

---

# Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

## *Accélérateurs et instrumentation associée*

---

### ADVANCED COMPACT COMPTON SOURCES

---

#### **Auteur principal**

Nom : MONARD Hugues

Affiliation : LAL (→ FLUO)

Email et coordonnées : monard@lal.in2p3.fr

#### **Co-auteurs**

*C. Bruni, I. Chaikovska, N. Delerue, M. Jacquet, S. Kubytski, H. Monard*

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à [PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR](mailto:PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR)  
avant le **1<sup>er</sup> novembre 2019**

## 1. Informations générales

**Titre : Advanced Compact Compton Sources**

**Acronyme : ACCS**

**Résumé** (max. 600 caractères espaces compris)

*Les sources Compton compactes sont à la croisée de domaines d'intérêts de l'In2p3 comme la physique des accélérateurs d'électrons, les sources d'électrons innovantes, les applications sociétales. Les sources Compton sont capables de produire des faisceaux de photons ayant des énergies allant des rayons X au rayons  $\gamma$ . Elles auront un rôle à jouer dans le paysage des sources de rayons X et  $\gamma$  en complément notamment des sources synchrotrons, grâce à leur compacité et leur faible coût et les caractéristiques physiques des faisceaux pour les utilisateurs. Le développement de ces sources est à la confluence des études de dynamique faisceaux dans un anneau (de petite taille), des développements technologiques pour stockée une forte puissance laser (contribution MOCAA), des études de photocathodes (contribution vide et surface MAVERICS).*

*L'utilisation des sources de rayons X participera au développement de l'innovation et de la connaissance au sens large. La caractérisation par rayons X est devenu incontournable dans beaucoup de domaines : en santé, en contrôle non destructifs pour l'industrie, pour le patrimoine culturel,... A plus long termes, une valorisation et une industrialisation est envisagée.*

*La construction de machine locale, comme ThomX, est un élément important dans le contexte du nouveau laboratoire FLUO, et ce projet peut être fait en complémentarité avec d'autres projets au sein de FLUO. ThomX pourra devenir une plateforme dont une partie du temps accueille des utilisateurs, et une autre partie contribue aux efforts de R&D des accélérateurs, des détecteurs, des sources Compton.*

**Préciser le domaine de recherche** (plusieurs choix possibles)

- *Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)*
- *Interaction lasers/faisceaux*
- *Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent*
- *Autre R&D spécifique : stockage puissance laser*

**Préciser la motivation principale visée par la contribution :**

- *Accélérateurs pour les sources de lumière*
- *Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)*

## 2. Description des objectifs scientifiques et techniques

*(2 pages max incl. figures)*

*Décrire les objectifs scientifiques et/ou techniques de la contribution proposée en en précisant les motivations*

Les sources Compton Compact (SCC) sont des nouveaux acteurs sur la scène qui compte des sources X de laboratoire (limité en flux) et les synchrotrons qui coûtent chers et ayant quelques rares ligne X, avec des accès limités. Les sources compton capable de fournir un faisceau de rayons X durs de très bonne qualité, apportent une compacité ( $\sim 100 \text{ m}^2$ ) , un coût de construction faible au regard des synchrotrons et une variation facile de l'énergie des X.

Grâce à la collaboration entre le Néel, l'ESRF, le LAMS et l'Inserm de Grenoble, un travail novateur d'étude de la ligne X abouti à une ligne versatile en termes de techniques d'analyse d'échantillons adapter à la brillance produite pour divers domaines comme l'imagerie et la radiothérapie ; l'imagerie par contraste de phase ou par diffraction pour l'analyse du patrimoine ; l'éclairement de grands échantillons (10 cm) en une seule fois ; les potentialités en spectroscopie de fluorescence (composition chimique). ThomX obtiendra des résultats très compétitifs avec certaines expériences faites sur ID17 [Jacquet & Suortti 2015, Jacquet 2016], ou même supérieurs au source X classiques [Jacquet & Bruni 2017].

Un autre paramètre sur lequel on peut espérer un gain est la charge au point d'interaction ainsi que la stabilité du flux de rayons X. Ces deux paramètres sont liés à la photocathode et à la dynamique du faisceau dans le linac et l'anneau. En effet, la charge au point d'interaction, est liée à la maximale extraite de la photocathode et à la manière dont il est transporté.

Les études sur les photocathodes associé à la contribution MAVERICS sont un développement possible pour les SCC en termes de charge maximale extraite, de stabilité de charge produite coup à coup, d'émittance , de durée de vie des photocathodes [Chanlek].

