

# Limitations en intensité dans le plan longitudinal du PS au CERN

*Journées Accélérateurs de la SFP  
14/10/2021*

A. Lasheen, H. Damerau

Remerciements: E. Shaposhnikova, développeurs BLonD,  
opérateurs CPS, contributeurs au modèle d'impédance du PS



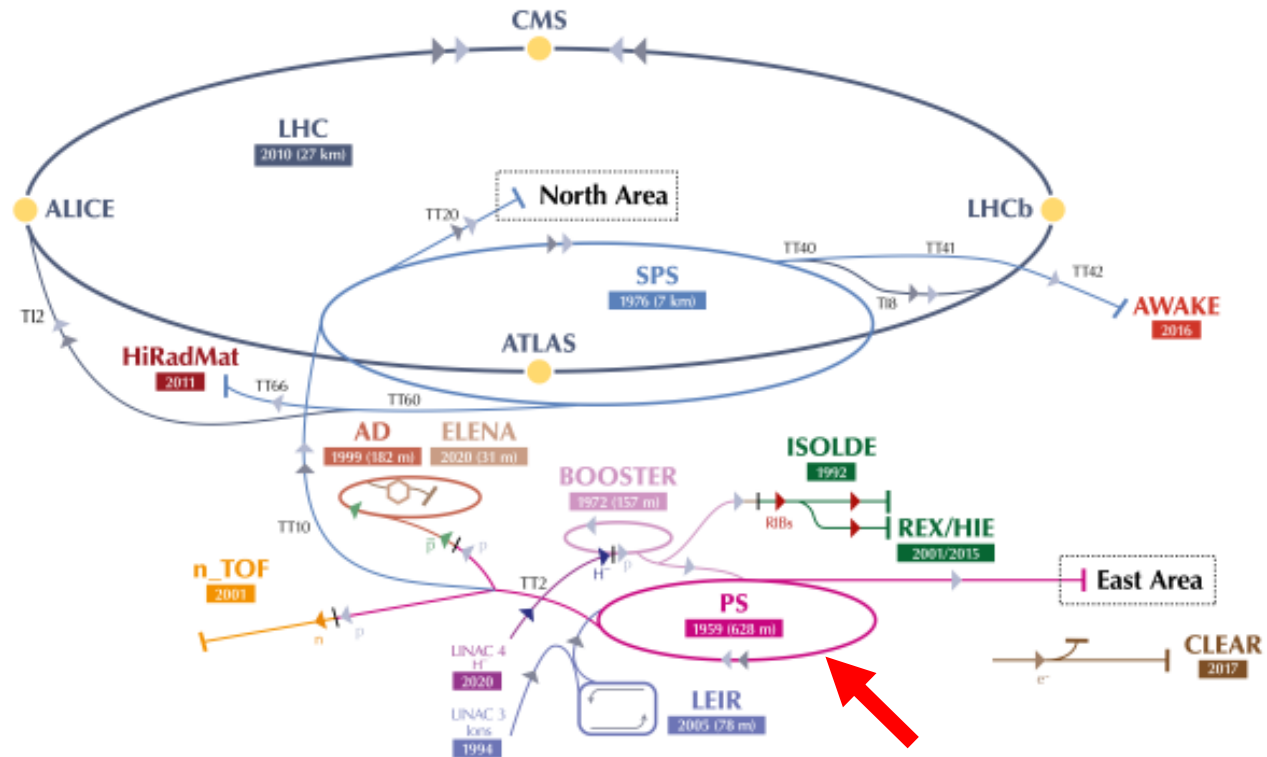
# Plan

---

- Introduction
  - *Le PS au CERN et le projet LIU*
- Investigations sur les instabilités en modes couplés
  - *Analyse de mode*
  - *Identification des sources d'impédances*
  - *Validation expérimentales*
- D'autres limitations futures ?
  - *Instabilités micro-onde à la transition*
- Conclusions

# Complexe d'accélérateurs du CERN

The CERN accelerator complex  
 Complexe des accélérateurs du CERN



▶  $H^-$  (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶  $e^-$  (electrons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials

# Systèmes RF du PS

RF Manipulations  
(fixed freq)



