
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

MATERIAUX POUR ACCELERATEURS, VIDE DYNAMIQUE ET RECHERCHE
INNOVANTE SUR LES CAVITES SUPRACONDUCTRICES

Auteur principal

Nom : SATTONNAY Gaël

Affiliation : Université Paris Sud - CNRS - LAL/FLUO

Email et coordonnées : sattonnay@lal.in2p3.fr
Université Paris Sud – LAL- Bat 200 91405 Orsay

Co-auteurs

(liste des noms et affiliations)

- M. FOUAIDY: CNRS – IPNO/FLUO
- W. KAABI : CNRS – LAL/FLUO
- D. LONGUEVERGNE : CNRS – IPNO/FLUO
- G. MARTINET : CNRS – IPNO/FLUO
- B. MERCIER : CNRS – LAL/FLUO

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 : Matériaux pour Accélérateurs, Vide dynamique et Recherche Innovante sur les Cavités Supraconductrices

Acronyme : MAVERICS

Résumé (max. 600 caractères espaces compris)

Les performances actuelles et futures des accélérateurs se trouvent souvent limitées par les matériaux constituant les lignes faisceaux et cavités supraconductrices, ceux-ci étant soumis à des conditions extrêmes: ultra-vide, températures cryogéniques, champs électromagnétiques, irradiations. Ainsi, il est devenu indispensable d'améliorer les propriétés des matériaux et de conduire des analyses de leur surface afin d'augmenter les performances des futures machines. Ce projet se concentre sur deux axes de R&D: (i) matériaux innovants pour accélérateurs ; (ii) nouveaux moyens de caractérisation.

Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)

- *Supraconductivité accélérateur (aimants fort champ, cavités SRF...)*
- *Développement durable de la discipline (infrastructures technologiques, efficacité énergétique, fiabilité...) : développement de la plateforme de caractérisation PANAMA et du laboratoire Vide, Surfaces et Matériaux au sein de FLUO*
- *Autre R&D spécifique : Vide dynamique, désorptions stimulées, matériaux innovants (couches minces, dépôts, fabrication additive, photocathodes)*

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

- *Accélérateurs pour la physique nucléaire*
- *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)

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

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 ?)

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

Pour faire face aux prochains défis aussi bien fondamentaux (l'origine de la matière et l'énergie noire, l'énergie nucléaire...) que pratiques (coûts de constructions et d'opération) les technologies des accélérateurs du futur doivent évoluer: nouveaux matériaux, nouvelles approches de fabrication. Comme pour de nombreuses technologies de pointes, les performances des éléments impliqués dans la technologie des accélérateurs sont intimement liées aux caractéristiques et capacités des matériaux utilisés. Certaines des limitations sont directement liées aux performances de ces matériaux, aussi bien d'un point de vue technologique (par exemple nature chimique et contrôle fin des matériaux de base, qualités des soudures), que d'un point de vue plus fondamental (par exemple développement de nouveaux matériaux, mutations technologiques). De plus, l'emploi généralisé de couches minces (sources, coupleurs, cavités RF, enceintes à vide) demande de disposer d'outils d'études autrefois réservés aux études fondamentales dans le domaine des surfaces. Il apparaît clairement aujourd'hui que la maîtrise de ces matériaux conduira à une amélioration des dispositifs les utilisant. Cela mène dans nos laboratoires respectifs à un nombre croissant de programmes de R&D sur le développement de matériaux.

De nombreux phénomènes limitant les performances des accélérateurs sont directement liées aux interactions entre des particules (électrons, ions, photons) et la surface d'un matériau constituant les parois des chambres à vide ou des cavités supraconductrices radiofréquences par exemple. La nature du matériau ainsi que la morphologie et la chimie de surface peuvent ainsi directement impacter le comportement global des composants dans un accélérateur. Ces phénomènes limitant sont par exemple:

- Désorption stimulée conduisant à la dégradation du vide dans les lignes faisceaux;
- Effets collectifs (multipacting, nuages d'électrons) conduisant à l'instabilité des faisceaux de particules dans l'accélérateur ou à la limitation des performances des cavités accélératrices supraconductrices ;
- Entrée prématurée des vortex magnétiques dans le Niobium entraînant une réduction du champ accélérateur maximal atteignable ;
- Emission électronique induite par les champs électromagnétiques radiofréquences.

