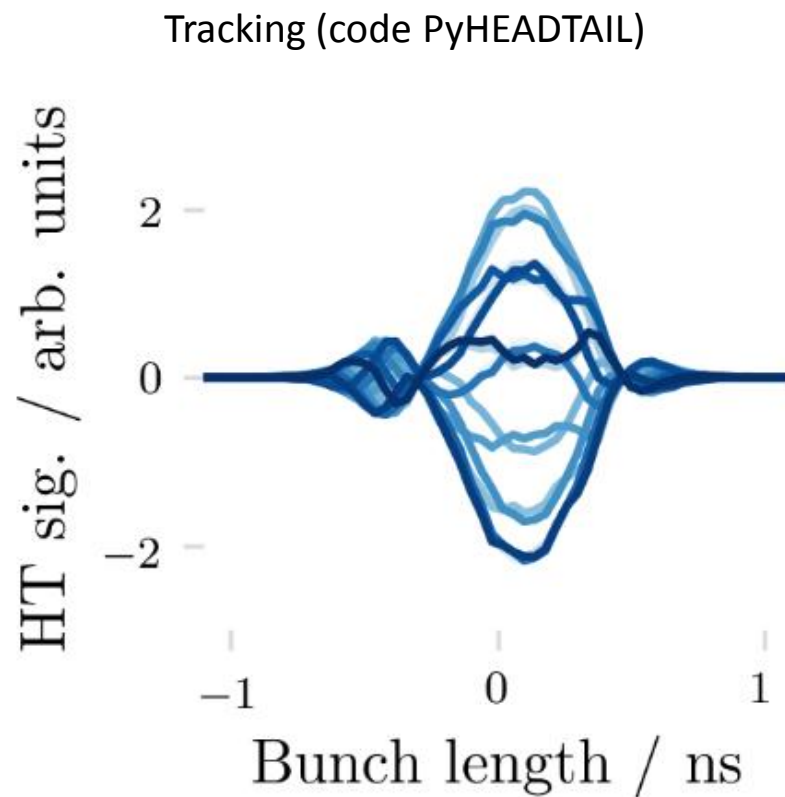


Modèle impédance: LHC 2017



# Les profils des paquets peuvent être obtenus avec les deux approches

- Reconstruction analytique implémentée dans le code DELPHI
- Accès a une observable supplémentaire

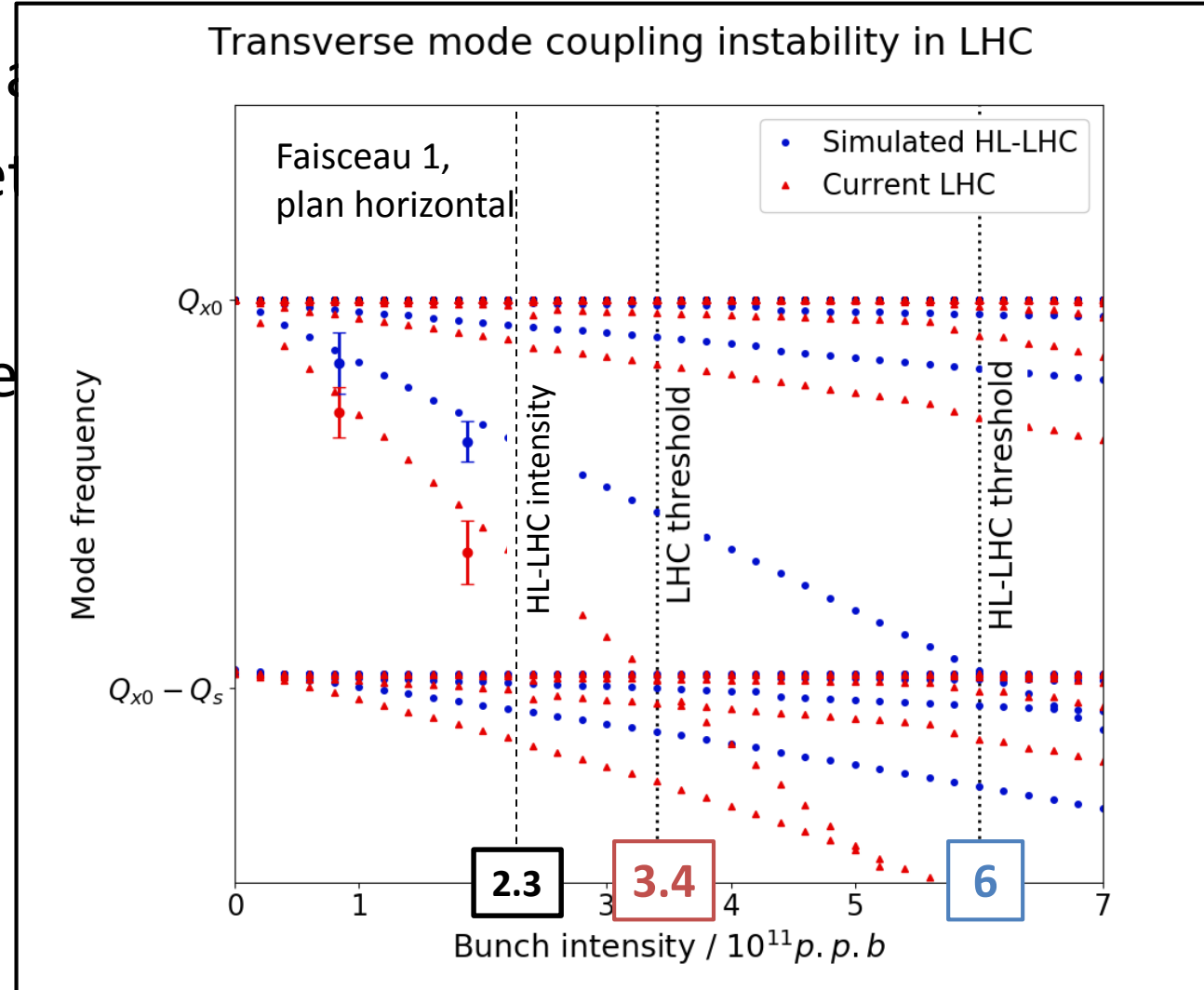


# L'impédance de HL-LHC doit être réduite pour faire face à l'augmentation d'intensité

- Évaluer les marges de stabilité actuelles
- Prouver l'effet bénéfique de la réduction d'impédance
- Méthode: mesure du décalage du nombre d'onde transverse

# L'impédance de HL-LHC doit être réduite pour faire face à l'augmentation d'intensité

- Évaluer les ma
- Prouver l'effet
- Méthode: me



erse

# Conclusions

- Les instabilités faisceau causées par l'impédance peuvent être étudiées par des codes analytiques ou par des codes de tracking
- Le code analytique DELPHI permet de reconstruire le profil des paquets mesurable dans l'accélérateur
- L'effet bénéfique de la réduction d'impédance prévue pour HL-LHC a pu être démontré



# Les Journées accélérateurs

## Roscoff

2 - 4 octobre 2019

### Thèmes

*Présentations orales et posters*

Accélérateurs de hadrons

Accélérateurs de leptons

Accélération laser-plasma

Technologie des accélérateurs

Applications et aspects industriels



Secrétariat : Sandra Cardot  
email : [roscoff@accelerateurs.fr](mailto:roscoff@accelerateurs.fr)



**Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :**

Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Révol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),  
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM),  
Eric Giguet (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

**<http://accelerateurs.sfpnet.fr/>**





# **First Beam-Beam Long-range Compensation Experiment in the CERN LHC**

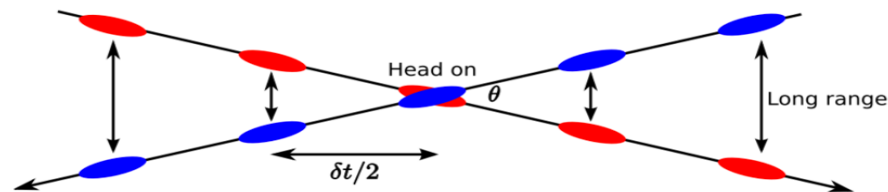
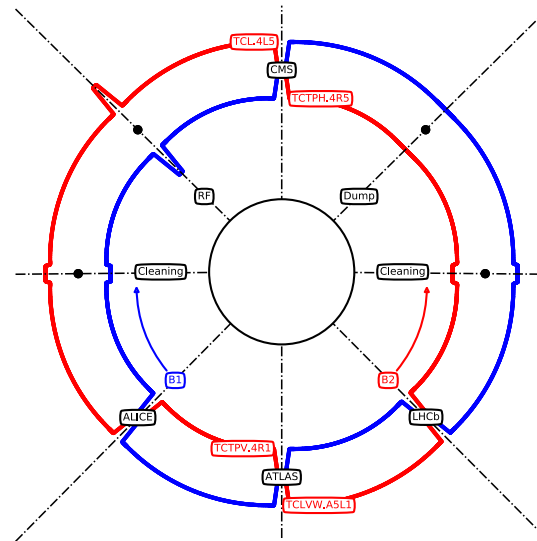
A. Poyet



Journées Accélérateurs de la SFP – Roscoff – 2<sup>nd</sup> October 2019

# I – Introduction to the problem

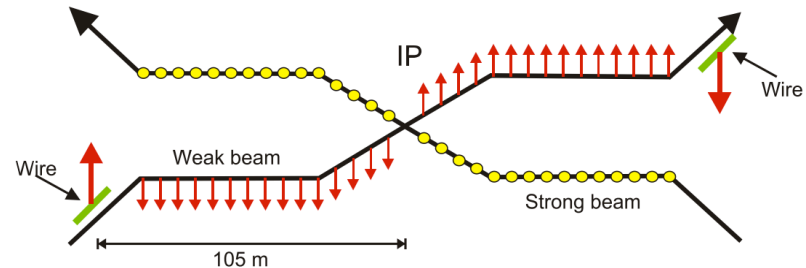
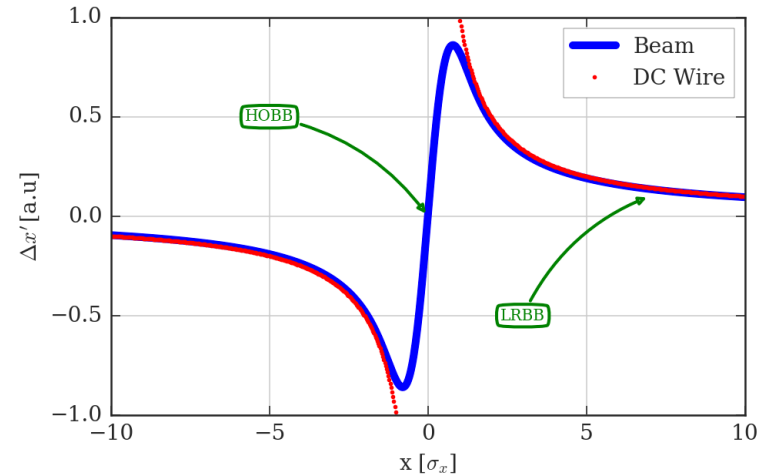
- LHC is a **collider**
  - 2 beams circulating and colliding in 4 points
- Two types of interactions:
  - Maximizing the **inelastic collisions** (**Head-On** → **Luminosity**)
  - Consequence: **electromagnetic** interactions (**Long-Range** → lifetime deterioration)
- This effect increases with the beam intensity, and with the reduction of crossing angle → **limitation for LHC, HL-LHC and other future colliders**





