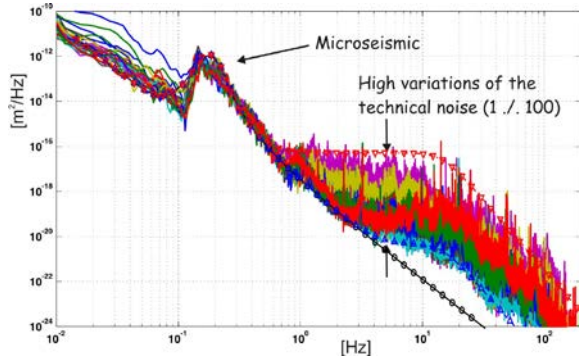


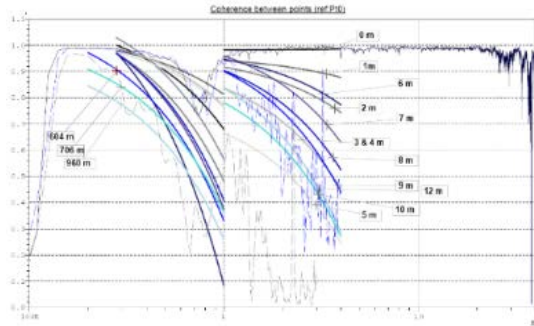
R&D ACCELERATEURS au LAPP

B. Aimard, G. Balik, J.P. Baud, [L. Brunetti](#), A. Dominjon, S. Grabon, E. Montbarbon, F. Poirier

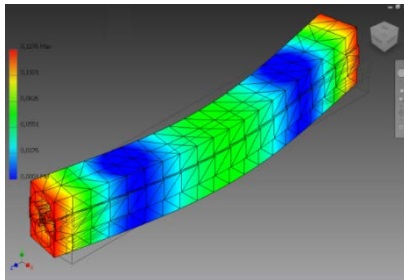
Réunion Annuelle Réseau Instrumentation Faisceau, 07 avril 2022



PSD displacement of various sites

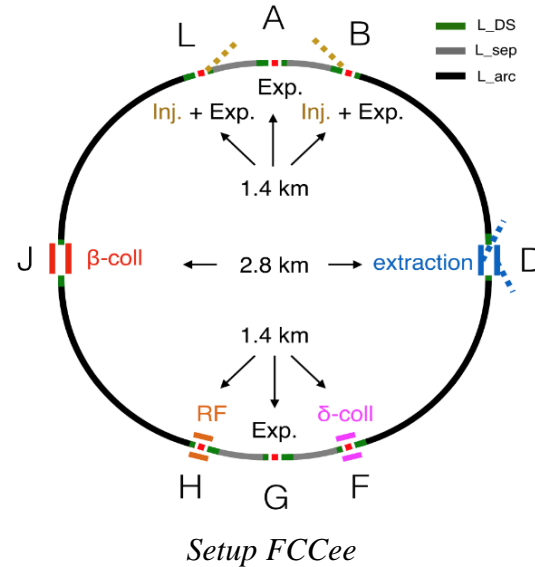


Mesures de coherence au LHC



Simulation d'aimant

+ Perturbations locales (pompes, refroidissements... etc)

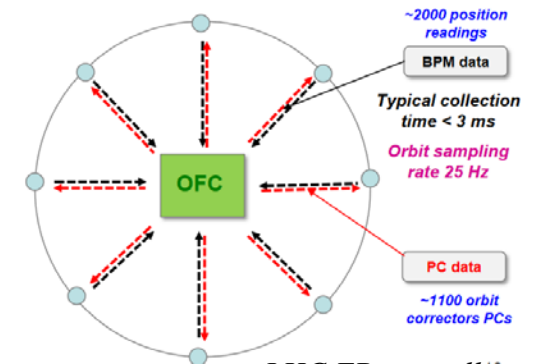


➤ Incidences sur la qualité du faisceau / machine:

- Luminosité
- Emittance
- Taille et position faisceau...

- ❑ Mesure directe : capteurs de vibrations (géophones, sismomètres, accéléromètres...)
- ❑ Mesure des effets sur le faisceau: BPM, luminomètres...
- ❑ Outils d'analyse: simulation mécanique (éléments finis) & optique (MADx, SAD, PLACET...)
- ❑ Atténuations des sources et des effets: génie civil, mécanique/mécatronique, contrôles faisceau

❖ Développements sur les accélérateurs linaires (CLIC & ATF2), étude de faisabilité (FCCee) et un applicatif (SuperKEKB)



LHC FB controller architecture design



$\Delta d=0$

Criticité des aspects vibratoires

$d=0$



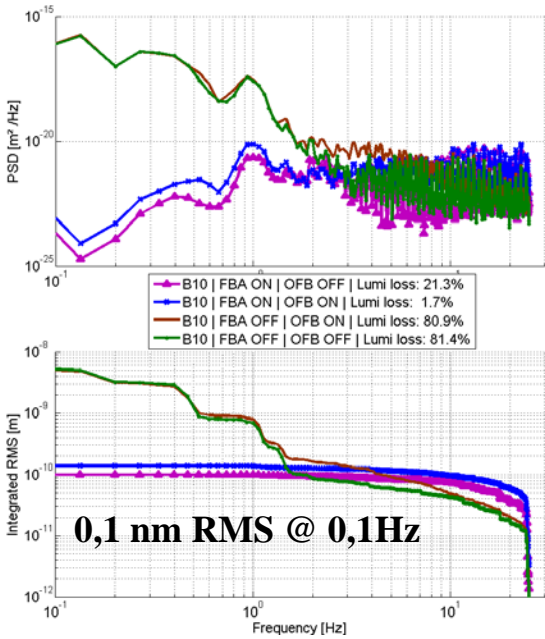
- Accélérateur circulaire – répétition de faisceau élevée & symétrie des effets magnétiques sur les 2 faisceaux
- Cohérence des infrastructures, en particulier autour des IPs
- Contrôles faisceaux : correction de l'orbite, contrôle post-IP BPM



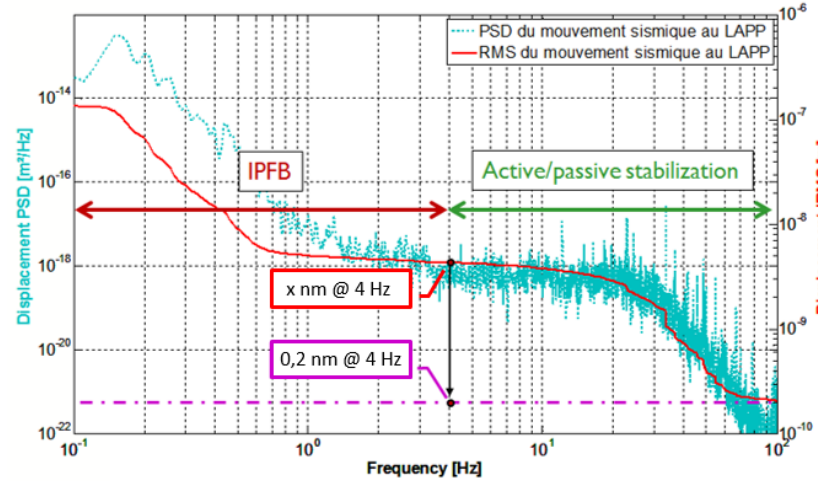
- Effets mécaniques – mode de résonances: cryostat encastré libre, supports & aimants, systèmes de positionnement...
- Incohérence le long de l'anneau vs distance et fréquences ou vs contraintes structurelles, sources diverses (ex: pompes, cooling...)
- Résolution et bruit des BPMs
- **Faisceau nanométrique en vertical**

- Lien étroit avec les défauts statiques (alignement et positionnement actif)
- Focus sur le MDI (Machine Detector Interface) qui nécessite néanmoins une approche globale

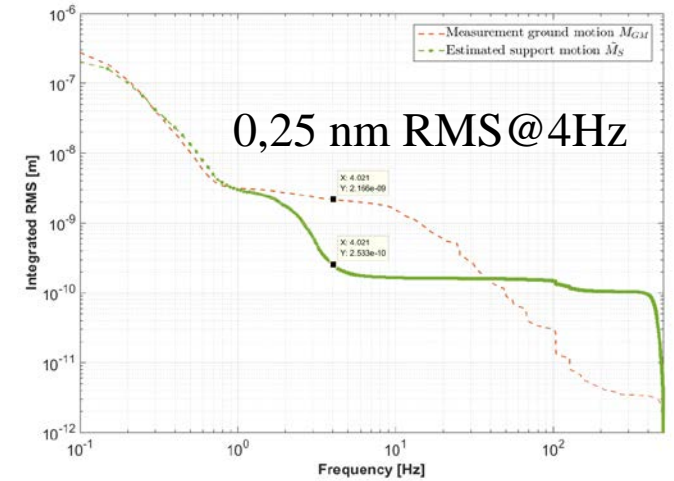
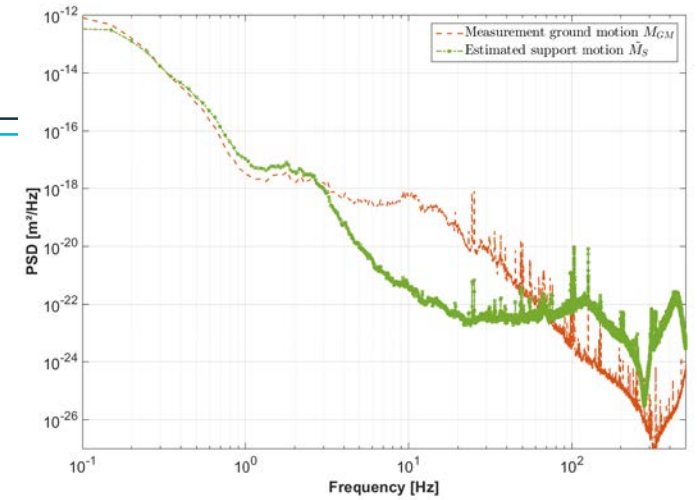
Exemple: spécifications CLIC au point d'interaction



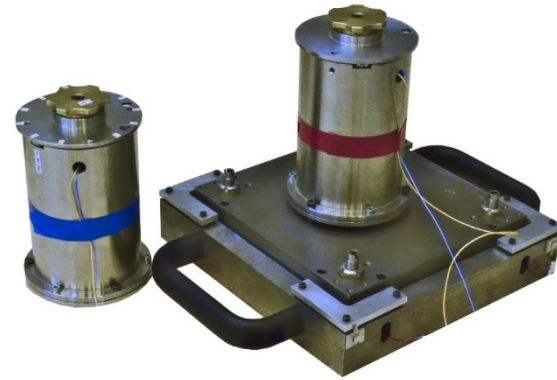
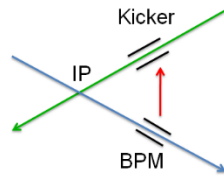
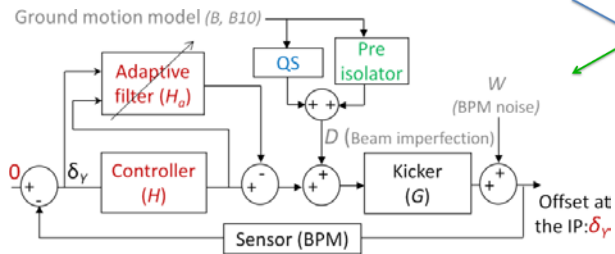
IPFB



Stab



Luminosity vs control ON or OFF and vs model of seismic motion (deal under *Placet*)



- Pied actif LAPP + capteurs LAPP -



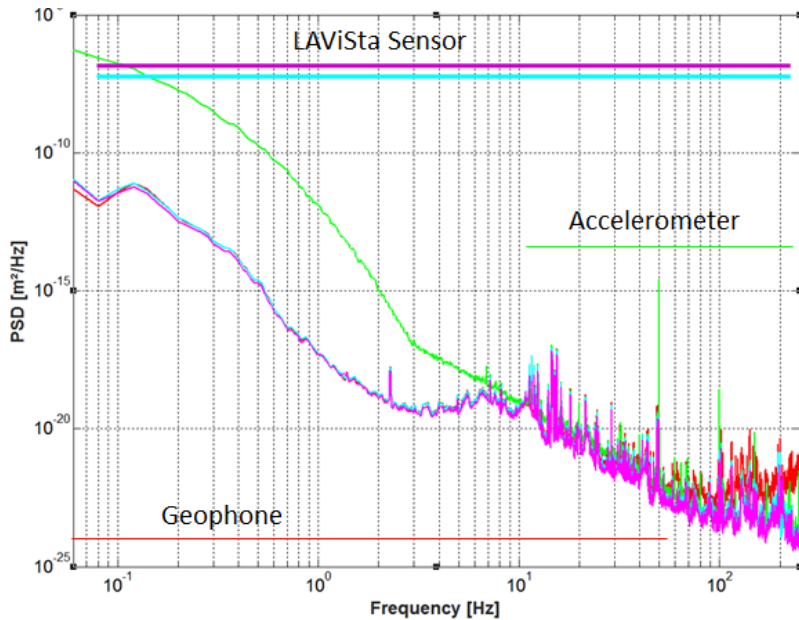
CLIC Main Linac stabilization
CERN

- Caron B et al, 2012, "Vibration control of the beam of the future linear collider", *Control Engineering Practice*.
- G. Balik et al, 2012, "Integrated simulation of ground motion mitigation, techniques for the future compact linear collider (CLIC)", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*
- G. Balik, B. Caron, B. Aimard, L. Brunetti, G. Deleglise, "Vibration control using a dedicated inertial sensor", *IEEE Sensors Journal*, 2017

Exemples de sismomètres et accéléromètres commerciaux pour des mesures nanométriques:

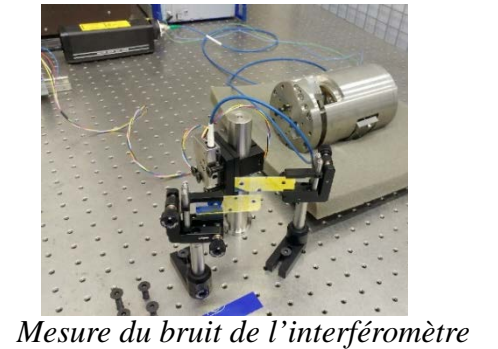
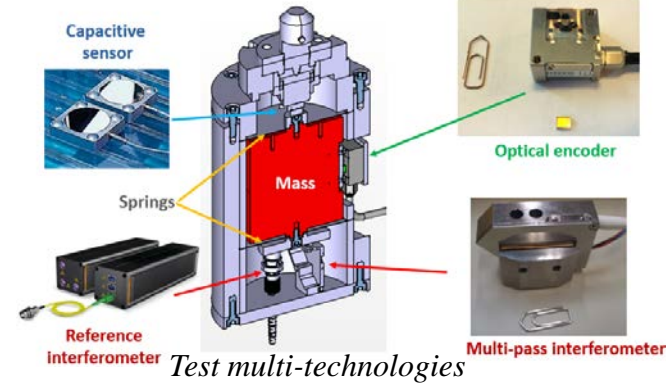
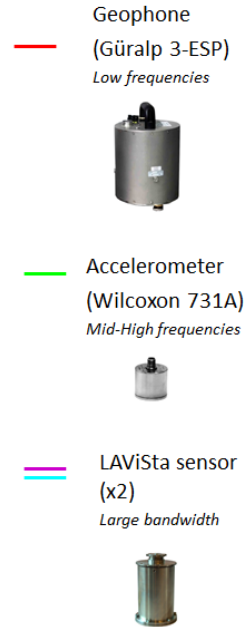
Streckeisen STS2	Guralp CMG 3T	Guralp CMG 40T	Guralp CMG 6T	Eentec SP500	PCB 393B31	Wilcoxon 731A	PI D0-015
x,y,z	x,y,z	x,y,z	x,y,z	z	z	z	Δd
2*750Vs/m	2*750Vs/m	2*800Vs/m	2*1000Vs/m	2000Vs/m	1 Vs ² /m	1 Vs ² /m	0.67 V/ μ m
120 s -50 Hz	360s -50 Hz	30 s -50 Hz	30s-80Hz	60 s -70 Hz	10 s -300 Hz	10 s -300 Hz	10 s -300 Hz
13 kg	13.5 kg	7.5 kg	2,6 kg	0.750 kg	0.77 kg	0.55 kg	0.635 kg

Comparaison avec des capteurs commerciaux au CERN (ISR):



R&D en cours:

➤ Comparaison de technologies de mesures différentielles



- Capacitive sensors (PI & Lion Precision), Optical encoder (Magnescale) & Interferometer (Attocube & a developed one (INRiM (It) and ISI Brno (Cz))
- P. Novotny et al, "What is the best displacement transducer for a seismic sensor?", IEEE Inertial Sensors and Systems 2017, Hawaiï, USA.

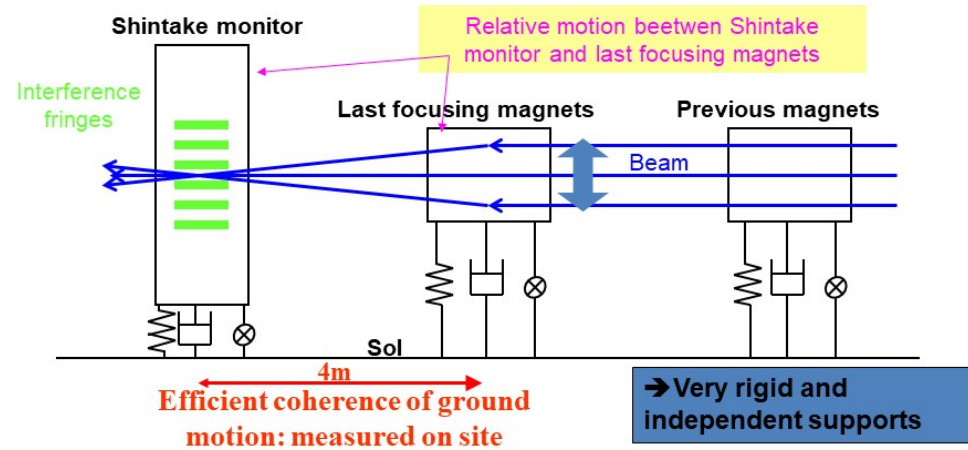
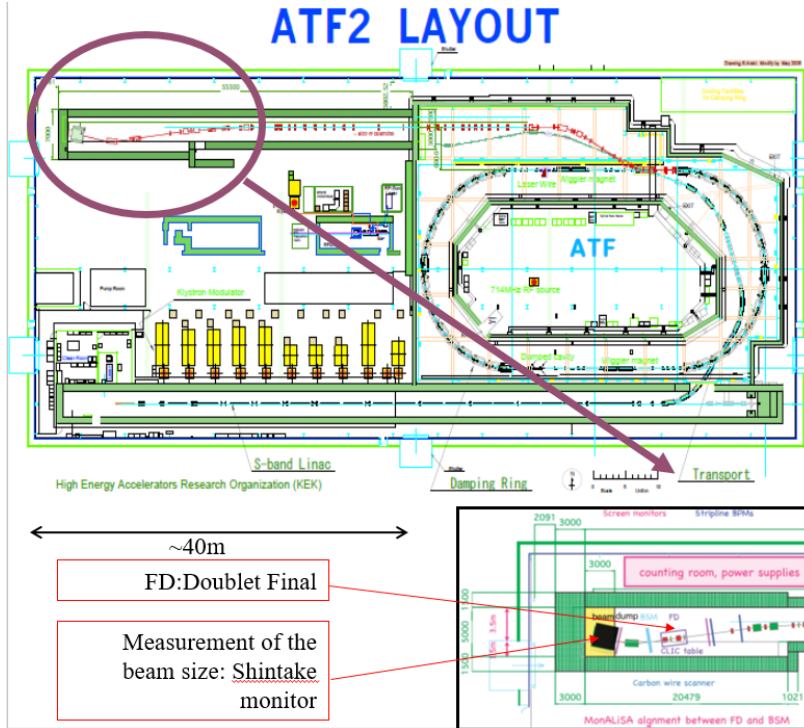
➤ Fort lien technologique avec le positionnement actif

- Exemple d'ATF2 au Japon (KEK) – démonstrateur d'accélérateur linéaire

- ATF2 Objectifs : Faisceau stable de 37 nm au point d'interaction.

- ☐ Nécessite un déplacement relatif entre le Shintake Monitor et l'aimant du final focus : **10 nm au dessus de 0.1Hz (direction verticale)**

- Optimisation de la cohérence des mouvements entre les éléments

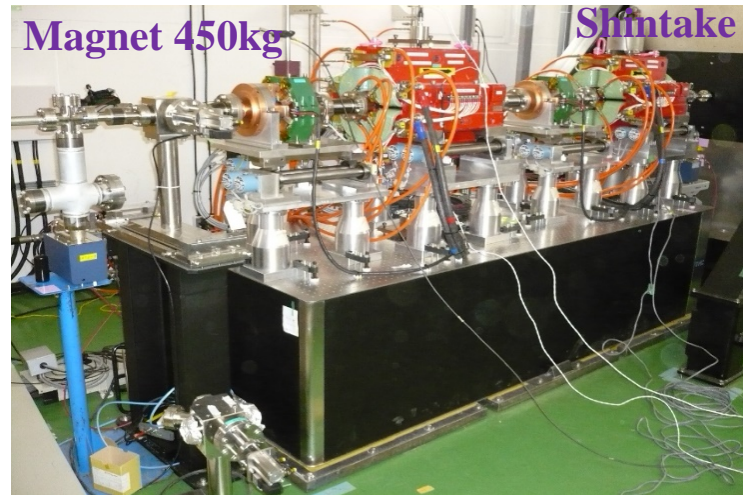
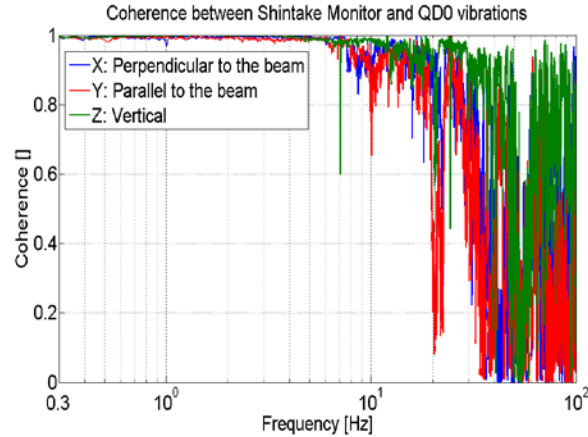


- Fonction de transfert entre le sol + final focus et le shintake monitor doit être le plus proche de 1

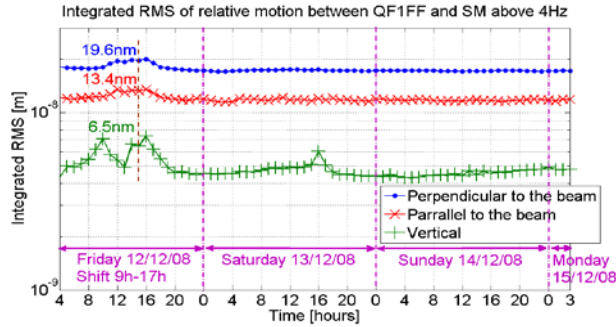
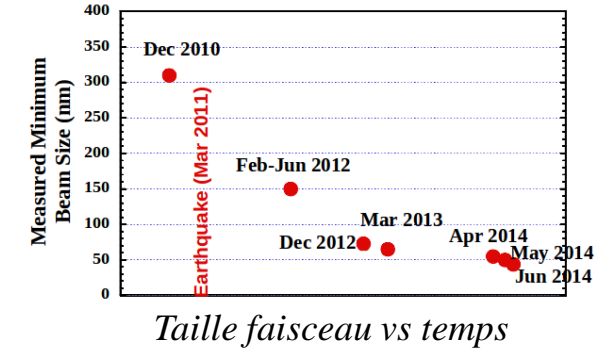


Demonstration of linear colliders - ILC

■ Setup final du final focus:



Setup du final focus - ensemble extrêmement rigide (axe z)

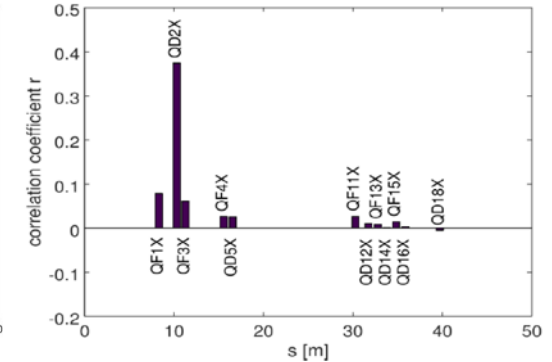
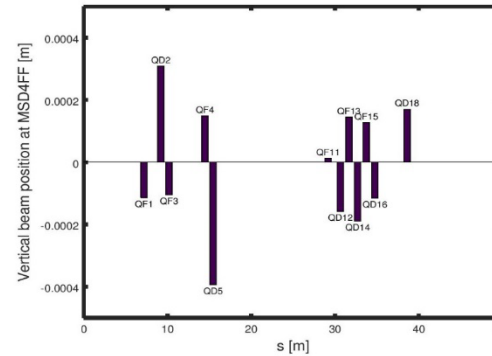
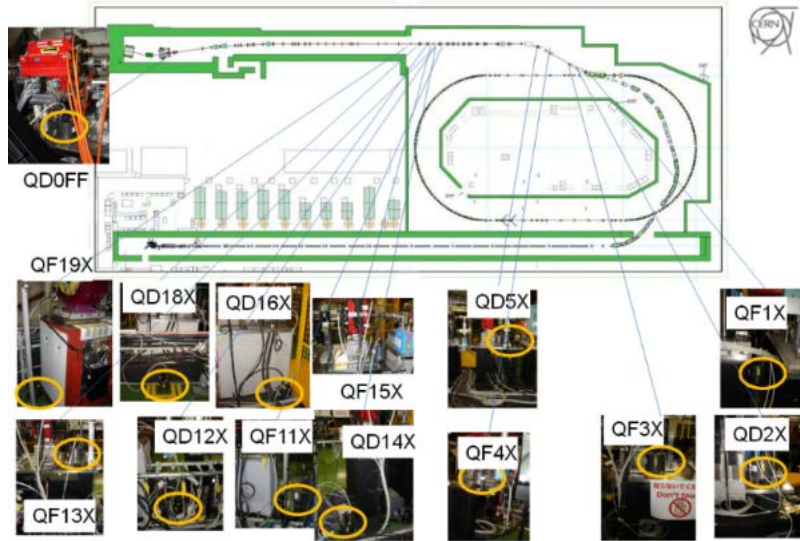


□ Déplacement relative entre shintake monitor et doublets finaux de [4 – 6] nm RMS @ 0,1 Hz (axe vertical):

	Tolerance	Measurement [SM-QD0]	Measurement [SM-QF1]
Vertical	7 nm (for QD0) 20 nm (for QF1)	4.8 nm	6.3 nm
Perpendicular to the beam	~ 500 nm	30.7 nm	30.6 nm
Parallel to the beam	~ 10,000 nm	36.5 nm	27.1 nm

□ Stratégie très répandue sur de nombreux accélérateur – expériences...

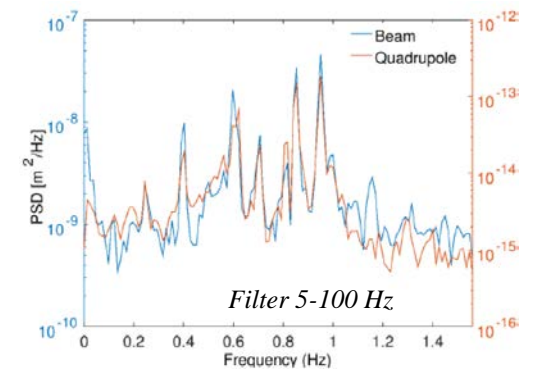
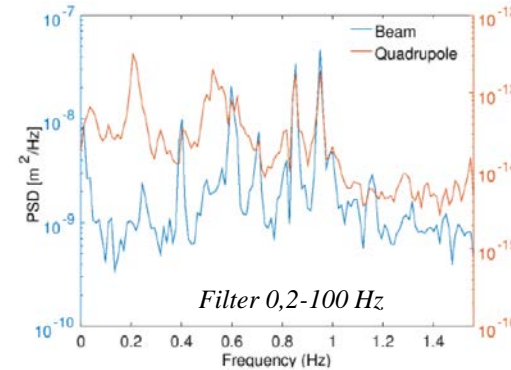
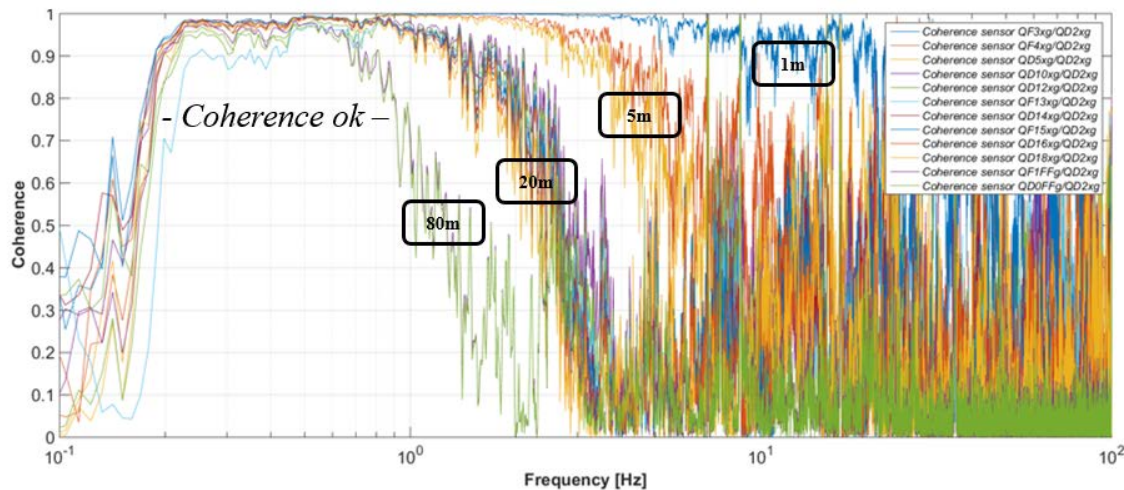
■ Contrôle “feedforward” en fonction du mouvement des aimants



Comparison of the estimated and the correlated perturbations created by the magnets motions at the end of the extraction line

14 capteurs Geophones (Guralp 6T) - Collaboration CERN, IJClab, Oxford, KEK and LAPP

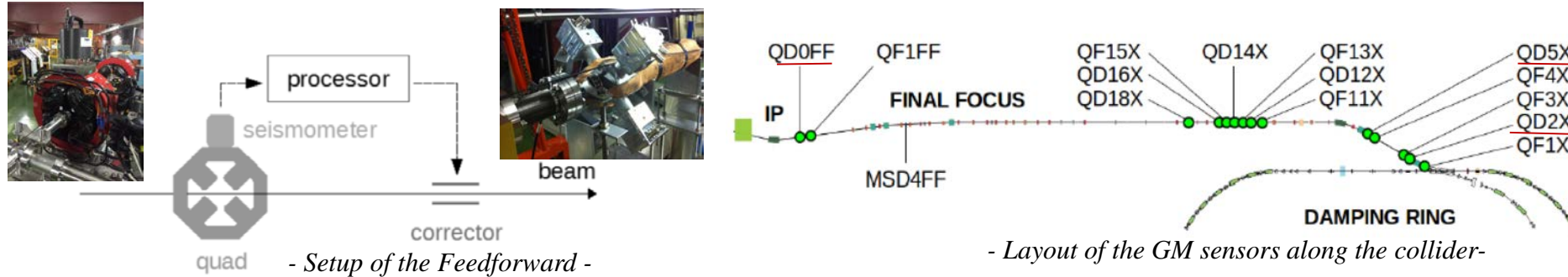
■ Extraction du mouvement incohérent



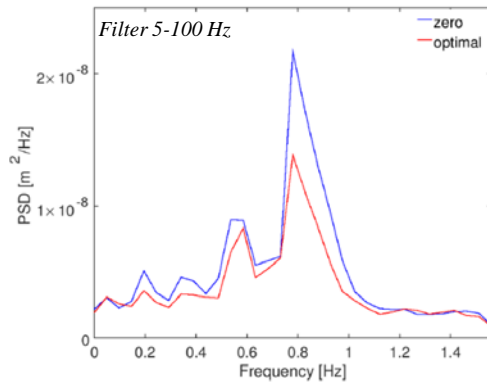
Correlation BPM – Magnet measurements

Feedforward setup

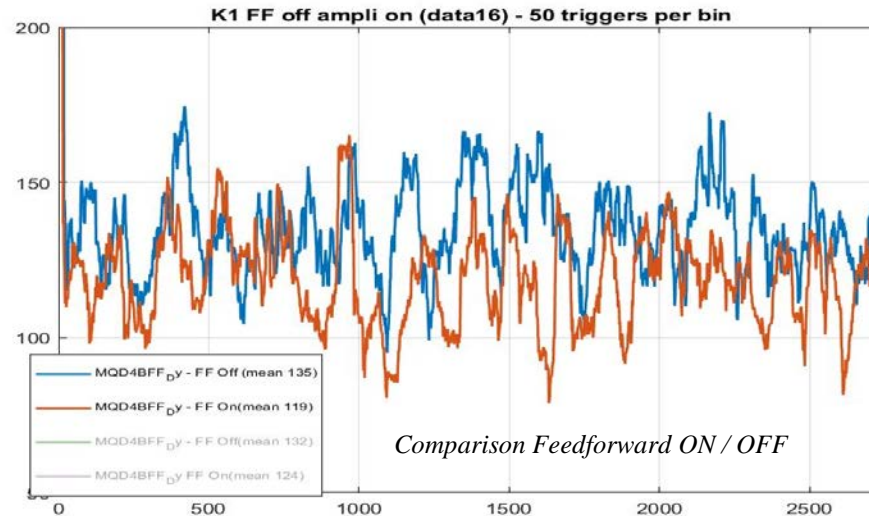
□ D. Bett et al, "Compensation of orbit distortion due to quadrupole motion using feed-forward control at KEK ATF", *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 895 (2018) 10–18



Contrôle des perturbations au niveau de l'extraction line

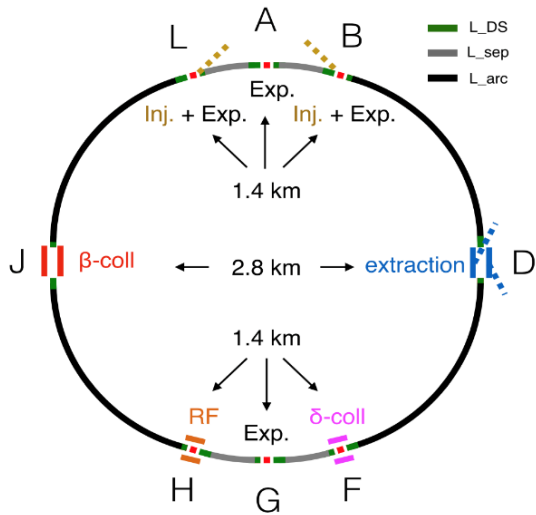
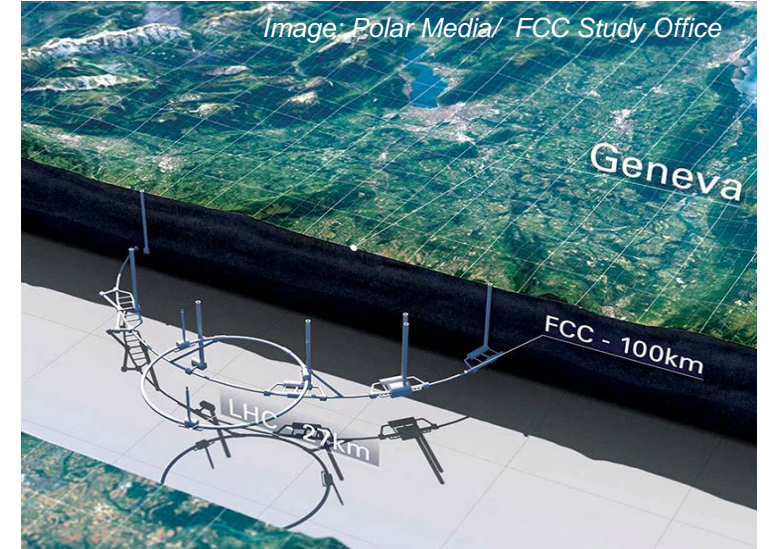


- The obtained experimental results with 1 geophone and 1 kicker -



□ La réduction du jitter peut atteindre 10 à 20% (une grande part est dûe à l'injection)

- FCC: étude de trois potentielles configurations, à savoir les collisions de hadrons (FCC-hh), comme dans le LHC, **collisions électron-positon (FCC-ee)**, comme dans l'ancien LEP, et collisions proton-électron.
- En 2019, le groupe a intégré la collaboration dédiée à l'Interface Machine-Détecteur (MDI), en particulier l'étude des effets vibratoires sur les performances de la machine FCC-ee



Energy (GeV)	45.6	80	120	175
$\sigma_x(\text{IP})$ (μm)	6.4	13	13	36
$\sigma_y(\text{IP})$ (nm)	28	41	36	66

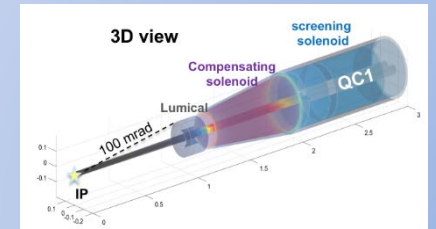
Taille de faisceau de FCC-ee en fonction de l'énergie

double ring e^+e^- collider ~100 km

MDI vibration aspects

- Mécanique & contrôle
- Simulation optique

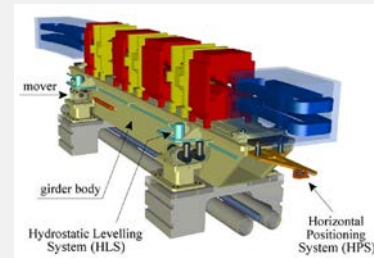
FCC IS WP2.3



Positioning technics

- A l'interface de l'alignement et du positionnement actif faisceau OFF

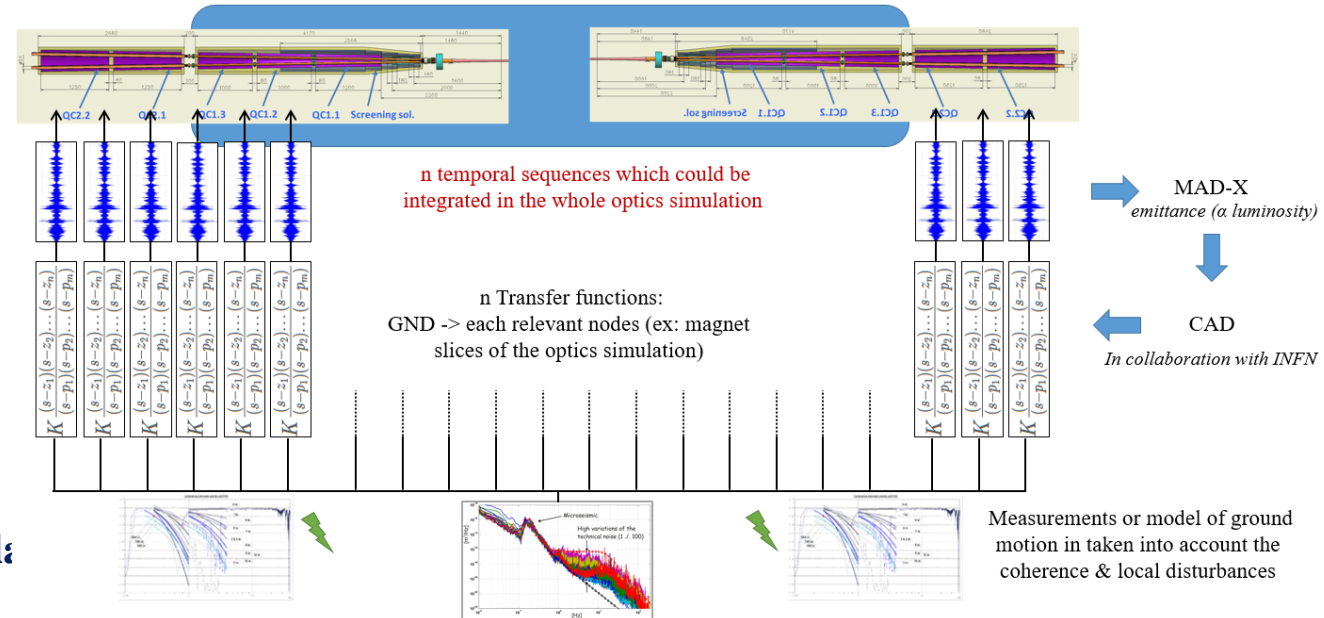
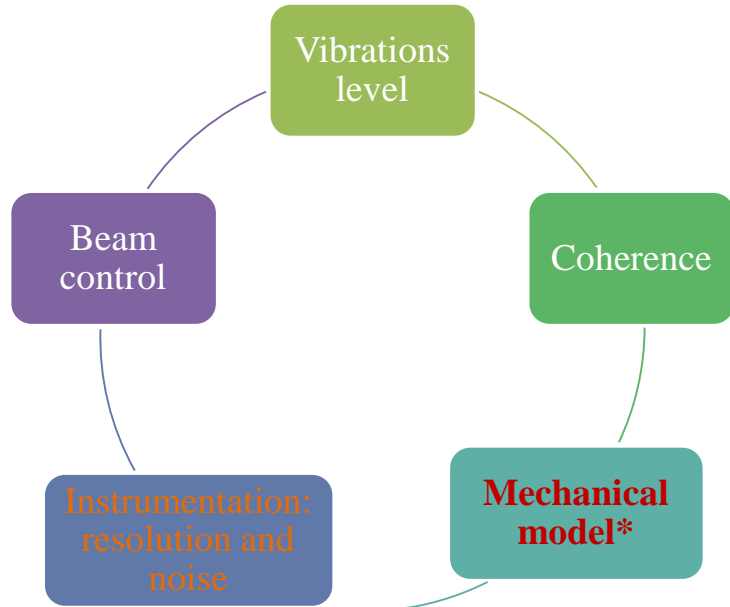
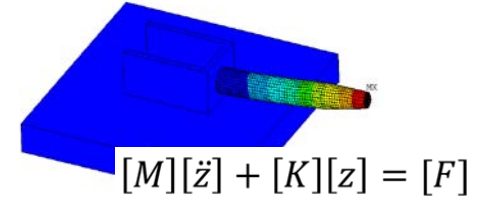
FCC IS WP2.2



- Evaluation des tolérances et des performances associées au MDI

- *Integration de la dynamique de la mécanique dans la simulation optique globale*

- FEM : Analyse modale (éléments finis)- détermination des modes significatifs de l'assemblage (fonctions de transfert)
 - Expression sous la forme de modèle d'état
 - Evaluation d'une séquence temporelle à chaque noeud stratégique

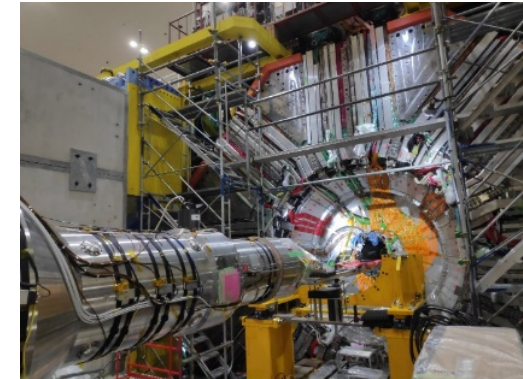
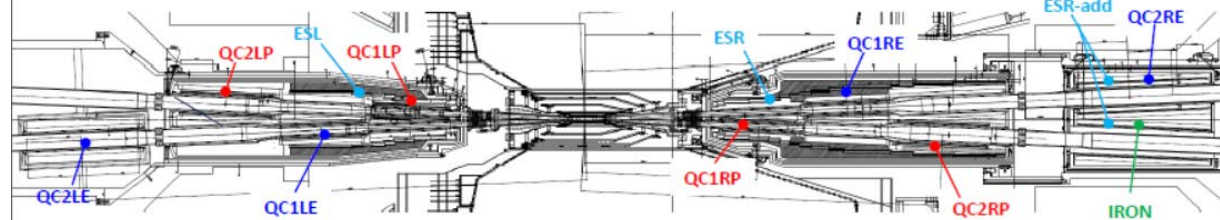
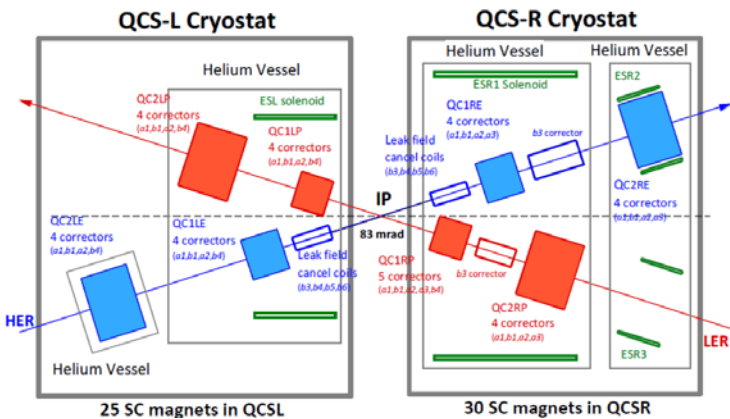
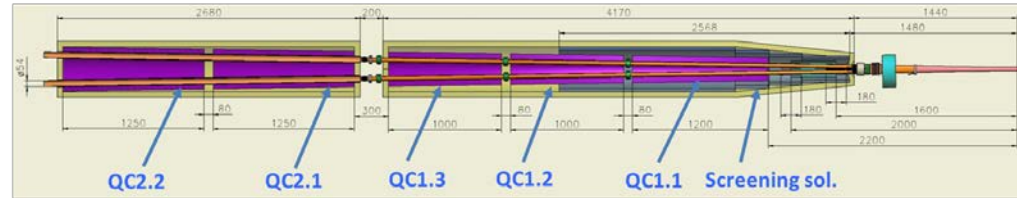
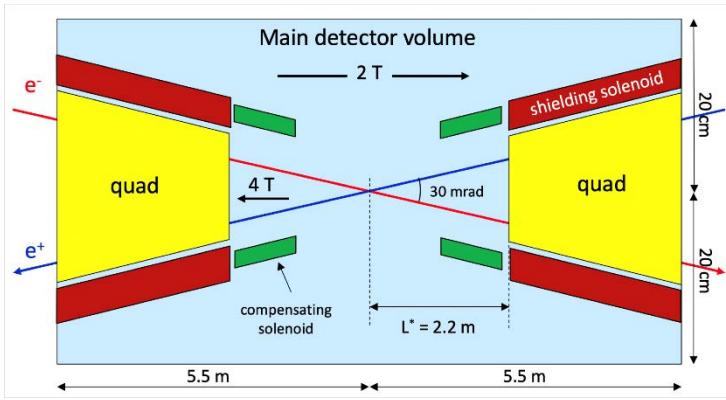


*: concrete, positioning system & alignment, girder, cryostat support, coupling cryostat – magnet, magnet...

- ❑ La simulation optique est nécessaire pour valider l'assemblage du MDI (validation – définition des spécifications)
- ❑ Les fonctions de transfert de l'assemblage du MDI sont nécessaires pour la simulation d'optique globale

➤ **Poster de E. Montbarbon & S. Grabon** “Etude des vibrations dans la région d'interaction du Futur Collisionneur Circulaire FCC-ee”

	SuperKEKB	FCC-ee
Energy(GeV)	7 (e ⁻) 4(e ⁺)	45,6,80,120,175
σ _x (IP) (μm)	11 10	6.4,13,13,36
σ _y (IP) (nm)	56 48	28,41,36,66
Cryostat in cantilever	yes	yes

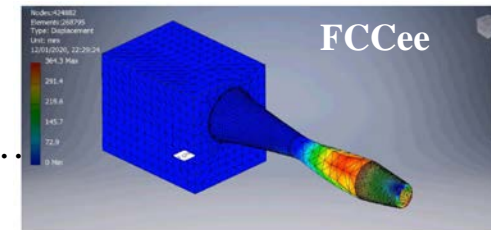


■ Similarités, avantages et opportunités:

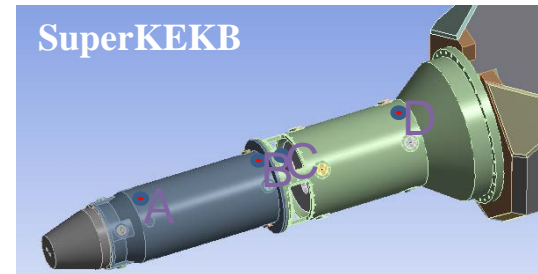
Accélérateur en opération, faisceaux similaires, cryostat en encastré libre
 De nombreuses problématiques communes : résolution BPMs, IP feedback...

■ Différence:

Les aimants de focalisation finale HER and LER ne sont pas symétriques dans le cryostat

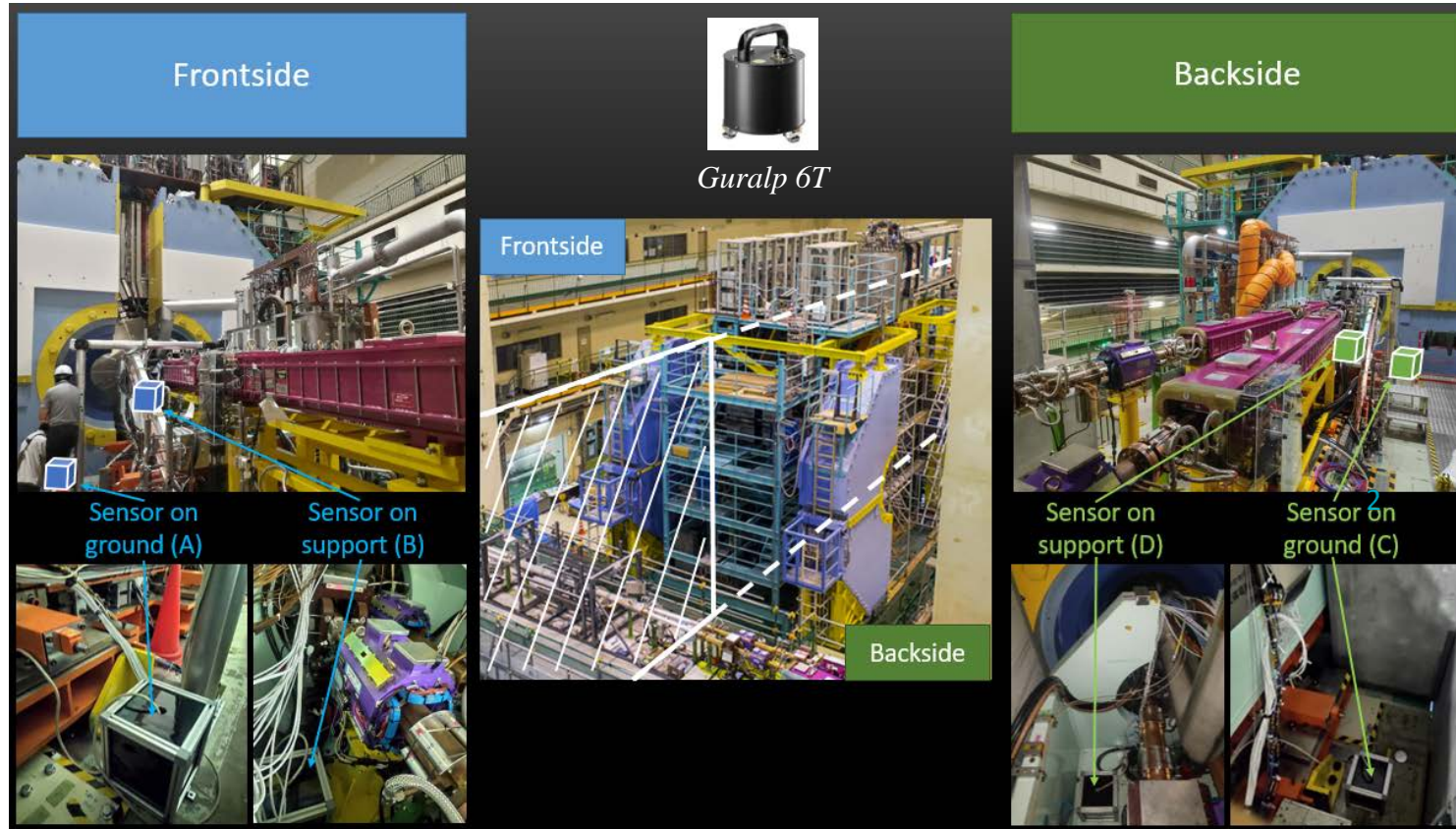


In my "version zero" toy mechanical simulation the twist mode (F9) had a main frequency of 306 Hz.

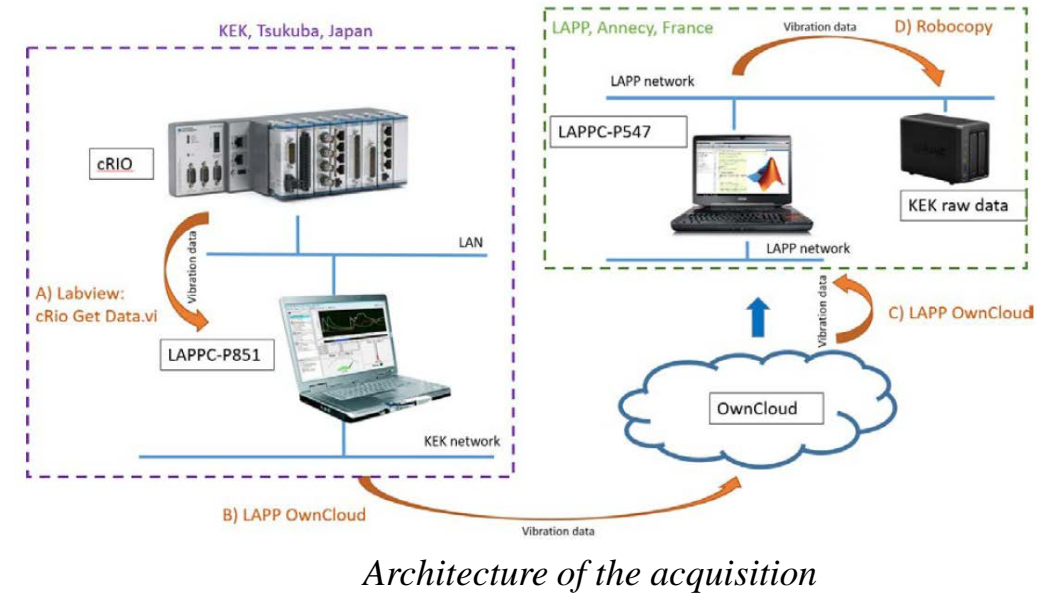


Conception du cryostat (KEK)

SuperKEKB – système de mesures vibratoire



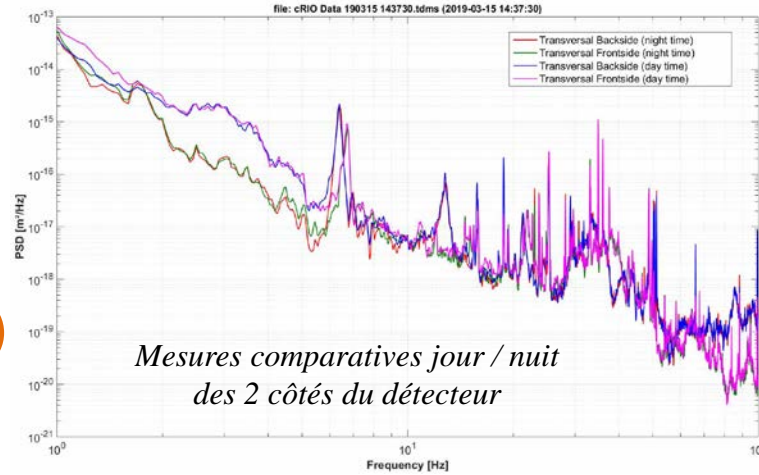
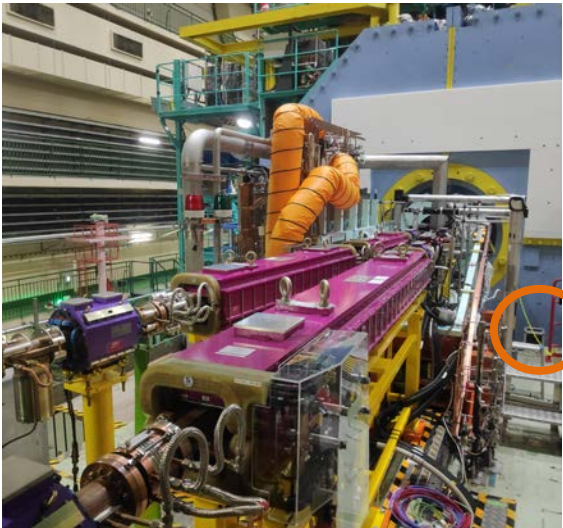
4 capteurs sismiques - 2 de chaque côté du détecteur BELLE II



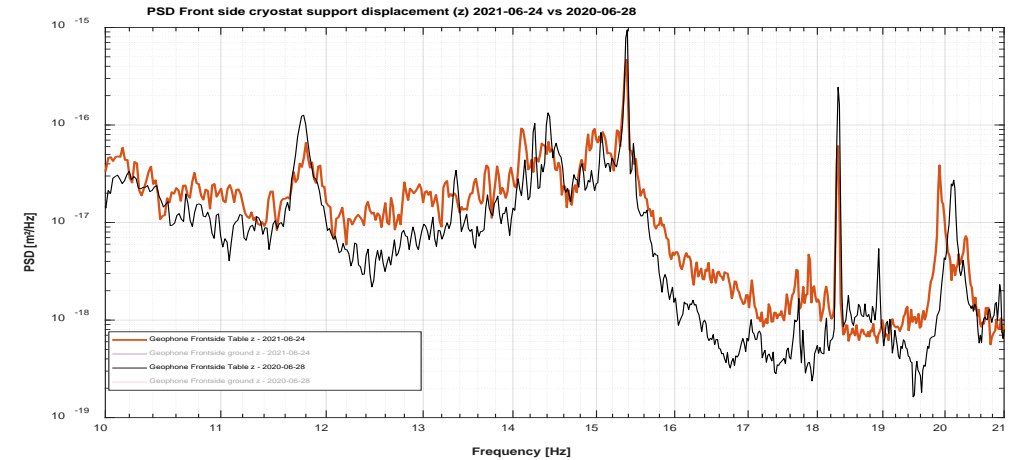
Monitoring continu avec données disponibles pour la collaboration

- Monitoring des événements sismiques et du bruit culturel
- Identification des perturbations et d'événements spécifiques
- Rapports hebdomadaires : <https://lappweb.in2p3.fr/SuperKEKB/>

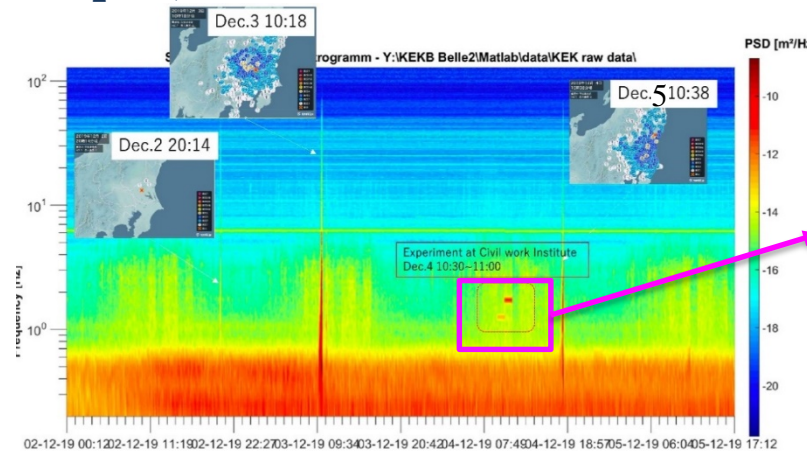
- Mesures vibratoires spécifiques



- Evolution du comportement mécanique du cryostat dans le temps:



- Détection d'évènements: activités sismiques, installations...

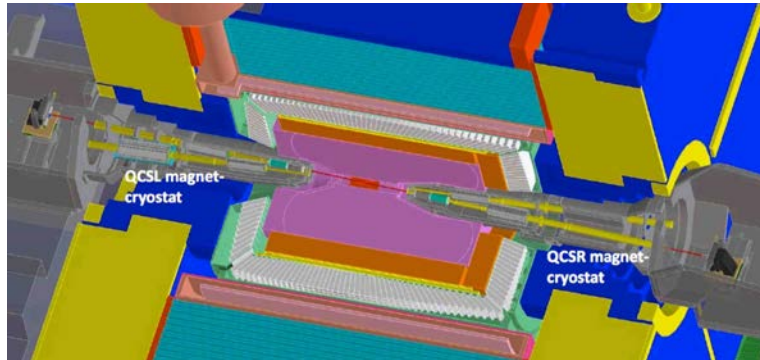


Experiment of
accelerate centrifugal
force close to KEK

Vibration analysis: *earthquake* and *external perturbations*

➤ Correlation between vibrations measurements and luminosity measurements

- 4 luminosity measurements (**IJClab**) 2 on the HER(e+) beam, 2 on the LER(e-) beam at 1 KHz
- About the same measurements (ZDLM) are done by **KEK**



- ◆ Goal: fast relative luminosity monitoring based on radiative Bhabha scattering as input to SuperKEKB IP dithering orbit feedback system (and for machine tuning and backgrounds studies)
 - **Train Integrated Luminosity (TIL)**: $\Delta L/L \sim 1\%$ @ 1 kHz
 - **Bunch Integrated Luminosity (BIL)**, 2500 bunches/train, 4 ns, $\sim 1\%$ @ few Hz

◆ Radiative Bhabha process at vanishing photon scattering angle

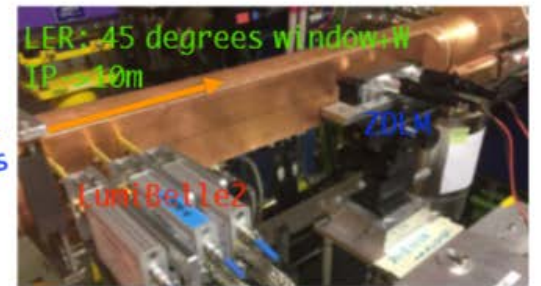
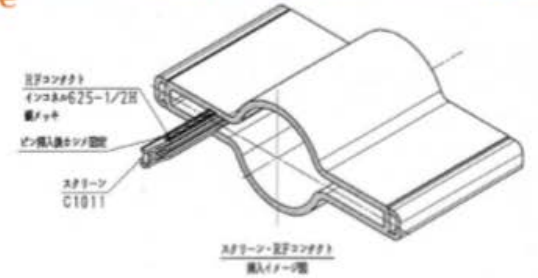
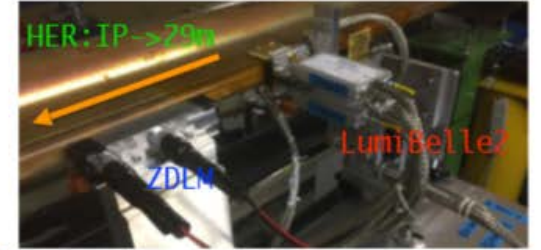
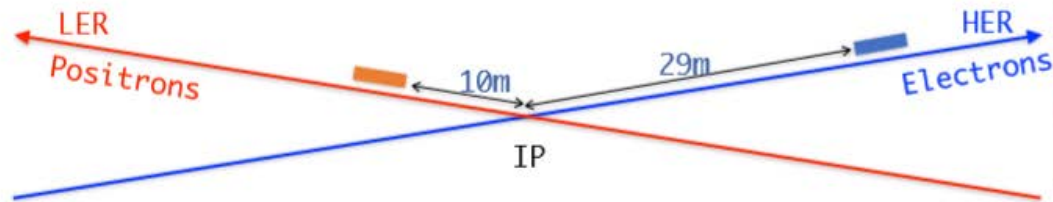
- Rate proportional to Luminosity
- Large cross section ~ 0.2 barn

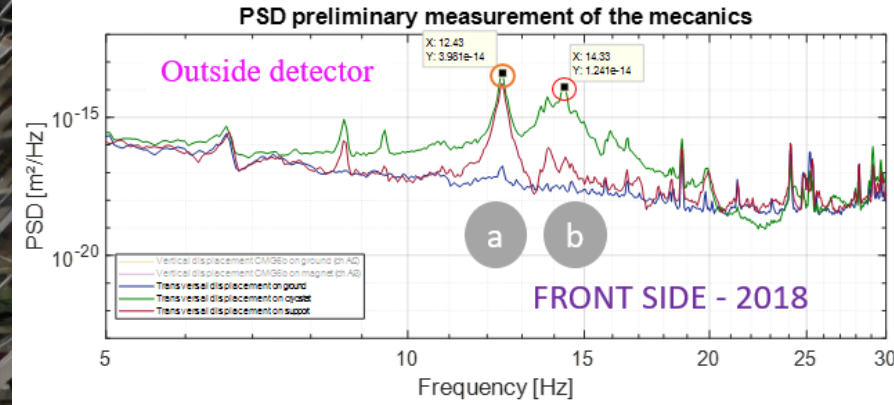
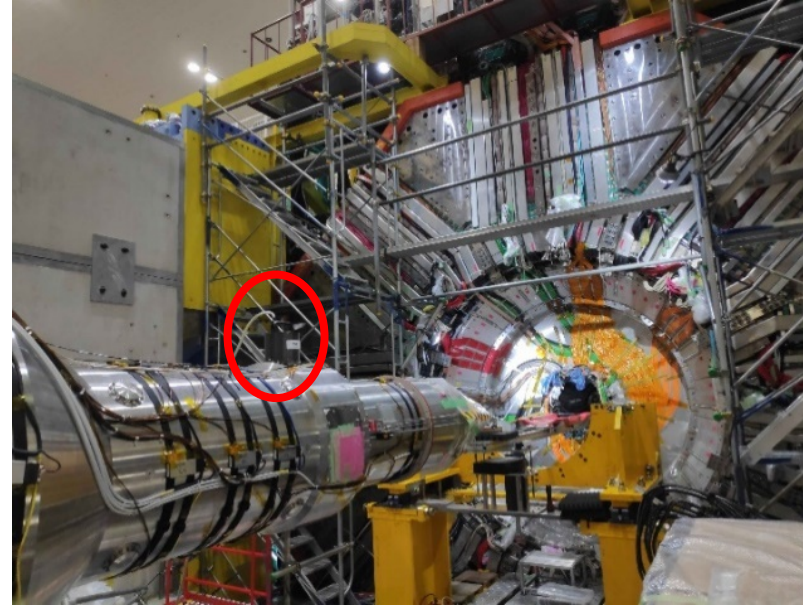
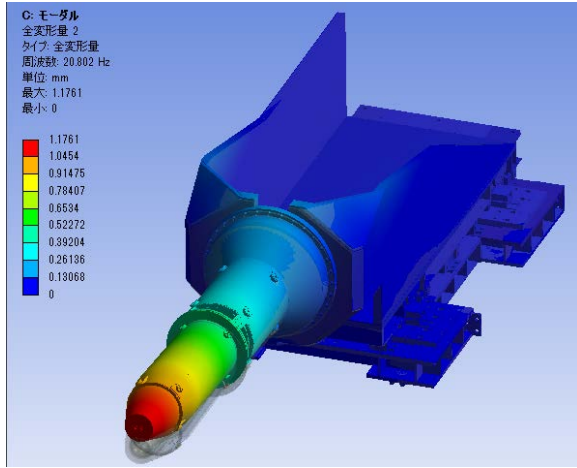
◆ Two complementary techniques from LAL and KEK:

- **LumiBelle2 (LAL)**: sCVD diamond detector $\sim 4.5 \times 4.5 \times 0.5 / 0.14$ mm³
- **ZDLM (KEK)** Cherenkov detector + scintillator + PMT

◆ Two commonly optimised locations:

- 10m downstream of IP in LER \longrightarrow Bhabha positrons
- 29m downstream of IP in HER \longrightarrow Bhabha photons

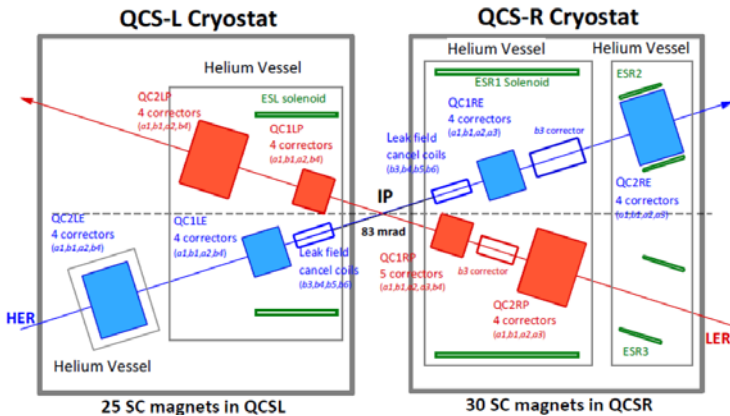




PSD of displacements on the cryostat (vertical direction)

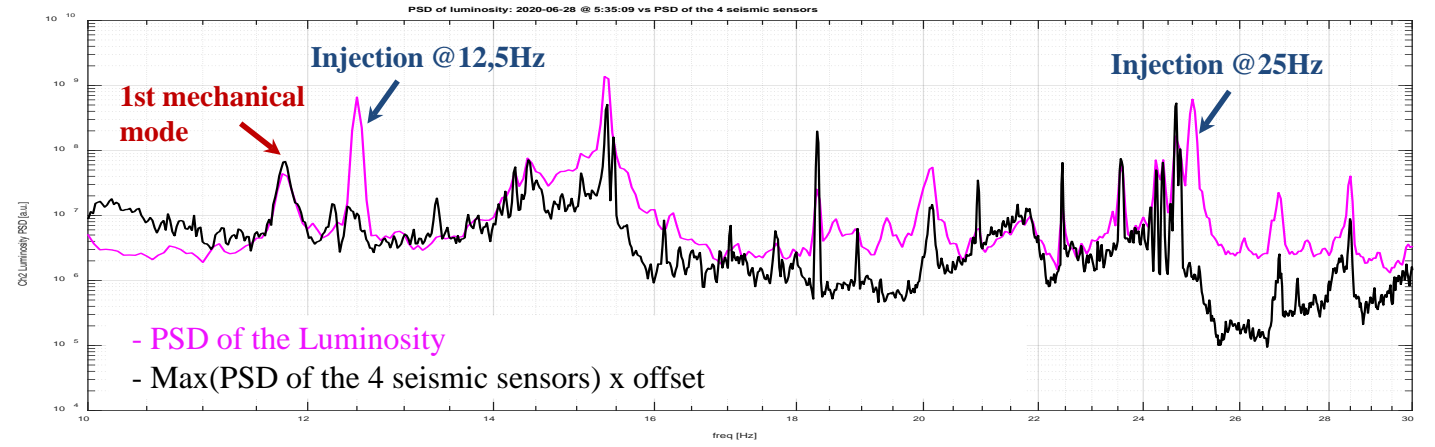
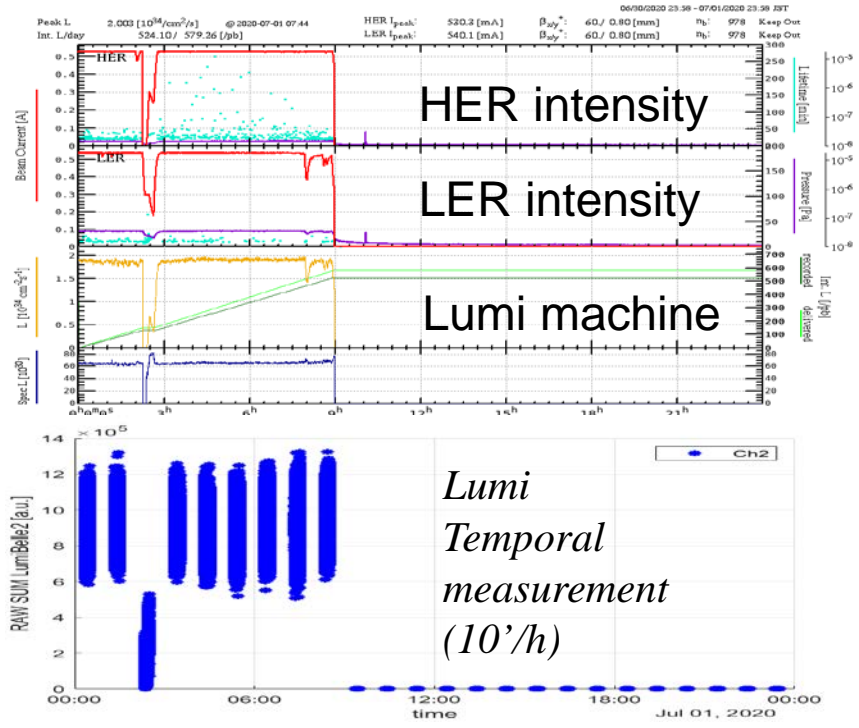
- Mesure sur le cryostat
- Mesure à l'encastrement du cryostat
- Mesure au sol

Dynamics measurements on the cryostat (LAPP)



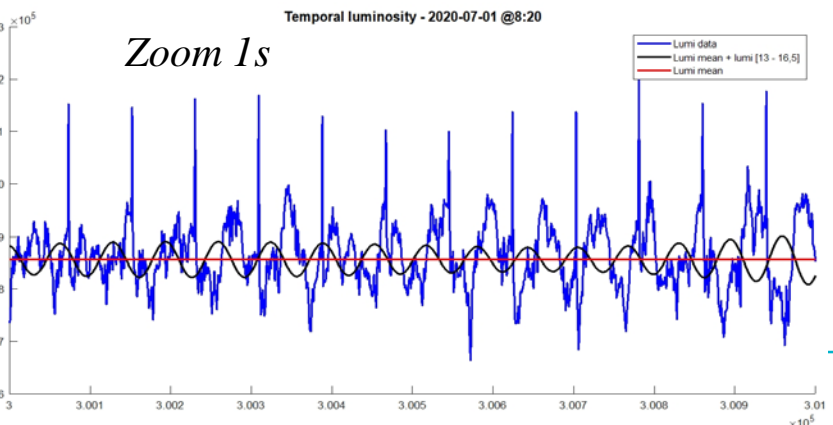
- Au sein d'un cryostat, les déplacements liés au 1^{er} mode de flexion sont forcément différents entre les aimants
- Les déviations induites sur les 2 faisceaux étant différentes, les effets ne peuvent être totalement contrôlés
- **Effets sur le faisceau? Observabilité?**

- **Comparaison:** ➤ *But : comprendre les impacts vibratoires sur le faisceau de perturbations cohérentes sur l'ensemble de l'accélérateur (ex: sismique), localisées (ex: pompe) ou amplifiées par la mécanique (ex: cryostat avec des aimants FF asymétriques)*



Si perturbations nulles, la partie dynamique de la luminosité serait nulle

- Hormis les pics à 12,5 Hz & 25 Hz dues à l'injection du faisceau, tous les pics de luminosité sont principalement dues aux vibrations amplifiées par la structure mécanique asymétrique (cryostat)
- Publication: M. Serluca, G. Balik, L. Brunetti, B. Aimard, A. Dominjon, P. Bambade, S. Wallon, S. Di Carlo, M. Masukawa, S. Uehara, *Vibration and luminosity frequency analysis of the SuperKEKB collider, NIMA (2021).*



- **Quantification vibrations et luminosité (réelle et en simulation sous SAD) : stage M2 en 2022 avec IJClab**

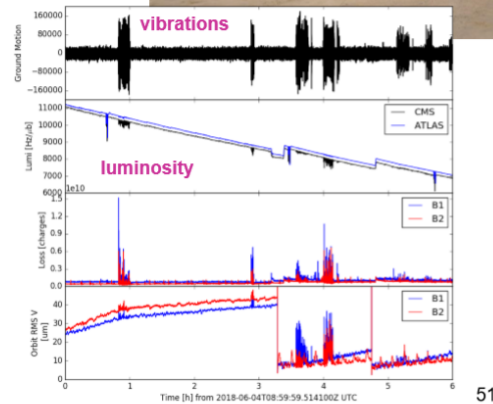
... and there's the man-made waves (2)

- In the early part of the CE work, an important volume of soil was moved around and compacted while LHC was operating.
- Ground compactors compact soil by... **vibrating**.
- ...and they managed to **shake the beams colliding at the IP ~100 m underground**.

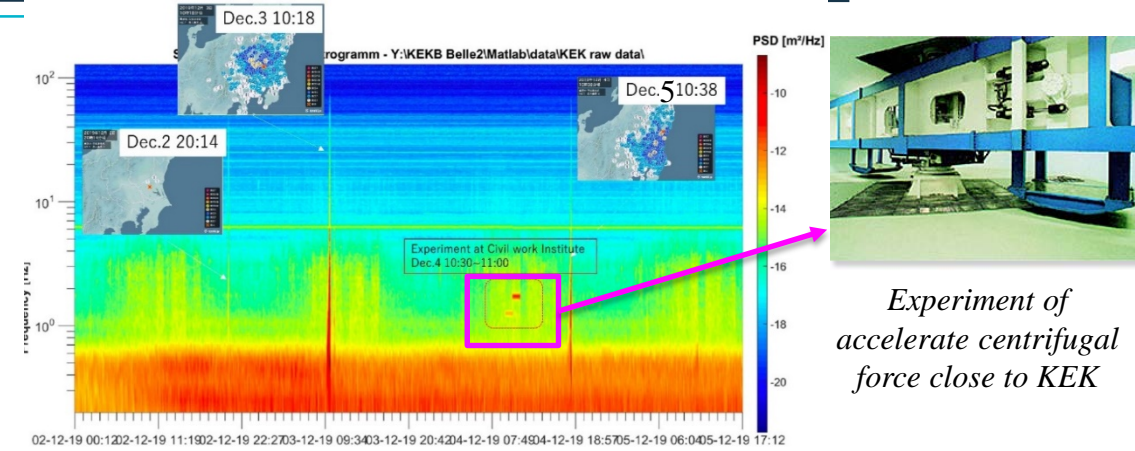


Mechanism:

- The vibrations with **frequencies ~20 Hz** were transmitted through 100 m of rock to the tunnel magnets and their supports that resonate in the frequency range 8-22 Hz.
- The resonant excitation generated ~ **micrometer amplitude beam movements** that were clearly visible on the CMS experiments luminosity (= rate of collisions).



