Bowen BAI

Optimisations de l'injecteur pour FCC-ee et applications pour PRAE

**Résumé**

Au cours des dernières années, un développement intense d’accélérateurs d’électrons linéaires a été conduit par différentes communautés comme la communauté X-FEL, la communauté des collisionneurs linéaires de la physique des hautes énergies (HEP) : ILC et CLIC ainsi que la communauté des collisionneurs circulaires : FCC-ee et CEPC. En outre, il existe également de nombreuses autres applications de la science médicale à l’industrie qui utiliseront un tel LINAC comme accélérateur principal. Dans toutes ces études, un e-linac à haut rendement avec des énergies de 10 MeV à plus de 1 TeV est nécessaire comme conducteur ou injecteur. Même si la technologie LINAC pour faire face aux performances recherchées est très connue, un effort de R&D important proposant des solutions plus compactes, plus simples, plus rentables, efficaces, robustes et fiables est en cours. Dans ce contexte, cette thèse optimisera le LINAC et ses lignes de transfert associées dans deux cas:

1. L’injecteur LINAC pour FCC-ee (Future Circular électron-positon Collider), en partic-ulier celui à positons.

2. Le LINAC pour une plate-forme d’application connue sous le nom de projet PRAE (Platform for Research and Applications with Electrons).

Le Future Circular Collider (FCC) hébergé par le CERN, est une collaboration internationale visant à explorer la faisabilité de différents scénarios de collisionneurs de particules dans le but d’augmenter considérablement l’énergie et la luminosité par rapport aux collisionneurs existants, dans la recherche de nouvelle physique. Dans le cas de FCC-ee, le rapport de conception conceptuelle (CDR) montre que 2,13 ×1010 (3,2 nC) particules d’électrons et de positons par paquet sont nécessaires pour le remplissage complet le plus exigeant du mode de fonctionnement Z. La sélection de base pour l’injecteur LINAC FCC-ee est basée sur celle de

SuperKEKB, qui nous donne un rendement en positons de 0,2 Ne+/Ne− contre 0,4 Ne+/Ne− obtenue dans une expérience récente. L’objectif principal de cette thèse est de réaliser la conception et l’optimisation de bout en bout pour la production de faisceau, l’accélération et le transport de la source d’électrons d’alimentation à l’anneau d’amortissement de positons. Il s’agit également d’augmenter l’efficacité et la flexibilité de la production de positons (le rendement en positons doit être supérieur à 0,7 Ne+/Ne− ) pour l’injecteur LINAC de FCC-ee. Une étude complémentaire pour l’optimisation de la cible de positons utilisant une cible conventionnelle ou une cible hybride est également brièvement résumée. Compte tenu des inconvénients du schéma d’injecteur de SuperKEKB actuel, trois nouveaux modèles de schémas de dérivation différents ont été finis pour transférer les particules d’électrons et de positons séparément pour une meilleure transmission et une flexibilité améliorée de l’ensemble du

système. Cela pourrait finalement nous donner un rendement en positons d’environ 1,2 Ne+/Ne− dans l’anneau d’amortissement du positon dans les simulations théoriques. En conclusion, ce travail est une première étape dans l’optimisation du système d’injecteur de FCC-ee du point de vue de l’efficacité du transport et de la conception optique. Les différents schémas proposés sont basés sur des technologies établies. Les différents chemins pour les électrons et les positons sont utilisés afin d’améliorer l’efficacité de transport du point de vue des pertes et du coût.