La motivation principale des études expérimentales et théoriques en dynamique faisceau sur ThomX est de renforcer notre connaissance des modèles théoriques existants par le rapprochement expérience/simulations. L'objectif étant de maintenir les propriétés du faisceau d'électrons dans l'anneau de stockage proche de celles de la sortie linac pour maximiser la brillance spectrale du rayonnement X. Ainsi, ThomX a la particularité d'être une machine compacte tout en nécessitant des travaux détaillés et approfondis comme sur les linac et les anneaux de nouvelle génération, ainsi que les linac à récupération d'énergie. Un travail important de rapprochement expérience/simulation afin de minimiser l'orbite de la cathode au point d'interaction, ainsi que la désadaptation longitudinale et transverse est prévue à la fois avec la caractérisation approfondie de la dynamique simple particule et une optimisation de type beam based combiné à du deep et du machine learning.

ThomX est aussi un lieu privilégié pour l'étude des effets collectifs. Plusieurs campagnes expérimentales seront menées dans différentes conditions afin de pleinement caractériser les effets collectifs : force de charge d'espace [SC\_esculap], ions cloud [FII, erI] en collaboration avec le groupe vide et surface du laboratoire, effet touschek multiple, diffusion Compton, l'instabilité de type microbunching généré par le CSR [CSR\_linac, CSR\_ERL , CSR\_KARA, CSR\_Xband, CSR\_cristal, CSR\_heater, CSR\_optics, CSR\_chaos] , l'impédance [Bane ; passive streaking, linearisation]. Une alternative au stockage de 1 nC à étudier est de pouvoir injecter deux paquets de 500pC. D'autres alternatives de manipulation d'espace des phases et d'optimisation de l'optique de la ligne de transfert sont aussi envisagées.

Plus globalement, l'expérience acquise lors de la construction des réglages et de l'opération d'un accélérateur sera très bénéfique à l'équipe du FLUO. La perte de compétence est un obstacle majeur à la construction d'accélérateur. Il est important que les équipes du FLUO acquièrent la culture opérationnelle d'un accélérateur d'envergure qui leur permettra de mieux se positionner lors des appels à projet de conception de futurs accélérateurs ou pour construire et opérer à Orsay l'accélérateur PERLE.

*Préciser comment ces objectifs se situent par rapport à l'état de l'art et au contexte international (ex : est-ce une contribution visant un développement théorique ou expérimental ? Est-elle dans la continuité de concepts ou technologies actuelles, ou bien est-ce une nouvelle approche conceptuelle ? )*

Depuis 2000, les SCC sont en développement vers des flux toujours plus élevés et nécessitent des efforts en termes de puissance laser stockée ( finesse de cavité, voir MOCAA), charge, fréquences d'injection, émittances, etc.) [Jacquet 2014]. Actuellement la seule machine Compton compacte en fonctionnement est celle du Lyncean Technologies Inc. [Bech et al. 2009] dont l'installation a démarré en 2002. Cette source délivre un flux d'environ  $10^{10}$ - $10^{11}$  photons par seconde, soit deux ordres de grandeur de moins que ce qui est prévu avec ThomX qui est le seul projet le plus avancé dans sa réalisation et son fonctionnement. Les premiers papiers décrivant les projets de SCC de haut flux ont été publiés il y a une dizaine d'années, parfois plus [Yu & Huang 2008, Bessonov et al. 2009, Bulyak et al. 2009, Graves et al. 2009]. Aucun n'a encore abouti aujourd'hui.

*Préciser les liens éventuels avec d'autres projets nationaux ou internationaux existants ou envisagés.*

Plusieurs projets de recherche au LAL avec la source ThomX en partenariat avec d'autres laboratoires ont déjà été élaborés :

- Avec Hélène Elleaume de l'Inserm à Grenoble, Alberto Bravin de la ligne biomédicale ID17 de l'ESRF et David Sarrut et Jean-Michel Létang de l'équipe *Tomographic*

- Imaging and Radiation Therapy* du centre CREATIS de Lyon, projet d'amélioration d'efficacité de la radiothérapie, thèse possible, comparaison SCC et Synchrotron
- Philippe Walter du Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale de Jussieu, Catherine Dejoie de la ligne de lumière (ID22) de l'ESRF et Pauline Martinetto de l'équipe *Matériaux, Rayonnements, Structure* de l'institut Néel ont proposé en 2017 une thèse commune ESRF/Néel/ThomX.

