



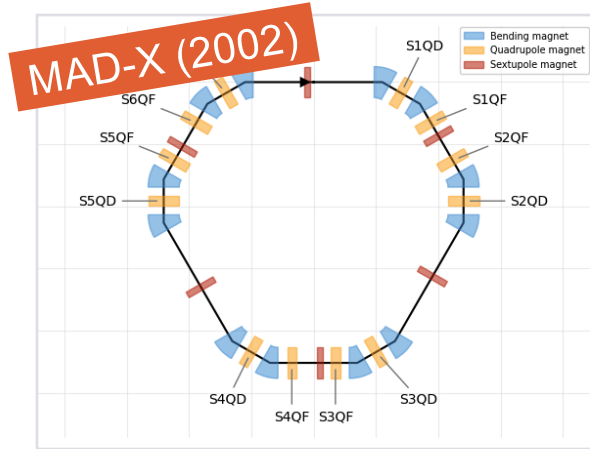
L'écosystème Xsuite pour la simulation de dynamique des faisceaux

Félix Soubelet, au nom de l'équipe de développement d'Xsuite.

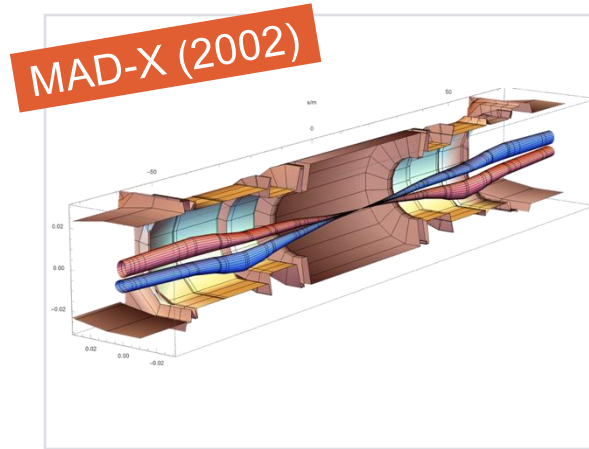
Avec nos remerciements envers tous les contributeurs.

Panorama de dynamique des faisceaux au CERN

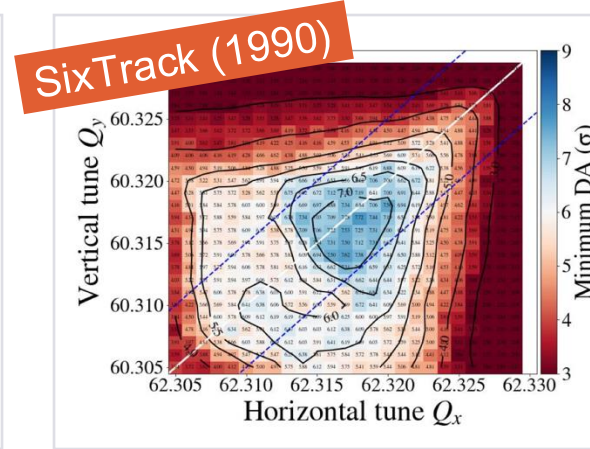
Le CERN a une longue histoire d'outils de dynamique faisceau aux applications variées, telles que :



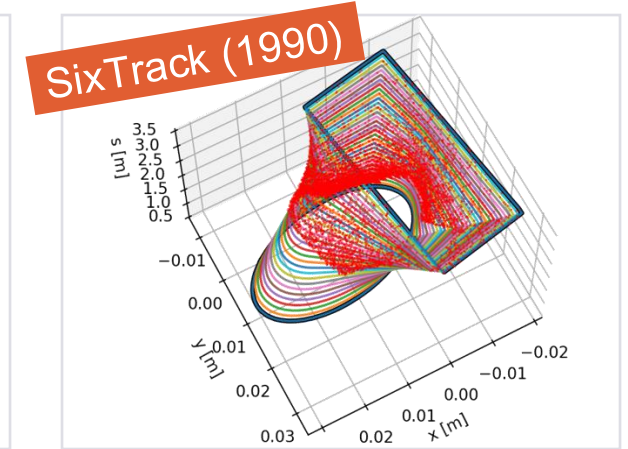
Conception de maille



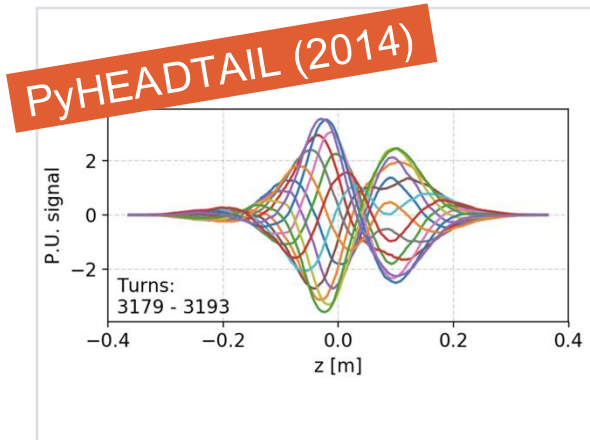
Optique (calcul & conception)



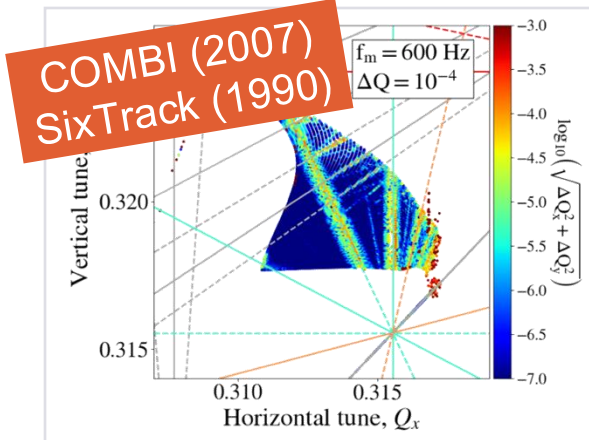
Tracking (OD)



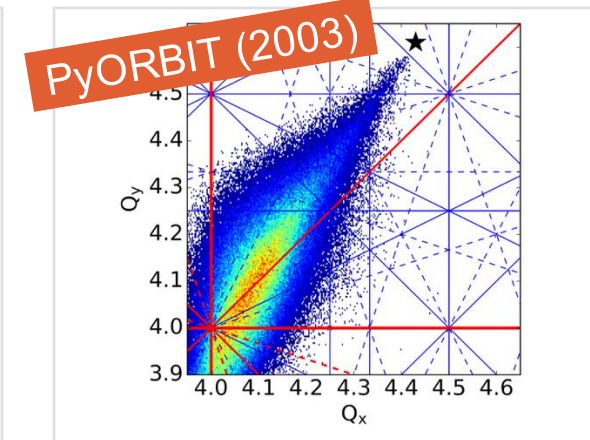
Collimation



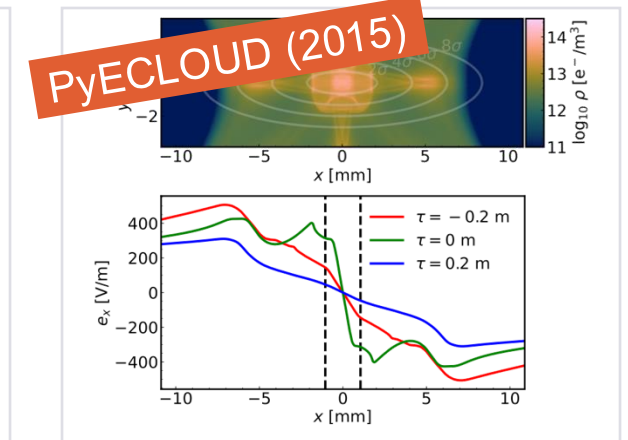
Impédances



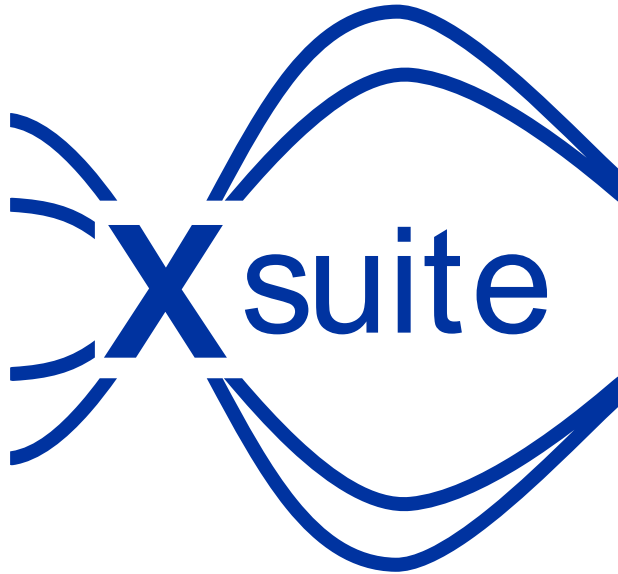
Effets faisceau-faisceau



Charge d'espace



Nuage d'électrons



Cahier des charges:

- Un outil pour beaucoup d'applications : des **anneaux de hadrons à basse énergie** aux **collisionneurs de leptons à haute énergie**.
- Des **simulations hétérogènes** simplifiées, sans scripts ad-hoc ni adaptations de modèles ni conversions entre outils.
- Un outil **extensible par défaut**, les anciens n'ayant pas été conçus pour (expertise nécessaire manquante, charge de travail démesurée).
- Une **interface utilisateur moderne : Python**, avec son écosystème d'outils scientifiques. Réduction de complexité : plus besoin de maintenir d'outil de visualisation ni de langage de script.
- Un **support intégré pour GPU**, en plus de CPU mono- et **multi-thread**.

Xsuite a démarré en 2021 pour résoudre les problèmes liés à un paysage fragmenté, s'appuyant sur le savoir-faire acquis lors du développement des outils précédents.

Objectif : un outil conçu pour Python, permettant et facilitant l'interaction de différents effets & performant sur GPU.

Références pour plus d'informations :

- Documentation : xsuite.readthedocs.io
- *"Xsuite: an integrated beam physics simulation framework," IPAC'24.*
- *"Xsuite: a multiplatform toolbox for optics design, fast tracking, collimation and collective effects," ICAP'24.*
- *"Xsuite: a multiplatform Python toolkit for beam dynamics," ATS Seminar (2025).*

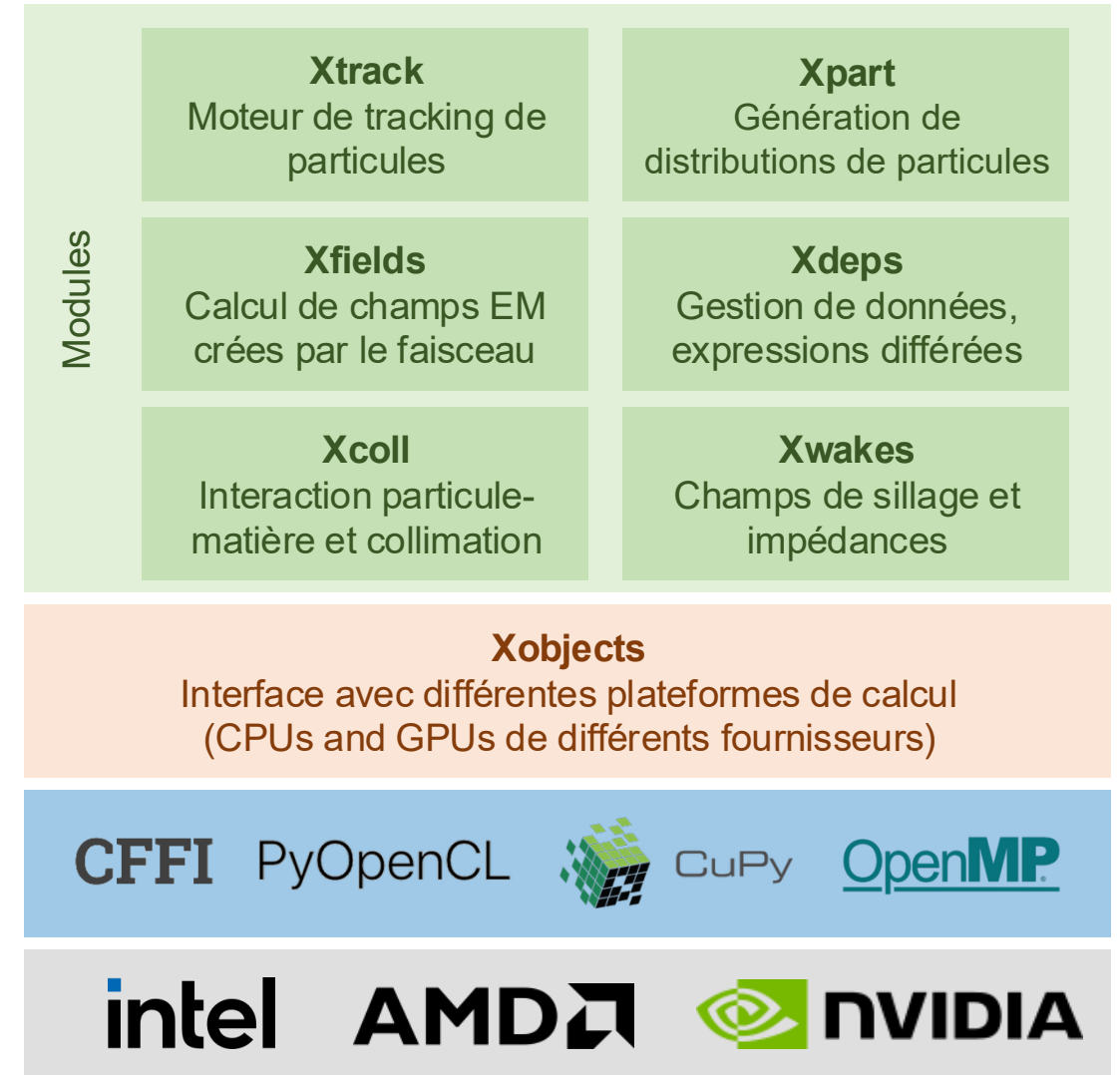
Approche de développement

– **Architecture orthogonale** : diviser le logiciel en blocs fonctionnels indépendants.

- ⇒ Interfaces définies et claires.
- ⇒ Complexité réduite du code.
- ⇒ Meilleure évolutivité, facilité de compréhension.
- ⇒ Courbe d'apprentissage réduite.
- ⇒ Les utilisateurs peuvent contribuer (et le font !).