Comme premier exemple, on peut citer les collisionneurs circulaires tels que le LHC (Large Hadron Collider) et le FCC (Futur Collisionneur Circulaire). Les limitations actuelles des performances du LHC en terme de nombres de paquets de protons et d'énergie s'expliquent en partie par les effets collectifs conduisant à la formation de nuages d'électrons. Ceux-ci produisent des instabilités des faisceaux de protons, déposent une énergie thermique conséquente sur les surfaces

supraconductrices pouvant induire un quench des aimants et contribuent également à la dégradation du vide dans la machine. Ce nuage d'électrons est engendré par les interactions de particules avec les parois des lignes de faisceaux, associé à un effet de multiplication des électrons qui est directement lié aux propriétés des surfaces impactées. La compréhension de ses phénomènes est donc cruciale pour les futurs accélérateurs tel que le FCC : l'augmentation de l'énergie des particules ainsi que de l'intensité du faisceau dans le FCC par rapport au LHC ne peut que conduire à l'augmentation de ces phénomènes parasites. Des recherches intenses sont actuellement menées (notamment au CERN) pour limiter les nuages d'électrons : les solutions envisagées mettent en jeu le développement de nouveaux matériaux possédant des propriétés spécifiques de surface qui permettent de limiter ce phénomène. Il est à noter que nous collaborons déjà actuellement avec le CERN pour comprendre l'impact de ce phénomène sur le vide dynamique de la machine dans le cadre du projet FCC [1,2].

Comme deuxième exemple, on peut citer les collisionneurs linéaires tels que l'ILC (International Linear Collider) et la problématique des coûts d'investissement et de fonctionnement liés aux limitations des cavités accélératrices supraconductrices. Il est essentiel de pouvoir diminuer les coûts de production des cavités supraconductrices. Une partie de ces coûts provient d'un manque de fiabilité dans le procédé actuel de fabrication, même si celle-ci a été grandement augmentée ces dernières années. Par exemple, pour le projet XFEL (800 cavités), ayant pour spécification un champ accélérateur de 23.6 MV/m, 15% des cavités ont dues être retraitées) [3]. Au champ nominal spécifié pour l'ILC (plus de 10000 cavités), soit 31.5 MV/m, le taux de succès serait inférieur à 50% avec les méthodes de fabrication et de traitement de surface utilisées pour XFEL. Le retraitement engendrerait un surcoût ainsi qu'un retard très significatif. L'augmentation des performances des cavités et notamment l'étude de nouveaux procédés de traitements des matériaux (dopage) et des surfaces (dépôt de couches minces protectrices pouvant réduire les problèmes de multipacting, d'émission électronique et d'entrée prématurée des vortex magnétiques) est donc indispensable pour que de tels projets puissent voir le jour.

Il est donc nécessaire d'étudier ces phénomènes afin de proposer des solutions pour améliorer les performances globales des composants pour accélérateurs. Ces études passent par la caractérisation des matériaux d'intérêt (et plus particulièrement de leur surface), de leur comportement sous bombardement (effets de conditionnement, évolution des rendements de désorption, diminution des rendement d'émissions de particules secondaire). Dans ce contexte, il est donc indispensable d'étudier le comportement et les propriétés de nouveaux matériaux (dépôts, couches minces, multicouches). Ainsi, l'étude du conditionnement de cuivre sous irradiation, le comportement de couches de carbones amorphes déposées sur du cuivre pour limiter le multipacting ou de surfaces structurées avec des lasers sont des exemples d'axes de recherche importants. Dans le cas des cavités RF supraconductrices, on peut également citer l'amélioration du facteur de qualité des cavités RF en niobium par l'infusion de N₂ ou le dopage de surface ou encore le dépôt de multicouches ultra-minces de matériaux supraconducteurs. Il faut également évaluer l'impact de nouveaux procédés de fabrication tels que la fabrication additive métallique, dans un contexte accélérateur (ultra-vide, environnement extrême, température cryogénique), étude que nous avons déjà commencée [4].

