
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

DYNAMIQUE FAISCEAU - ELECTRONS

Auteur principal

Nom : Christelle Bruni

Affiliation : LAL

Email et coordonnées : bruni@lal.in2p3.fr, 0164468351

Co-auteurs

I. Chaikovska, S. Chance, N. Delerue, H. Guler, V. Kubytskyi, C. Rimbault, C. Vallerand

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR
avant le **1^{er} novembre 2019**

1. Informations générales

Titre : Dynamique faisceau - électrons

Acronyme : DYNA

Résumé (max. 600 caractères espaces compris)

Les études et développements en dynamique faisceau servent pour la conception des accélérateurs, aux réglages et à l'optimisation des faisceaux. Les réglages (et leur reproductibilité), les non linéarités et les instabilités résultantes des effets collectifs doivent être maîtrisés pour dépasser les limites de durée, de charge, et d'émittances. D'autre part, nos installations, basées sur des technologies classiques, permettent l'insertion et les tests de moyens novateurs de manipulation de faisceau, de mesure et d'accélération avec des structures à haute fréquence.

Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)

- *Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)*
- *Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent*

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

- *Accélérateurs pour la physique des particules*
- *Accélérateurs pour les sources de lumière ou de neutrons*
- *Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)*

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

(2 pages max incl. figures)

La motivation principale des études expérimentales et théoriques en dynamique faisceau est de renforcer notre connaissance des modèles théoriques existants par le rapprochement expérience/simulations avec pour objectif l'amélioration constante des performances des faisceaux. La première conséquence des demandes croissantes de fortes charges, et de brillance crête, est la présence de phénomènes non linéaires ainsi que l'apparition d'instabilités. En deca des instabilités, la connaissance de la dynamique des particules individuelles est le pilier pour les mesures et les simulations incluant des phénomènes collectifs. En outre, la connaissance de la dynamique des particules depuis la source jusqu'au point d'intérêt est nécessaire puisque les non linéarités apparaissent dès la source. Ainsi, la connaissance de la dynamique simple particule, des sources d'électrons, des effets collectifs et des instabilités et les moyens de les modéliser et de les mesurer est l'étape nécessaire pour **maitriser les performances des faisceaux d'électrons d'un point de vue théorique et expérimental**. Plusieurs axes de recherche de la dynamique faisceau ci dessous s'articulent pour atteindre cet objectif commun. Les développements et perspectives en dynamique faisceau proposés dans ce document sont à l'état de l'art dans la communauté accélérateur internationale et servent plusieurs projets accélérateurs locaux comme PHIL/laser-plasma/THOMX/PERLE/FCC et s'insèrent.

Les études et les mesures d'**optique linéaire et non linéaire** sont nécessaires dans la conception et les réglages des accélérateurs. Les perspectives expérimentales concernent ThomX, PHIL (linac et anneau), ainsi que la conception des arcs de l'ERL PERLE. Un projet d'**optimisation par Machine Learning**, qui tirera partie des procédures de réglages et d'alignement mis en place par discrimination de chaque équipement participant à la dynamique faisceau se développe et nous espérons aboutir à une procédure d'optimisation automatisée que ce soit en conception ou en expérience des différentes propriétés des faisceaux issus des linac selon les besoins des projets afin d'améliorer la reproductibilité des résultats. Ce type d'optimisation commence à être mis en place dans la communauté internationale accélérateur [1-3]. Il est envisagé de développer des collaborations sur ces problématiques notamment avec CLEAR et VELA.

Les projets sur dynamique faisceau incluent les problématiques de **nuages d'ions** en collaboration avec le groupe vide et surface. Le piégeage des ions par le faisceau d'électrons peut engendrer des instabilités transverses dans les accélérateurs à forte cadence comme ThomX ou PERLE, engendrant des pertes rapides non supportées par les feedback transverses [4,5]. Des campagnes de mesures sont prévues sur ThomX pour confirmer les zones de piégeage du modèle déjà établi [6] pour montrer l'efficacité du nettoyage par électrode, et des études de conception pour PERLE. Une collaboration avec l'ESRF pourra aussi être discutée.

L'instabilité microbunching issue du **rayonnement synchrotron cohérent** dans les dipôles est un enjeu sur plusieurs accélérateurs notamment pour les linac à fort courant [7] ainsi que ceux à recirculation ERL [8], ainsi que certains anneaux [9]. Les études faites pour ThomX montre une limitation en courant et ont abouti à un code de tracking 6D pour ces études [10,11]. L'objectif est de mesurer les seuils d'instabilité sur ThomX, et d'optimiser la conception de PERLE ou de transport de paquets courts avoir d'avoir des seuils en dehors de la zone de fonctionnement. La communauté accélérateur déploie d'importants moyens de mesures pour avoir la résolution temporelle [12, 13], ainsi que sur les moyens de contrôles [14-16].