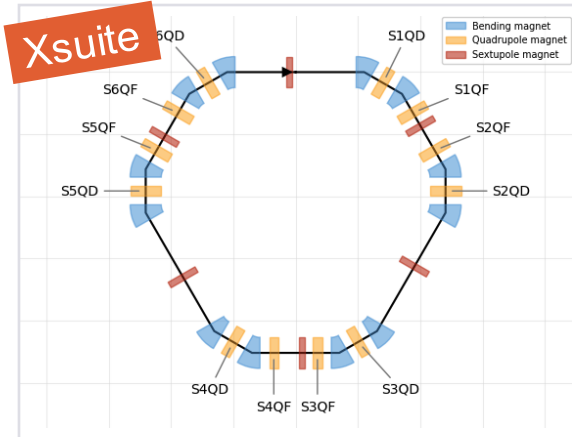
– **Développement Agile** :

- Un accent sur le soutien aux utilisateurs : les retours d'expérience contribuent à l'amélioration du logiciel.
- Un cycle de développement rapide grâce à une infrastructure étendue de tests continus. Souvent plusieurs versions par mois, intégrant modifications et extensions basées sur les retours utilisateur.

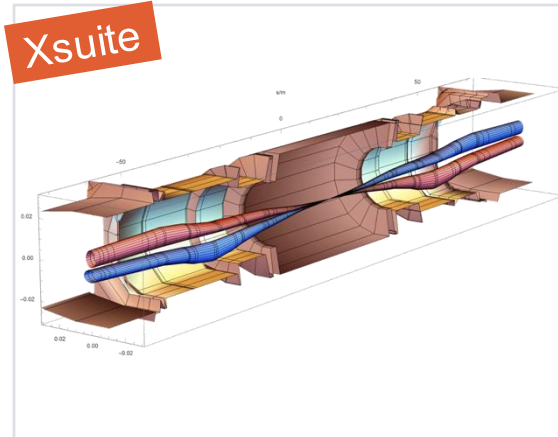


Adoption

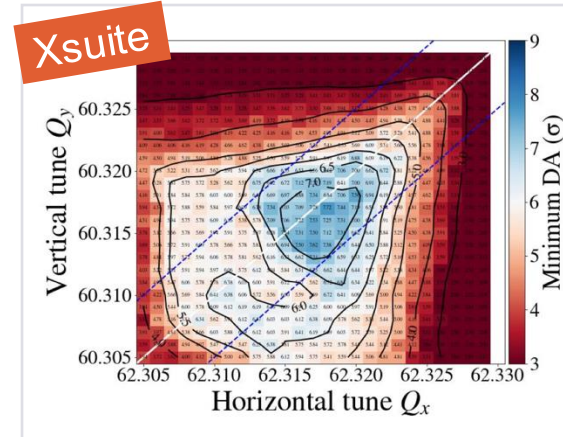
Xsuite est devenu l'outil par défaut, permettant d'arrêter le développement des anciens outils.



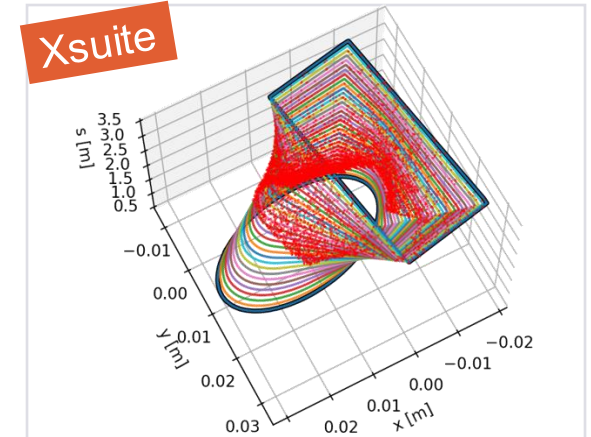
Conception de maille



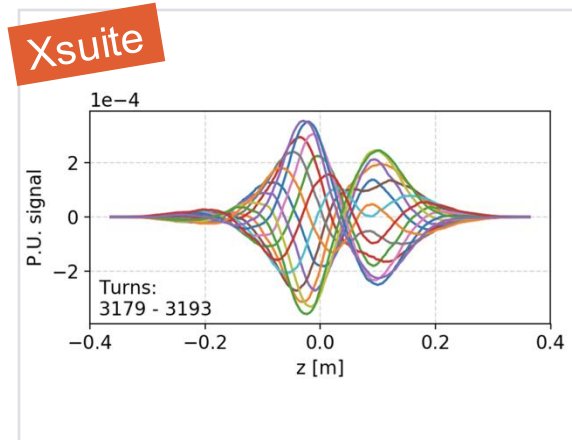
Optique (calcul & conception)



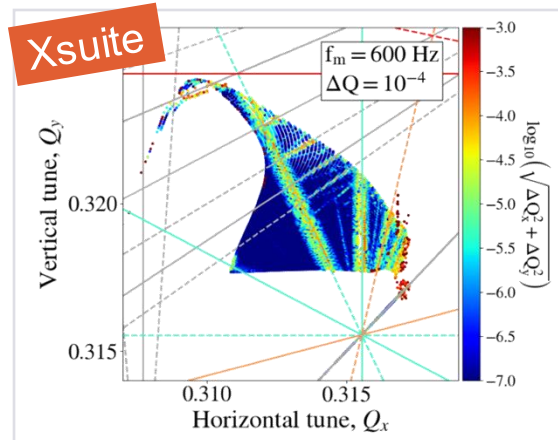
Tracking (OD)



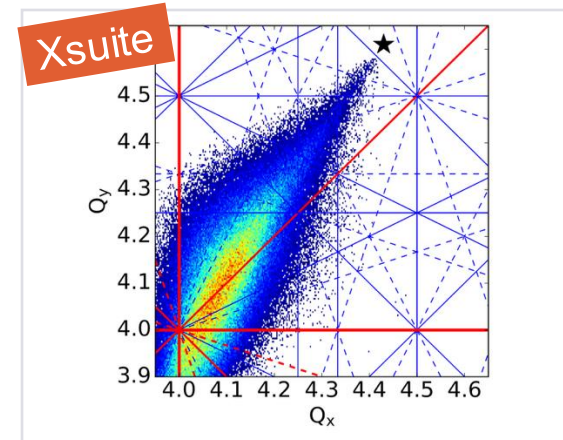
Collimation



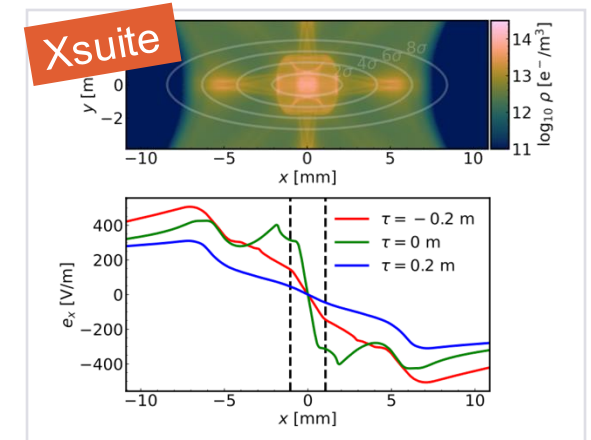
Impédances



Effets faisceau-faisceau



Charge d'espace



Nuage d'électrons

Une communauté grandissante

Réception par les utilisateurs et développeurs au-delà de nos attentes :

> 40 contributeurs.

> 150 utilisateurs actifs dans le monde.

> 200 mentions d'Xsuite dans les actes d'IPAC25.

Les écoles d'accélérateurs (USPAS, CAS, JUAS) utilisent Xsuite dans leurs tutoriels.

Une communauté dynamique offre soutien et conseils aux utilisateurs, et de nombreux retours aux développeurs !

CERN

- AD
- ELENA
- LEIR
- PSB
- PS
- SPS, TI2, TI8
- LHC
- FCC-ee, FCC-hh
- Muon Collider

Fermilab

- Main injector
- Recycler
- Booster
- IOTA

GSI

- SIS-18
- SIS-100

BNL

- RHIC
- Booster
- EIC

J-PARC

- Main Ring
- KEK
- SuperKEKB

Centres médicaux

- HIT (Heidelberg)
- MEDAUSTRON
- PIMMS
- NIMMS

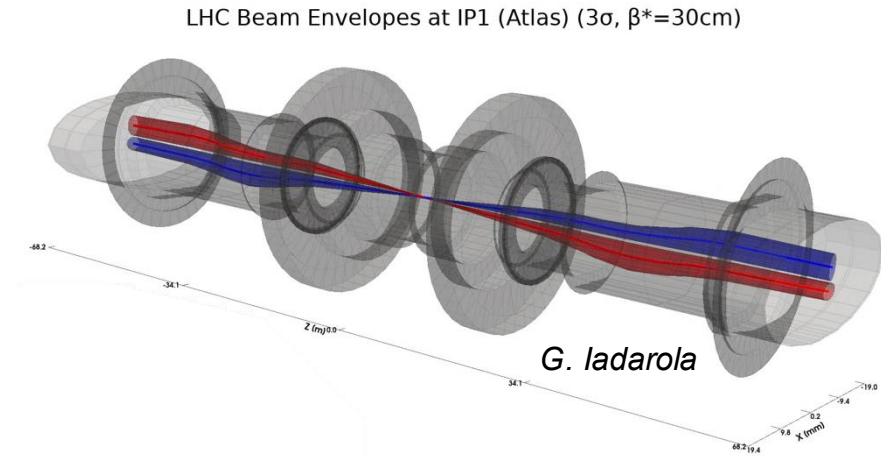
Sources de lumière/anneaux d'amortissement :

- PETRA
- DESY injector ring
- ELETTRA
- BESSY III
- PSI SLS 2.0
- Canadian Light Source
- CLIC-DR

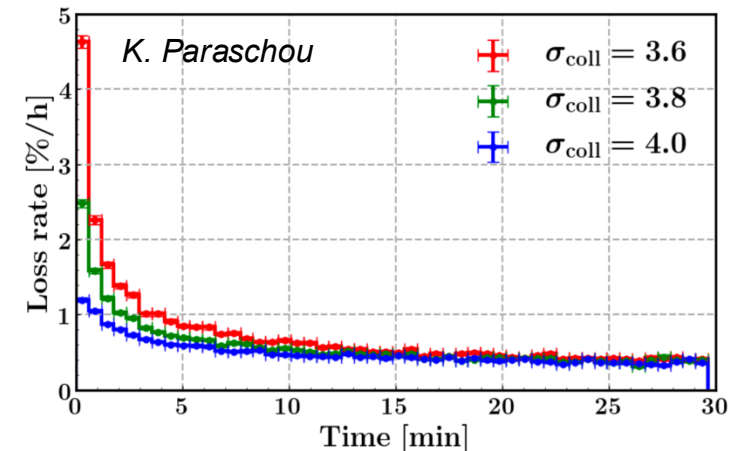
et plus...

Les capacités d'Xsuite

- Conception de maille, calcul d'optique, correction d'orbite et de trajectoire
- Imperfections de champ et désalignement d'aimants
- Champs de bord, aimants à fonctions combinées, solénoïdes avec champs multipolaires chevauchants
- Interaction particule-matière (moteur Everest + interfaces vers FLUKA & GEANT4)
- Rayonnement synchrotron : modèles déterministes & stochastiques
- Modélisation de nuages d'électrons / ions
- Tracking de spin et estimation de polarisation
- Charge d'espace : figé, quasi-figé et auto-consistant PIC
- Champs de sillage : dipolaire et quadripolaires, un ou plusieurs paquets, multi-tours
- Effets faisceau-faisceau : faible-faible et fort-fort, analytiques ou PIC, Beamstrahlung, diffusion Bhabha
- Diffusion intra-faisceau : modèles analytiques et kicks simplifiés pour tracking (prochainement PIC)
- Interface MAD-NG : calcul de cartes non-linéaires, formes normales, RDTs
- Interface RF-Track : tracking à travers des cartes de champ
- Interface BLonD : modélisation avancée de systèmes RF



Simulation réaliste de tracking du LHC en collisions : 20k particules sur 20M tours: < de 3 jours sur GPU



Démonstration

Voici quelques démonstrations pour illustrer l'interface d'Xsuite et certaines de ses capacités.

Les exemples sont basés sur la maille de PIMMS (voir [CERN-PS-99-010-DI](https://cds.cern.ch/record/206801/files/CERN-PS-99-010-DI.pdf)) :

- Conception de maille
- Optimisation de l'optique
- Tracking et mitigation d'instabilité

Plus d'exemples sont inclus à https://github.com/fsoubelet/Journees_Accelerateurs

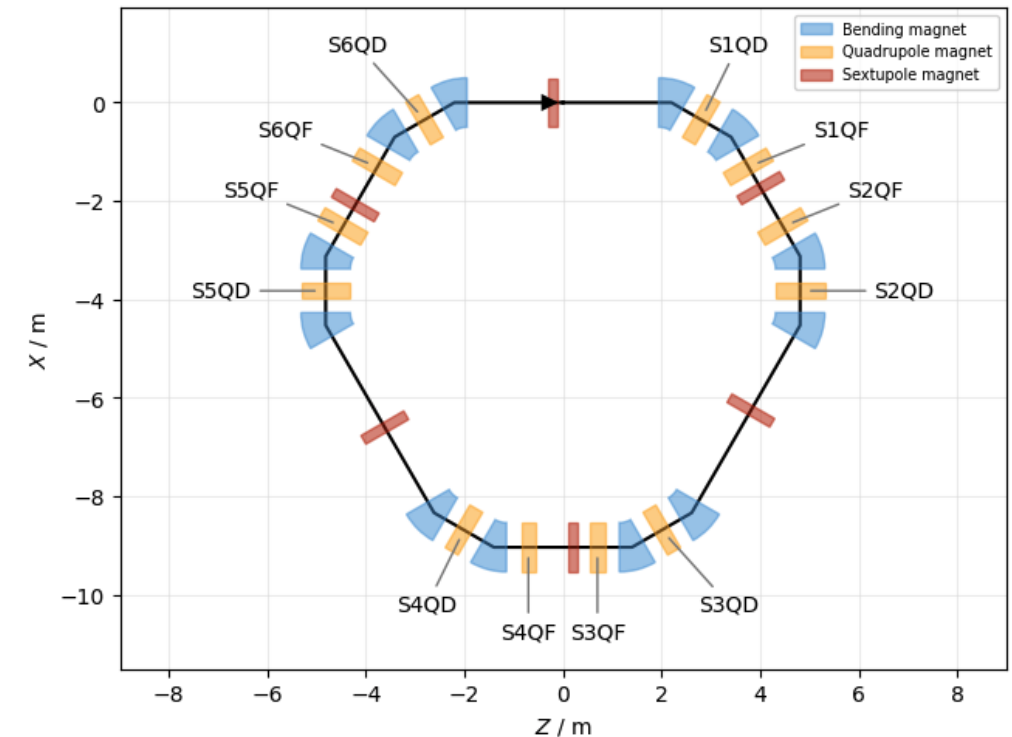


Merci de votre attention !



Xsuite – Modélisation de maille

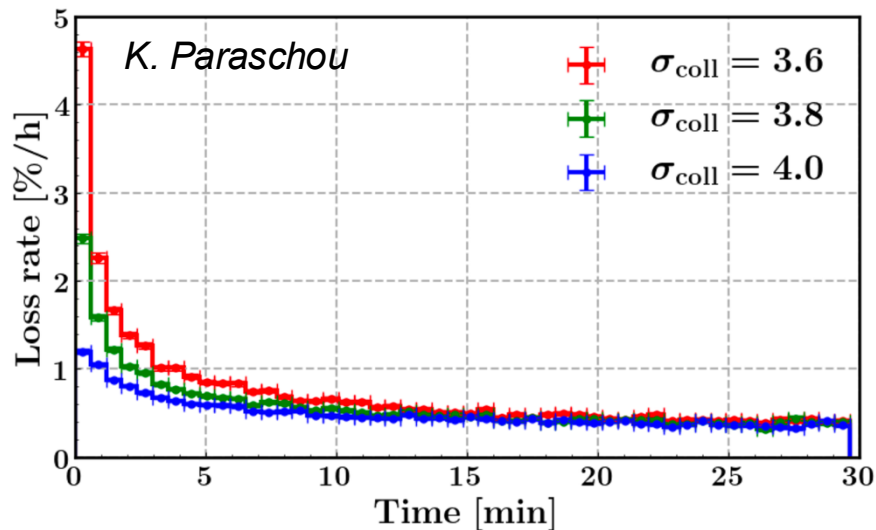
- Les différents éléments de maille sont disponibles pour modéliser les machines du CERN et d'autres instituts de recherche :
 - Dipôles, multipôles, solénoïdes, aimants à fonctions combinées, cavités RF, cavités crabe, etc.
- Modélisation d'éléments **épais et minces**.
- Inclusion des **champs de bord** d'ordre arbitraire.
- Modélisation de **champs multipolaires superposés**.
- Gestion des **désalignements, erreurs multipolaires, imperfections de champ**.
- Gestion des circuits via les **expressions déferées** (à la MAD-X).



Xsuite – Tracking de particules

La **vitesse de tracking** de distributions de particules élément par élément est primordiale.

- Pour la performance, **Xsuite assemble et compile un kernel en C** (appelé depuis Python) optimisé pour la maille et **spécialisé pour la plateforme de calcul choisie (CPU or GPU)**
 - La vitesse de tracking est similaire à celle de SixTrack sur CPU (un cœur) et environ deux ordres de magnitude plus rapide sur des GPUs modernes.



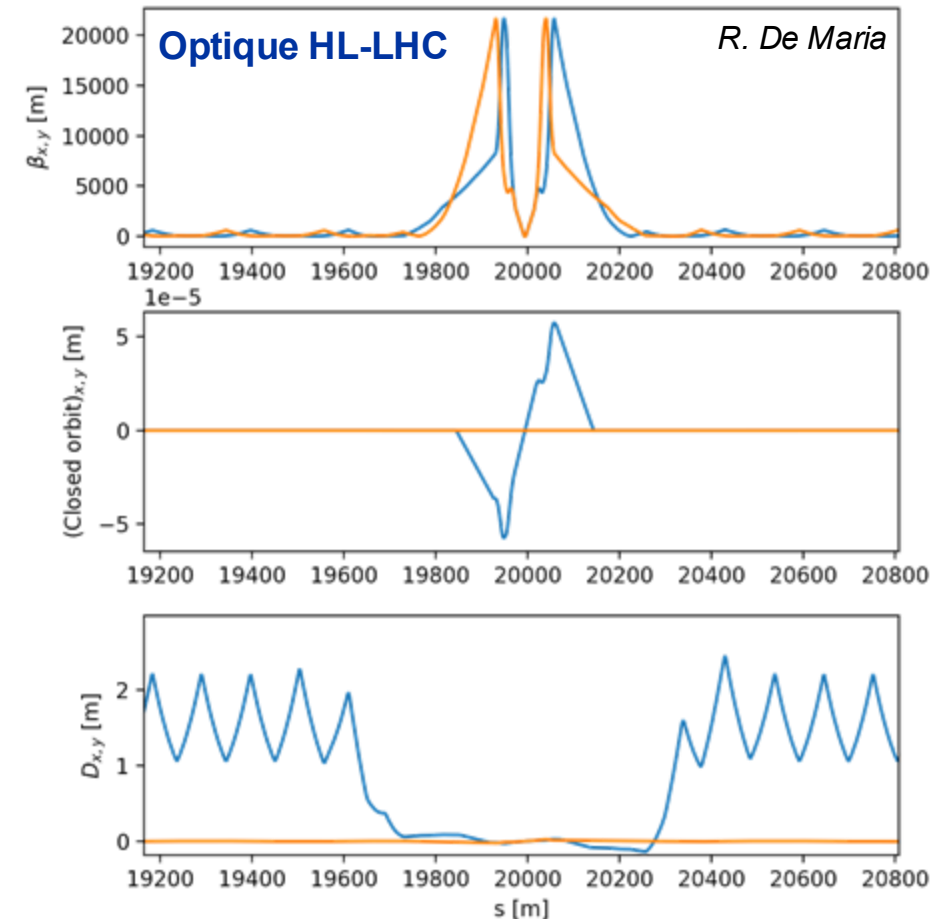
Exemple du LHC:

- **Simulation de tracking élément par élément des 30 premières minutes** après avoir amené les faisceaux en collision (**20 M tours**) pour étudier la durée de vie des faisceaux et le dépeuplement des queues du paquet
- Simulation de **20 000 particules**
 - Sur **CPU** (un process), prendrait **> 2 ans de simulation**.
 - Sur **GPU** (NVIDIA V100) fait en **< 3 jours de simulation**.