Ainsi, notre activité vide, surface et matériaux peut être définie par l'ensemble des activités ayant pour but de traiter/modifier/caractériser la surface et/ou matériau d'un système accélérateur soumis à des conditions extrêmes : ultra-vide, températures cryogéniques, champs électromagnétiques, pertes faisceaux et effets collectifs. Le but est également d'alimenter et d'améliorer la collaboration entre les équipes R&D des laboratoires concernés par la refondation et

plus largement dans le cadre de l'Université Paris-Saclay (collaboration avec l'IRFU), afin de non seulement les rendre plus compétitifs vis-à-vis de l'international mais également d'être force de proposition pour les futurs grands projets en construction avec de nouvelles avancées technologiques dans le domaine des traitements de surface des cavités accélératrices supraconductrices, des lignes faisceaux (interaction vide-faisceau-surface) et des sources de particules (photo-cathodes, ions, ...). Enfin, la similitude des problématiques rencontrées dans le domaine des surfaces de matériaux pour les cavités supraconductrices (IPNO) ou le vide dynamique (vide surfaces et matériaux au LAL) nous conduit naturellement à regrouper nos compétences au sein d'une même équipe de R&D (MAVERICS) dans le futur pôle accélérateur de FLUO.

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.

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).

Les phénomènes impliqués concernant essentiellement la surface des matériaux, il faut donc tout d'abord développer les moyens de caractérisation « classique » des matériaux qui seront regroupés sur la plateforme PANAMA à Orsay (microscopie optique confocale, Spectroscopie de masse d'Emission des Ions Secondaires, Diffractomètre de RX rasant, Microscope électronique à balayage en cours d'acquisition et renforcement de la plateforme dans le futur avec un projet d'acquisition d'un microscope à force atomique) et sur laquelle la future équipe MAVERICS pourra s'appuyer pour mener à bien ses différentes études. Outre ces moyens de caractérisation, il s'agira également de développer ou d'améliorer des bâtis d'étude spécifiques : désorption ionique et électronique au travers des collaborations (plateforme ANDROMEDE à Orsay, GSI à Darmstadt, GANIL à Caen et CERN) et d'un projet ARIES, mesure du taux d'émission d'électrons secondaires (LAL), mesure des énergies de désorptions (LAL), bâtis multi-techniques (adaptation nécessaire d'un bâti XPS-RHEED en cours d'acquisition). Enfin, il faudra également renforcer nos moyens d'élaboration de couches minces soit en collaboration (bâti de dépôt ALD avec l'IRFU, HIPIMS avec le CERN et JLAB, Nb₃Sn FNAL, CORNELL), soit en interne (dépôts TiN et NEG au LAL). Cet ensemble pourrait constituer à terme une plateforme de recherche. Il est également important de noter que l'emplacement futur de la plateforme PANAMA et du labo vide et surface à proximité de l'IGLEX à Orsay permettra de former un ensemble à très fort potentiel pour la caractérisation des matériaux pour accélérateur en lien avec la plateforme ANDROMEDE (analyse de la chimie des surfaces) et THOMX (études matériaux par RX).

Enfin, à plus long terme, les activités de dépôts pourraient s'orienter également vers la réalisation de couches minces pour des applications photocathodes, afin d'équiper par exemple les canons à électrons de THOMX ou PERLE.

Calendrier indicatif des études principales:

- Avenir proche (1-5 ans) : désorption ionique, vide dynamique, SRF (traitements thermiques)
- Avenir plus lointain (5-10ans) : photo-cathodes (Upgrade ThomX, PERLE), SRF gun

Financement

Plateforme PANAMA :

Le financement SESAME de la région Ile de France pour le projet « Axe SRF » va contribuer à renforcer la plateforme PANAMA (acquisition d'un microscope électronique à Balayage pour 300 k€) et le CPER va permettre de financer les travaux d'infrastructure pour la rénovation des bâtiments qui doivent accueillir la future plateforme PANAMA et le laboratoire Vide et Surface et Matériaux. Toutefois, cette plateforme nécessitera à terme un budget de fonctionnement de l'ordre de 50 k€/an. Le coût des consommables est estimé à 8 k€/an.