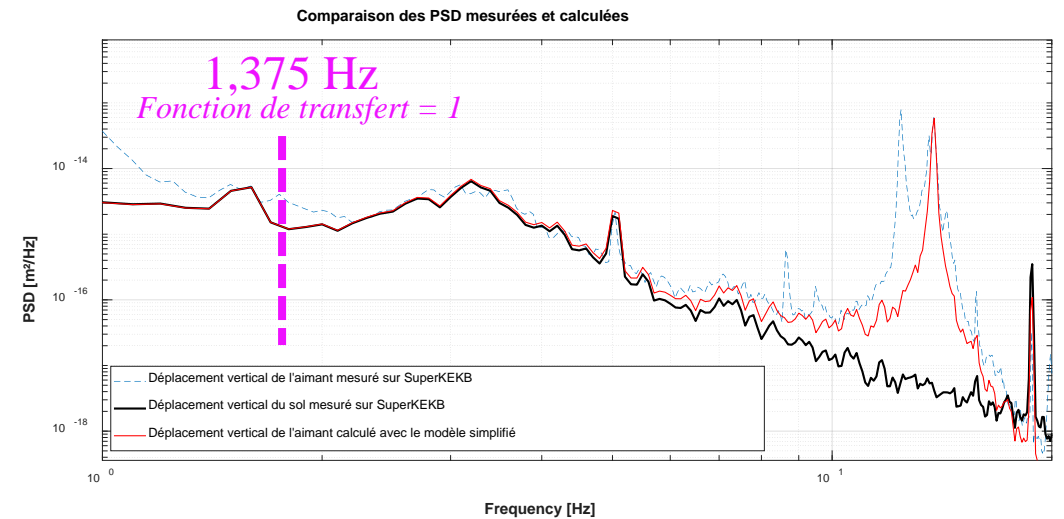
51



Experiment of accelerate centrifugal force close to KEK

Vibration analysis: *earthquake* and *external perturbations*

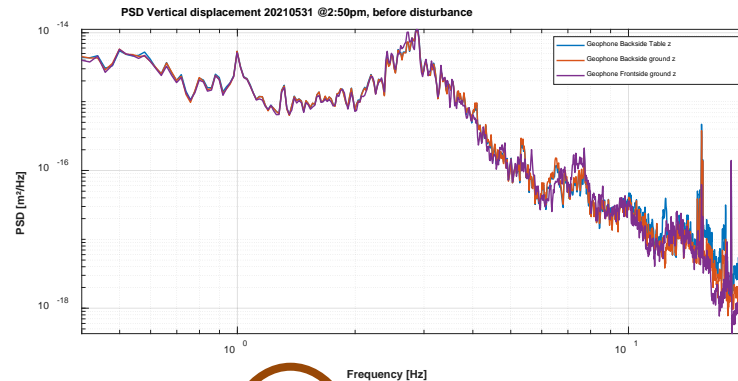
Perturbation à 1,375 Hz: pas d'amplification mécanique, bonne coherence, contrôle post-collision efficace



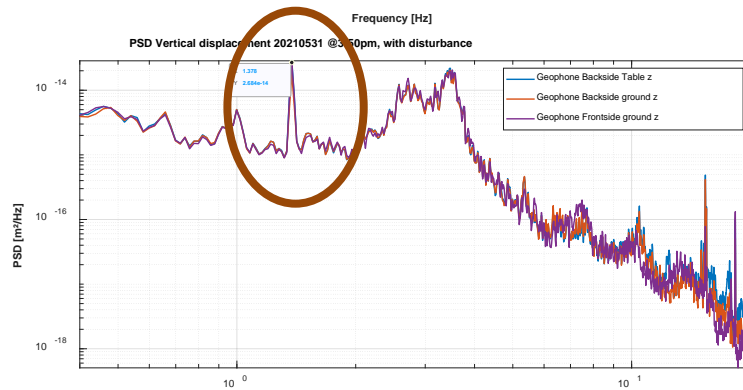


Source connue

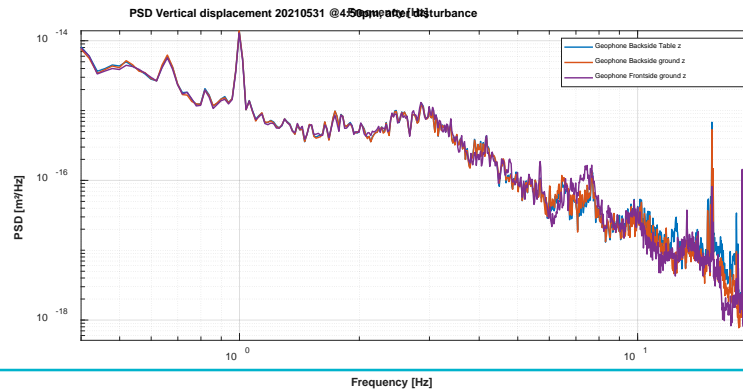
PSD Mesures vibrations



14h50
Pas de pics

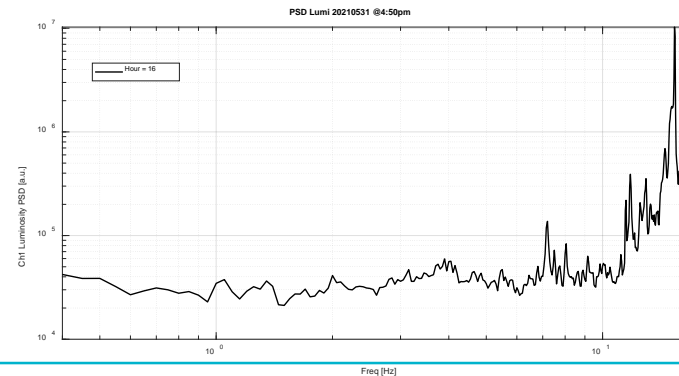
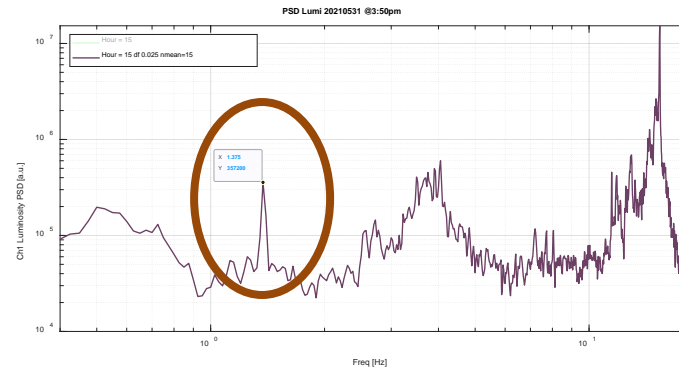
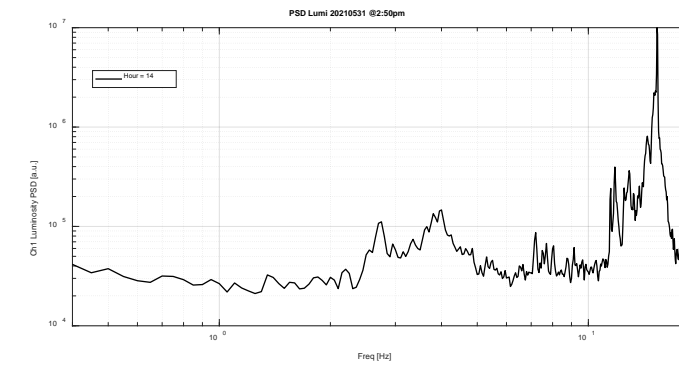


15h50
1 pic à 1,375Hz



16h50
Pas de pics

PSD Mesures luminosité



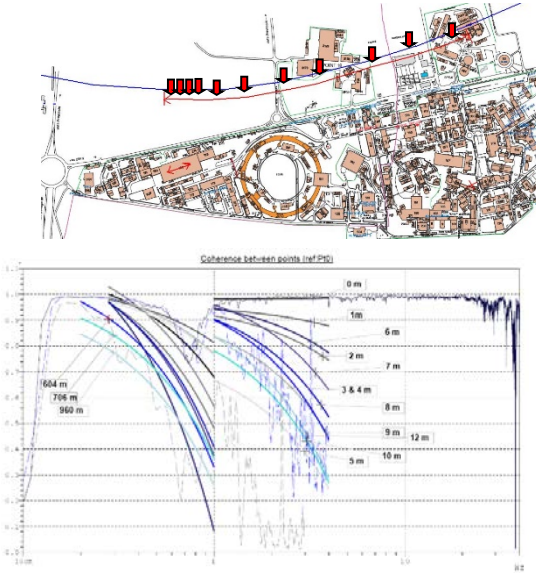
L'analyse et le contrôle vibratoire ne sont pas de l'instrumentation faisceau « direct » mais:

- Un aspect critique de nombreuses machines
- Peuvent être corrélés à l'instrumentation machine (BPMs, luminomètres...)
- A prendre en compte en amont et avec une approche globale
- Identification des sources de perturbations pour l'optimisation machine
- Utile pour le contrôle
- Lien avec le positionnement (actif)

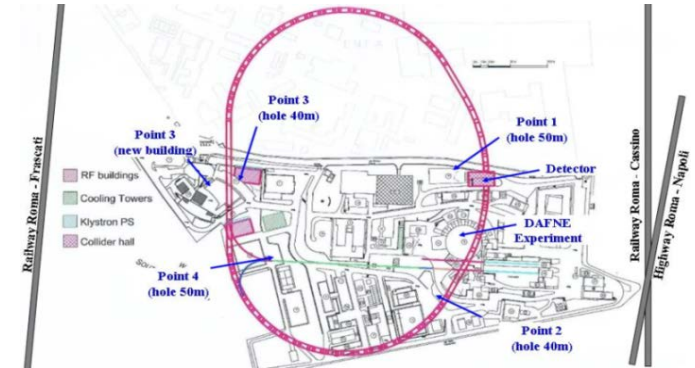
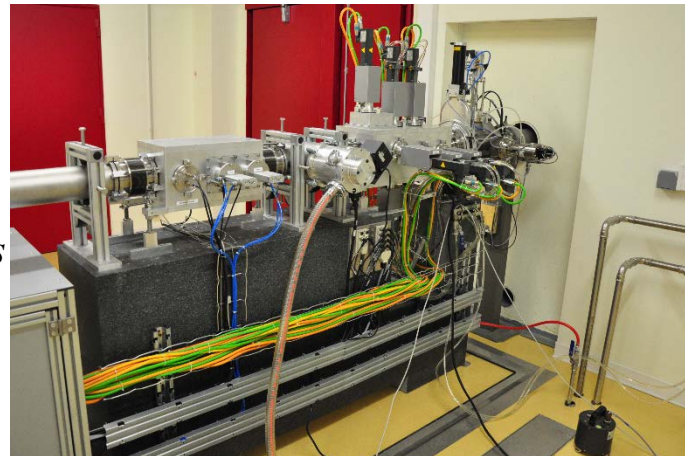
Evaluer les limites du « tout se déplace uniformément » (cohérence, contrôle, asymétries...)

■ Quelques exemples de travaux collaboratifs

□ LHC measurements



□ IRSN vibrations analysis



□ SuperB analysis

