

Résumé de la thèse en français

À la suite du programme du Grand collisionneur de hadrons, la communauté de la physique des particules envisage plusieurs projets d'accélérateurs pour poursuivre l'exploration des lois fondamentales de la nature. La Stratégie européenne pour la physique des particules recommande la construction d'une future « usine à electroweak », destinée à produire un grand nombre de bosons Z, W et Higgs, afin de mesurer leurs propriétés avec une précision inédite. Parmi les projets figurent le Futur Collisionneur Circulaire dans sa phase électron-positon (FCC-ee) en Europe, et le Collisionneur Circulaire électron-positon (CEPC) en Chine.

Obtenir un fort courant de faisceau tout en maintenant une mise au point très serrée au point d'interaction est primordial pour atteindre un taux d'événements élevé. Cependant, le comportement collectif des particules, issu des fortes interactions électromagnétiques entre les faisceaux lors des collisions et avec leur environnement, impose des limitations importantes aux performances du collisionneur. Jusqu'à récemment, ces deux interactions, les champs de sillage électromagnétiques et les interactions faisceau-faisceau, étaient étudiées séparément. Cette thèse étudie leurs effets combinés, avec une analyse détaillée des instabilités collectives qui en résultent. Les outils numériques développés et les extensions des modèles analytiques permettant de représenter les effets pertinents sont présentés.

Dans ces futurs collisionneurs à faisceaux plats, chaque plan est dominé par une instabilité spécifique résultant de la combinaison des effets faisceau-faisceau et des champs de sillage. Dans le plan horizontal, la résonance synchro-bétatron, ou instabilité $\langle x-z \rangle$, est analysée: elle provient du schéma d'angle de croisement qui introduit une composante longitudinale dans les résonances induites par les interactions faisceau-faisceau et est fortement influencée par la composante longitudinale des champs de sillage. Dans le plan vertical, l'instabilité de couplage de modes transverses se transforme en une nouvelle instabilité, dite de répulsion de modes transverses, sous l'effet de l'hourglass, dû à la forte focalisation de paquets de particules relativement longs au point d'interaction. Cette instabilité de répulsion de modes transverses, identifiée pour la première fois dans cette thèse, pourrait concerter l'ensemble des machines présentant un effet d'hourglass.

Les mécanismes fondamentaux de ces instabilités collectives sont analysés afin d'en comprendre le développement et les paramètres impliqués. Leur impact sur la conception des futurs collisionneurs est discuté, ainsi que des stratégies pour en réduire les effets limitants. Deux approches sont explorées: la première repose sur des corrections directes des propriétés et de la dynamique des faisceaux via l'ajustement de la chromaticité et le damper transverse; la seconde consiste à optimiser les paramètres de la machine à l'aide d'un algorithme génétique, pour limiter la formation d'instabilités dès la conception.

Enfin, ce travail identifie plusieurs pistes de recherche futures. Une étude plus détaillée de l'influence de la chromaticité et de son effet sur la durée de vie des faisceaux est nécessaire. Le rôle de l'amortissement de Landau devra également être examiné afin de mieux comprendre les mécanismes susceptibles de réduire certaines des instabilités observées. Le développement de l'approche d'optimisation pourrait être affiné en intégrant des contraintes et des effets supplémentaires pour fournir des estimations plus réalistes. L'étude conjointe de l'optique de la machine et d'autres phénomènes collectifs, en relation avec les instabilités identifiées, constituera une étape importante. Avec les progrès continus des outils de calcul et des capacités de simulation, une compréhension plus complète de ces effets couplés deviendra possible, contribuant à la conception et à l'optimisation des prochains collisionneurs à lepton à haute énergie.

Résumé de la thèse en anglais

After the completion of the Large Hadron Collider (LHC) program, the particle physics community is considering options for future accelerator projects to further explore the fundamental laws of nature. The European Strategy for Particle Physics has suggested the construction of a future “electroweak factory,” a machine designed to produce a very large number of Z, W and Higgs

bosons. Such a facility would enable precise measurements of their properties and could provide answers to several open questions in particle physics that remain unresolved after the LHC era. Proposals for such colliders include the Future Circular Collider in its electron-positron phase (FCC-ee) to be built in Europe, or the Circular Electron Positron Collider (CEPC) proposed in China.

