

---

# Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

## *Accélérateurs et instrumentation associée*

---

### LES DIAGNOSTICS FAISCEAUX POUR ACCELERATEUR

---

#### **Auteur principal**

#### **Rapporteur (proposition)**

Nom : F.Poirier

Affiliation : CNRS/DR17 - Arronax

Email et coordonnées : [poirier@arronax-nantes.fr](mailto:poirier@arronax-nantes.fr)

Arronax GIP, 1 rue Aronnax 44817 Saint-Herblain

#### **Co-auteurs**

*(liste des noms et affiliations)*

B.Thomas<sup>1</sup>, C. Jamet<sup>2</sup>, E.Bouquerel<sup>3</sup>, C.Maazouzi<sup>3</sup>, F.Osswald<sup>3</sup>, L.Perrot<sup>4</sup>, N.Delerue<sup>5</sup>, M. Serluca<sup>6</sup>, C. Thiebaut<sup>7</sup>, M. Verderi<sup>7</sup>, B.Cheymol<sup>8</sup>, D.Dauvergne<sup>8</sup>, M.L.Gallin-Martel<sup>8</sup>

<sup>1</sup>CENBG : Centre d'Etude Nucléaire de Bordeaux Gradignan

<sup>2</sup>GANIL : Grand accélérateur national d'ions lourds de Caen

<sup>3</sup>IPHC : Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien de Strasbourg

<sup>4</sup>IPNO : Institut de Physique et Nucléaire d'Orsay

<sup>5</sup>LAL : Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay

<sup>6</sup>LAPP : Laboratoire de Annecy de Physique des Particules

<sup>7</sup>LLR : Laboratoire Leprince Ringuet (Ecole polytechnique)

<sup>8</sup>LPSC : Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie de Grenoble

*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 : LES DIAGNOSTICS FAISCEAUX POUR ACCELERATEUR

---

**Acronyme :** DFA-RIF – (*Diagnostics Faisceaux pour Accélérateur - Réseau Instrumentation Faisceau*)

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

*L'instrumentation faisceaux, domaine essentiel des accélérateurs, est un des fondamentaux pour pouvoir évaluer les performances des accélérateurs et envisager les développements nécessaires pour atteindre ou dépasser les objectifs des machines. L'expertise dans ce domaine en est donc cruciale. La proposition ci-dessous s'inscrit dans le projet de développement des connaissances et préservation de l'expertise, encouragé par la stratégie européenne [1].*

*Ce document constitué par les acteurs expert du réseau instrumentation faisceau rapporte la vision et projets sur les diagnostics des accélérateurs et se veut soutien du développement des compétences du domaine.*

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

- *Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)*
- *Sources de particules (électrons, positrons, muons, protons, ions lourds stables, ions radioactifs...) et cibles associées*
- *Supraconductivité accélérateur (aimants fort champ, cavités SRF...)*
- *Accélération plasma (électrons, ions...) et interaction lasers/faisceaux*
- *Technologies RF innovantes (structures haut gradients, alimentations RF...)*

**X** *Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent*

- *Développement durable de la discipline (infrastructures technologiques, efficacité énergétique, fiabilité...)*
- *Autre R&D spécifique : (préciser)*

**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...)*

X *Autre : Global car support transverse du réseau, sur les projets instrumentations de faisceaux des accélérateurs de particules des laboratoires de l'IN2P3.*

## 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.*

*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.*

### 2.1) ACCELERATEURS

Les accélérateurs de particules, qu'ils soient pour la haute énergie, la physique nucléaire ou les domaines sociétaux et de santé cherchent l'efficacité de production de réactions et d'évènements au sein de leurs propres champs d'intérêt. La production de plus de réactions, de nouveaux types d'évènements et la poussée vers de nouvelles frontières, motivent une des orientations majeures des accélérateurs vers plus de puissance faisceau, en transportant plus de particules et/ou à des énergies plus élevées qu'auparavant. A ceci s'accompagnent des caractéristiques toujours plus exigeantes, pour les machines en cours de mise à jour ou de conception, par exemple une émittance (transverse et longitudinale) plus petite, des pertes plus faibles, des temps inter-paquets plus courts. Aussi, de nouvelles machines voient le jour dans les domaines de l'accélération laser-plasma, ciblant de larges gradients d'accélération à des taux de répétition réduits.

A l'IN2P3, les projets répondent à ces besoins présents et futurs à travers plusieurs installations sur le territoire national et des accélérateurs internationaux dans lesquels les personnels experts en instrumentations sont impliqués :

- pour les grands accélérateurs nationaux et internationaux : Spiral2, phase 1 pour l'accélération de H<sup>+</sup>, D<sup>+</sup> et ions, à 5mA.
- pour les accélérateurs de recherche tels qu'AIFIRA, ANAFIRE, CLIO, PHIL, PRECy, ThomX
- pour les accélérateurs du domaine sociétal et de santé tels que l'ESS, Myrrha, Arronax
- les nouveaux concepts d'accélérateur basés sur l'accélération dans un plasma par exemple Apollon, EuPRAXIA.
- pour les collisionneurs superKEKB, ILC, CLIC, FCC.

### 2.2) DIAGNOSTICS DE DEMAIN

Il est possible de recenser le besoin de mesurer les grandeurs physiques telles que l'intensité, les dimensions transverses et longitudinales, l'énergie, l'émittance des faisceaux, les pertes de particules et les impacts des réglages de phase de cavité. Pour ces mesures il existe une grande variété de diagnostics qui sont construits sur des techniques, des technologies et conceptions spécifiques et adaptées aux accélérateurs. La conception et construction doivent, quant à elles, prendre en compte, les instruments de mesures, la modélisation de ces instruments mais aussi l'électronique associée et les outils de traitement de signaux.

L'instrumentation faisceaux de demain doit pouvoir répondre aux futures exigences des accélérateurs précités. Elle doit être la moins intrusive possible au regard des faisceaux avec des résolutions contribuant à une connaissance précise des caractéristiques détaillées plus haut. La rapidité de la mesure est une spécification décisive, d'une part en vue de la différenciation des signaux de chaque paquet (à des taux très bas, <1Hz, ou élevés de répétition, 40 MHz) et d'autres parts dans l'acquisition et le traitement des signaux.

Les machines nécessitent aussi un grand nombre de diagnostics, souvent avec des dimensions compactes, qui doivent intégrer de plus en plus l'environnement radiologique et inclure les aspects de robustesse opérationnelle et de maintenances modérées. Toutes ces exigences imposent dans certains cas une étape dans la caractérisation de ces diagnostics comprenant les bancs de tests comme étapes essentielles de la R&D des diagnostics. La R&D sur les diagnostics étudie aussi, dans le cadre des nouvelles technologies de construction, l'impression additive (3D) et de manière indirecte l'utilisation des diagnostics dans un contexte de grands flux de données (big-data) et d'intelligence artificielle [4].

La fiabilisation des chaînes de mesure et de contrôle des caractéristiques faisceaux est aussi un point important. Les nouveaux accélérateurs haute-puissance nécessitent des taux de bon fonctionnement élevé, cela concerne entre autres les diagnostics et leur électronique associée.

Parallèlement, pour les futurs collisionneurs avec des faisceaux nanométriques au point d'interaction, il est aussi décisif de développer des capteurs de vibration dédiés au contrôle de la stabilisation active des aimants de focalisation finaux et dédiés à la stabilisation des faisceaux au moyen de techniques de type 'feedback' et 'feedforward' [10-11].

Bien que les diagnostics soient très diverses dans leurs objectifs et spécificités techniques et donc des projets envisagés, il est possible de rapprocher quelques exemples de technologies qui sont envisagées par les acteurs du réseau:

- La mesure de la position du faisceau via les Beam Position Monitor (BPM) qui doit permettre, à des intensités de faisceaux élevées, des mesures de positionnement transverse et servir comme mesures de réglage pour les phases des cavités. Cette problématique est particulièrement importante pour des accélérateurs tels que Spiral 2 [2], Myrrha [3] et ESS. Sur SPIRAL2, des optimisations et évolutions sont nécessaires pour augmenter la dynamique de mesure et aller vers plus de sensibilités pour répondre aux besoins des faibles intensités faisceaux pour les expériences telles que Super Separator Spectrometer (S3). Arronax met aussi en place des développements de BPM pour ses lignes de faisceaux fort courant. (Exemples du LAL, LPSC, IPNO et GANIL sont donnés plus bas).
- les émittance-mètres sont des éléments fondamentaux de la caractérisation du faisceau dans les phases de mise en route des accélérateurs et la validation de l'émittance pouvant servir à la modélisation de la dynamique transverse des faisceaux. Des projets de basse (<100keV) et moyenne énergie (<20MeV) nécessitant des développements sont proposés : ceux-ci s'établissent sur des systèmes à fentes. Pour les basses énergies, les émittance-mètres de type Alisson sont envisagés pour les besoins de caractérisation dans les injecteurs à haute intensité (Des exemples de l'IPHC, CENBG, LPSC et IPNO sont donnés plus bas).
- le développement des bancs de caractérisation constitue un intérêt spécifique dans les phases de développement de diagnostics. D'une part ces bancs s'ils font partie intégrante des phases de préparation et démarrage (« commissioning ») d'un accélérateur permettent un meilleur établissement des données de bases des opérations. D'autre part, les bancs de tests hors