Des contacts pris avec Dominik Schaniel de l'équipe *Cristallographie et Relations Structure-Propriétés* (CRISP) du Laboratoire de Cristallographie, Résonance Magnétique et Modélisations (CRM<sup>2</sup>) de l'université de Lorraine à Nancy (pour la physique des matériaux) permettent un proposal pour un projet ITN (Innovative Training Network) en 2020 est actuellement en cours d'écriture.

Concernant la dynamique faisceau, des collaborations existent avec SOLEIL, et l'ESRF, ainsi que INFN Frascati et Milan, Daresbury (CLARA) et le CLEAR (CERN) pour la partie linac. Des échanges avec le CERN au sujet de l'impédance existent. D'autres collaborations avec le laboratoire PhLAM à Lille, ainsi que ANKA sont à envisager pour les études et les mesures d'instabilités CSR. PSI ainsi qu'ELETTRA sont aussi des collaborations à envisager.

### **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.*

Pour la ligne X, études conceptuelles déjà réalisées. Éléments optiques et mécaniques nécessaires à la mise en place des expériences : déjà dessinés et réalisés.

Partenaires potentiels : Institut Néel ; Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale de Jussieu ; ESRF ; Laboratoire de Cristallographie, Résonance Magnétique et Modélisations de Nancy ; Inserm de Grenoble ; Centre CREATIS de Lyon ; ...

Dans les domaines de l'imagerie et de la thérapie nous espérons obtenir des résultats compétitifs avec ceux obtenus actuellement sur la ligne biomédicale ID 17 de l'ESRF.

ThomX doit pouvoir tester l'efficacité de produits de contraste de haut Z (nanoparticules d'or par exemple) prometteurs en radiothérapie.

Dans les techniques de spectroscopie de fluorescence et de diffraction en faisceau rose ou monochromatique (études du patrimoine culturel, archéologie, science des matériaux), ThomX se situera, en termes de performance, entre les tubes X classiques et les sources synchrotron, avec le grand avantage d'être accordable en énergie (de 45 à 90 keV) et de pouvoir être intégré dans un laboratoire ou un musée grâce à sa taille modeste. Les expériences que nous mènerons utilisant ces techniques nous permettront de quantifier précisément les performances de notre source.

Concernant les effets collectifs, deux thèses théoriques ont eu lieu sur le sujet [ref Illya, Alexis]. Trois autres thèses sont actuellement en cours.

Au-delà de l'aspect démonstrateur, ThomX pourra devenir une plateforme du nouveau laboratoire FLUO accueillant, une partie du temps, des utilisateurs (certains payant) des rayons X, une fois que les modes de fonctionnement auront été identifiés et mis en place. Il faudra établir un modèle économique pour cette plateforme. Le budget de fonctionnement d'une telle plateforme est estimée à 240 k€/an, avec environ 4 à 5 FTE pour l'opération, la maintenance, les expériences. Le coût d'une journée d'expérience est estimé à environ 2.5 k€, avec une estimation de 100j par an (soit environ 300 €/h). Le mode utilisateurs externes sera établi après une durée estimée à environ 2 à 3 ans d'effort pour identifier les modes stables de fonctionnement en termes de flux.

Dans le domaine de l'héritage culturel, le réseau européen E-RIHS (<http://www.erihs.fr/>) peut être également une porte d'entrée pour ThomX : une partie du temps de faisceau participant à l'effort de recherche dans le patrimoine culturel. Des contacts ont aussi été pris avec le consortium Calypso+ (un consortium qui mets en relation 19 partenaires européens pour faciliter l'accès aux sources de lumières) afin de pouvoir offrir du temps de faisceau à des utilisateurs extérieurs en échange d'un support financier.

Une initiative récente (TomX : Tomographie X) se propose de créer une structure de recherche fédérative des moyens de l'université Paris-Saclay en y impliquant des industriels comme SAFRAN [tomX].

*Si possible, évaluer grossièrement l'ordre de grandeur du financement nécessaire pour mener le développement envisagé (coût complet, en distinguant équipements, consommables et ressources humaines).*

Au vu du programme ambitieux de mesure concernant la physique des accélérateurs, ainsi que les différents thèmes abordés, ont espérer 2 à 3 thèses par an, un post doc, encadrer par deux chercheurs à 50% de leur temps pour des thématiques accélérateurs et stockage de puissance laser (1.5 FTE total, réparti sur 3 chercheurs in2p3 soit environ 150 k€). Il faut également une peu de temps de techniciens diverses, qui regroupés font 0.5 FTE soit 50 k€/an. Les FTE de thèses et post sont supposés être financés par ailleurs.

D'autres thèses et post doc peuvent se faire autour des expériences de la ligne X, mais les compétences ne se trouvent pas à l'in2p3. Seul, une personne locale faisant le lien sera mobilisée à environ 50% de son temps. (0.5 FTE pour in2p3 soit 50 k€).

Au total 2 FTE chercheur, 0.5 FTE technicien.

Un budget mission pour échanger avec les autres accélérateurs internationaux ainsi que faire des expériences complémentaires est aussi nécessaire ainsi qu'un peu d'équipement/consommable.

En coût total :

150 keuros/ans personnel chercheur in2p3 (deux fois plus avec thèses et post doc)

50 k€/an personnel technicien in2p3

20 keuros/an missions,

20 k€ équipements/consommables.

## **Impact** **(0.5 page max.)**

*Décrire les retombées espérées pour le développement de futures installations de recherche basées sur des accélérateurs ou pour d'autres applications sociétales.  
Le cas échéant, préciser les partenariats industriels envisageables.*

Une version industrielle de ThomX pourrait voir le jour afin d'équiper des hôpitaux, musées, des laboratoires... Cette partie est un nouveau projet en soi qui dépasse le cadre du démonstrateur. Il faudra trouver un ou des industriels qui ont la capacité de pouvoir assembler la source de rayons X. L'association PIGES (<http://www.piges.eu/#>) pourrait être une porte d'entrée.

Une étude faite par la SATT de Paris Saclay, ainsi qu'une étude faite par Thalès semble montrer un intérêt d'une version industrielle pour des applications médicales. Thales est actuellement le partenaire industriel de ThomX, mais aucun signe fort n'est montré afin d'étudier une version industrielle.

On peut mentionner que l'entreprise Lyncean (<https://lynceantech.com/products/>) a installé une version industrielle d'une source Compton à l'université de Munich pour des applications bio-médicales (<https://www.tum.de/nc/en/about-tum/news/press-releases/details/32714/>).

Une fois que les modes de fonctionnement de ThomX seront stabilisés, travailler avec un industriel a du sens afin de fiabiliser la source, diminuer les coûts, rendre la version industrielle plus compacte et utilisable par des non-experts.

## Références

Bulyak E. *et al.* (2002). *Nucl. Instr. Meth. A* 487, 241–248.

Yu, P. & Huang, W. (2008). *Nucl. Instr. Meth. A* 592, 1–8.

Bech M. *et al.* (2009). *J. Synch. Rad.* 16, 43-47.

Bessonov, E.G. *et al.* (2009). *JINST* 4, P07017.

Graves, W.S. *et al.* (2009). *Nucl. Instr. Meth. A* 608, S103–S105.

Jacquet, M. (2014). *Nucl. Instr. Meth. B* 331, 1.

Jacquet, M. & Suortti, P. (2015). *Phys. Med.* 31, 596.

Jacquet, M. (2016). *Phys. Med.* 32, 1790.

Jacquet, M. & Bruni, C. (2017). *J. Synch. Rad.* 24, 312.

[tomX] Réponse à l'Appel à Manifestation d'Intérêt "Objets Interdisciplinaires" de l'Université Paris-Saclay

[Chanlek] quantum efficiency lifetime studies using photocathode preparation for ALICE, PhD, UNiv. Of Manchester, 2011.

[CSR\_Linac] 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,

[CSR\_ERL] **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**

[CSR\_KARA] 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)

[CSR\_Xband], **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**

[CSR\_cristal] E. Roussel, C. Evain, C. Sz waj, 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

[CSR\_heater] 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.

[CSR\_optics]; 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,

[CSR\_chaos] [C. Evain](#), [C. Sz waj](#), [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)

[SC\_esculap] K. Wang, E. Baynard, C. Bruni, K. Cassou, V. Chaumat, N. Delerue, J. Demailly, D. Douillet, N. El.Kamchi, D. Garzella, O. Guilbaud, S. Jenzer, S. Kazamias, V. Kubytskyi, P. Lepercq, B. Lucas, G. Maynard, O. Neveu, M. Pittman, R. Prazeres, H. Purwar, D. Ros, Longitudinal compression and transverse matching of electron bunch for external injection LPWA at ESCULAP, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 909, 2018, Pages 266-270,

[bane] 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,

[passive streaking] **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**

[linearisation] 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

[Illya] 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 ⟩](#)

[Alexis] 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 ⟩](#)