## II – Proposed solution

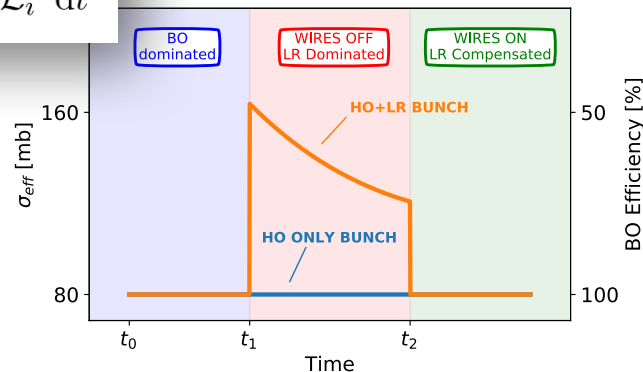
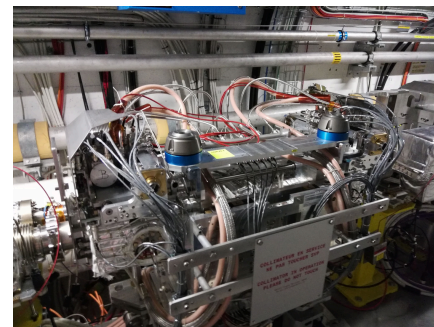
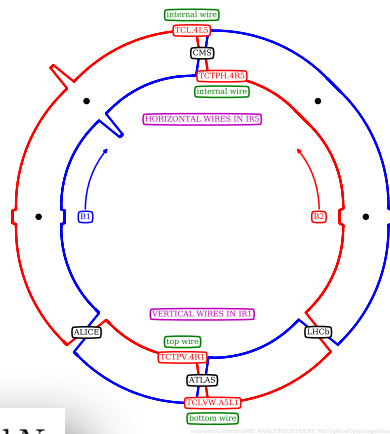
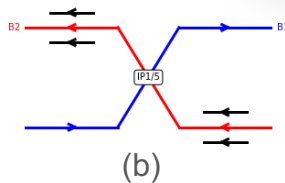
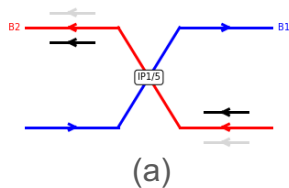
- Early 2000's, JP Koutchouk proposed for the first time to **compensate the BBLR using a wire**
- By placing a wire at the same s-position as the BBLR interaction, **this wire would produce the same kick**
- **Impossible to install one wire per interaction** → ~20 interactions per side per IP
- **The s-position of the wire has an important impact on the non-linear beam dynamics of the problem**
- One wire per side per IP, choose wisely !



# III – Experimental Setup

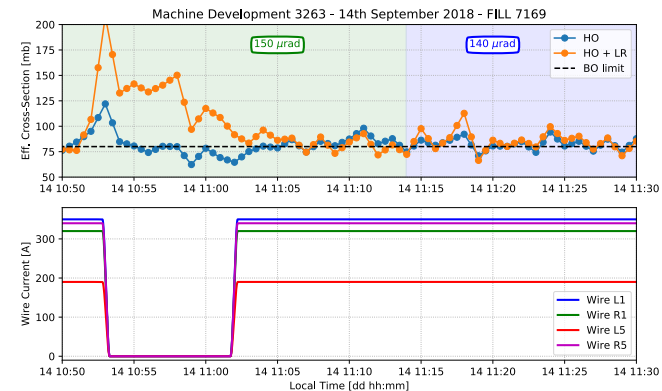
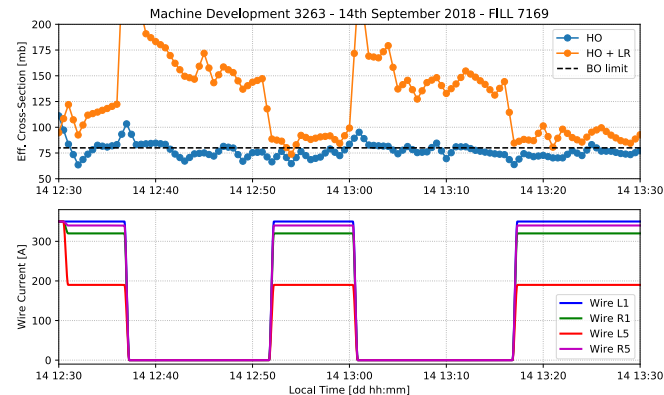
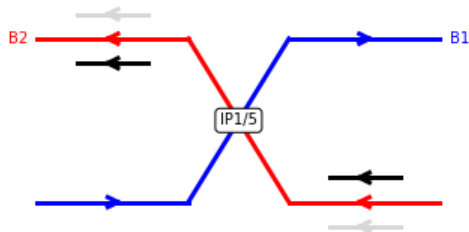
- Wires embedded in **4 collimators** around IP1/5 (8 wires)
- 2 possible configuration :
  - Single wire** configuration (a)
  - Alternative non-linear** configuration (b)

$$\sigma_{eff} = - \frac{1}{\sum_i \mathcal{L}_i} \frac{dN}{dt}$$



# IV – Experimental Results

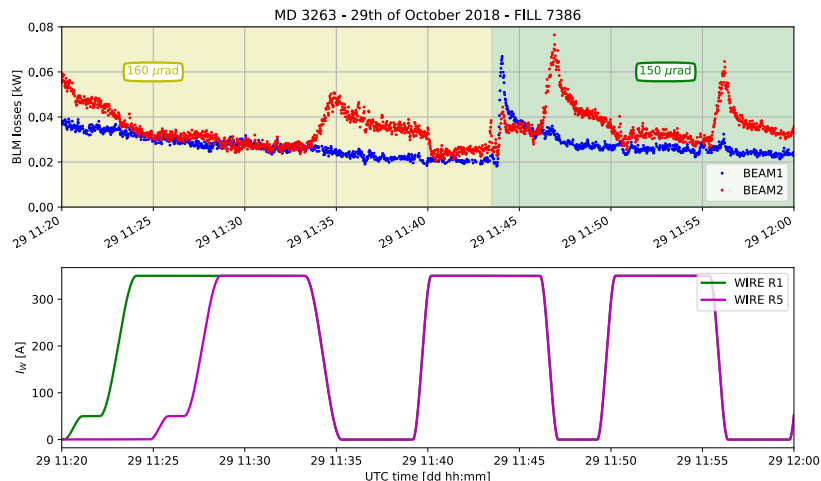
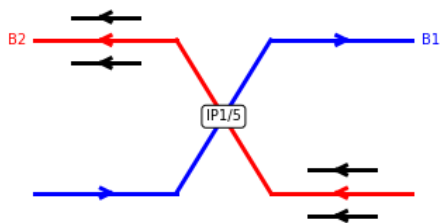
- **Single wire configuration**
- **Clear effect** on the effective cross-section, even by **reducing the crossing angle**





# IV – Experimental Results

- **Alternative non-linear configuration**
- **Visible effect** on the **beam losses**, possibility to **reduce the crossing angle** without increasing the losses



# Conclusions

- During LHC Run II, 2 years of experiments during which the potential of the compensation of the BBLR using wires has been observed
- Powering the wires reduces the beam losses, allowing a reduction of the crossing angle
- Tests have been led both with low intensity beams, and in scenarios closer to operation
- The next step is now to prepare the LHC Run III in order to gain experience in operation with the wires



***Thank you for your attention!***



Credits : thanks to the wire compensators team !



# Les Journées accélérateurs

## Roscoff

2 - 4 octobre 2019

### Thèmes

*Présentations orales et posters*

Accélérateurs de hadrons

Accélérateurs de leptons

Accélération laser-plasma

Technologie des accélérateurs

Applications et aspects industriels



Secrétariat : Sandra Cardot  
email : [roscoff@accelerateurs.fr](mailto:roscoff@accelerateurs.fr)



**Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :**

Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Révol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),  
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM),  
Eric Giguet (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

**<http://accelerateurs.sfpnet.fr/>**



# Résonateur Quadripolaire

## Conception d'un nouvel instrument pour la caractérisation d'échantillons supraconducteurs

Sarra BIRA

Directeur de thèse: Michel Guidal

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay IPNO



Journée Accélérateurs Roscoff 2019



# Plan

- Motivations
- Le résonateur quadripolaire
- Principe de mesure de la résistance de surface
- Etapes de conception
- Ensemble résonateur et chambre de mesure
- Conclusion et perspectives.



# Motivations

- Les cavités accélératrices en **Niobium massif** ( $T_c < 9.2 \text{ K}$ )
  - Performances max atteintes  $\Rightarrow E_{acc} = 59 \text{ MV/m}$   
soit  $B_s = 200 \text{ mT}$



Cavité accélératrice

# Motivations

- Les cavités accélératrices en **Niobium massif** ( $T_c < 9.2$  K)
  - Performances max atteintes  $\Rightarrow E_{acc} = 59$  MV/m  
soit  $B_s = 200$  mT
- Objectif: trouver des nouveaux matériaux supraconducteurs avec  $B_c$  et  $T_c$  plus élevés
  - $\Rightarrow Nb_3Sn, NbN, MgB_2$



Cavité accélératrice

# Motivations

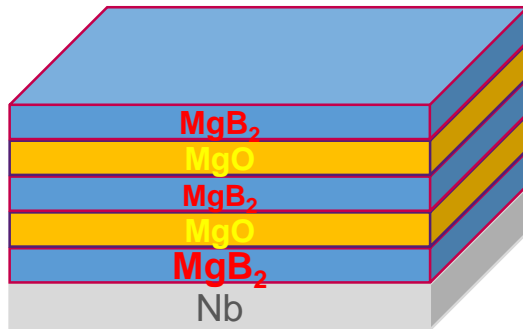
- Les cavités accélératrices en **Niobium massif** ( $T_c < 9.2$  K)

➤ Performances max atteintes  $\Rightarrow E_{acc} = 59$  MV/m  
soit  $B_s = 200$  mT

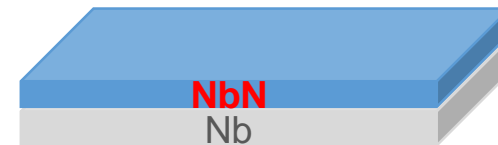


Cavité accélératrice

- Objectif: trouver des nouveaux matériaux supraconducteurs avec  $B_c$  et  $T_c$  plus élevés  
➤  $\Rightarrow Nb_3Sn, NbN, MgB_2$



Multicouches



Couche mince

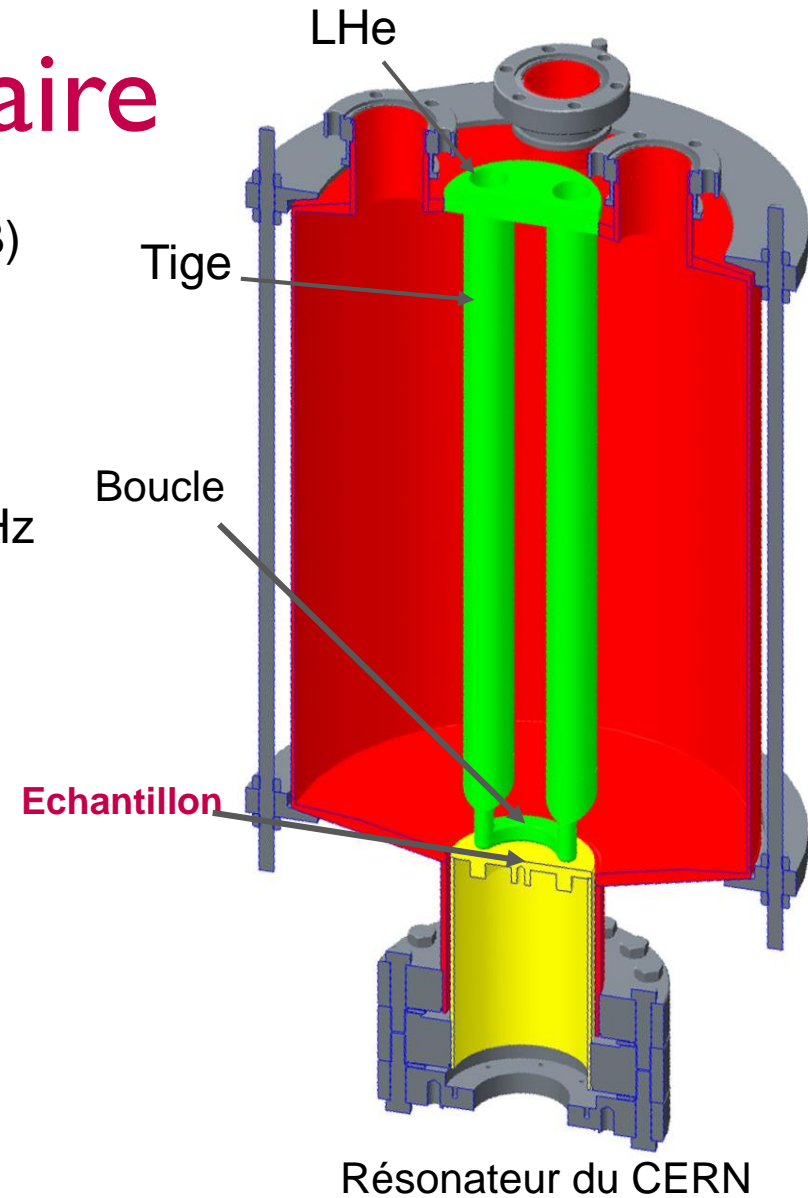


# Résonateur quadripolaire

- Propriétés du matériau supraconducteur ( $f$ ,  $T$ ,  $B$ )
  - Mesure de la résistance de surface  $R_s$
  - Longueur de pénétration de London  $\lambda$
  - Température de transition  $T_c$

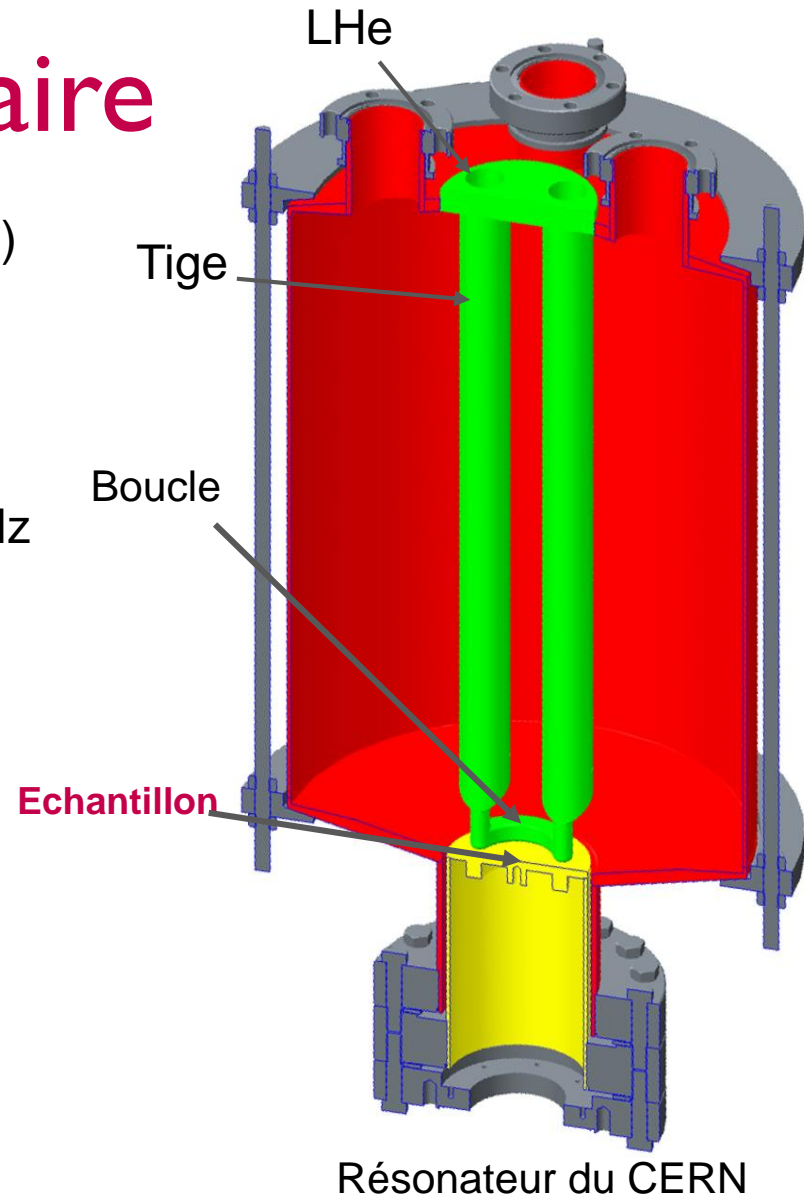
# Résonateur quadripolaire

- Propriétés du matériau supraconducteur ( $f$ ,  $T$ ,  $B$ )
  - Mesure de la résistance de surface  $R_s$
  - Longueur de pénétration de London  $\lambda$
  - Température de transition  $T_c$
- Système basé sur le design du CERN à 400MHz



# Résonateur quadripolaire

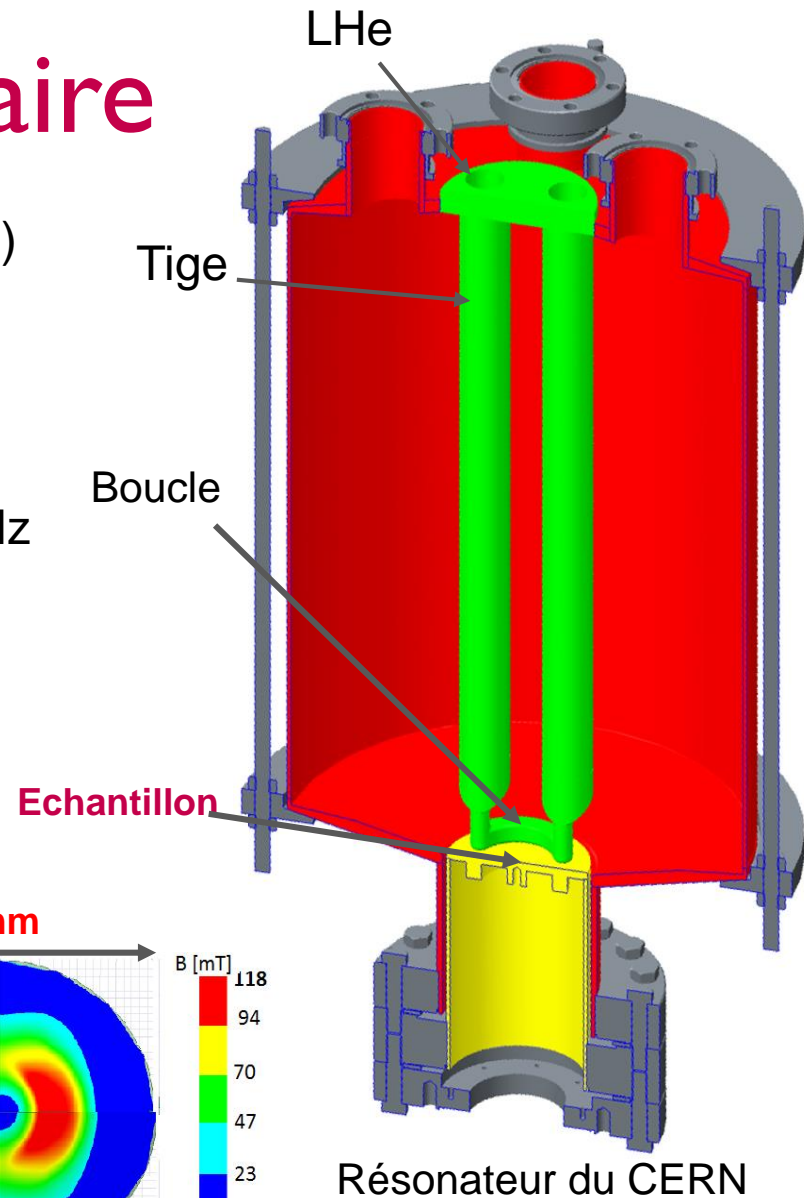
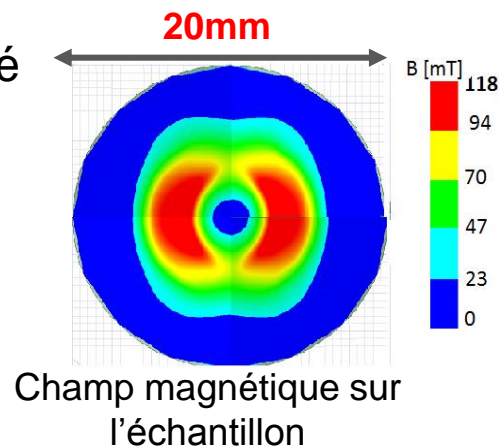
- Propriétés du matériau supraconducteur ( $f$ ,  $T$ ,  $B$ )
  - Mesure de la résistance de surface  $R_s$
  - Longueur de pénétration de London  $\lambda$
  - Température de transition  $T_c$
- Système basé sur le design du CERN à 400MHz
- Petits échantillons de **20 mm** de diamètre
- Fréquence de fonctionnement:
  - 1.3GHz (fréquence de référence),
  - 2.6GHz, 3.8GHz(comparaison avec une autre cavité TE011)





# Résonateur quadripolaire

- Propriétés du matériau supraconducteur ( $f$ ,  $T$ ,  $B$ )
  - Mesure de la résistance de surface  $R_s$
  - Longueur de pénétration de London  $\lambda$
  - Température de transition  $T_c$
- Système basé sur le design du CERN à 400MHz
- Petits échantillons de **20 mm** de diamètre
- Fréquence de fonctionnement:
  - 1.3GHz (fréquence de référence),
  - 2.6GHz, 3.8GHz(comparaison avec une autre cavité TE011)

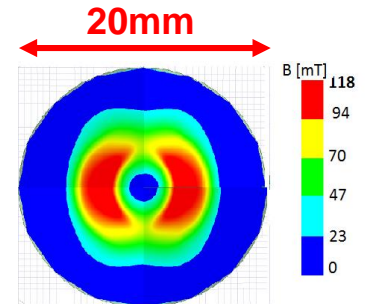
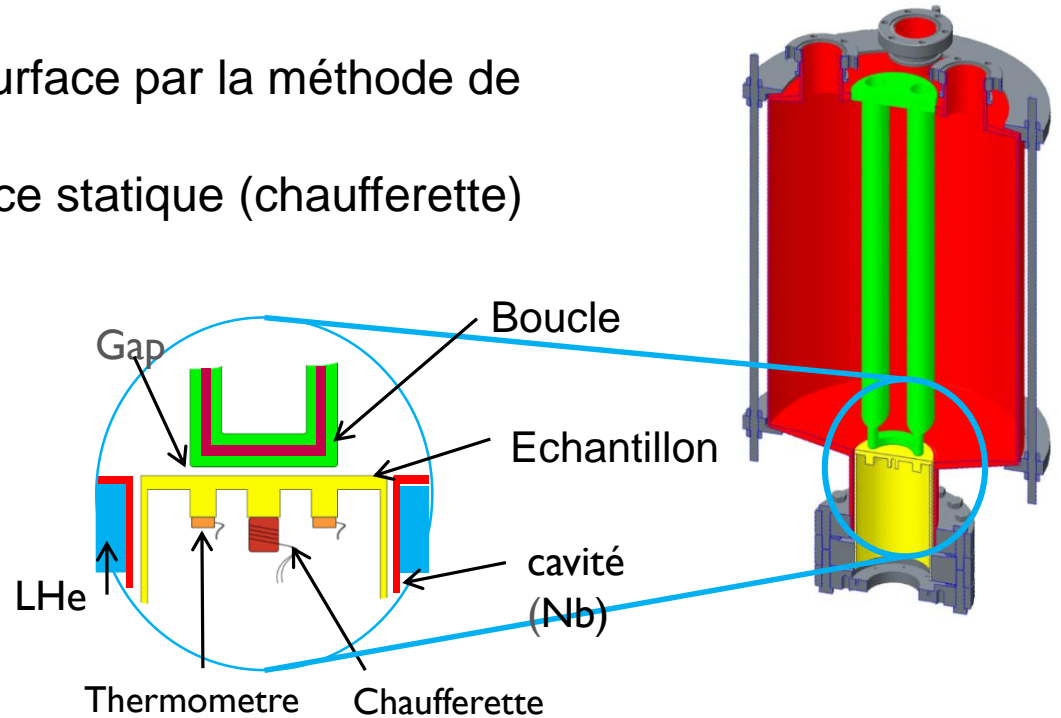


# Principe de mesure de la résistance de surface

- La mesure de la résistance de surface par la méthode de compensation calorimétrique

# Principe de mesure de la résistance de surface

- La mesure de la résistance de surface par la méthode de **compensation calorimétrique**
  - Chauffage par une puissance statique (chaufferette)
  - Chauffage RF

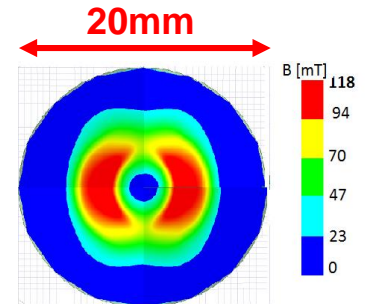
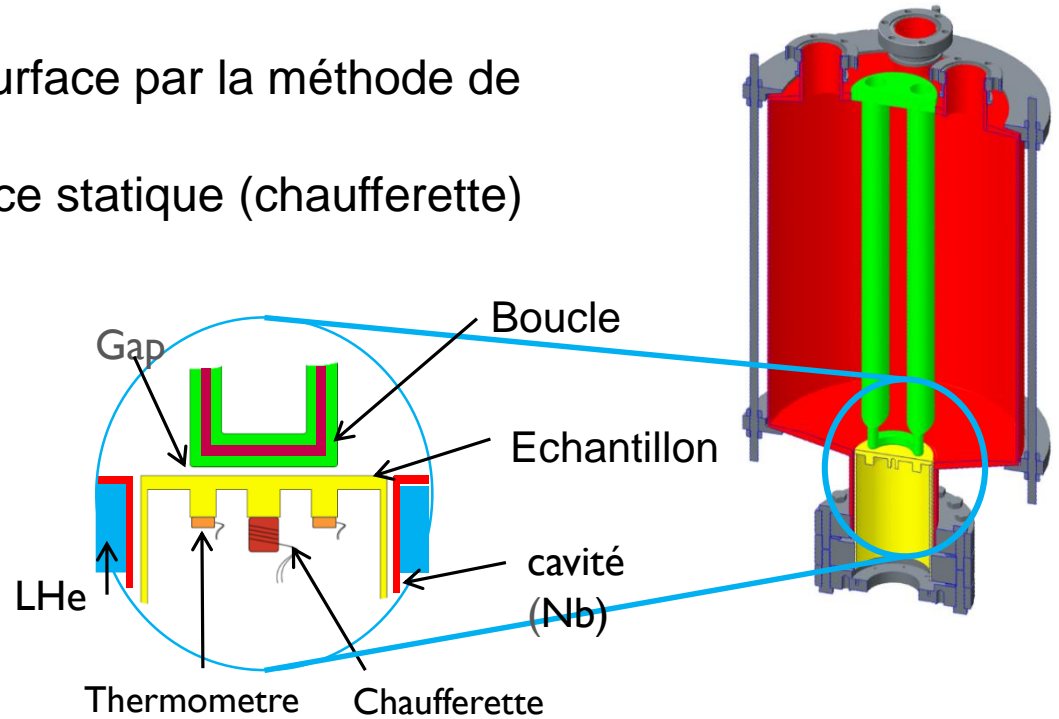
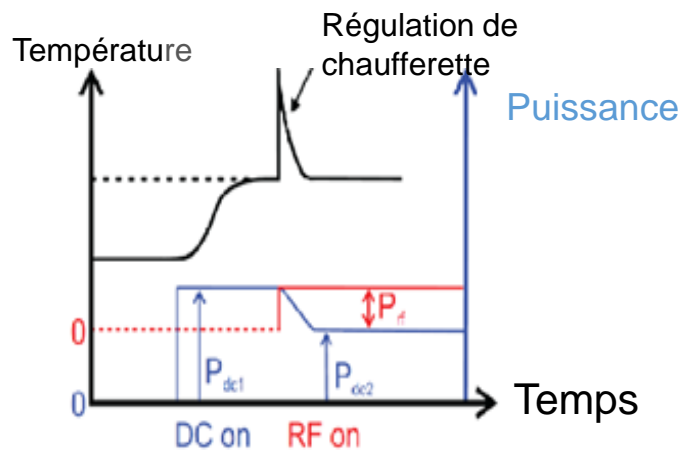


Champ magnétique sur l'échantillon



# Principe de mesure de la résistance de surface

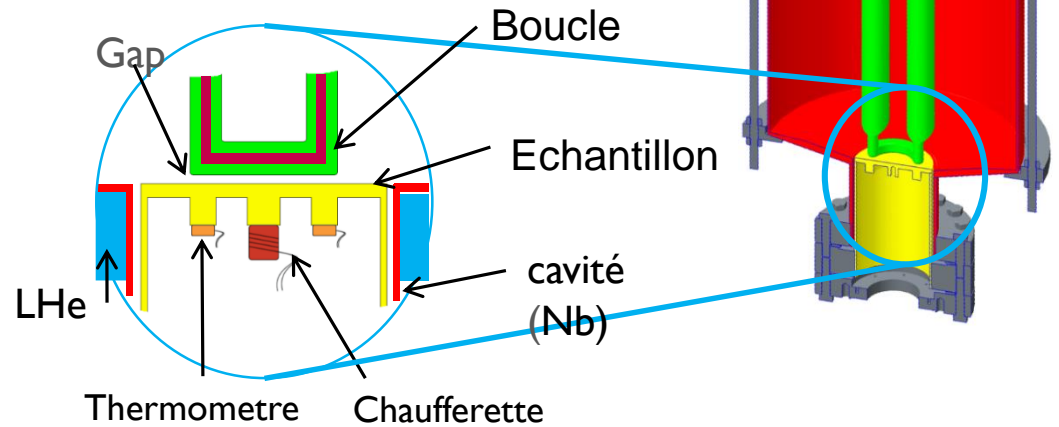
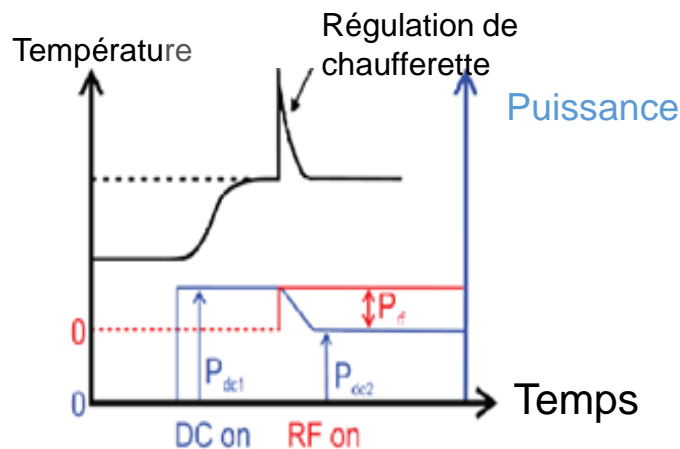
- La mesure de la résistance de surface par la méthode de compensation calorimétrique
  - Chauffage par une puissance statique (chaufferette)
  - Chauffage RF



Champ magnétique sur l'échantillon

# Principe de mesure de la résistance de surface

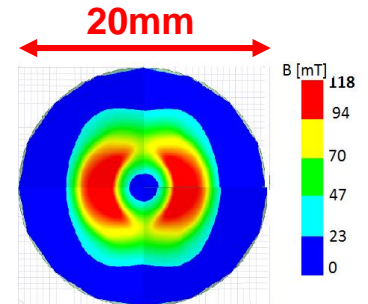
- La mesure de la résistance de surface par la méthode de **compensation calorimétrique**
  - Chauffage par une puissance statique (chaufferette)
  - Chauffage RF



- La puissance RF est donnée par:

$$\Rightarrow P_{RF} = P_{DC1} - P_{DC2} = \frac{1}{2} \iint_{\text{éch}} R_s |H_S|^2 ds$$

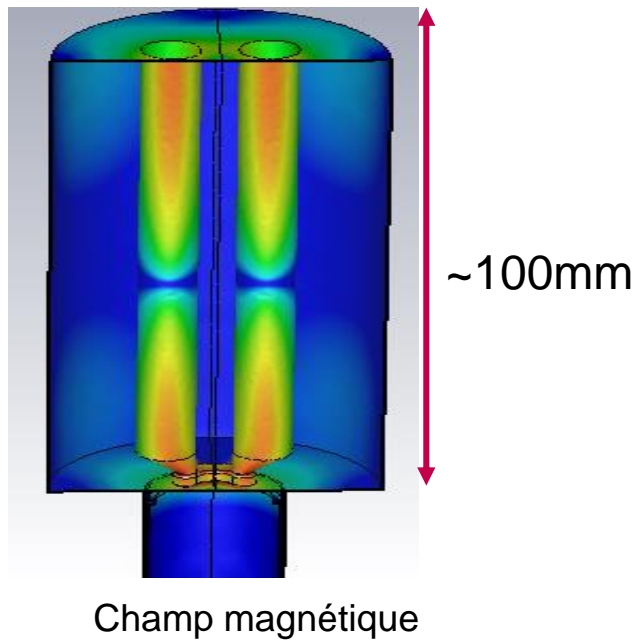
- La résistance de surface :  $R_s = \frac{2P_{RF}}{\iint_{\text{éch}} |H_S|^2 ds}$



Champ magnétique sur l'échantillon

# Etapes de conception

## Etudes RF

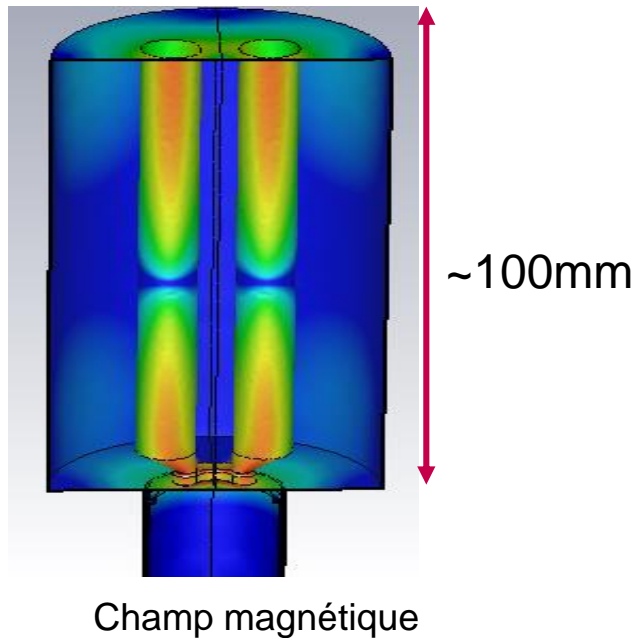


- Optimisation de la géométrie de la cavité  
Ansys et CST



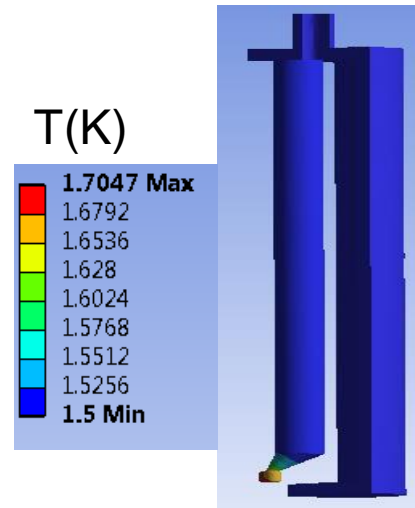
# Etapes de conception

## Etudes RF



- Optimisation de la géométrie de la cavité  
Ansys et CST

## Etude thermique

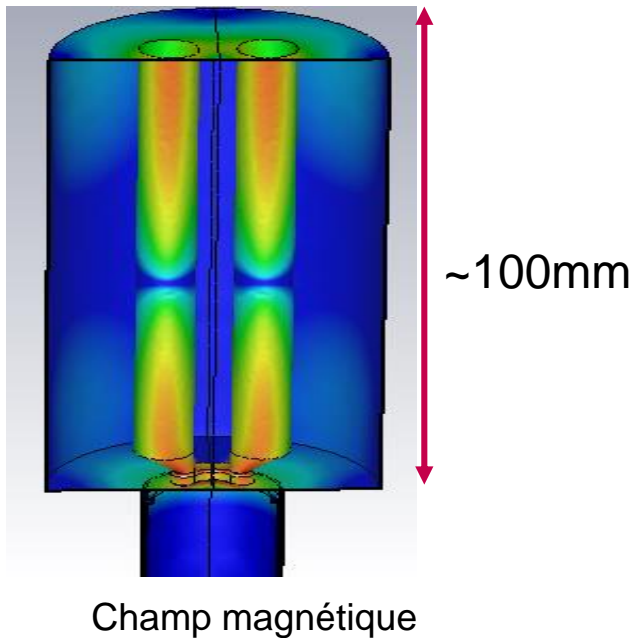


Température du résonateur  
après le refroidissement

- Fixer la gamme de température et  
du champ magnétique (Ansys)

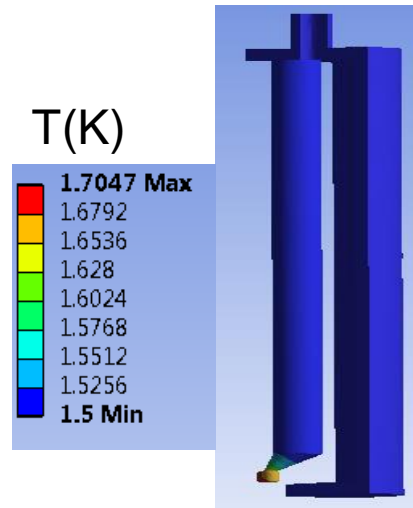
# Etapes de conception

## Etudes RF



- Optimisation de la géométrie de la cavité (ANSYS et CST)

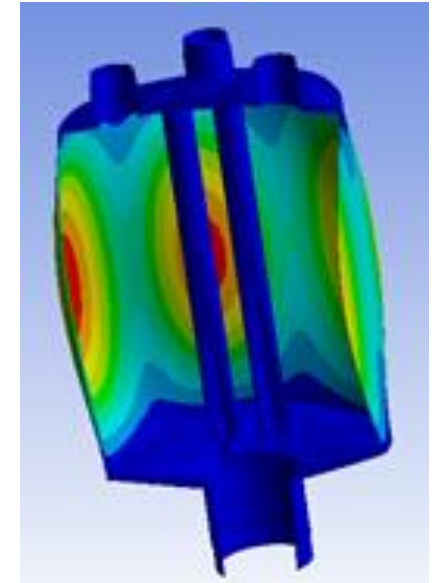
## Etude thermique



Température du résonateur après le refroidissement

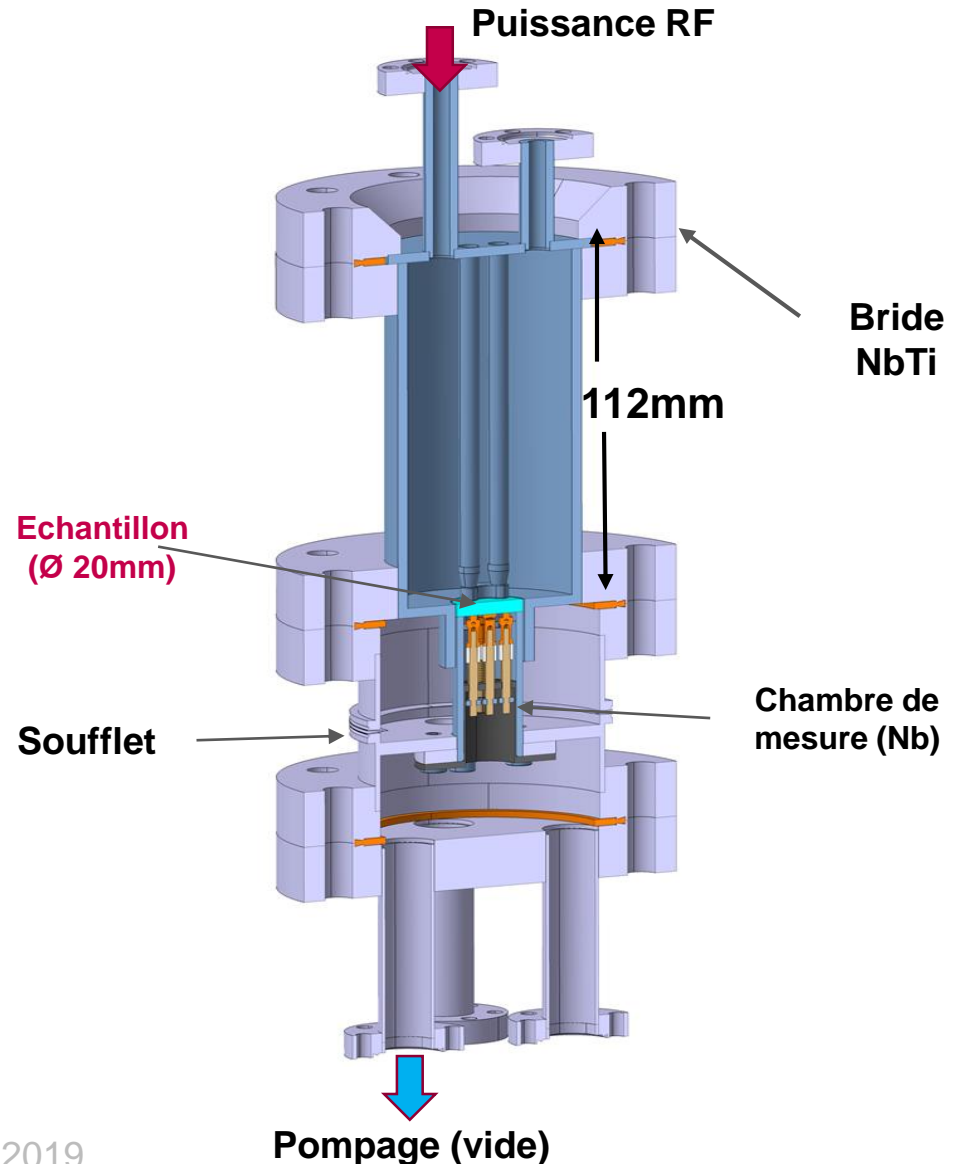
- Fixer la gamme du température et du champ magnétique de fonctionnement (ANSYS)

## Etude mécanique



- Prédiction des déformations/rétreints sur résonateur (ANSYS)

# Configuration finale du résonateur et de la chambre de mesure





# Conclusion et perspectives

- Fabrication du Résonateur Quadripolaire
- Produire des échantillons supraconducteurs avec la technique ALD (Atomic layer deposition), en collaboration avec l'IRFU (T.Proslier)
- Objectif final: mesure du premier échantillon dans le QPR

---

Merci pour votre  
attention 😊

---



# Les Journées accélérateurs

## Roscoff

2 - 4 octobre 2019

### Thèmes

*Présentations orales et posters*

Accélérateurs de hadrons

Accélérateurs de leptons

Accélération laser-plasma

Technologie des accélérateurs

Applications et aspects industriels



Secrétariat : Sandra Cardot  
email : [roscoff@accelerateurs.fr](mailto:roscoff@accelerateurs.fr)



**Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :**

Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Révol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),  
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM),  
Eric Giguët (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

**<http://accelerateurs.sfpnet.fr/>**



# OPTIQUE ET DIAGNOSTIQUES FAISCEAU POUR LA HEBT DU PROJET MYRRHA 100 MEV

- ***MYRRHA : Multi-purpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications***
- Directeur de thèse : Fadi IBRAHIM
- Co-Directeur: Luc PERROT

# MYRRHA 600 MEV, RÉACTEUR NUCLÉAIRE SOUS-CRITIQUE PILOTÉ PAR ADS

Projet MYRRHA, Belgique / MÖL :

- Incinération des déchets nucléaire à longue vie (Am).
- Etude de la transmutation et produire de nouveaux radio-isotopes (ISOL).

Nécessité de réduire le stress thermique dans la cuve du réacteur. 3 jours de redémarrage après un arrêt faisceau de plus de 3s.

Concevoir un LINAC-protons fiable:

- Minimiser les pannes.
  - Moins de 40 arrêts/an. → Double injecteur.
- ⇒ Phase 1: Démonstrateur LINAC 100 MeV protons.

Schéma de principe MYRRHA: ADS et réacteur

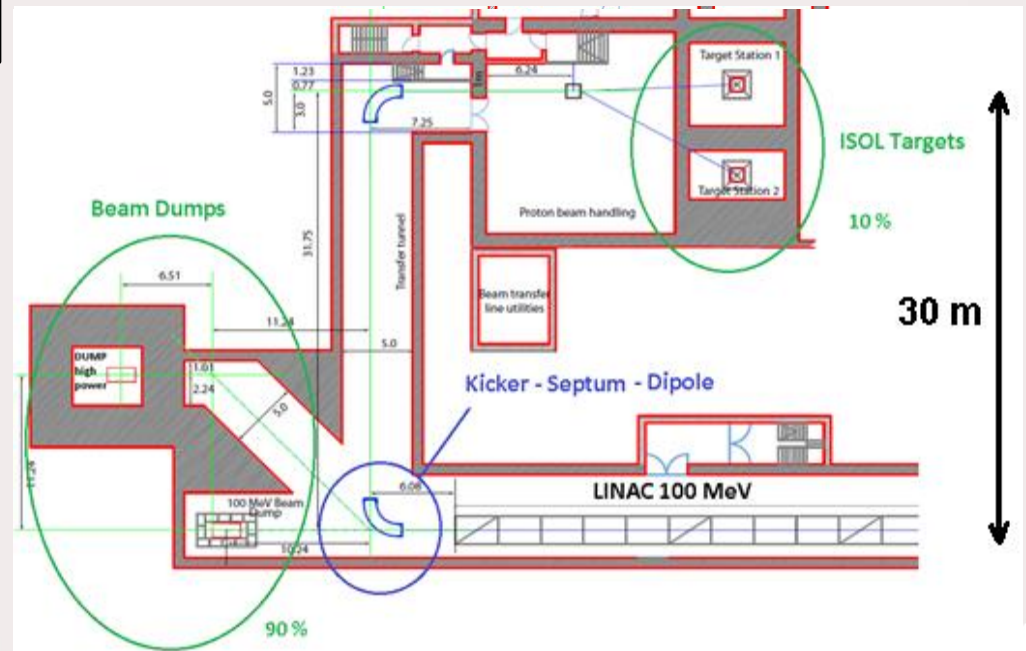
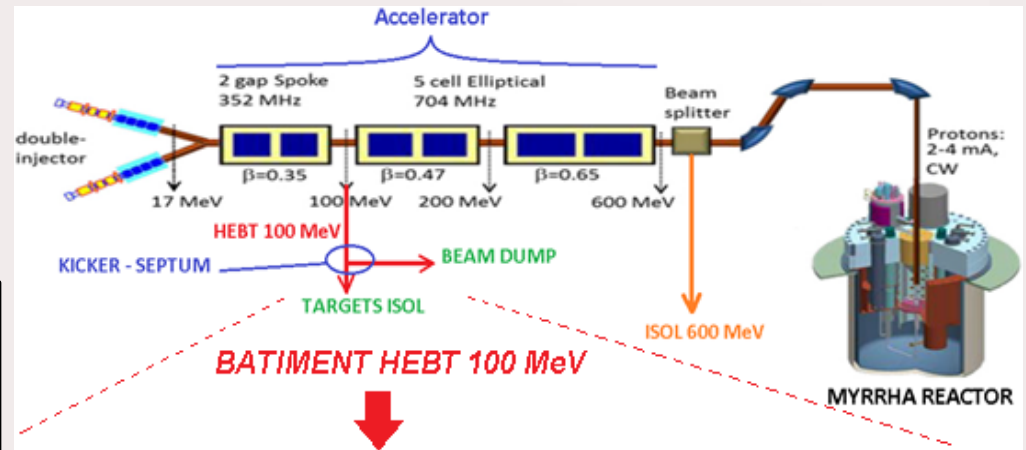


Schéma Bâtiment - Sortie LINAC et HEBT

# MYRRHA 600 MEV, RÉACTEUR NUCLÉAIRE SOUS-CRITIQUE PILOTÉ PAR ADS

Projet MYRRHA, Belgique / MÖL :

- Incinération des déchets nucléaire à longue vie (Am).
- Etude de la transmutation et produire de nouveaux radio-isotopes (ISOL).

Nécessité de réduire le stress thermique dans la cuve du réacteur. 3 jours de redémarrage après un arrêt faisceau de plus de 3s.

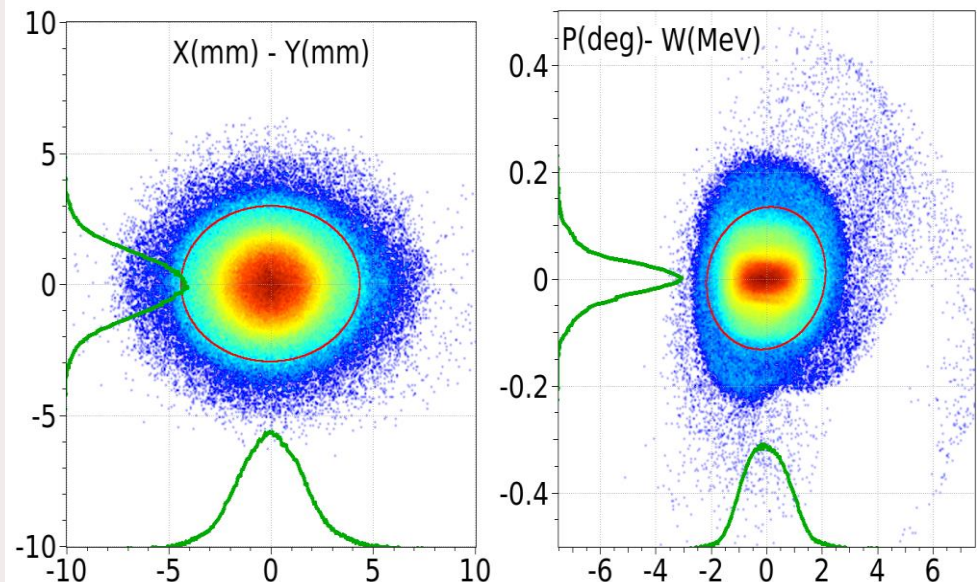
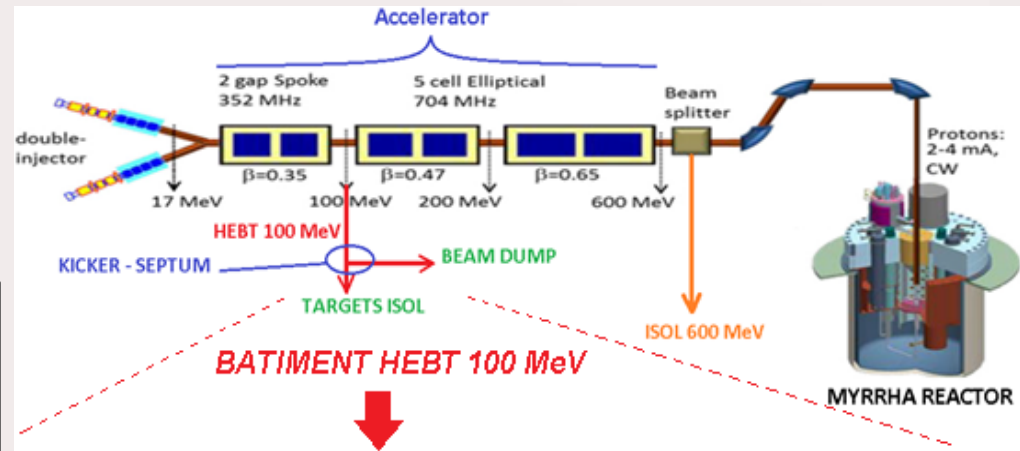
Concevoir un LINAC-protons fiable:

- Minimiser les pannes.
  - Moins de 40 arrêts/an. → Double injecteur.
- ⇒ Phase 1: Démonstrateur LINAC 100 MeV proton.

Caractéristiques faisceau nominal:

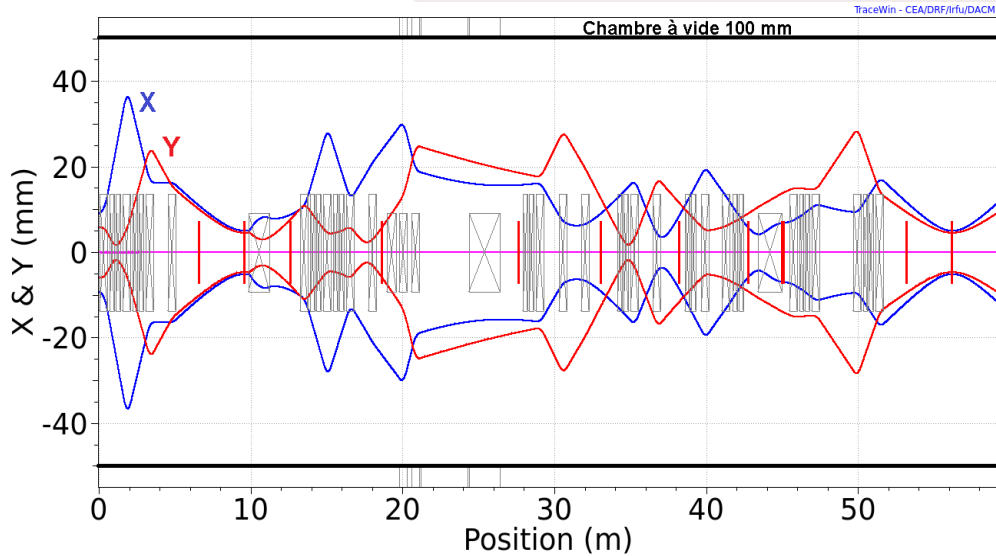
- Sortie LINAC,  $E = 100$  MeV
- Courant faisceau = 4 mA
- RF 176 MHz
- Continu (DC 100%)
- Emittance Transverse  $0.25 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$

Schéma de principe MYRRHA: ADS et réacteur



Distributions Sortie LINAC - 100 MeV





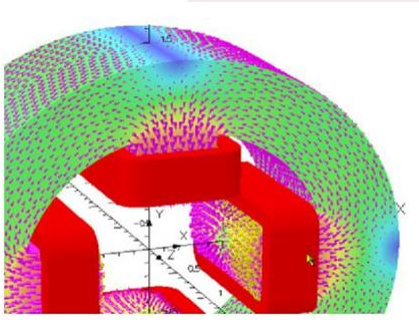
Enveloppe faisceau en X et Y. Sortie LINAC → Hall Exp. PTF ISOL

## Etude de dynamique faisceau avec Tracewin :

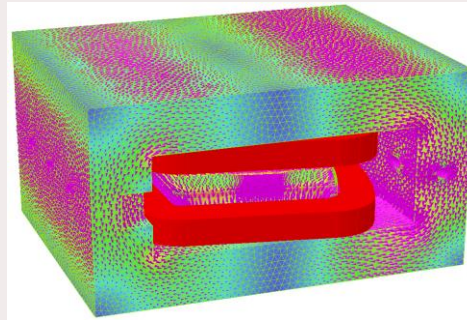
- Eléments magnétiques simples : Positionner Quadrupôle, Dipôles, Sterrers en respectant les dimensions du bâtiment.
- Ajuster les gradients des éléments optiques
- Etude d'erreurs: Prise en compte des incertitudes sur le faisceau et les éléments.

## Conception magnétique des éléments optiques:

- Réalisation de cartes de champ avec OPERA et/ou CST des éléments optiques.
- Utiliser les cartes de champ pour affiner les simulations Tracewin.

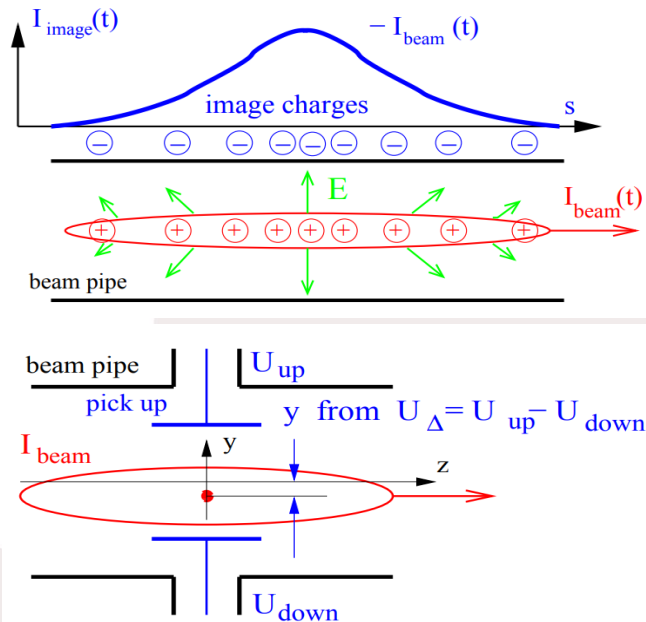
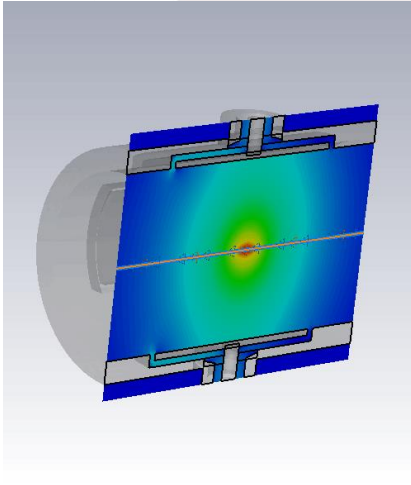


Carte de champ OPERA 3D:  
Quadrupôle magnétique



Carte de champ OPERA 3D:  
Dipôle magnétique

# DIAGNOSTIQUES FAISCEAU - BEAM POSITION MONITOR -



Déséquilibre de charges  $\rightarrow$  position du faisceau

## Etudes électrostatique du BPM avec CST :

- Développement BPM pour HEBT à 100 MeV.
- Simuler le passage du faisceau dans un BPM (caractéristiques MYRRHA, IPHI, SPIRAL2).
- Carte de champ électrique dans le BPM.
- Induction de signal  $\rightarrow$  Tension de sortie du détecteur.
- Etude paramétrique: Estimation de sensibilité d'induction par paramètre + étude de corrélations (géométries du BPM, caractéristiques Faisceau).
- Comparaison à des calculs analytiques  $\Rightarrow$  Code ROOT étude paramétrique.

## Mesures:

- Mesures sur faisceaux réels
  - IPHI (3MeV, 60 mA protons)
  - SPIRAL2 (5mA/40MeV D, 1mA/14.5MeV/u ions lourds)
  - Injecteur MYRRHA à Louvain (4mA/1.5 MeV protons)

- Participation au rapport européen MYRTE: Première étude complète de Dynamique Faisceau HEBT, et définition d'un cahier des charges de conception magnétique aimant rapide Kicker-Septum.
- Approfondir la conception des lignes HEBT: Nouveau plan bâtiment à venir.
- Conception magnétique des éléments Optiques, benchmark OPERA /CST.
- Poursuivre des études BPM avec CST/PIC, comparer avec le code d'étude paramétrique.
- Traiter les mesures réalisées à IPHI, comparer avec le code d'étude paramétrique.
- Mesure sur faisceau SPIRAL2 à réaliser.

*Merci de votre attention*



# Les Journées accélérateurs

## Roscoff

2 - 4 octobre 2019

### Thèmes

*Présentations orales et posters*

Accélérateurs de hadrons

Accélérateurs de leptons

Accélération laser-plasma

Technologie des accélérateurs

Applications et aspects industriels



Secrétariat : Sandra Cardot  
email : [roscoff@accelerateurs.fr](mailto:roscoff@accelerateurs.fr)



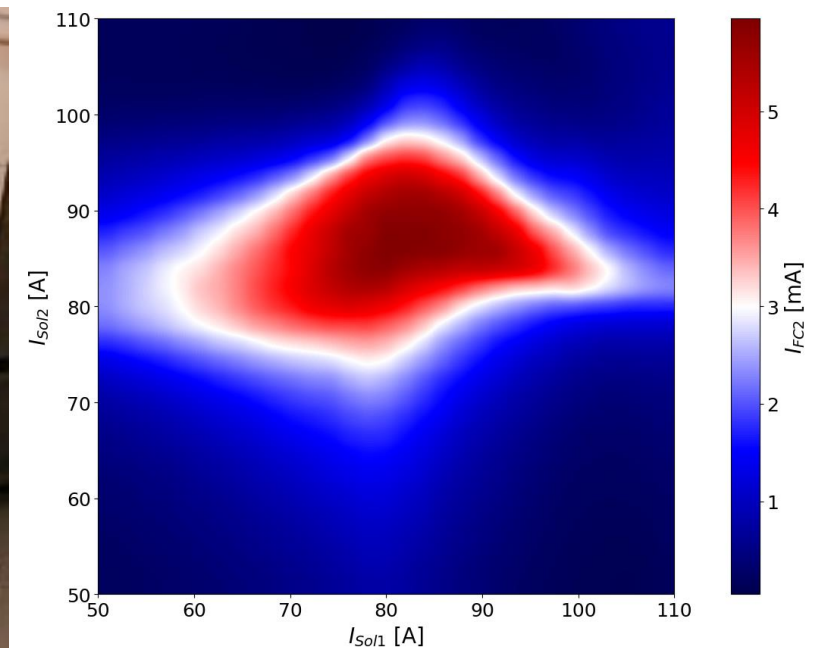
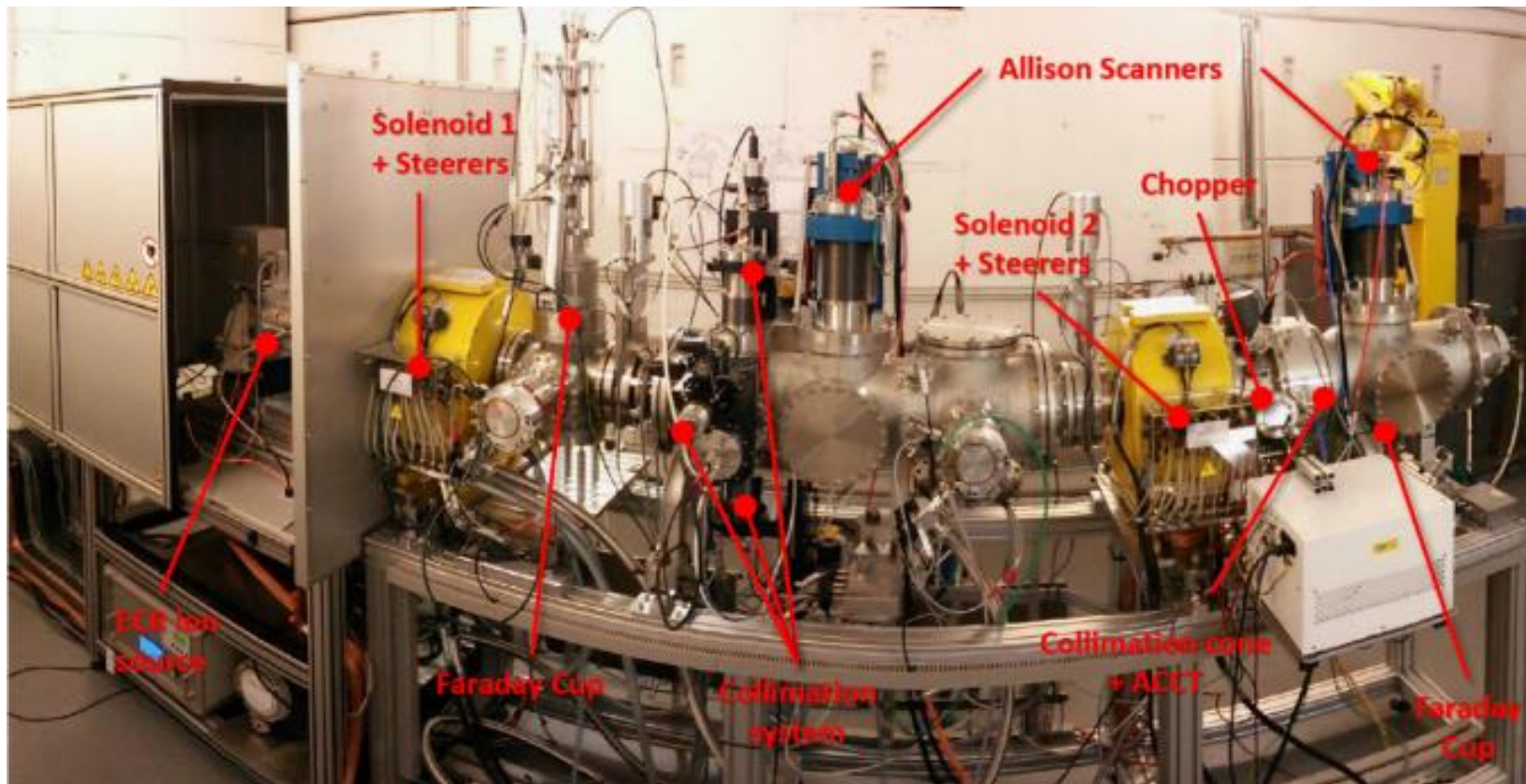
**Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :**

Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Révol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),  
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM),  
Eric Giguët (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

**<http://accelerateurs.sfpnet.fr/>**



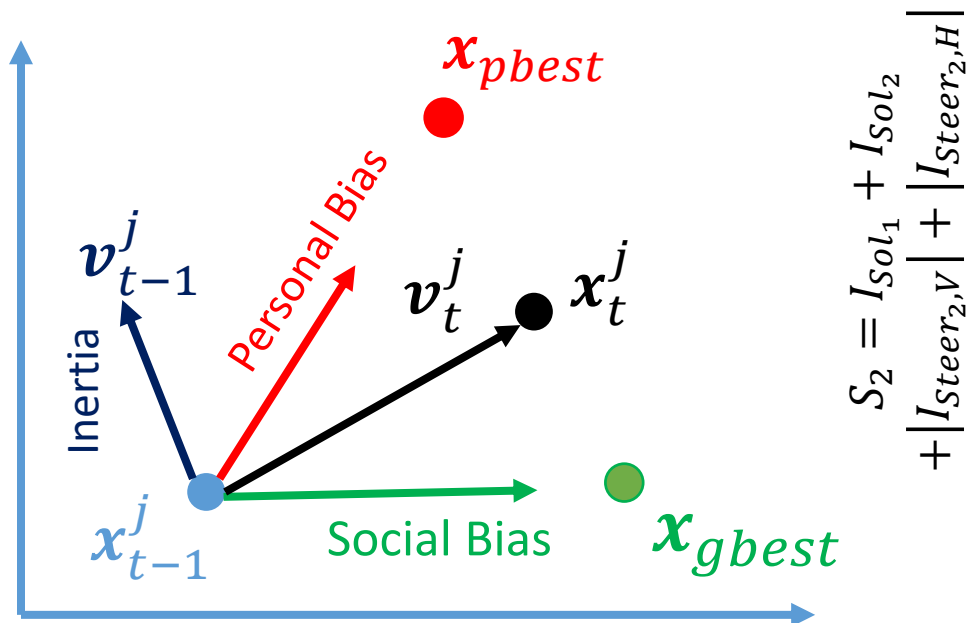
# Recommissioning of the LEBT MYRRHA & Modélisation rapide avec des RNs



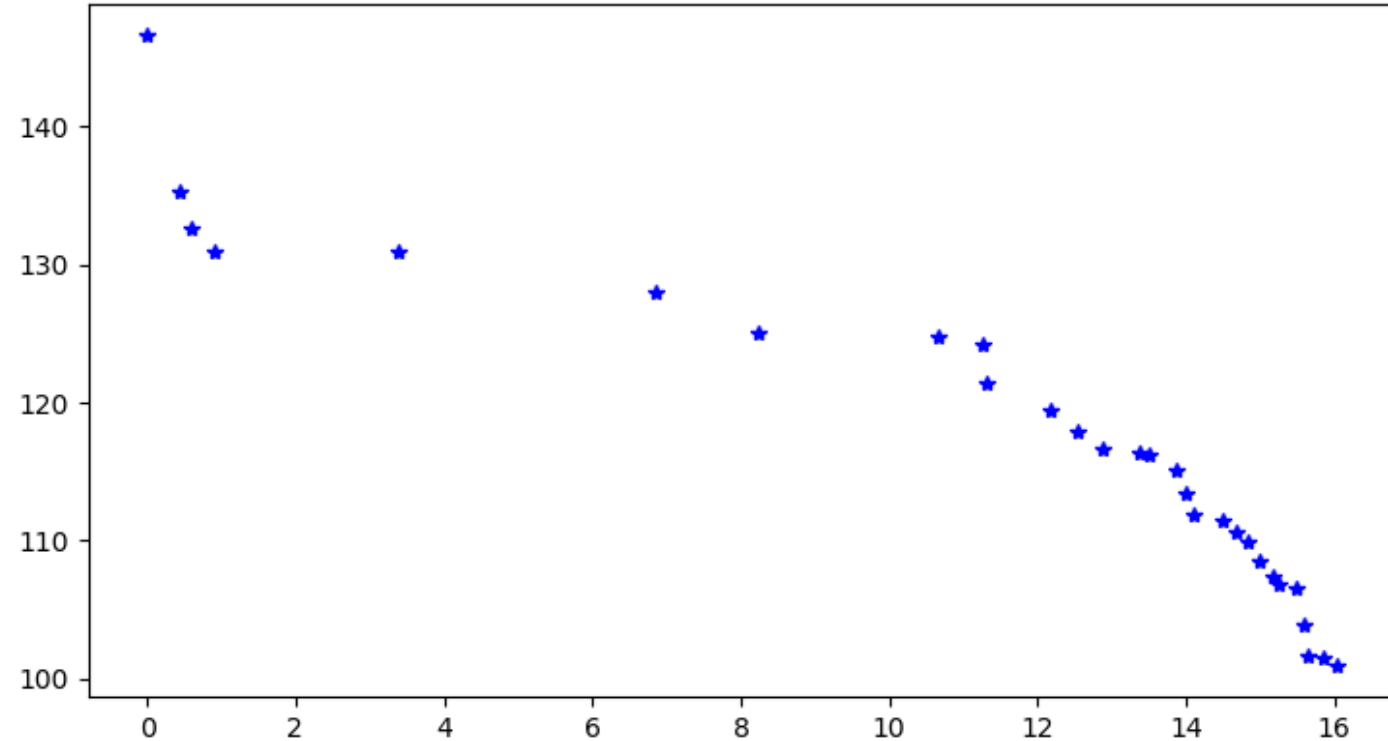
Présenté par Mathieu Debonnie  
Doctorant ACS-LPSC

Collimateur déployé à 40 mm

- Algorithme métaheuristique



$$S_2 = I_{Sol_1} + I_{Sol_2} + |I_{Steer_2,V}| + |I_{Steer_2,H}|$$



Score 1 =  $(I - I^{cible})^2$  with  $I^{cible} = 4.2 \text{ mA}$

Premier tests !

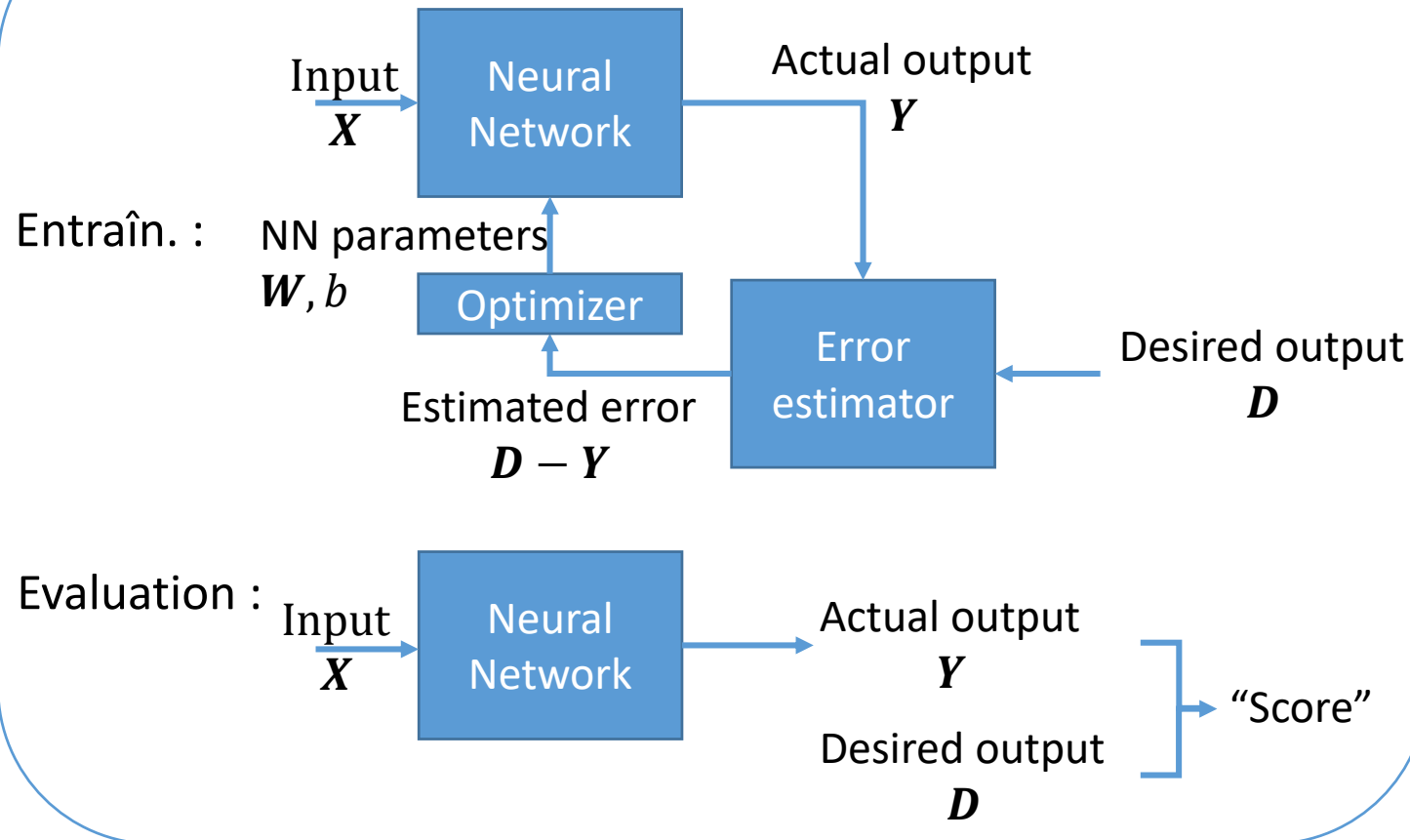
Améliorations à faire



Ici, les particules sont des solutions potentielles du problème à optimiser ( $\neq$  particles in physics)



## Entraînement supervisé d'un réseau de neurones



Nécessite

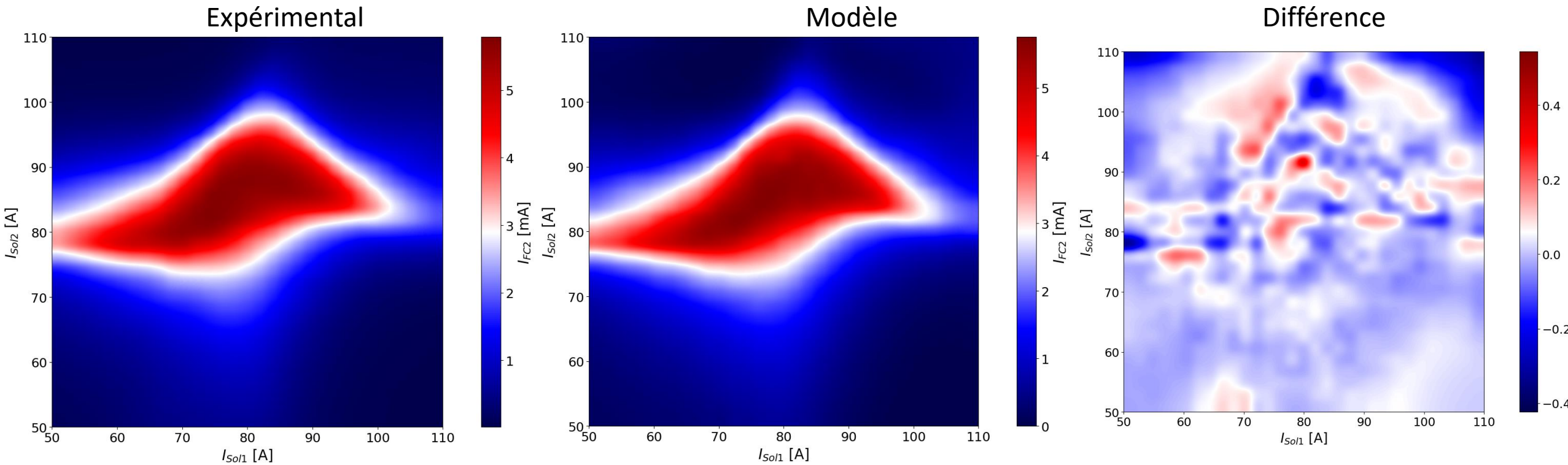
- Dataset d'entraînement ( $\mathbf{X}, \mathbf{D}$ )
- Dataset d'évaluation ( $\mathbf{X}, \mathbf{D}$ )

Paramètres

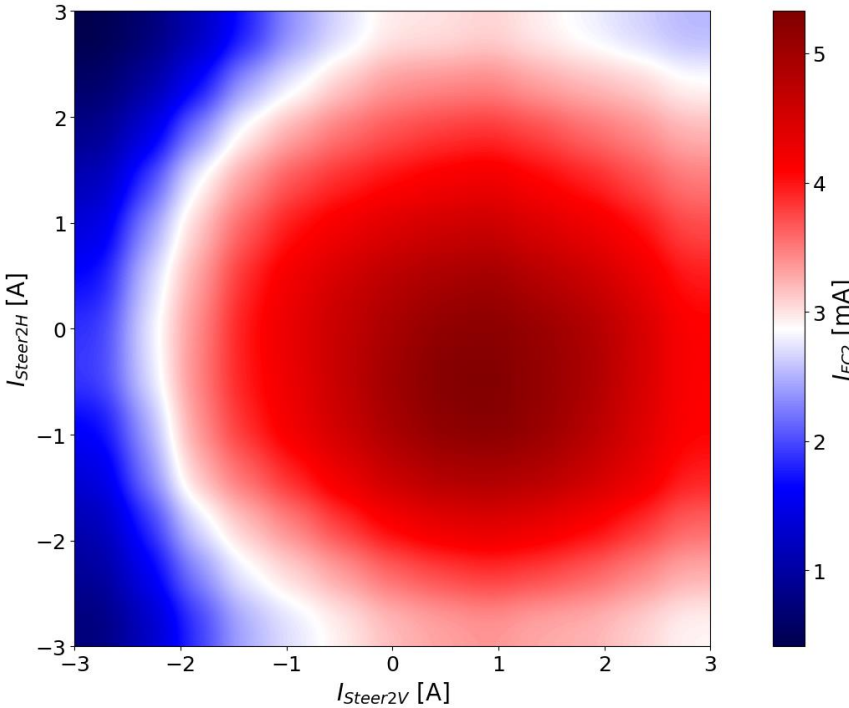
- Réseau de neurones
- Estimateur d'erreur
- Optimisateur

Simple en principe mais  
difficile en pratique

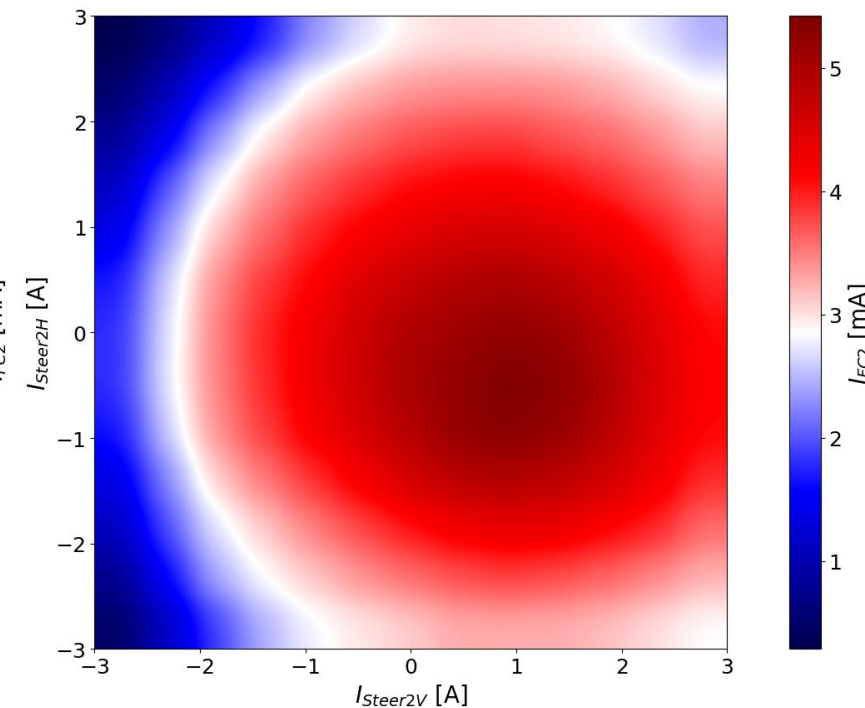
➔ approche par essai-erreur



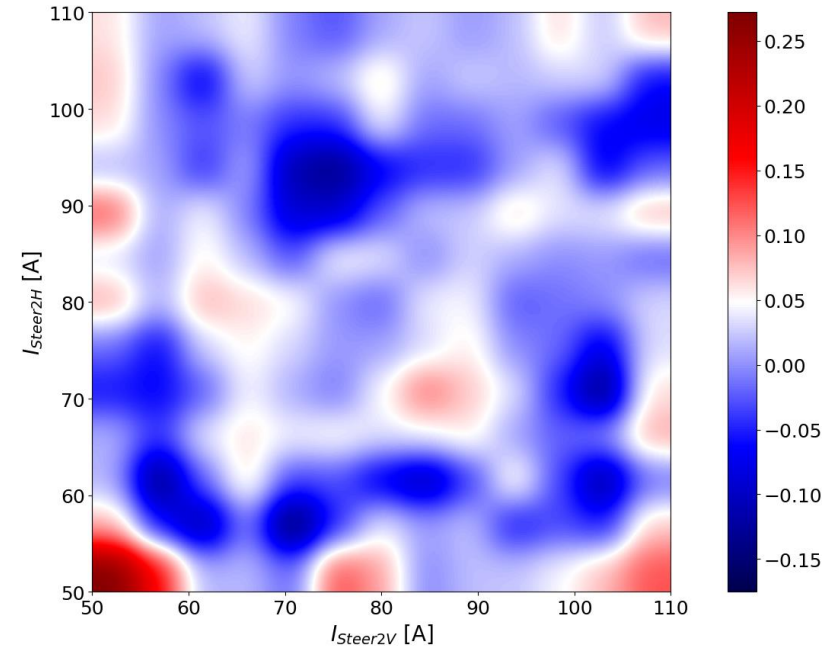
Expérimental



Modèle



Différence



## Conclusions et perspectives

- Dans la bonne direction mais manque de précision
- Retour sur la LEBT