Xsuite – Calcul d'optique

- Le module **Twiss d'Xsuite** peut extraire les **fonctions de réseau** d'un anneau ou d'une ligne.
- Le calcul **sonde la maille par tracking e particules**:
 - L'orbite fermée est obtenue avec un solveur de racine sur le tracking.
 - La matrice Jacobienne est obtenue par tracking (différences centrales).
 - La "forme normale linéaire" est obtenue par diagonalisation de la matrice Jacobienne.
 - Les vecteurs propres sont propagés par tracking.
 - Les paramètres de Twiss (α , β , γ), fonctions de dispersion, avances de phase, coefficients de couplage etc. sont obtenus depuis les vecteurs propres.
- Le calcul peut être effectué en assignant un **moment cinétique arbitraire** pour obtenir le battement betatron off-momentum, la chromaticité non-linéaire, la dispersion non-linéaire, etc.

$$q_x = 0.31000 \quad q_y = 0.32000 \\ Q'_x = 2.00 \quad Q'_y = 2.00 \quad \gamma_{tr} = 53.57$$



Précision comparée à
MAD-X: $\Delta\beta / \beta \ll 10^{-4}$
Temps de calcul très
similaire

```
In [39]: t_mad_ms
Out[39]: 202.0

In [40]: t_xsuite_ms
Out[40]: 185.0
```

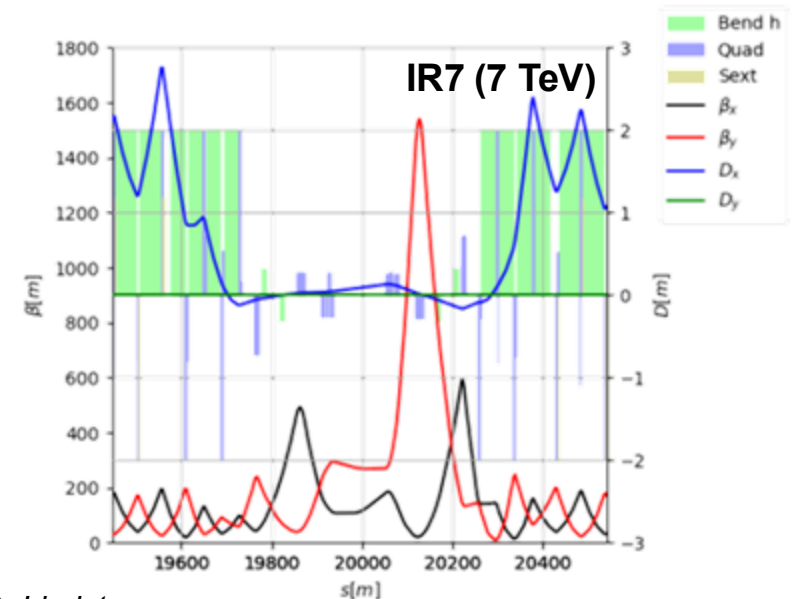
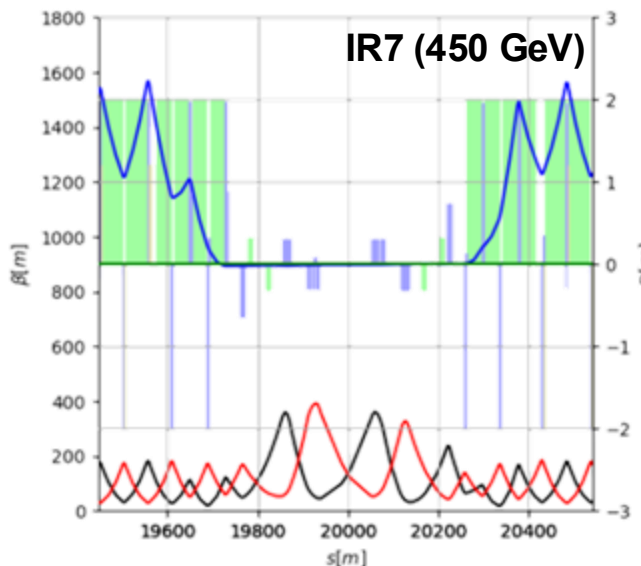
Xsuite – Conception d'optique

Xsuite fournit un **optimiseur multi-objectif** pour "matcher" les paramètres modélisés aux contraintes assignées (pour le contrôle des nombres d'onde, de la chromaticité, les déviations d'orbite, le choix de l'optique etc.).

- Basé sur l' **expérience de MAD-X** → **Fournit** plusieurs algorithmes d'optimisation (tel que le Jacobien développé pour MAD-X) et permet l'intégration d'optimiseurs Python externes.
- L'interface est conçue pour la **flexibilité d'utilisation**. L'utilisateur peut **intervenir dans l'optimisation** pour :
 - Activer/désactiver des cibles ou variables, revenir à des états précédents, changer les limites données, changer les valeurs assignées aux cibles, changer les tolérances de convergence etc.
- Utilisé pour la **conception de l'optique du LHC et du FCC-ee**.

Le premier cycle complet du LHC conçu avec Xsuite a été testé en 2024

(incluant le « combined ramp & squeeze » pour toutes les insertions expérimentales)



R. De maria, B. Lindstrom

Xsuite – Interaction particule-matière

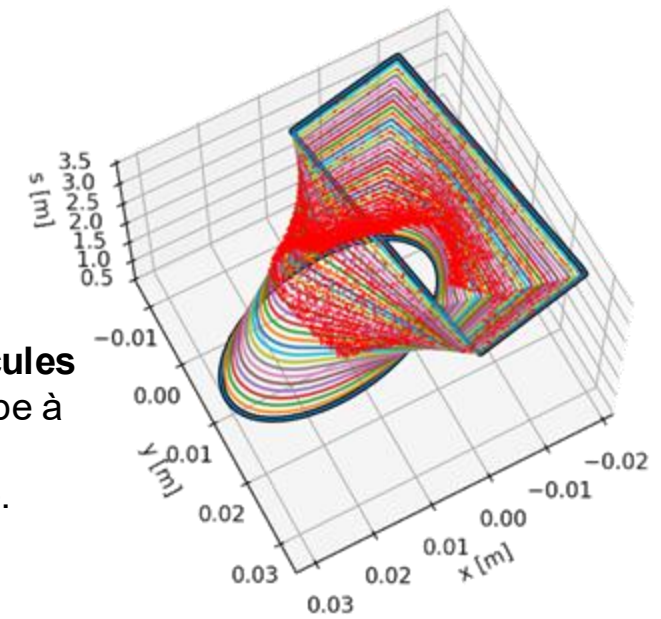
Pour les études de collimation, le **module Xcoll** fournit **trois moteurs de simulation particule-matière** :

- Le **moteur “Everest”** intégré à Xcoll (une évolution du moteur K2 venant de SixTrack).
- The **moteur “Geant 4”**, basé sur une interface avec BDSIM-Geant4 (utilisé pour les études de collimation du FCC-ee).
- The **moteur “FLUKA”**, basé sur une interface avec le code Monte Carlo FLUKA.

De plus, Xsuite fournit :

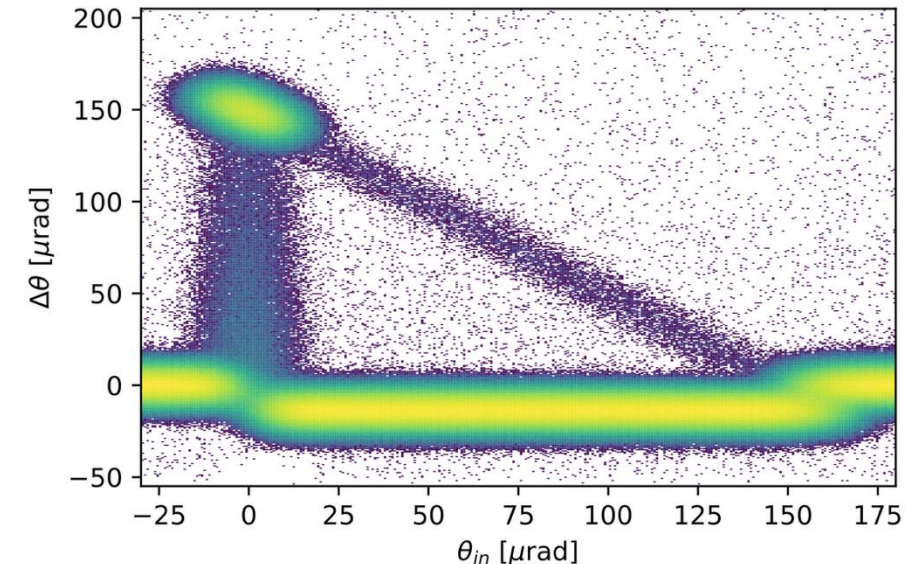
- Des outils pour **automatiquement installer et configurer les collimateurs** dans la simulation.
- Une prise en charge de **modèles d'ouverture complexes** ainsi que la **localisation précise des particules perdues** lors du tracking à travers la ligne (typiquement à 1-10 cm près).

Localisation de particules perdues le long du tube à faisceau à section transverse variable.



F. Van der Veken

Déviations de particules par un cristal courbé (moteur Everest)



Xsuite – Rayonnement synchrotron

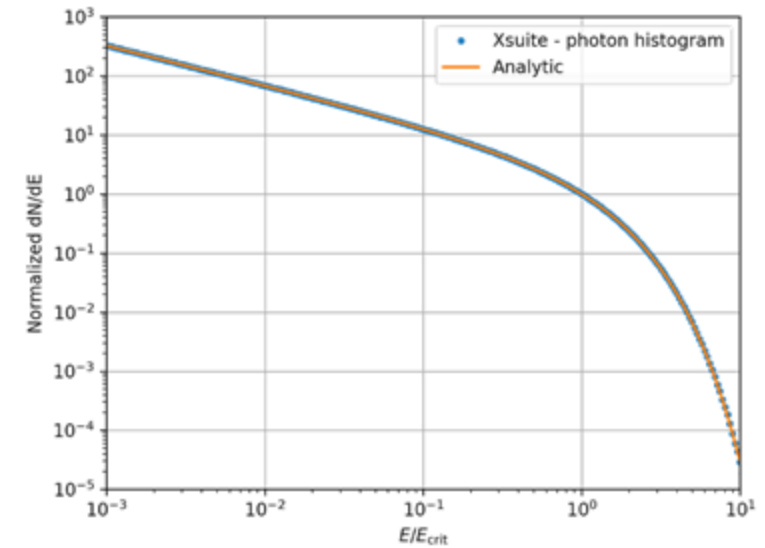
L'effet du **rayonnement synchrotron** peut être inclus dans les simulations de tracking d'Xsuite, avec deux modèles disponibles :

- Le **modèle “moyen”**, où la perte d'énergie due au rayonnement est appliquée particule par particule sans tenir compte des fluctuations quantiques ;
- Le **modèle “quantique”** pour lequel l'émission de photon est réellement simulée.

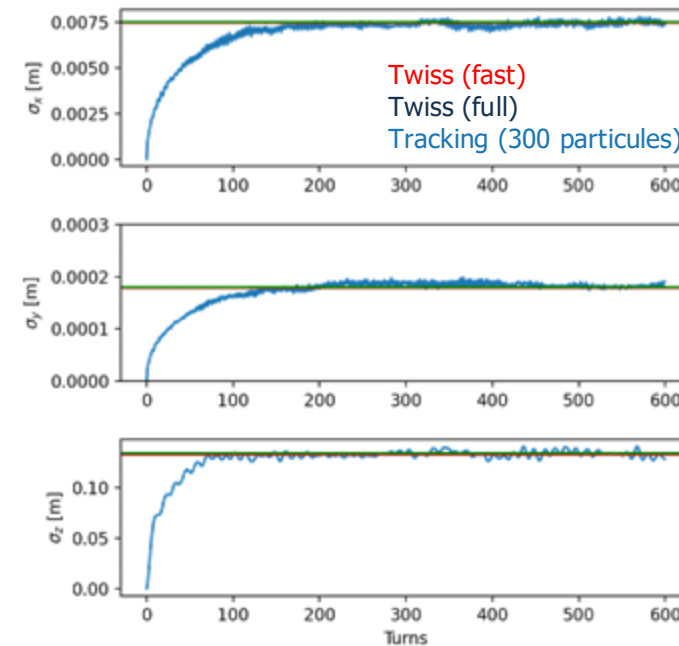
Le module **Twiss d'Xsuite** inclut également :

- Un algorithme dédié pour les fonctions optiques avec une **“one-turn map” non-symplectique**.
- Un module dédié pour le calcul de la **perte d'énergie par rayonnement, les temps d'amortissement et les émittances d'équilibre**.

Pour **compenser la perte d'énergie par rayonnement (“tapering”)**, un outil automatique est fourni pour rephaser les cavités RF et ajuster l'intensité des aimants..



Émittance d'équilibre (Twiss vs tracking)



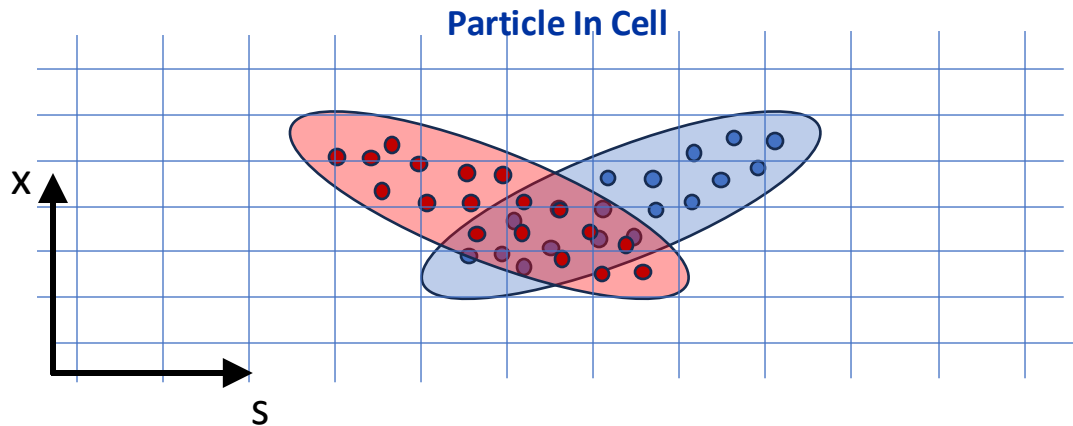
Xsuite – Modélisation faisceau-faisceau

Bénéficiaire des développements réalisés pour le LHC

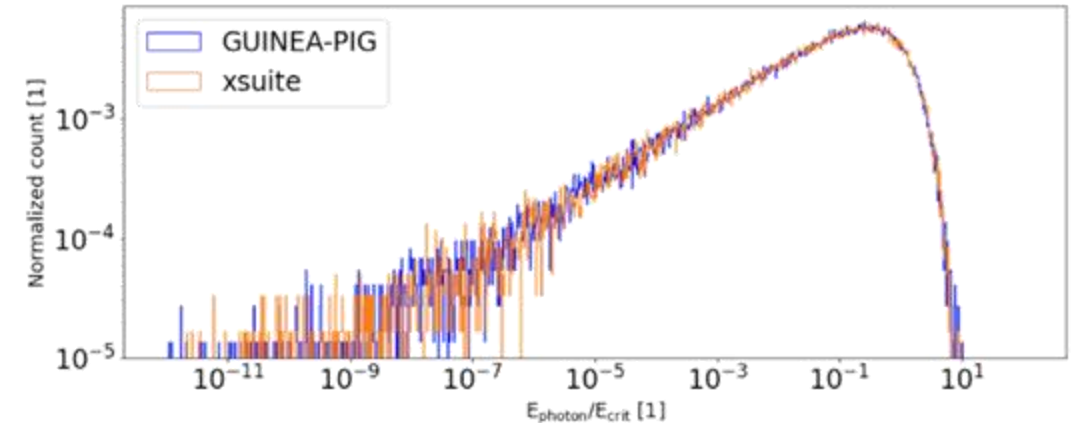
- Modélisation 4D/6D basée sur une distribution Gaussienne.
- Méthodes de modélisation faible-faible et fort-fort.

Fonctionnalités supplémentaires pour le FCC-ee

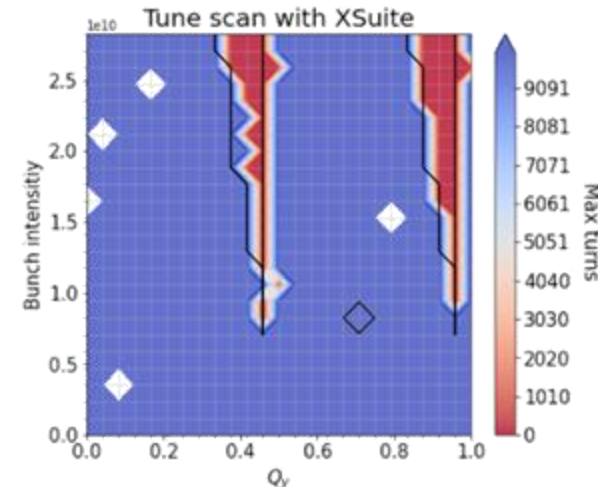
- Modèle Particle-In-Cell auto-consistant,
- Rayonnement beamstrahlung,
- Estimations de diffusion Bhabha.



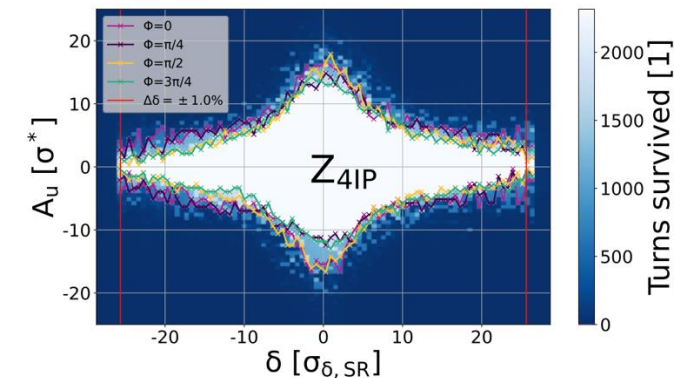
Beamstrahlung – validation vs Guinea Pig



Coherent bb effects at FCC-ee



FCC-ee DA with BB



Xsuite – Effets collectifs

Charge d'espace, différents modèles :

- Modèle “frozen”, distribution de charges fixe,
- Modèle “quasi frozen”, où l'intensité et les tailles du faisceau sont recalculées à chaque interaction,
- Modèle “Particle-In-Cell (PIC)”.

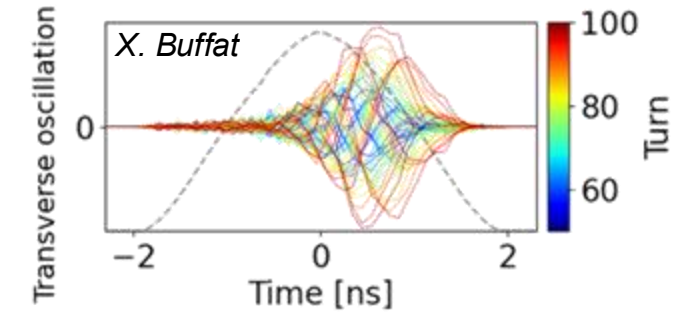
Champs de sillage

- Longitudinaux, transverses dipolaire et quadripolaire.
- Mono paquet ainsi que multi-paquets.

Diffusion intra faisceau (IBS) :

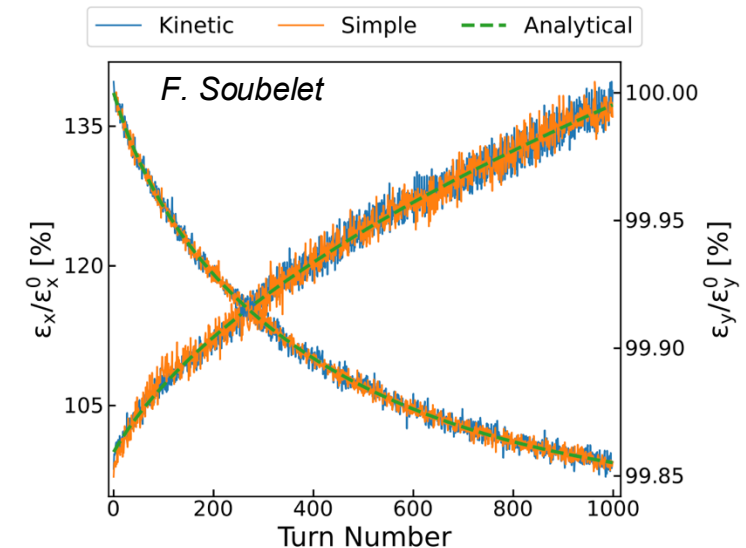
- Calcul des taux de croissance IBS analytiques à partir des paramètres faisceau et de l'optique.
- Kicks simplifiés pour l'inclusion des effets IBS lors de simulations de tracking.

Simulation d'instabilités cohérentes avec champs de sillage et charge d'espace



N. simulations	400
Number of PIC calculations per turn	540
Number of turns per simulation	40'000
Computing time per sim. (GPU)	~3 days
Computing time per sim. (CPU serial)	> 12 months

Benchmark IBS pour le SPS (faisceau d'ions Pb)



Xsuite - Interfaces vers d'autres outils

Xsuite est **facile à interfacer** et étendre avec d'autres outils fournissant une API en Python.

Par exemple Xsuite peut interfacer avec ces outils pour des fonctionnalités non présentes nativement :

- **MAD-NG** – calcul et optimisation de formes normales non linéaires paramétriques et termes de résonances (RDTs) avec différenciation automatique.
- **RF-Track** – tracking de particules dans des cartes de champ complexes.
- **FLUKA** – simulation d'interaction particule-matière (par exemple utilisé pour le LHC).
- **BDSIM-GEANT4** – simulation d'interaction particule-matière (principalement pour les études FCC).
- **BLonD** – modélisation avancée de systèmes RF, etc.

```
rdts = ["f4000", "f3100", "f2020", "f1120"]
twiss_ng = hllhc15_line.madng_twiss(rdts=rdts)
```