Dans la deuxième partie de cette thèse, la conception d’une plateforme d’application de radiobiologie et de physique nucléaire PRAE (Platform for Research and Applications with Electrons) LINAC basée sur un faisceau d’électrons pulsé de haute qualité d’énergie jusqu’à 70 MeV en phase 1 et 140 MeV en phase 2 a été réalisé. Deux paquets d’électrons d’intensité de l’ordre du nanoCoulomb dans l’accélérateur PRAE pour la phase 1 sont produits dans un canon RF à une fréquence de 50 Hz, post- accélérés par un LINAC en bande S jusqu’à 50-70 MeV et injectés dans la ligne directe du faisceau plus une ligne déviée. La conception optique des lignes de faisceau doit être aussi flexible que possible pour répondre aux différents types de caractéristiques de faisceau (taille du faisceau, énergie, dispersion, courant. . . ) et modes de fonctionnement en fonction de l’application. L’étude des différentes options optiques et la mise en œuvre de ces deux lignes de faisceau ainsi que l’interaction faisceau-eau pour les études précliniques pour le cas des expériences de radiobiologie ont également été réalisées et présentées dans cette thèse.Ce manuscrit comporte principalement quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous donnons une introduction aux LINACs électroniques RF et leurs applications dans la société moderne. Nous présentons tout d’abord les principes de fonctionnement des LINAC, leurs compositions ainsi que leurs paramètres essentiels permettant de déterminer leurs qualités et leurs performances. Nous présentons ensuite les problèmes généralement rencontrés dans la conception optique des LINACs électroniques RF et des systèmes de transport de faisceau, incluant l’effet de la charge d’espace, l’effet de champ de sillage, le rayonnement synchrotron incohérent (CSR), le rayonnement synchrotron cohérent (CSR) . . . De ces instabilités collectives, nous introduisons en détail les problèmes physiques et les analyses mathématiques correspondantes ainsi que les outils de simulation employés pour étudier leurs effets. Les codes de simulation incluent le code MADX, le code SAD (pouvant être utilisé pour l’étude de l’effet de charge d’espace, de l’effet de champ de sillage, du rayonnement synchrotron et des désalignements) et le code PLACET (utilisé pour l’étude de la RSE dans les aimants dipôles et les désalignements). Enfin, nous présentons les applications des LINACs électroniques RF. Selon la gamme d’énergie du faisceau d’électrons, les applications peuvent être divisées en trois catégories.

1. Elles peuvent fonctionner comme des injecteurs pour des collisionneurs de physique des hautes énergies (HEP) ou des sources lumineuses. L’énergie du faisceau est de plusieurs centaines de MeV à plusieurs GeV, voir des centaines de GeV).

2. Les LINACs d’électrons de moyenne énergie avec une gamme d’énergie de 50 MeV à environ 300 MeV sont généralement envisagés pour les installations ou les plates-formes de R&D pour des études multidisciplinaires de nouvelles technologies d’accélérateur.

3. Les LINACs à basse énergie (de plusieurs MeV à 30 MeV) sont les machines les plus couramment utilisées dans les applications médicales (traitement des cancers), industrielles (traitement des matériaux, stérilisation) et de sécurité (criblage aux rayons X de la cargaison) dans nos sociétés modernes.

Pour les trois applications, nous présentons respectivement les projets suivants à titre d’exemples : (1) FCC-ee, CEPC, ILC et CLIC; (2) installations de R&D comme CLEAR et CLARA; (3) LINAC d’électrons de basse énergie pour les installations de radiothérapie à rayons X et les machines de contrôle de sécurité des passeports.

Depuis la découverte du boson de Higgs au LHC en 2012, il y a un intérêt croissant pour les mesures de précision de la physique des EW, y compris les propriétés du boson de Higgs. Cela pousse à des études de collisionneur électron-positon de haute luminosité et de haute précision. Jusqu’à présent, CLIC, ILC, CEPC, FCC-ee ont été proposés comme les futures installations possibles pour explorer la frontière HEP.

Le deuxième chapitre présente les études d’optique et les optimisations pour le système d’injecteur FCC-ee. Ce chapitre est le cœur de cette thèse. Nous introduisons d’abord le schéma de base du système d’injecteur FCC-ee. Il est composé de deux sources d’électrons (un canon RF de 6,5 nC et un canon thermionique de 10 nC), un LINAC électrons/positons (pour les énergies jusqu’à 6 GeV) et un 1,54 GeV bague d’amortissement. Le structure initiale est basée sur le LINAC d’injecteur de SuperKEKB. Mais le schéma de SuperKEKB présente l’inconvénient que les électrons à faible émittance et les positons à plus grande émittance partagent les mêmes LINACs avec une configuration de cible à positons fixe. Cela peut entraîner une faible efficacité de production de positons et une mauvaise flexibilité du système.

Une mesure expérimentale récente nous donne un rendement en positons de 0,2 Ne+/Ne− contre 0,4 Ne+/Ne− conçu à la sortie de l’injecteur LINAC pour un faisceau incident d’électrons d’énergie 3,5 GeV et d’intensité de 10 nC. Pour éviter un tel problème potentiel dans l’injecteur FCC-ee, nous avons proposé trois schémas d’injection différents utilisant une structure de contournement pour l’accélération et la transmission séparées des électrons et des positons. Nous présentons chaque composant du système d’injection : les sources d’électrons (canon RF de 6,5 nC et canon thermionique de 10 nC), la section d’accélération (structures d’accélération en bande S conductrices normales et structures d’accélération en bande S à grande ouverture), trois structures optiques de bypass (dérivation de type Dogleg, dérivation de type chicane et schéma d’arc), des moyens de production de positons, un nouveau LINAC de positons de 1,54 GeV conçu pour accélérer les positons capturés et une structure en boucle de retournement pour transférer les positons vers l’anneau d’amortissement des positons. La difficulté de conception est de garder une bonne transmission. Par conséquent, les problèmes physiques mentionnés dans le premier chapitre doivent être bien pris en compte. Pour les conceptions de dérivation, la dynamique du faisceau concernant la dispersion et la chromaticité doit également être prise en considération pour un système achromatique et isochrone. Les différents modes de production de positons utilisant différentes cibles de positons et différents modes d’accélération (mode d’accélération et mode de décélération dans la première structure RF du LINAC de capture) sont également étudiés pour capturer plus de positons. Enfin, nous montrons que le rendement en positons avant l’anneau d’amortissement des positons dans la conception des trois schémas d’injecteurs est de 1,2 N Ne+/Ne− dans la simulation. Cela peut répondre ainsi à l’exigence du FCC-ee CDR avec 0,7 Ne+/Ne− . Du point de vue des coûts, d’autres schémas d’injection envisageables ont également été proposés. Ils pourraient être étudiés en détail à l’avenir pour une machine potentielle aussi grande et complexe.

Le chapitre 3 présente la conception optique pour le LINAC et les lignes de faisceau d’une plate-forme multidisciplinaire R&D nommée PRAE. Cette plateforme vise à rassembler la physique subatomique, l’instrumentation, la radiobiologie et la recherche clinique autour d’un accélérateur pulsé à 50 Hz de haute performance délivrant le faisceau d’électrons à deux lignes de faisceau dans la gamme d’énergie de 50 à 70 MeV dans la première étape, et évolutif à 140 MeV dans la deuxième étape. La construction était prévue à Orsay, en France. La gamme d’énergie des électrons de 50 à 140 MeV sera adaptée pour effectuer une série de nouvelles études de faisabilité et de radiobiologie prometteuses pour les traitements de radiothérapie moins destructifs reposant sur des faisceaux de crayons submillimétriques fractionnés dans l’espace et d’autres techniques nouvelles (mini-faisceau de grille et faisceau FLASH). Dans le domaine de la physique subatomique, ils visent une contribution significative à l’effort mondial de la compréhension de l’énigme du rayon de charge protonique. L’expérience ProRad (Proton-Radius) étudiera la diffusion élastique du proton électronique pour mesurer avec précision le facteur de forme électrique du proton dans une plage quadratique ultra-faible à quatre impulsions et encore inexplorée. En outre, une plate-forme d’instrumentation entièrement équipée fournira les outils nécessaires pour développer une prochaine génération de détecteurs utilisés dans de nombreux domaines de recherche tels que l’imagerie médicale, la physique subatomique et des particules, la technologie spatiale et l’astrophysique.

Les études de conception de la plate-forme sont divisées en deux parties: les simulations du LINAC et la conception optique des deux lignes de faisceau. Le LINAC d’électrons RF de 70 MeV est composé de structures d’accélération en bande S conductrices normales (identiques à celles utilisées dans FCC-ee) avec un gradient d’accélération d’environ 22 MV/m. Les deux lignes de faisceau ont été conçues en utilisant les mêmes codes (MADX et PLACET) que nous utilisé dans FCC-ee. La ligne de faisceau VHEE sera utilisée pour l’étude préclinique de radiothérapie.. La ligne de faisceau ProRad sera dédiée à l’expérience de mesure du rayon de proton. La ligne de faisceau VHEE est une structure en Dogleg composée de deux dipôles et de plusieurs quadripôles. Le faisceau sortant de cette ligne de faisceau est utilisé pour deux types de modalités de radiothérapie : mini-faisceau de grille et faisceau FLASH. Dans les deux modalités, la simulation de l’interaction faisceau-eau a également été présentée pour étudier l’effet potentiel du traitement. La ligne de faisceau ProRad est une structure en chicane, composée de 4 dipôles, avec un collimateur au milieu de la structure pour obtenir une petite diffusion d’énergie.

La conception de l’optique et les technologies d’accélération appliquées sont présentées dans le manuscrit, dans le cadre des développements actuels et les applications des LINACs d’électrons RF dans la société moderne et de présenter une perspective pour l’exploitation future.

**Mots-clés:** Physique des accélérateurs, injecteur FCC-ee, projet PRAE, conception optique, optimisation, suivi de faisceau, rendement en positons

Injector linac optimizations for FCC-ee and applications for PRAE

**Abstract**

In the last years there has been intense linear electron-accelerator development driven by

different communities as the X-FEL community, the High Energy Physics (HEP) linear-collider

community: ILC and CLIC as well as HEP circular-collider community: FCC-ee and CEPC.

Furthermore, there are also many other applications from medical science to industry that will

use such a linac as main accelerators. In all these studies, a high-efficient e-linac with energies

from about 10 to over 1000 MeV is needed as driver or injector. Even if the linac technology

to cope with the performances needed is very well known, an important R&D effort on more

compact, simpler, cost-effective, efficient, robust and reliable is in progress. In this frame, this

thesis will optimize the linac and its associated transfer lines in two cases:

1. The injector linac for FCC-ee (Future Circular electron-positron Collider), in particular

the positron one.

2. The linac for an application platform known as PRAE project (Platform for Research

and Applications with Electrons).

The Future Circular Collider (FCC) hosted by CERN, is an international collaboration

to explore the feasibility of different particle collider scenarios with the aim of significantly

increasing the energy and luminosity compared to existing colliders, in the search for new

physics. In the case of FCC-ee, 2.13°ø1010 (3.2 nC) electron and positron particles per bunch

are needed for the most demanding full filling of Z running mode in the conceptual design

report (CDR). The baseline selection for FCC-ee injector linac is based on the SuperKEKB one,

which gives us a positron yield of 0.2 Ne+/Ne− against 0.4 Ne+/Ne− design in recent experiment.

The main objective of this thesis is to perform the start-to-end design and optimization for beam

production, acceleration and transport from the feeding electron source to the positron damping

ring as well as to increase the efficiency and the flexibility of the positron production (the

positron yield needs to be larger than 0.7 Ne+/Ne−) for FCC-ee injector linac. A complementary

study for positron target optimization using conventional target or hybrid target is also shortly

summarized. Considered the drawbacks of the current SuperKEKB injector scheme, three new

different bypass scheme designs have been finished to transfer electron and positron particles

xii

separately for a better transmission and improved flexibility of the whole system, which finally

could gives us a positron yield of around 1.2 Ne+/Ne− at the positron damping ring in theoretical

simulations. In conclusion, this work is a first step in the optimization of the FCC-ee injector

system from the point of view of the efficiency of the transport and optics design. The various

schemes proposed are based on established technologies and different paths for electrons and

positrons are used in order to improve the efficiency of the transport from the point of view of

losses and cost.

In the second part of this thesis, the design for a radiobiology and nuclear physics application

linac platform PRAE (Platform for Research and Applications with Electrons) based on a highquality

pulsed electron beam of energy up to 70 MeV in phase 1 and 140 MeV in phase 2 has

been realized. 2 nC electron bunches in the PRAE accelerator phase 1 are produced in a RF

gun at 50 Hz frequency, post-accelerated by an S-band linac to 50-70 MeV and injected into the

direct beam line plus a deviated line. The optics design of the beam lines has to be as flexible

as possible to cope with different kinds of beam characteristics (beam size, energy, dispersion,

current... ) and operation modes depending on the application. The study of the different optics

options and the implementation of these two beam lines as well as the beam-water interaction

for pre-clinical studies for the case of the radiobiology experiments has also been done and

presented in this thesis.

**Keywords:** Accelerator physics, FCC-ee injector, PRAE project, optics design, optimization,

beam tracking, positron yield