Les études concernant **l'impédance** sont indispensables durant l'étape de conception d'un accélérateur, ainsi que le rapprochement expériences/simulations. Il est prévu de faire évoluer le banc de mesure pour les mesures d'impédances transverses. Les impédances peuvent aussi être utilisées de façon maîtrisée pour manipuler ou diagnostiquer les faisceaux d'électrons. Des expériences doivent être mises en place pour ThomX et PHIL avec une collaboration possible avec FERMI et PSI. L'objectif étant de disposer d'une mesure de l'espace des phases longitudinale par passive streaking (dont nous ne disposons pas à ce jour par manque de moyens) et de pouvoir supprimer les non linéarités avec un linéariseur passif [17-19] en s'affranchissant des coûts d'une cavité défectrice et d'une cavité harmonique redresseuse.

Les études concernant les **injecteurs** (PHIL/laserplasma/THOMX/PERLE) ont pour objectif le transport de faisceau dominé par la force de charge d'espace (paquets courts, ou chargés) avec des contraintes d'injection avec des lasers (encombrement, focalisation) ou d'adaptation dans une structure circulaire. La connaissance de la source d'électrons est un point clé pour les **manipulations des espaces de phases**. Le passive streaking et le linéariseur passif développés avec les compétences impédances nous permettront de manipuler et diagnostiquer nos sources et ainsi de mieux modéliser les instabilités. Pour le projet ESCULAP, nous étudierons de façon expérimentale la compression magnétique. Une approche complémentaire pour les paquets courts consiste à accélérer et comprimer des faisceaux avec des structures accélératrices à haute fréquence THz [20,21] en collaboration avec DESY. Des calculs et expériences préliminaires sur PHIL/LASERIX montrent les potentialités de cette expérience en terme de gain d'énergie et de compression du paquet [22,23]. Les résultats attendus permettront de lever certains verrous dans l'injection externe pour l'accélération laser-plasma ainsi que la montée en charge sur l'anneau ThomX et l'ERL PERLE. Il est envisagé de déposer une demande européenne FET sur ce sujet en collaboration avec DESY et Daresbury.

La mesure des bruits de fond générés par l'interaction faisceau-faisceau dans les collisionneurs peut servir au développement de diagnostics et à l'optimisation des faisceaux au point d'interaction. Les études menées sur le processus Bhabha radiatif à angle nul et sur les capteurs en diamant ont permis de mettre au point un luminomètre rapide, capable de mesures à 250 MHz, utilisé à SuperKEKB pour le réglage de la

machine, y compris à très faible courant, ainsi que pour le feedback [24, 25]. Ces études sont également pertinentes pour les projets de futurs collisionneurs tels que FCCee.

3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs (1 page max. incl. figures)

Préciser les travaux envisagés pour mener à bien les objectifs décrits (étude conceptuelle, expérience, prototypage, construction...) ainsi que les résultats espérés et leur échéance, en précisant si possible les partenaires potentiels.

Toutes les études en dynamique faisceau sont les piliers de la conception des futurs accélérateurs d'électrons et doivent être accompagnées de développements expérimentaux innovants et à l'état de l'art. Nous avons les compétences et beaucoup d'outils ont été mis en place pour accompagner la conception des futurs accélérateurs ainsi que les réglages des accélérateurs. La dynamique faisceau demande beaucoup de FTE qui inclus les études conceptuelles, ainsi que les réglages des faisceaux, analyse de données, et rapprochement expériences simulations. Il faut renforcer dans les années à venir le développement d'expériences à petite échelle à l'état de l'art ainsi que les collaborations internationales avec un accompagnement en frais de mission et en d'équipement/consommable. Le tableau ci-dessous résume les besoins pour chaque sous-thématique sur une base de 5 ans.

	FTE (h.m /keuros)	Consommable /équipement	Mission	Coût complet
1. Optique, réglages (linac-anneau)	120 /480	20	6	506
2. Paquets court (linac-laser)	12/40	20	3	63
3. Machine learning (linac, anneau)	60/240	5	6	251
4. Nuages d'ions (linac-anneau)	36/144	2	6	152
5. Microbunching (anneau, ERL)	36/144	30	4	178
6. Impédance (banc, linac)	36/144	20	2	166
7. Faisceau- faisceau (collisionneur)	60/240	5	5	250
Totaux	360/1432	100	32	1564

1. Temps sur accélérateurs, optimisation, études, échange avec d'autres installations en missions, License de code (8 personnes impliquées DYNA sur les commissioning, mesures sur PHIL, et conceptions), cette tâche sera continue pendant 5 ans sur les différentes installations et projet du laboratoire.

2. Achat dipôle spectromètre compatible avec l'installation du compresseur laserix. Compression magnétique prise en charge par ESCULAP. Collaboration DESY pour le THz : quelques consommables optiques, pilotage à distance, et mission à DESY/LAL (DESY prend en charge les composants diélectriques/optique pour le THz, leur missions). Cela permet d'effectuer une première expérience phare THz en fin 2020-2021. Une demande de financement FET pour le THz est prévue pour mai 2020 (1 personne impliquée côté DYNA + 1 personne RF + phil/laserix).

3. Consommable informatique pilotage à distance, mission de collaboration et tests sur d'autres accélérateurs (3 personnes impliquée DYNA). Premières expériences ML sur

réglages photoinjecteur/linac (2020), anneau (2021) avec une continuité sur d'autres systèmes sur 5 ans selon retour d'expérience

4. Mesures sur ThomX anneau (2020-2021), études conceptuelles PERLE (2020-2022), collaboration esrf, kara (1 personne impliquée DYNA)

5. Mesures sur ThomX ligne de transfert et anneau (2020-2021), amélioration de l'adaptation et développement de mesure tomographique ou passive streaking et par cristal (2021-2022), simulations (4 personnes DYNA)

6. Upgrade du banc, consommable et chambre pour expérience passive streaking et linéariseur (1 personne impliquée DYNA + 1 personne RF + 1 personne méca)

7. Etudes et mesures SuperKEKB et FFee (1 personne impliquée DYNA)

4. Impact

(0.5 page max.)

Toutes les études en dynamique faisceau sont les piliers de la conception des futurs accélérateurs d'électrons et doivent être accompagnées de développements expérimentaux innovants et à l'état de l'art. Nous disposons d'accélérateurs avec des technologies classiques et connues. Nous pourrions pousser les performances avec de nouvelles techniques de manipulation, d'accélération et de mesures de faisceau. Ainsi, nous améliorerons nos compétences dans ce domaine pour assurer de meilleures performances aux futures accélérateurs et pouvoir proposer des solutions innovantes préalablement testées dès la phase de conception. Les réglages avec le machine learning ouvrira la voie pour l'optimisation des accélérateurs de la conception à l'expérience ainsi que l'amélioration des réglages d'autres systèmes comme les lasers qui sont maintenant au côté des accélérateurs dans plusieurs domaines (laser-plasma, THz, photoémission, diagnostic optique, interaction ...).

Références

- [1] C. Emma, A. Edelen, M. J. Hogan, B. O'Shea, G. White, and V. Yakimenko, Machine learning-based longitudinal phase space prediction of particle accelerators, *Phys. Rev. Accel. Beams* 21, 112802 (2018)
- [2] Yongjun Li, Weixing Cheng, Li Hua Yu, and R. Rainer, Genetic algorithm enhanced by machine learning in dynamic aperture optimization, *Phys. Rev. Accel. Beams* 21, 054601 (2018)
- [3] E. Fol, J.M. Coello de Portugal, G. Franchetti, and R. Tomás, "Optics Corrections Using Machine Learning in the LHC", in *Proc. IPAC'19*, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 3990-3993. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-THPRB077
- [4] R. Nagaoka, Fast beam ion instability, *ICFA Beam Dyn. Newslett.* 69 (2016) 227-236, Trapped Ion Effects and Mitigation During High Current Operation in the Cornell DC Photoinjector, proceedings of IPAC, p 1735 (2016)
- [5] S.J. Full, A.C. Bartnik, I.V. Bazarov, J. Dobbins, B.M. Dunham, and G.H. Hoffstaetter, "Trapped Ion Effects and Mitigation During High Current Operation in the Cornell DC Photoinjector", in *Proc. 7th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'16)*, Busan, Korea, May 2016, paper TUPOR031, pp. 1735-1737, ISBN: 978-3-95450-147-2, doi:10.18429/JACoW-IPAC2016-TUPOR031, <http://jacow.org/ipac2016/papers/tupor031.pdf>, 2016.,
- [6] A. Gamelin, C. Bruni, and D. Radevych, Longitudinal and transverse dynamics of ions from residual gas in an electron accelerator, *Phys. Rev. Accel. Beams* 21 054401 (2018)
- [7] Z. Huang, G. Stupakov, Control and application of beam microbunching in high brightness linac-driven free electron lasers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 907, 2018, Pages 182-187,

[8] C. C. Hall, S. G. Biedron, A. L. Edelen, S. V. Milton, S. Benson, D. Douglas, R. Li, C. D. Tennant, and B. E. Carlsten, Measurement and simulation of the impact of coherent synchrotron radiation on the Jefferson Laboratory energy recovery linac electron beam, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 18, 030706

[9] J. L. Steinmann, M. Brosi, E. Bründermann, M. Caselle, S. Funkner, B. Kehrer, M. J. Nasse, G. Niehues, L. Rota, P. Schönfeldt, M. Schuh, M. Siegel, M. Weber and A.-S. Müller, turn by turn measurements for systematic investigations of microbunching instability, proceedings of 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources, 46 (2018)

[10] Illya Drebot. Electron beam dynamics with and without Compton back scattering. Other [cond-mat.other]. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. English. (NNT : 2013PA112262) . (tel-00920424)

[11] Alexis Gamelin. Collective effects in a transient microbunching regime and ion cloud mitigation in ThomX. Accelerator Physics [physics.acc-ph]. Université Paris-Saclay, 2018. English. (NNT : 2018SACLS276) . (tel-01934906)

[12], D. Ratner, C. Behrens, Y. Ding, Z. Huang, A. Marinelli, T. Maxwell, and F. Zhou, Time-resolved imaging of the microbunching instability and energy spread at the Linac Coherent Light Source, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 18, 030704 – Published 9 March 2015

[13] E. Roussel, C. Evain, C. Szwaj, S. Bielawski, J. Raasch, P. Thoma, A. Scheuring, M. Hofherr, K. Ilin, S. Wünsch, M. Siegel, M. Hosaka, N. Yamamoto, Y. Takashima, H. Zen, T. Konomi, M. Adachi, S. Kimura, and M. Katoh, Microbunching Instability in Relativistic Electron Bunches: Direct Observations of the Microstructures Using Ultrafast YBCO Detectors, *Phys. Rev. Lett.* 113, 094801

[14] J. Tang, W. Liu, R. Lemons, S. Vetter, T. Maxwell, F. Decker, A. Lutman, J. Krzywinski, G. Marcus, S. Moeller, D. Ratner, Z. Huang, and S. Carbajo, "Laguerre-Gaussian Mode Laser Heater for Microbunching Instability Suppression in Free Electron Lasers," in Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper SF31.2.

[15] ; Cheng-Ying Tsai, An alternative view of coherent synchrotron radiation induced microbunching development in multibend recirculation arcs, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 943, 2019, 162499,

[16] C. Evain, C. Szwaj, E. Roussel, J. Rodriguez, M. Le Parquier, M.-A. Tordeux, F. Ribeiro, M. Labat, N. Hubert, J.-B. Brubach, P. Roy & S. Bielawski, Stable coherent terahertz synchrotron radiation from controlled relativistic electron bunches, *Nature Physics* volume 15, pages635–639 (2019)

[17] K.L.F. Bane, G. Stupakov, Corrugated pipe as a beam dechirper, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 690, 2012, Pages 106-110,

[18] S. Bettoni, P. Craievich, A. A. Lutman, and M. Pedrozzi, Temporal profile measurements of relativistic electron bunch based on wakefield generation, *Phys. Rev. Accel. Beams* 19, 021304 – Published 25 February 2016

- [19] G. Penco, E. Allaria, I. Cudin, S. Di Mitri, D. Gauthier, S. Spampinati, M. Trovó, L. Giannessi, E. Roussel, S. Bettoni, P. Craievich, and E. Ferrari, Passive Linearization of the Magnetic Bunch Compression Using Self-Induced Fields, *Phys. Rev. Lett.* 119, 184802
- [20] Emilio A. Nanni et al., Terahertz-driven linear electron acceleration, *NATURE COMMUNICATIONS* 6, 8486 (2016)
- [21] Y. Wei, R. Ischebeck, M. Dehler, E. Ferrari, N. Hiller, S. Jamison, G. Xia, K. Hanahoe, Y. Li, J.D.A. Smith, C.P. Welsch, Investigations into dual-grating THz-driven accelerators, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 877 (2018) 173–177
- [22] Lemery F, Vinatier T, Mayet F, Assmann R, Baynard E, Demailly J, Dorda U, Lucas B, Pandey A –K and Pittman M 2019 35 megawatt multicycle THz pulses from a homemade periodically poled macrocrystal *Preprint arxiv:1909.07472*, soumis à Nature Physics
- [23] T. Vinatier, C. Bruni, R. W. Assmann, U. Dorda, F. Lemery, B. Marchetti, Feasibility study for a THz acceleration experiment on the PHIL facility at LAL, to be published in EAAC proceedings 2019
- [24] D. El Khechen, Y. Funakoshi, D. Jehanno, V. Kubytskyi, Y. Ohnishi, et al.. First beam loss measurements in the SuperKEKB positron ring using the fast luminosity monitor diamond sensors. *Phys.Rev.Accel.Beams*, 2019, 22 (6), pp.062801.
- [25] C.G. Pang, P. Bambade, S. Di Carlo, Y. Funakoshi, D. Jehanno, et al.. A fast luminosity monitor based on diamond detectors for the SuperKEKB collider. *Nucl.Instrum.Meth.A*, 2019, 931, pp.225-235.