Achieving high beam currents together with a tight focusing at the interaction points is critical for particle colliders to achieve a high event rate. However, the collective behaviour of particles, arising from the strong electromagnetic interactions during the collisions of the beams and their interactions with their surroundings, sets important limitations to the collider's performance. Until recently, these two interactions, known as electromagnetic wake fields, and beam-beam interactions, were studied independently. This thesis investigates their combined effects, with a detailed study of the resulting collective instabilities. Numerical tools used for the studies are introduced and the extension of analytical models for the representation of the relevant effects is presented. Then, instabilities are investigated in the transverse planes. Because such colliders have flat beams by design, in each plane, different instabilities dominate from the combined effect of beam-beam interactions and wake fields. In the horizontal plane, the synchro-betatron resonance, or $\langle x-z \rangle$ instability, is studied as it originates from the crossing-angle scheme adding a longitudinal component to the beam-beam driven resonances, strongly influenced by the longitudinal component of the wake fields. In the vertical plane, the transverse mode coupling instability transforms into a new transverse mode repulsion instability under a non-negligible hourglass effect, resulting from the strong focusing of longer particle bunches at the interaction point, identified here for the first time and potentially relevant for machines with similar optics configurations. The fundamental mechanisms of the collective instabilities are analyzed to understand in detail their development and the involved parameters. Their impact on future collider design is discussed, and strategies are suggested to reduce their impact on the performance of the colliders. Two approaches are investigated to mitigate performance limitations: one based on direct correction of beam properties and dynamics through chromaticity adjustment and transverse feedback, and another relying on the optimization of machine parameters with a genetic algorithm to reduce the development of instabilities by design.

This work finally identifies several directions for future studies. More detailed investigations are needed to quantify the influence of chromaticity and its effect on beam lifetime remains to be studied. The role of Landau damping should also be explored to understand additional damping mechanisms that could mitigate some of the observed instabilities. Further development of the optimization process could provide more realistic estimations by including additional effects and constraints. Detailed machine optics and other collective phenomena could be later considered together with the identified instabilities. As computational tools and simulation capabilities continue to evolve, a more complete understanding of these coupled effects will become possible, contributing to the design and optimization of next-generation high-energy lepton colliders.

Résumé de thèse vulgarisé pour le grand public en français

Comprendre comment maintenir des faisceaux de particules stables et de haute qualité est essentiel pour la conception des futurs collisionneurs à haute énergie, destinés à atteindre de nouveaux niveaux de précision et de performance. Ce travail étudie le comportement des faisceaux de particules chargées soumis à de fortes forces électromagnétiques dans ces machines. Deux effets collectifs majeurs sont considérés : les interactions faisceau-faisceau, où les paquets en collision perturbent mutuellement leur mouvement, et les champs de sillage, perturbations électromagnétiques créées lorsque les faisceaux traversent l'environnement de l'accélérateur. Leur influence combinée peut générer des instabilités limitant la qualité des faisceaux et les performances des collisionneurs. A l'aide d'outils de simulation et de modèles analytiques, cette étude identifie un nouveau type d'instabilité transverse et explore des moyens de la corriger ou de la limiter.

Résumé de thèse vulgarisé pour le grand public en anglais

Understanding how to preserve stable and high-quality particle beams is essential for the design of future high-energy colliders, which aim to reach new levels of precision and performance. This work investigates how charged particle beams behave in such machines under strong electromagnetic forces. Two main collective effects are considered: beam-beam interactions, where colliding bunches disturb each other's motion, and wake fields, electromagnetic disturbances created as beams travel through the accelerator environment. Their combined influence can generate instabilities that limit beam quality and collider performance. Using dedicated simulation tools and analytical models, the study examines these effects in detail, identifies a new type of transverse instability relevant to future designs, and explores methods to suppress or mitigate its impact on machine operation.

Membres du jury et affiliations:

Prof. Luigi PALUMBO (Professeur Sapienza Università di Roma et INFN – Roma1)

Prof. Adrian OEFTIGER (Professeur assistant John Adams Institute, University of Oxford)

Dr. Barbara DALENA (Directrice de recherche CEA/IRFU - Université Paris-Saclay)

Dr. Catia MILARDI (Directrice de recherche INFN Laboratori Nazionali di Frascati)

Prof. Fabian ZOMER (Professeur Université Paris Saclay et IJCLab, CNRS/IN2P3)

Direction de thèse:

Directeur: Dr. Aurélien Martens (IJCLab / Université Paris Saclay)

Co-superviseurs: Dr. Angeles Faus-Golfe (IJCLab / Université Paris Saclay) et Dr. Xavier Buffat (CERN)