2.8 - 10 MHz

Acceleration  
(tuning)  
to SPS



40 MHz

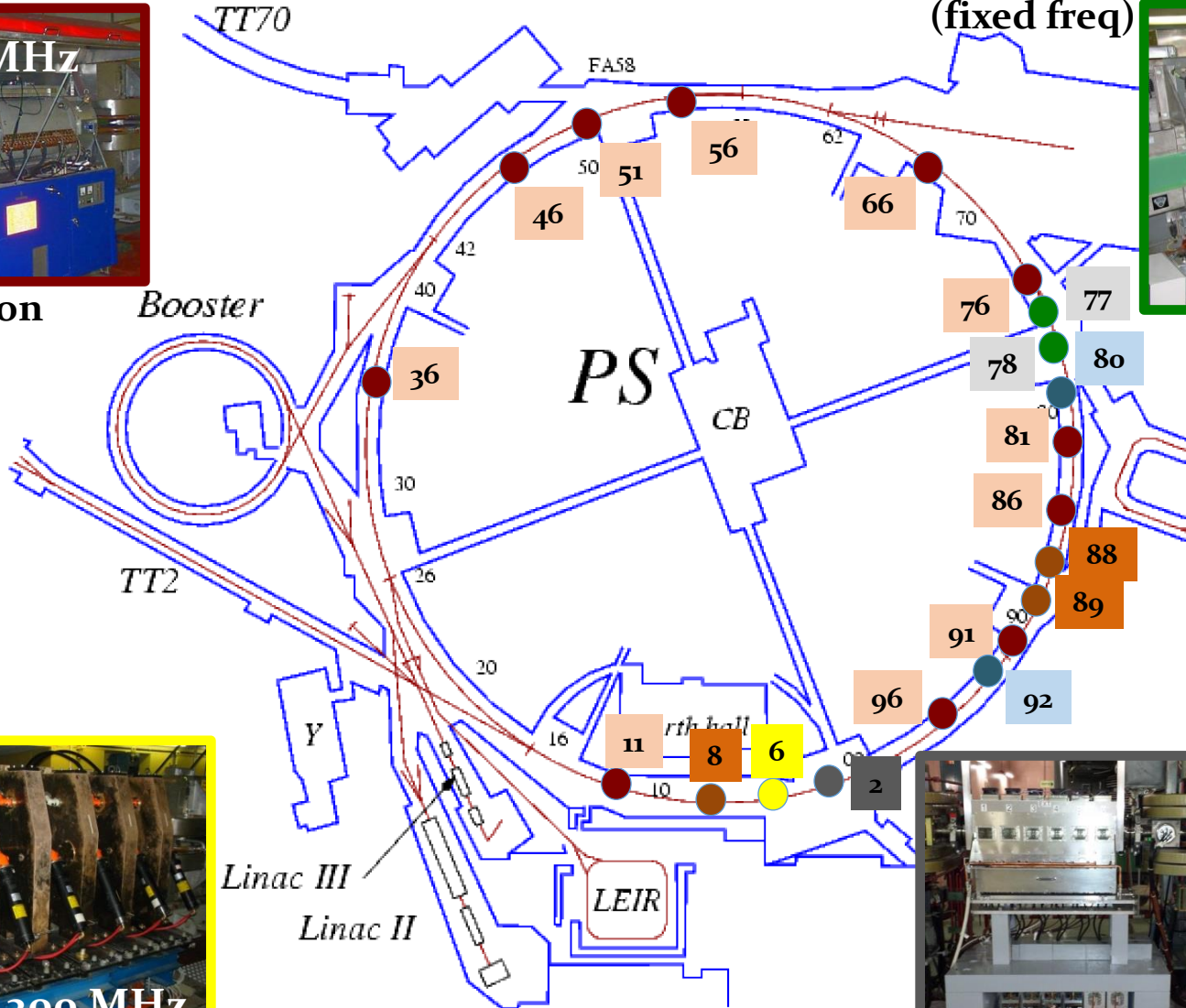


80 MHz



200 MHz

Longitudinal blow-up



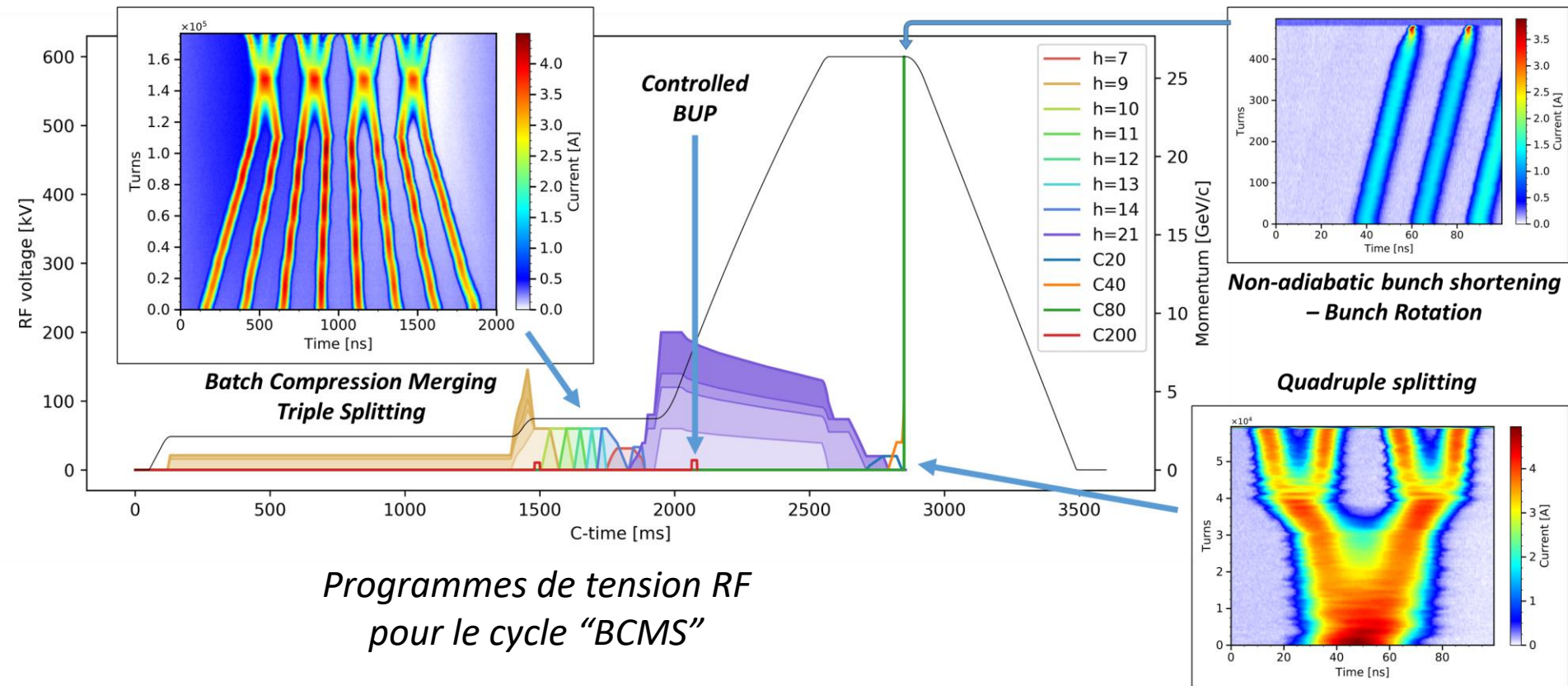
0.4 - 5 MHz

Damper



20 MHz

# Manipulations RF au PS



- Les cavités RF du PS permettent de couvrir un grand nombre d'harmoniques permettant de faire des manipulations RF et définit l'espace entre les paquets de 25 ns pour les faisceaux allant au LHC.
- De nombreux schémas de production existent et peuvent être proposés au LHC pour proposer un compromis intensité/brillance (train nominal de 72 paquets).

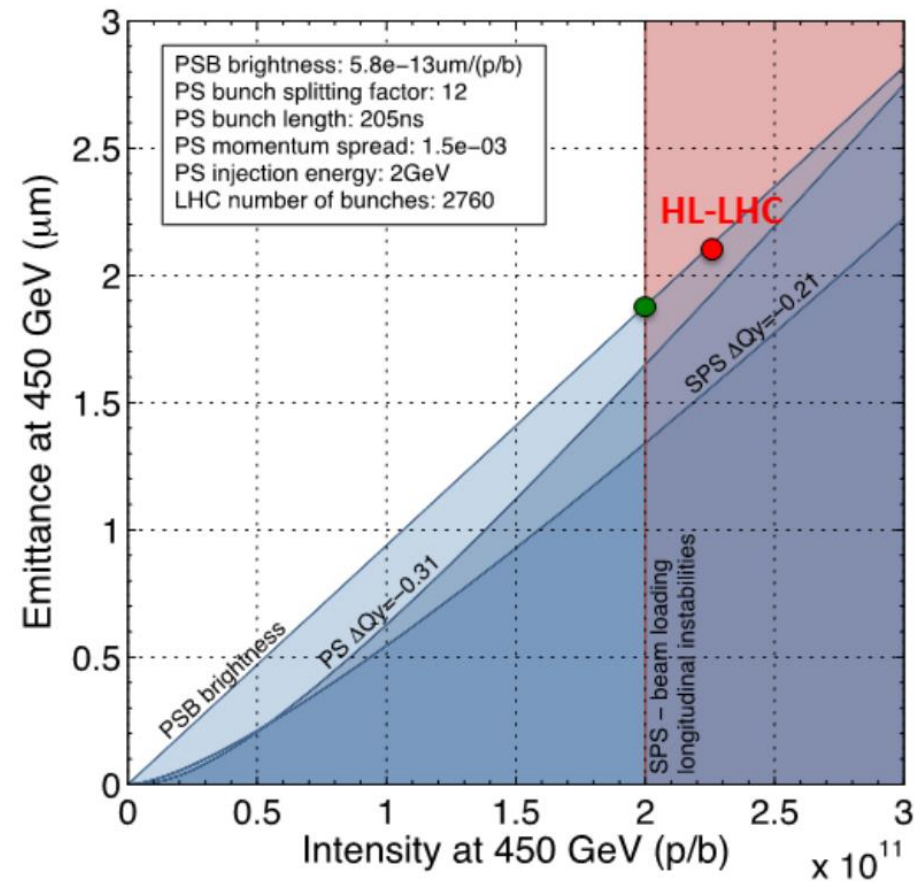
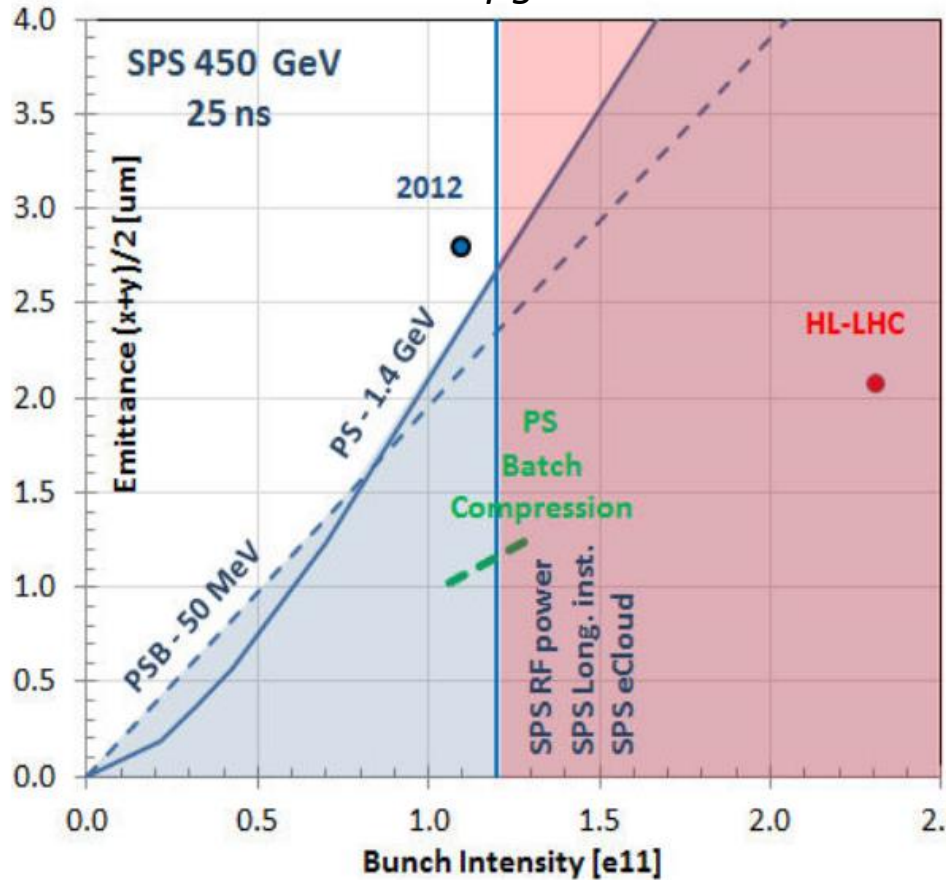