Ressources humaines :

Ces études et le fonctionnement de la plateforme nécessitent également des personnels et requiert donc : (i) un Ingénieur de Recherche pour les études vide dynamique/désorption et la poursuite de la collaboration avec le CERN pour la prise de données sur le secteur pilote vide du LHC dans le cadre du projet FCC ; (ii) un Assistant Ingénieur ou un Ingénieur d'Etudes pour le développement, la mise au point et le fonctionnement du bâti multi-technique XPS/RHEED (avec extension aux photocathodes) et d'un bâti pour la désorption ionique en lien avec la plateforme ANDROMEDE. Enfin le recrutement de doctorants (au moins 2 dans les 5 ans) sur nos thématiques (vide dynamique, fabrication additive ou traitements thermiques du niobium) sera nécessaire.

Equipement :

Les bâtis spécifiques (multitechnique, désorption ionique) nécessiteront un investissement en équipement pour leur mise au point de l'ordre de 100 k€. Le projet d'achat un microscope à force atomique (AFM) pour renforcer la plateforme PANAMA nécessitera la rédaction d'un projet dans le cadre d'appels d'offres spécifiques (P2IO, SESAME ou ANR) pour son financement (de l'ordre de 200 k€).

Missions :

Un budget mission pour réaliser des expériences ou des réunions dans des laboratoires partenaires (GSI, GANIL, CERN) ainsi que communiquer et discuter nos résultats dans des conférences nationales ou internationales est également essentiel (5 à 10 k€/an).

4. 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.

Le développement de cette activité autour des matériaux pour accélérateurs et de sa plateforme dédiée permettra à terme d'être un support pour tout projet accélérateur nécessitant des besoins de caractérisation de surfaces et des matériaux. Grace aux démarches initiées pour regrouper et mutualiser nos efforts et notre démarche pour mieux comprendre les aspects matériaux (outils de caractérisation spécifiques, plateforme PANAMA) ce projet nous donnera une réactivité nouvelle face aux dernières innovations apparues dans le domaine des accélérateurs. Enfin, nous pourrons développer nos propres études afin d'être force de proposition sur les aspects matériaux dans le domaine des accélérateurs. Pour finir, il existe des liens avec d'autres projets/initiatives existantes :

- Innov. Pilot ARIES (en collaboration avec le CERN, le GANIL, GSI et UKRI-STFC) :
 - 1- Demands in vacuum science and technology for future particle accelerators
 - 2- Ion Stimulated molecular Desorption of future materials for accelerator
 - 3- Thermal Outgassing Database
- FCC : Vide dynamique, effets collectif interactions faisceaux/surface (B. Mercier, G. Sattonnay, LAL-FLUO: MoU FCC (collab. V. Baglin CERN), contribution prospective Next Particle Colliders (A. Faus-Golfe)
- Fabrication additive I3D metal (S. Jenzer LAL/FLUO) ;
- SRF: Traitement thermique du niobium, caractérisation et production de couches minces matériaux alternatifs et multi-couches (G. Martinet, M. Fouaidy, D. Longuevergne IPNO/FLUO) ;
- SRF Gun : matériau photo-cathode, interaction laser/matériau (M. Fouaidy, FLUO)
- PIP2 : cavité supra haute performance (Infusion N2) (D. Longuevergne, IPNO-FLUO)
- AXE SRF : Financement SESAME Ile de France, collaboration IRFU-FLUO
- THOMX : matériaux photo-cathodes (H. Monard, FLUO, Prospective « Advanced Compact Compton Sources »)
- PERLE : matériaux photo-cathodes, cavité supra haute performance (Dopage/infusion N2) (W. Kaabi, FLUO)

Références

[1] S. Bilgen, V. Baglin, C. Bruni, B. Mercier, and G. Sattonnay, "Dynamic Pressure in the LHC - Influence of Ions Induced by Ionization of Residual Gas by Both the Proton Beam and the Electron Cloud", in *Proc. IPAC'19*, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 1236-1239. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP004

[2] G. Sattonnay, V. Baglin, S. Bilgen, and B. Mercier, "DYVACS (DYnamic VACuum Simulation) Code: Calculation of Gas Density Profiles in Presence of Electron Cloud", in *Proc. IPAC'19*, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 1244-1247. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP007

[3] N. Walker and al., "Performance analysis of the european XFEL SRF cavities, from vertical test to operation in modules", Proceedings of LINAC2016, East Lansing, MI, USA, 2016.

[4] G. Sattonnay *et al.*, "Is it Possible to Use Additive Manufacturing for Accelerator UHV Beam Pipes?", in *Proc. IPAC'19*, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 2240-2243. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEXXPLS3