

# 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

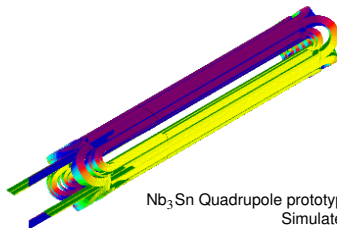
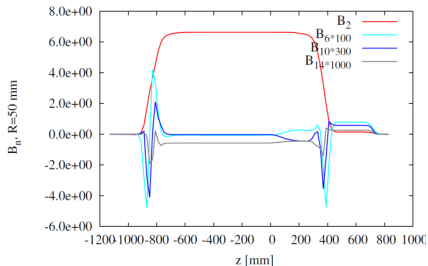


**PhD Thesis:** 17 April 2018 - 17 April 2021

# 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 bêtatronique est très élevée.



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

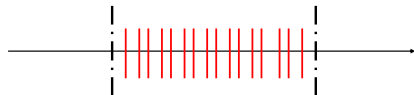
- Développer une fonction de transfert non-linéaire "réaliste" pour les études de dynamique faisceau.
- Utiliser des cartes magnétiques calculées ou mesurées.
- Déterminer des observables sensibles à la description longitudinale des harmoniques du champ.

# Modèle de fonction de transfert non-linéaire

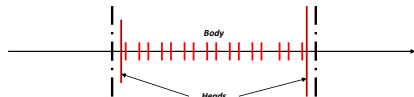
- 1 **HE (Hard Edge):** 16 "Kick and Drift" de forces multipôlaires intégrées identiques ( $\int B_n dz$ ).
- 2 **HE+Heads:** Similaire à HE avec une partie des forces intégrées dans des kick additionnels aux extrémités des quadripôles.
- 3 **Lie2:** Fonction de transfert non-linéaire dérivée de l'algèbre de Lie. Les extrémités sont modélisées en calculant le potentiel vecteur avec  $dz = 2cm$ .
  - **NDO:** 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.

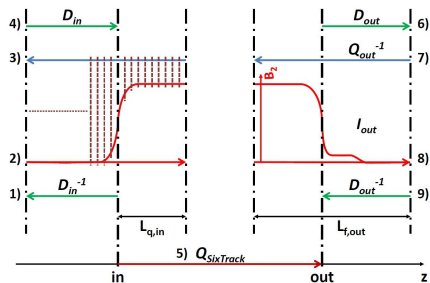
HE:



HE+Heads:



Lie2:



# Context des études

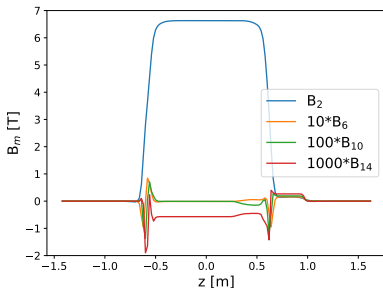
## Objectifs:

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:

$$\Delta Q_u = \underbrace{(\partial Q_u / \partial 2J_u)}_{b_4, b'_2, b''_2} 2J_u + \underbrace{\left( \frac{1}{2} \partial^2 Q_u / \partial (2J_u)^2 \right)}_{\substack{b_6, b'_4, b''_4, \\ b_2, b'_2, b''_2}} (2J_u)^2$$



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

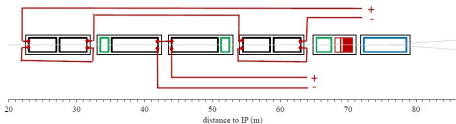
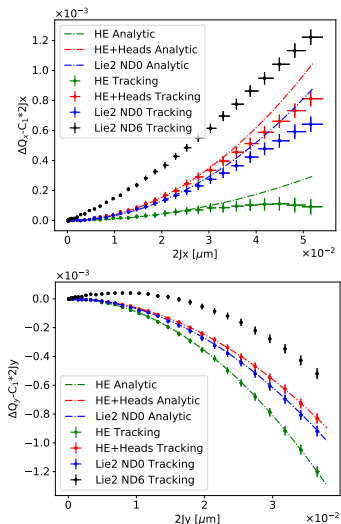


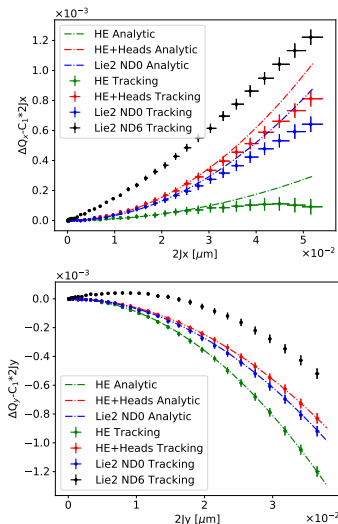
Schéma de l'alimentation des Triplet Finaux.

# Contribution à l'Amplitude Detuning

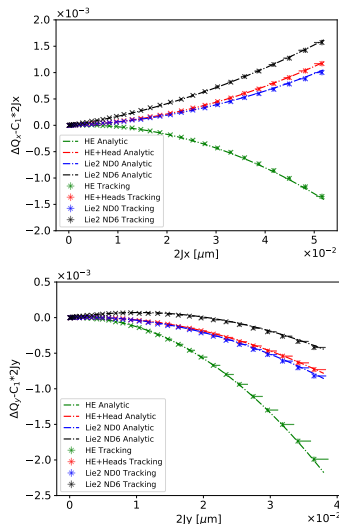


Amplitude Detuning avec toutes les harmoniques ( $b_3, b_4, b_5, b_6, \dots$  + aléatoire) dans l'IT sans la correction du  $b_6$ .

# Contribution à l'Amplitude Detuning



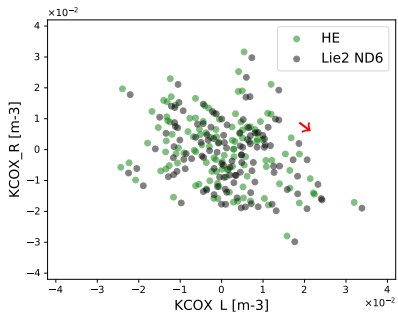
Amplitude Detuning avec toutes les harmoniques ( $b_3, b_4, b_5, b_6, \dots$  + aléatoire) dans l'IT sans la correction du  $b_6$ .



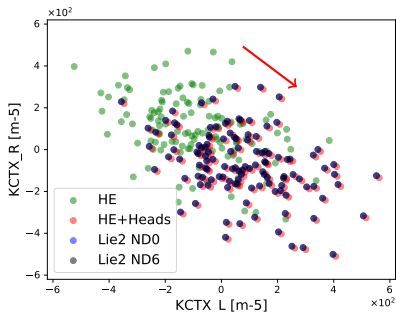
Amplitude Detuning avec uniquement l'harmonique  $b_6$  (+ aléatoire  $b_6$ ) dans l'IT sans la correction du  $b_6$ .

## 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. Pugnat *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