# Projet LIU: LHC Injectors Upgrade



Avant upgrade

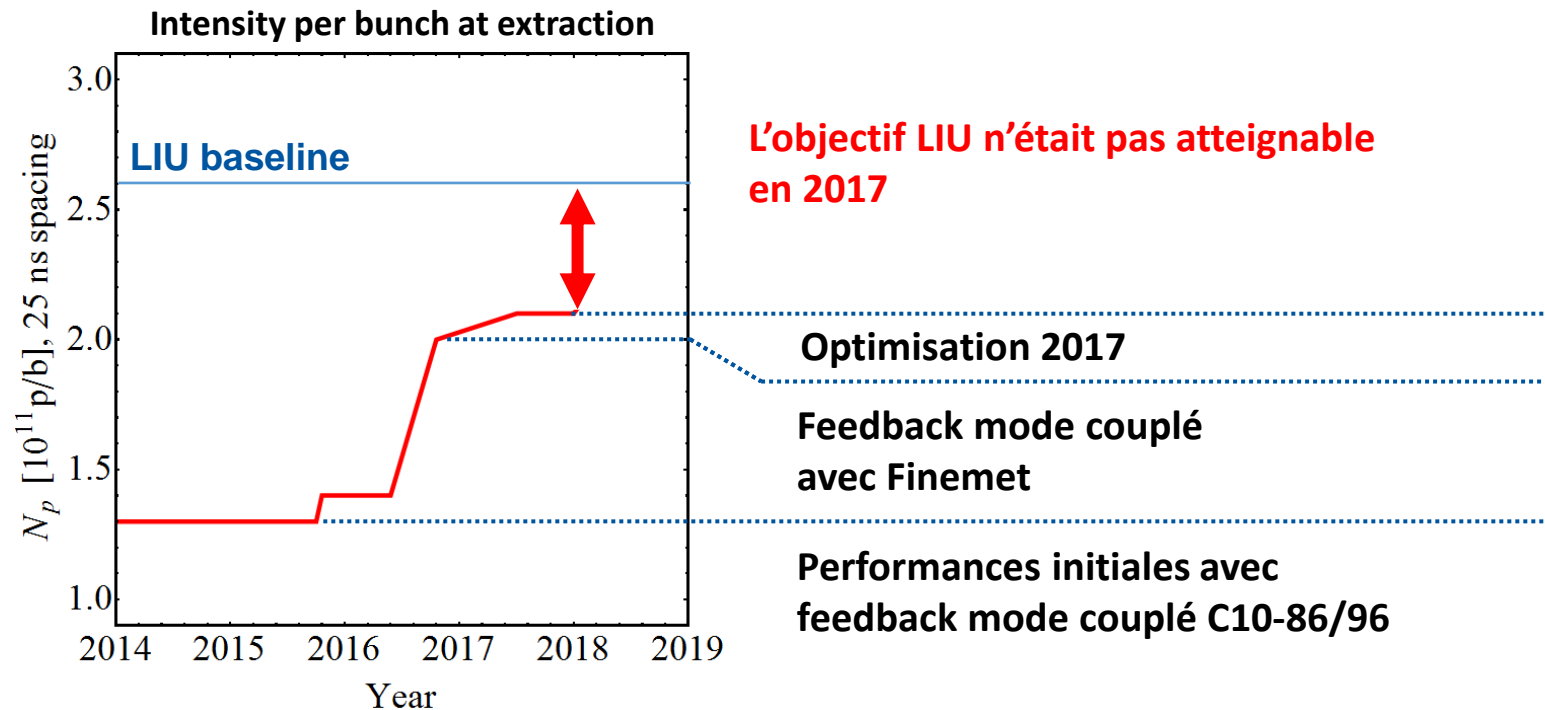
Après upgrade



[LHC Injectors Upgrade, Technical Design Report](#), présenté par R. Garoby à Roscoff en 2013

- Le projet LIU a pour but de préparer les injecteurs pour HL-LHC.
- L'objectif est de doubler l'intensité, tout en réduisant l'émittance.

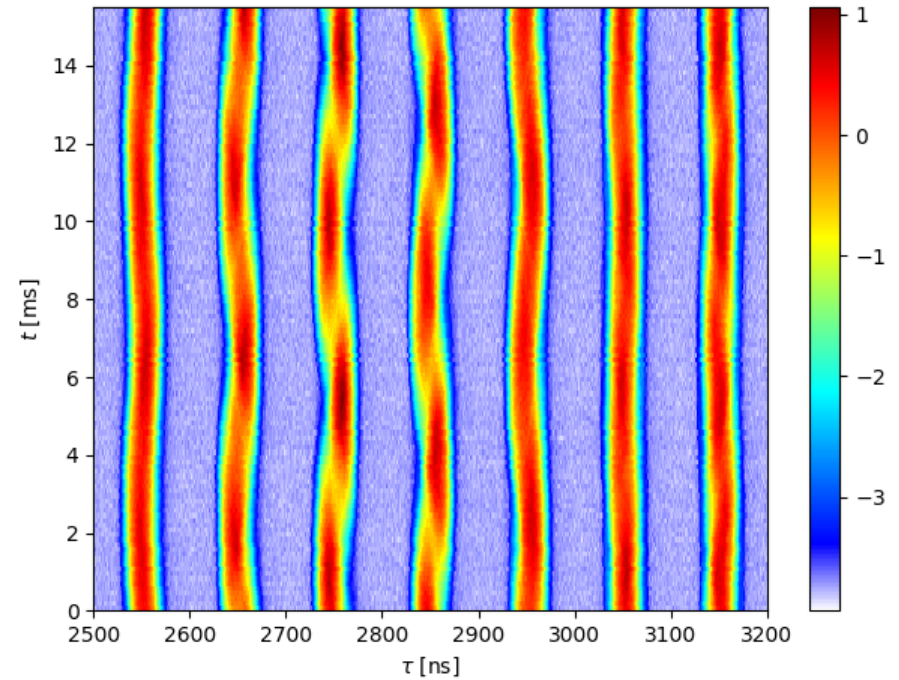
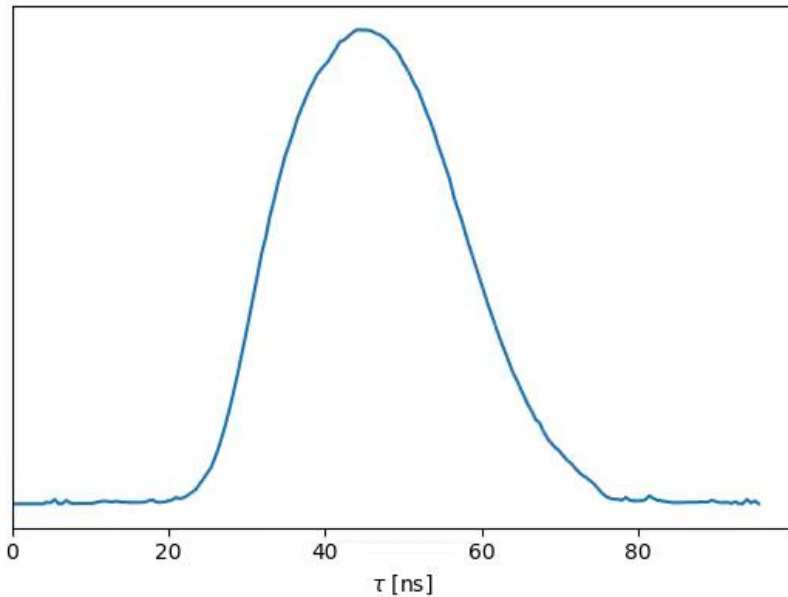
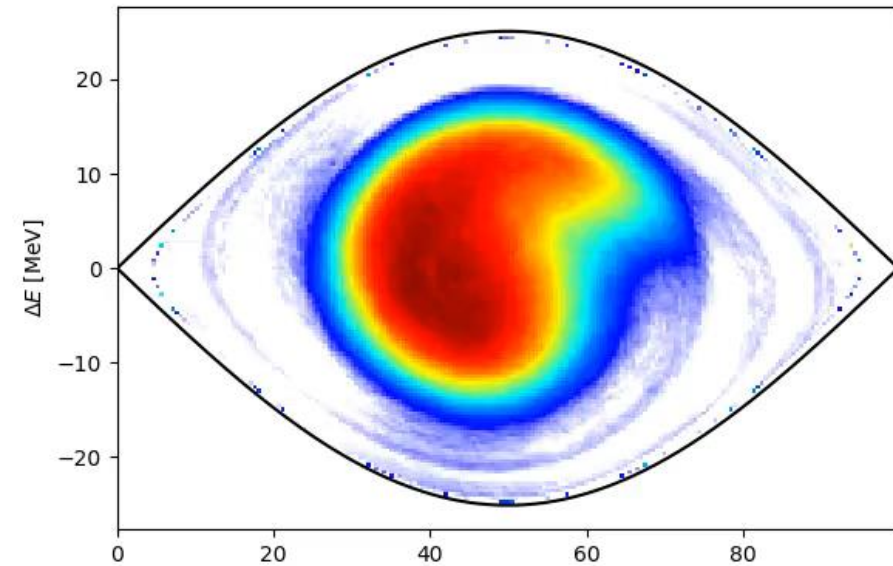
# Limitations du PS pour le projet LIU



## ■ Deux limitations principales en 2017:

- Instabilités en mode quadrupolaire pour des petites émittances longitudinales
- Augmentation incontrôlée de l'émittance sous l'influence des cavités haute fréquence

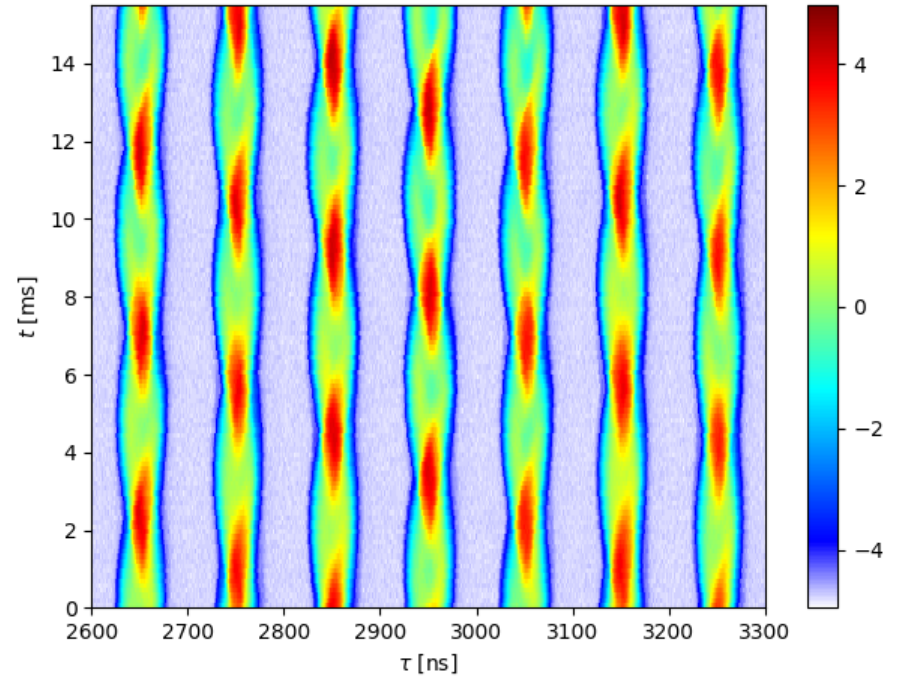
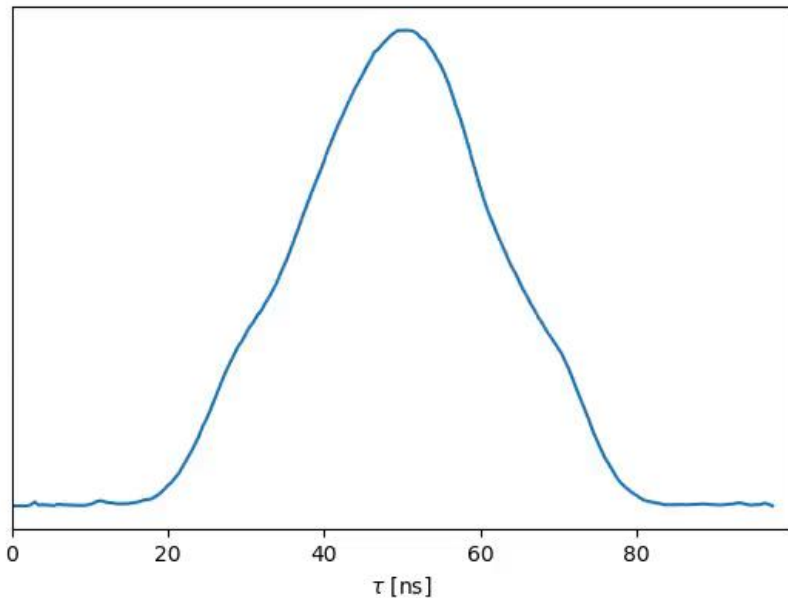
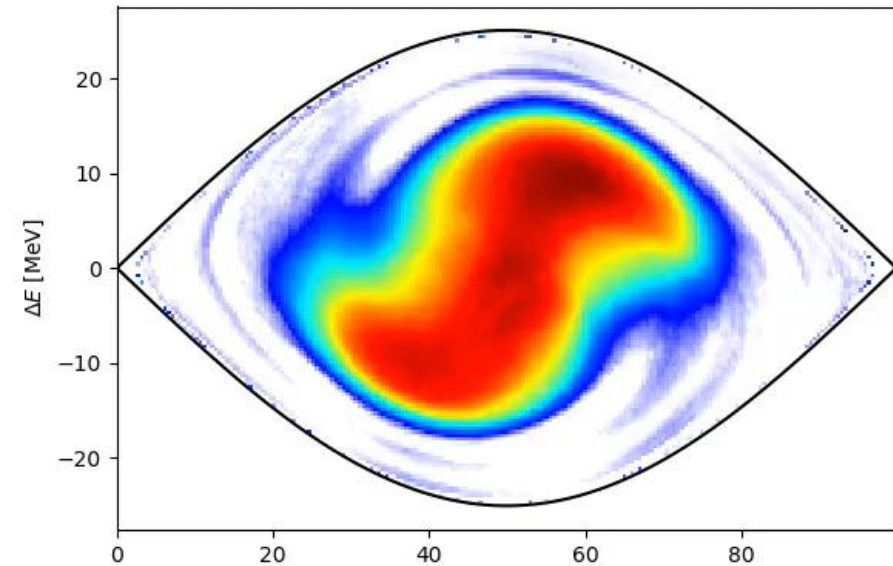
# Instabilités mode dipolaire



- Instabilités dipolaires mesurées à haute énergie
- Un nodule oscillant, oscillations de la position du paquet
- Oscillations à  $m=1 \times fs$

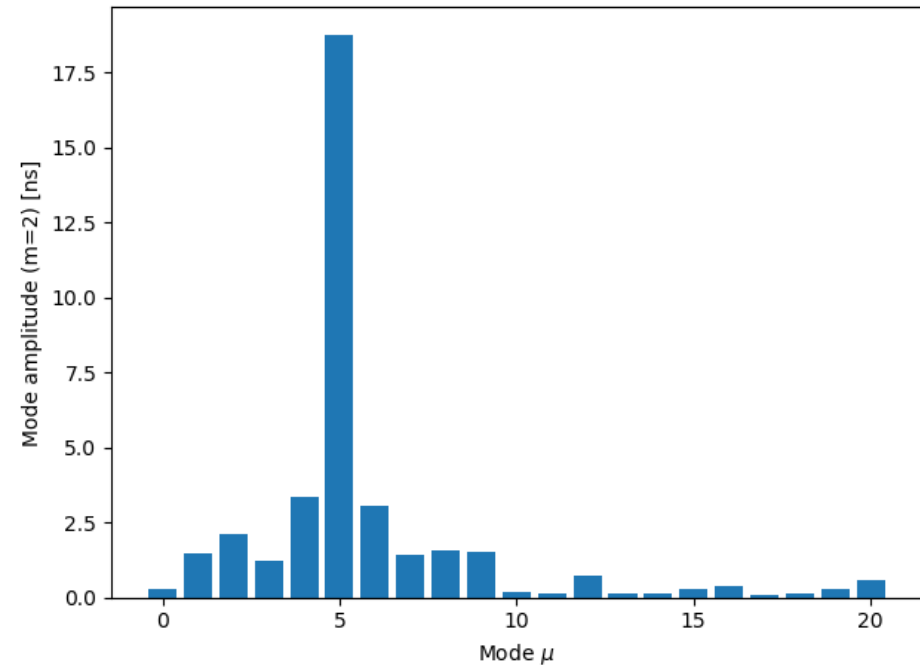
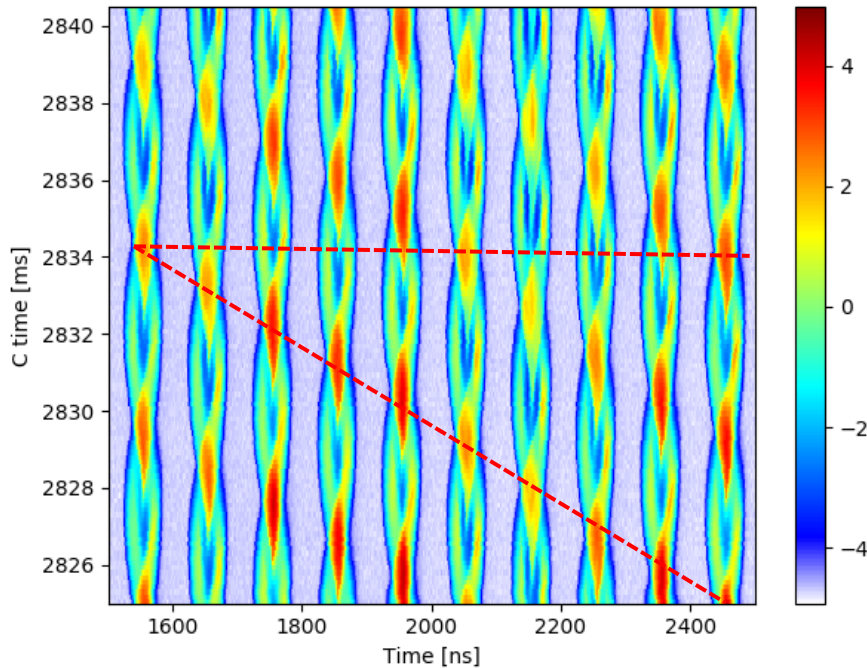


# Instabilités mode quadrupolaire



- Instabilités quadrupolaires mesurées à haute énergie
- Deux nodules oscillants, oscillations de la longueur du paquet
- Oscillations à  $m=2 \times fs$

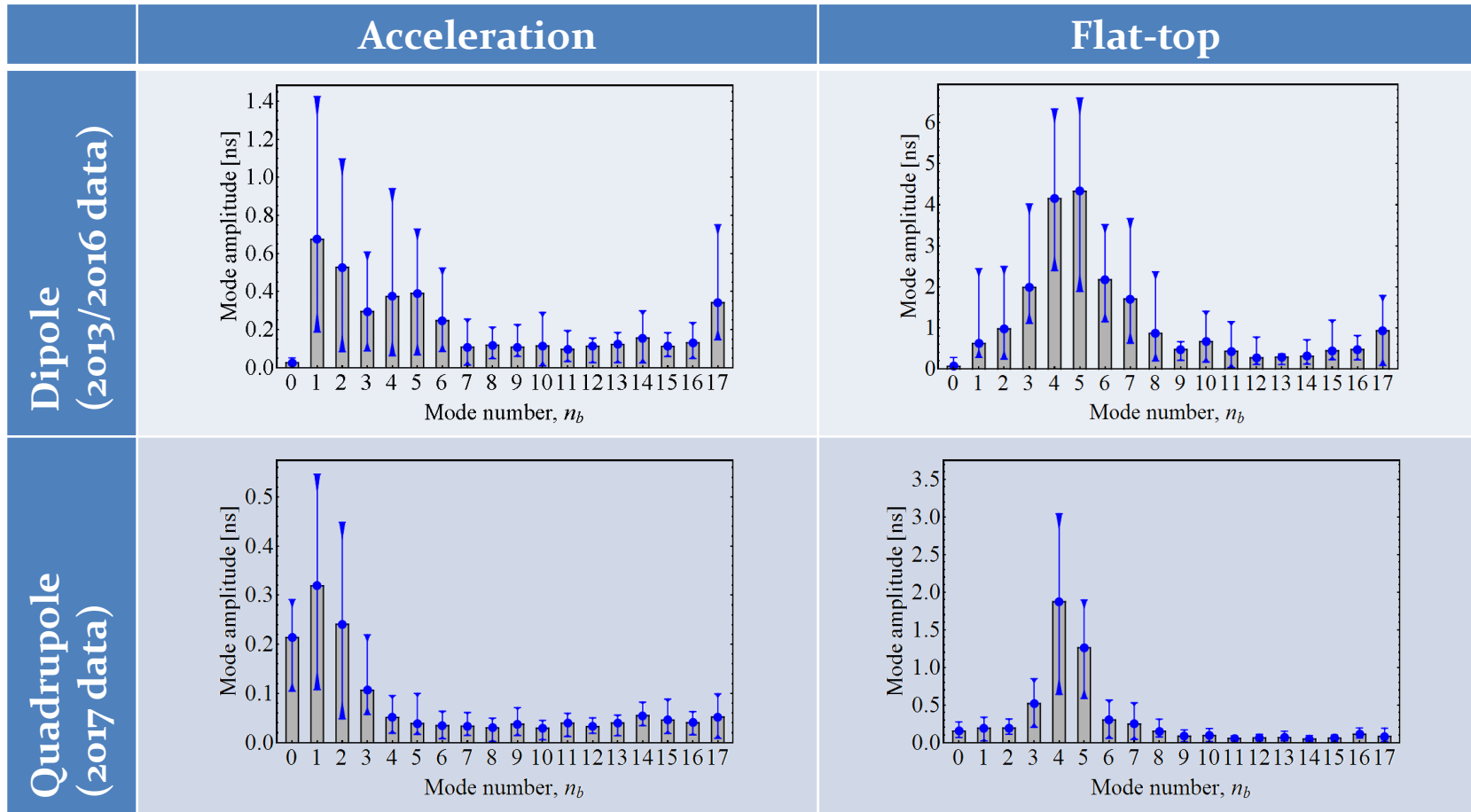
# Analyse de modes couplés, avance de phase



- Mesures de 2018 avec 21 paquets en harmonique RF  $h=21$  (machine pleine, cas symétrique), effectuées à  $4 \times 2.3 \times 10^{11}$  p/b
- L'analyse de mode s'obtient avec

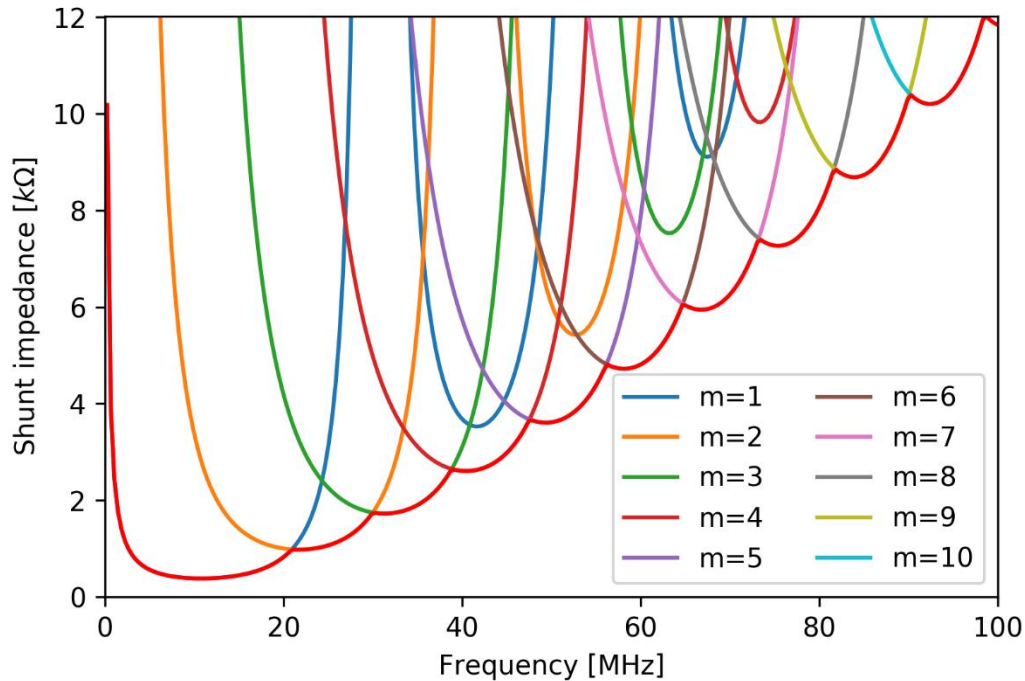
$$A_{\mu} \sin(m\omega_s t + \phi_{\mu}) = \frac{1}{N_b} \sum_{b=0}^{N_b-1} A_b \sin\left(m\omega_s t + \phi_b - \frac{2\pi \mu b}{N_b}\right)$$

# Analyse de mode passées



- Mesure des spectres de mode couplés reproductibles tous les ans avec 18 paquets en  $h=21$ .
- Mode dominant changeant à l'arrivée à haute énergie.

# Impédance shunt attendue



Coupled bunch instability threshold  
(narrow-band impedance source)

$$R_{sh} < \frac{|\eta|E}{eI_0\beta^2} \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 \frac{\Delta\omega_s}{\omega_s} \frac{F}{f_0\tau} G(f_r\tau)$$

$$G(x) = x \min\{J_m^{-2}(\pi x)\}$$

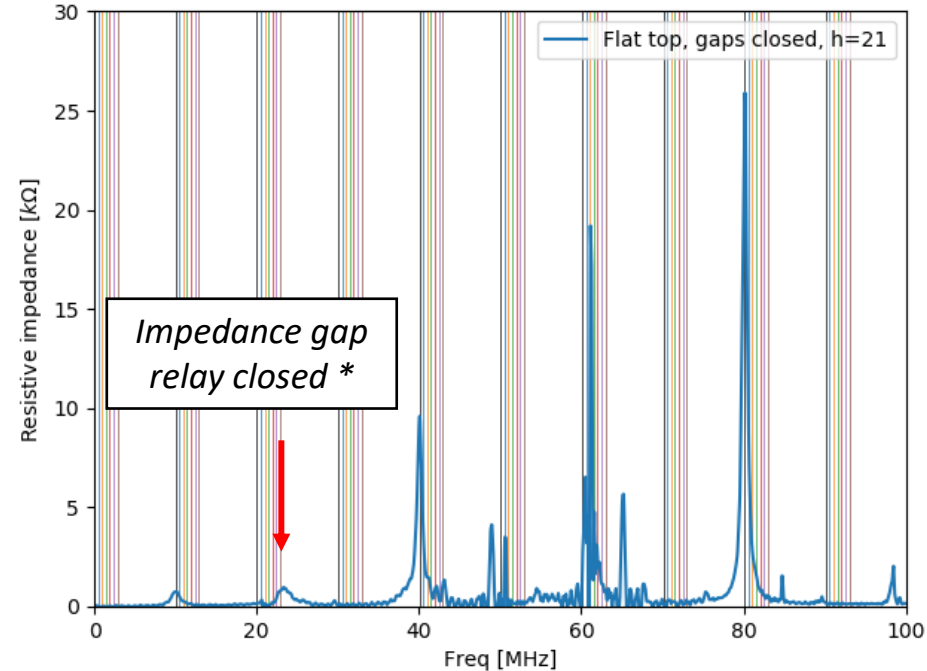
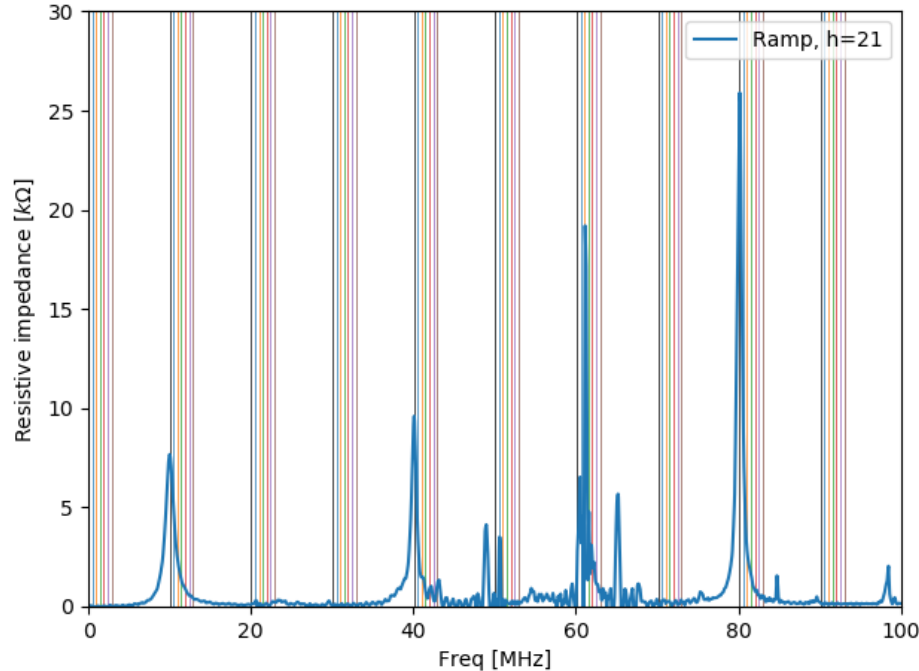
$$F \sim 0.3$$

E. Shaposhnikova,

<http://cds.cern.ch/record/691957/>

- Calculé avec les paramètres du faisceau à V=20 kV en h=21 et intensité LIU ( $N_b \approx 4 \times 2.6 \times 10^{11}$  p/b)
- Les estimations analytiques pointent vers des sources d'impédance de l'ordre du  $k\Omega$  pour générer des instabilités mode couplés
- Le type de mode dépend de la fréquence
  - Dipole (m=1): ~10MHz
  - Quadrupole (m=2): ~20 MHz

# Impédance et mode d'oscillation



$$f_{p,\mu} = (p N_{\text{bunches}} + \mu) f_{\text{rev}} + m f_s$$

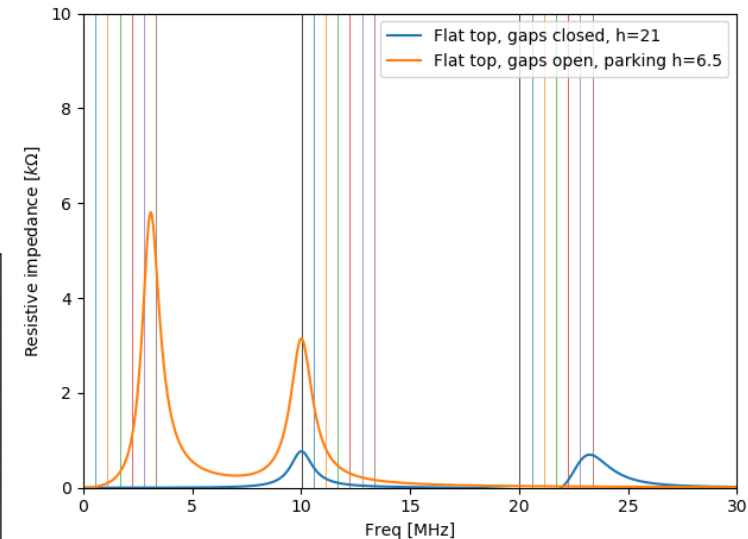
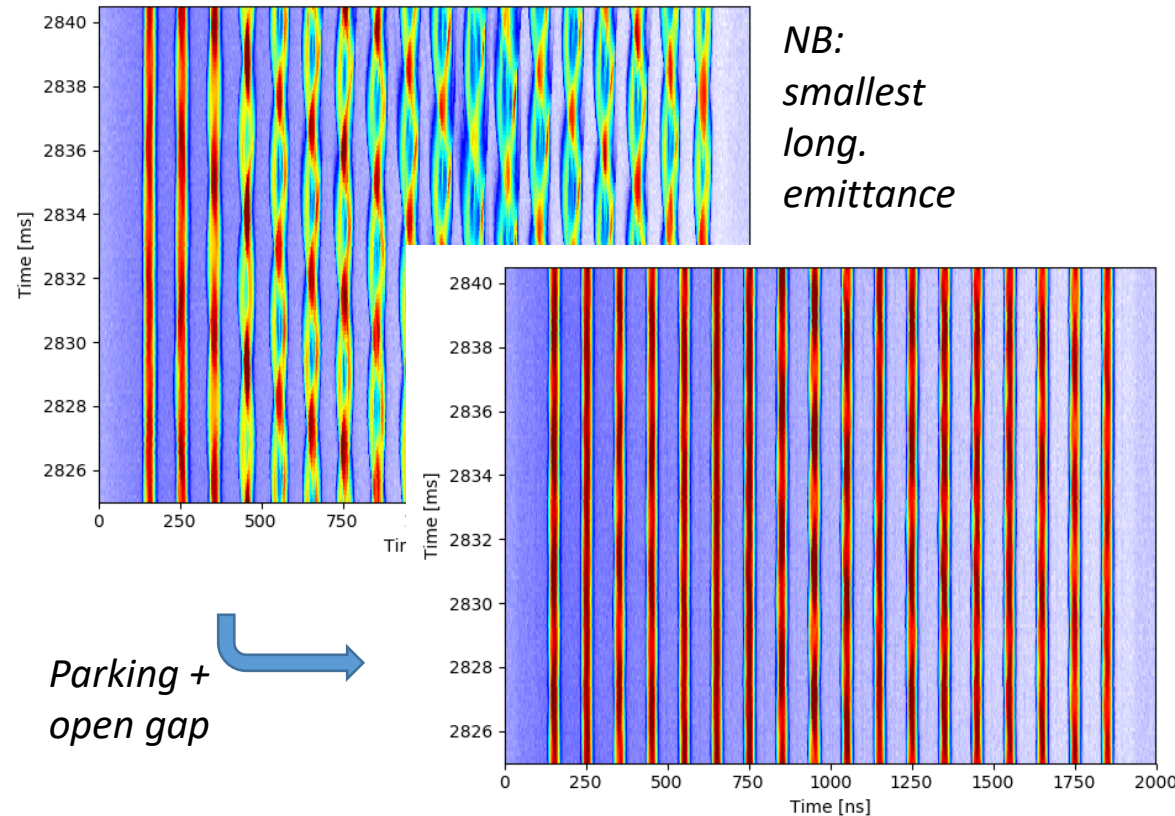
( $m = 1 \rightarrow$  dipole,  $m = 2 \rightarrow$  quadrupole)

\* G. Favia, based on C10-11 measurements,  
<https://cds.cern.ch/record/2286835/>

- Les sources d'impédance responsables de l'instabilités peuvent être identifiées en vérifiant l'emplacement en fréquence du pic résistif vs. emplacement des bandes synchrotroniques (lignes verticales jusque  $\mu = 6$ )
- L'impédance des cavités 10 MHz en court circuit (impédance réduite) correspond aux paramètres attendus.



# Vérifications de la source d'instabilités

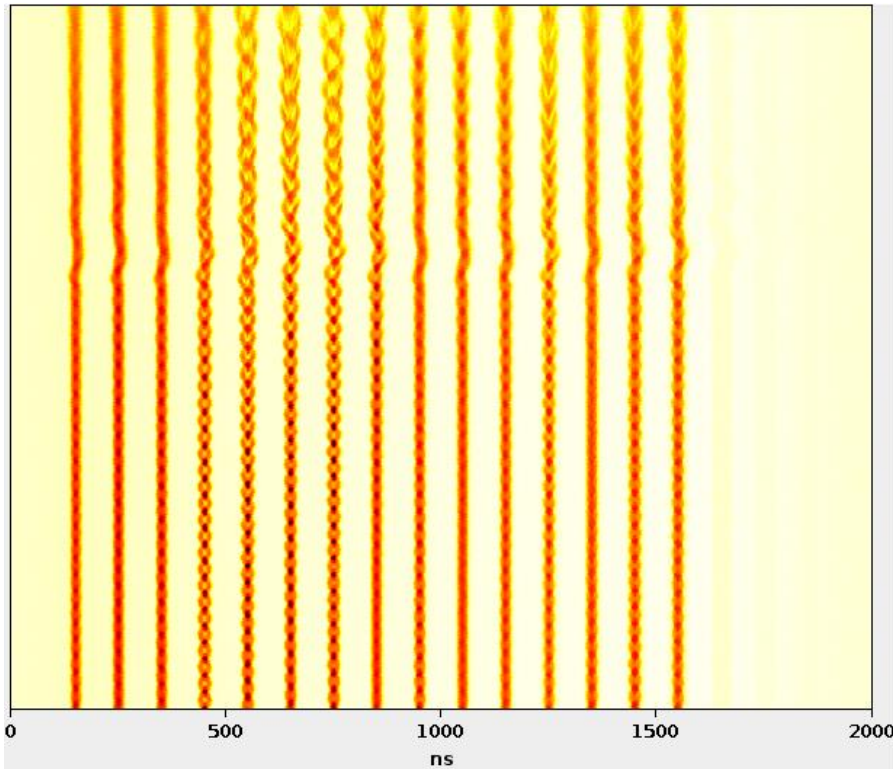


- Mesures avec **18** paquets et intensité  $N_b \approx 4 \times 2.6 \times 10^{11}$  p/b
- L'impédance des cavités peut être changée en coupant le court circuit et en déplaçant la fréquence d'ajustement des cavités non utilisées à basse fréquence.
- L'impédance est largement augmentée, mais loin de la fréquence responsable de l'instabilité quadrupolaire

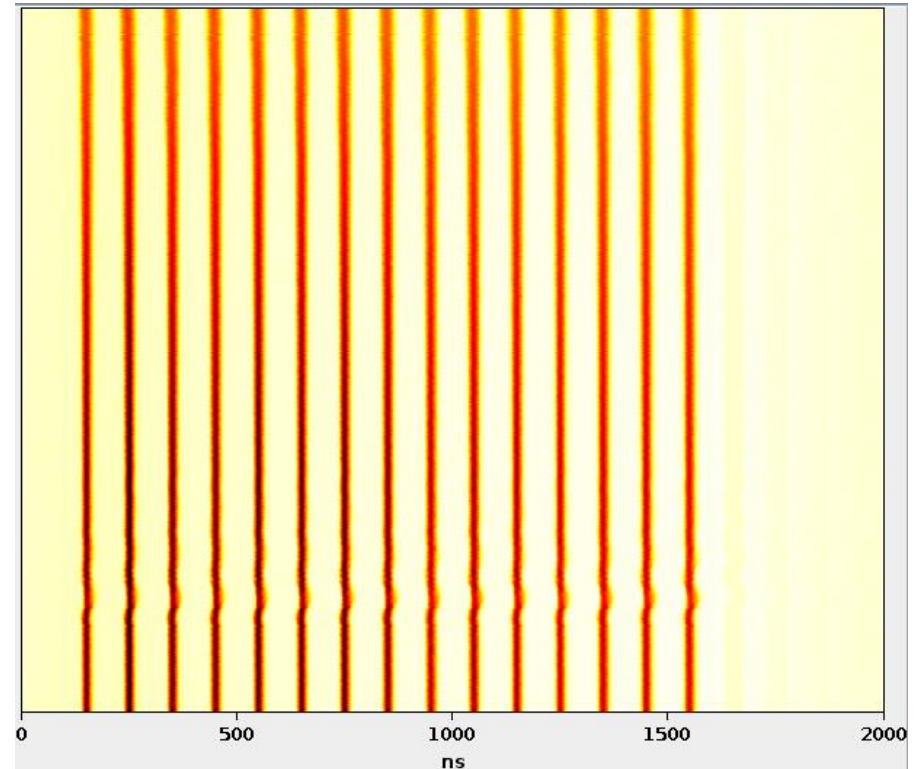
➤ **Les cavités 10MHz avec un court circuit semblent être la source!**

# Amortissement de Landau

*Sans cavité de Landau*

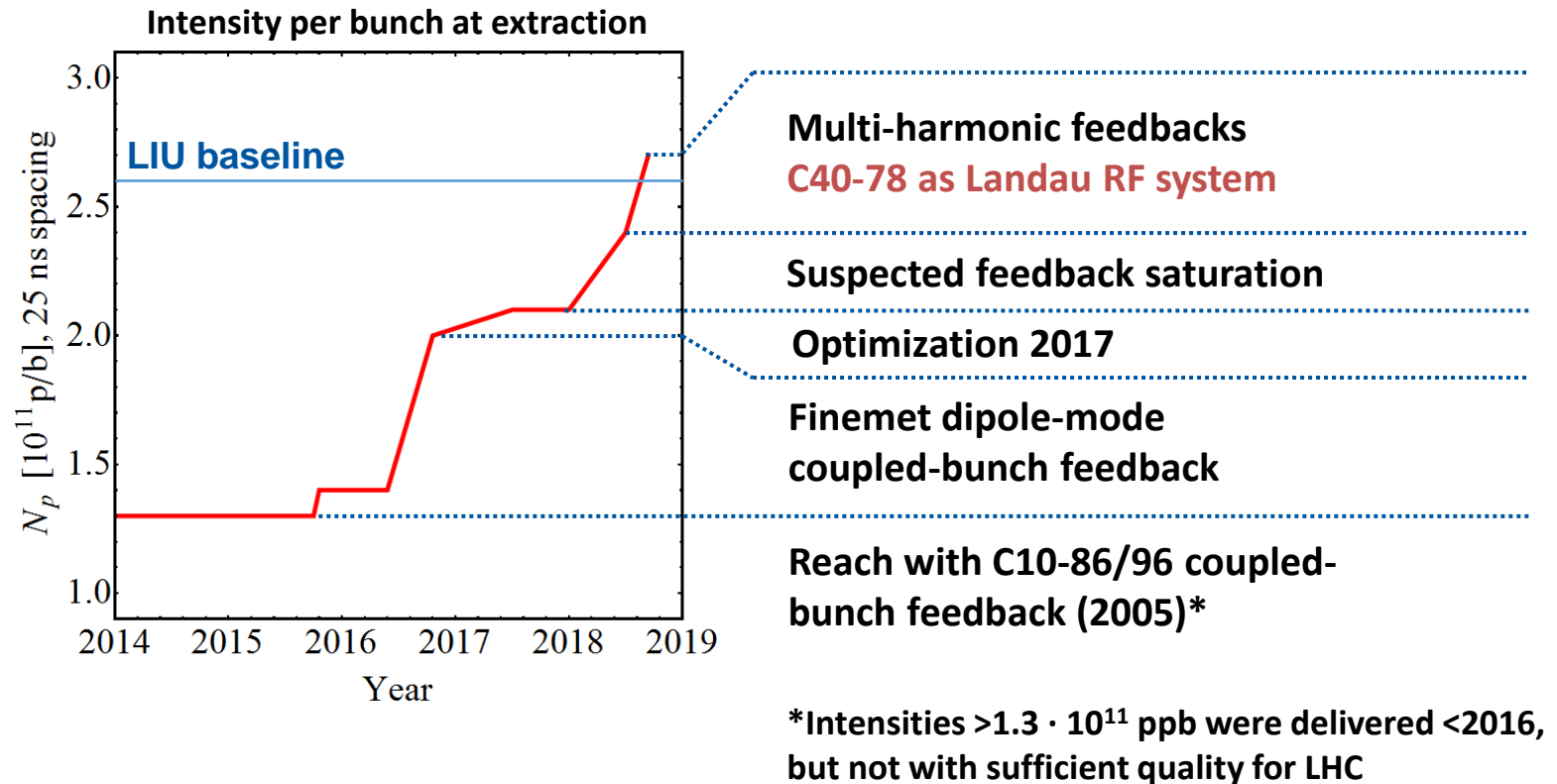


*Avec cavité de Landau*



- Une approche pour stabiliser le faisceau consiste à utiliser une cavité à une harmonique supérieure (x4 ici), à un faible ratio de tension (10-20%), en phase focalisante (raccourcissement).
- L'augmentation du spectre en fréquence synchrotron stabilise naturellement le faisceau. Une cavité 40MHz du PS a été détournée à cette fin!

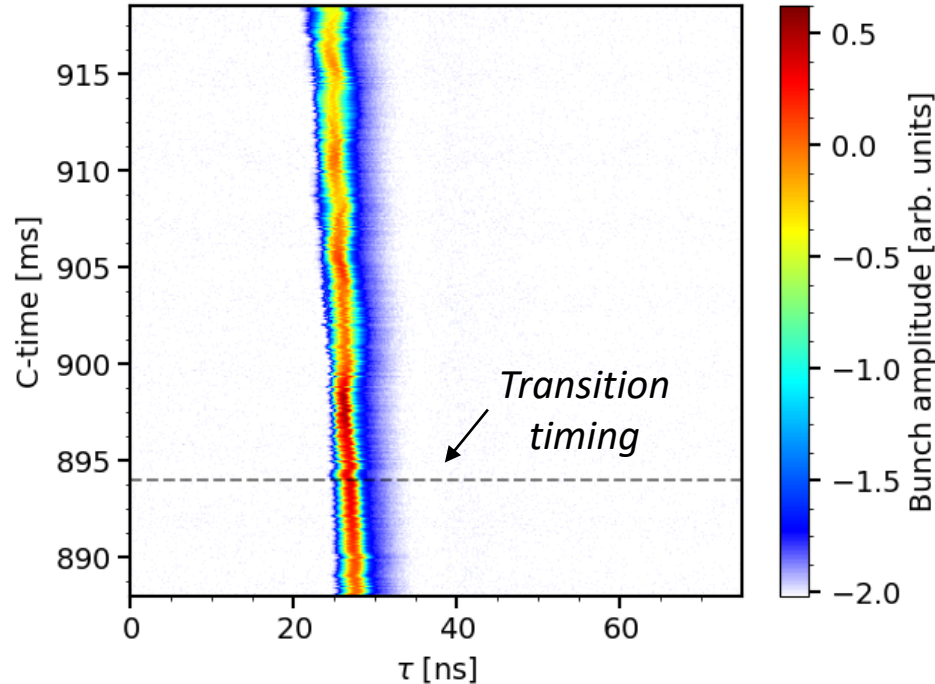
# La nouvelle magie du LIU PS



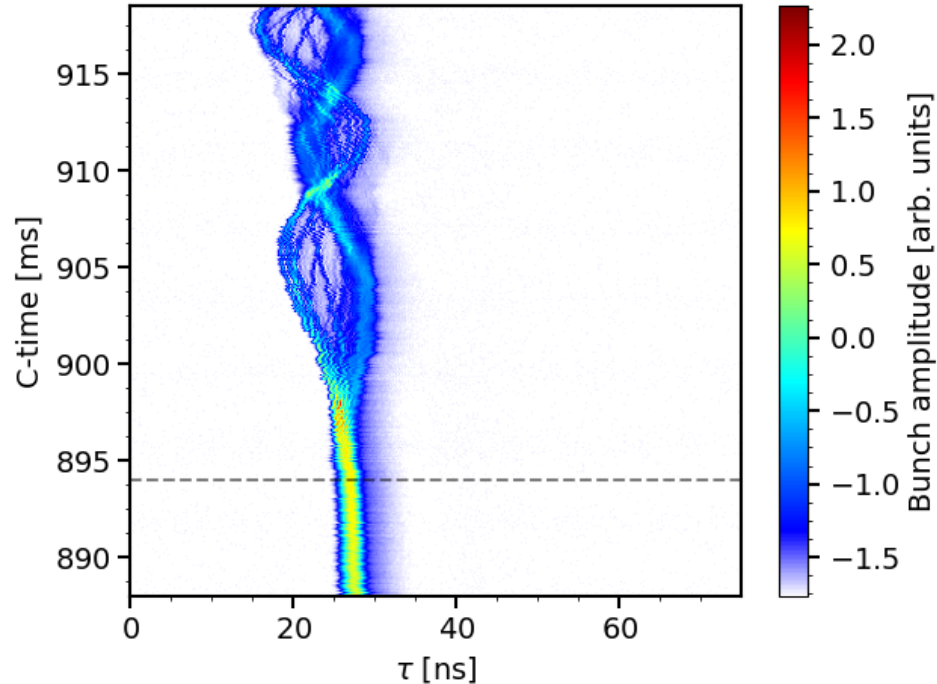
- Les performances pour le projet LIU ont pu être obtenues en 2018 grâce à des feedbacks supplémentaires sur les cavités haute fréquence et en utilisant une des cavités haute fréquence pour amortissement de Landau.
- En 2021, les performances sont en voie d'être rétablies après le long arrêt technique LS2 (2019-2020).

# Instabilités micro-onde à la transition (ions)

*Emittance longitudinale nominale*

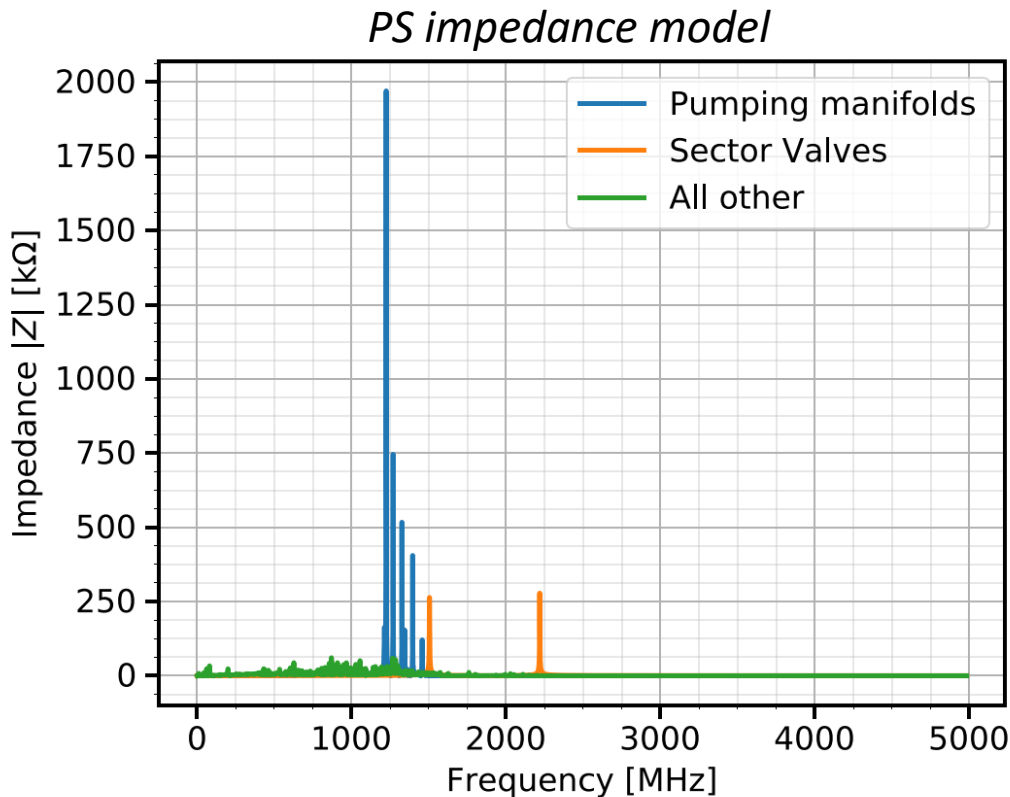


*Faible émittance longitudinale*

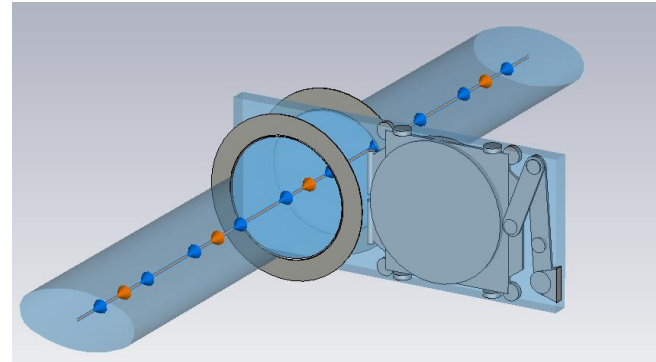


- En 2018 la luminosité du LHC pour les collisions avec ions a battu des records, grâce au raccourcissement de la distance entre paquets de 100 ns à 75 ns dans le PS.
- Le changement de mode de production a mis le PS à la limite de l'instabilité micro-onde, observable en réduisant l'émittance longitudinale.

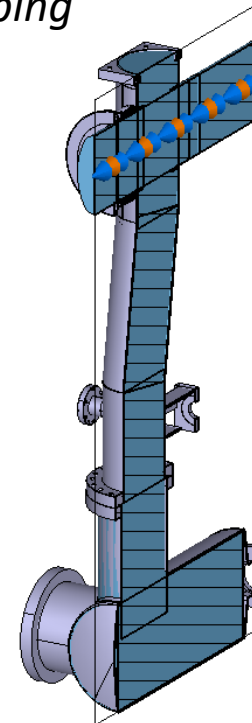
# Modèle d'impédance à haute fréquence



*Sector valves (x10)*



*Empty pumping manifolds (~x36)*



- Des suspects ont déjà été identifiés dans le PS, les équipements de vide et en particulier les assemblages de pompe et valves de secteur.
- Les assemblages de pompe ont déjà été identifiées à la fin des années 70 par [D. Boussard](#) comme sources potentielles pour l'instabilité micro-onde dans le PS.





# Conclusions

---

- L'augmentation attendue des performances dans le cadre du project LIU a été atteinte dans PS dans le plan longitudinal, et doit être validé de façon opérationnelle en vue du projet HL-LHC.
- Les instabilités observées sont à présent atténuées par des feedback ou par amortissement de Landau.
- Les études ont bénéficié d'une longue campagne de modélisation de l'impédance de couplage du faisceau, qui permettent de déterminer les sources d'instabilités.
- La chasse aux sources d'impédances pouvant contribuer aux instabilités du faisceau continue.
- La magie du PS continue d'opérer, encore pour de belles années...