faisceaux permettent d'étudier, spécifier et calibrer le fonctionnement des diagnostics. (Exemples de l'IPHC, IPNO, LAL)

- Les technologies à base de nouveaux matériaux sont explorées dans des buts d'application à des faisceaux d'ions pour machine à basse énergie (<250 MeV) et basse intensité, notamment avec des machines médicales innovantes. Cette exploration comprend autant la caractérisation des matériaux et tenu aux irradiations, tels que les diamants ou matières à faible pouvoir d'arrêt (polymères) que la définition de l'électronique rapide. (Exemples du LLR, LPSC, LPC)
- Les progrès à faire dans le domaine de capteurs de vibrations concernent le développement de nouvelles techniques de mesure telles que l'intégration de l'interférométrie au sein de ces dispositifs, mais également la miniaturisation, la protection dans des environnements fortement irradiés ou en présence de champs magnétiques et l'optimisation des fonctions de transfert pour le contrôle vibratoire en temps réel (Exemple du LAPP).

Pour répondre aux problématiques de la communauté française, ces technologies incitent à être explorées plus en avant avec une vision ou des applications communes et se positionnent clairement dans la construction du réseau. Plus concrètement, ces technologies sont dynamisées par les laboratoires et instituts mis en exemples ci-dessous.

### 2.3) PROPOSITION SPECIFIQUES CENTREES SUR LES LABORATOIRES:

#### BPM et Banc de tests

Dans le cadre de développements des projets d'accélérateurs de hautes intensités, il apparaît pertinent que des développements instrumentaux dédiés au pilotage des accélérateurs soient engagés. Il doit s'agir de couvrir avec plusieurs dispositifs de mesures telle la mesure de tailles transverses, de position et d'énergie. Robustesse, précision et standardisation doivent être assurées. Ces diagnostics peuvent être interceptifs ou non interceptifs. Les recherches doivent porter aussi bien sur le capteur que sur l'électronique associée. Ces recherches menées grâce aux compétences pluridisciplinaires et complémentaires des laboratoires de l'IN2P3 doivent permettre d'atteindre les objectifs visés. La contribution de l'IPNO et LPSC porte sur quelques aspects des diagnostics.

Ainsi, plusieurs propositions sont formulées [3]:

- réalisation d'un banc de test évolutif pour la caractérisation précise et exhaustive de l'électronique associée au capteur (BPM, BEM, BLM ...): le but de cette proposition de recherche est de fournir un banc de caractérisation de l'électronique d'acquisition sans que le capteur y soit associé. Cela permet d'éviter ainsi des problèmes de faisabilité liés au capteur. A titre d'exemple, un banc de caractérisation des BPM (sans le BPM) sera constitué de 5 voies synchrones avec des niveaux de puissance variant sur une dynamiques parfois très large (60dB), des niveaux très bas (jusqu'à -70dBm) et des déphasages complets (360°). Ce banc de test pourra également être utilisé pour caractériser entre autres les performances des BPM à cavités et des systèmes LLRF.
- évaluation de la faisabilité et étude de BPM à cavités pour les faisceaux intenses d'hadrons.
- évaluation de la mesure de la taille longitudinale du faisceau à partir des mesures BPM et des phases des cavités RF avoisinantes. Possibilité de corrélérer ces mesures à ceux des BPM

Dans un cadre d'application similaire, le GANIL propose d'explorer :

- la mise au point des mesures d'ellipticité pour étendre le domaine d'utilisation des BPM
- l'augmentation de la dynamique de mesure et l'amélioration de la sensibilité des électroniques de mesure

#### **Emittance-mètre faible courant et intégration**

Le CENBG indique que la mesure d'émission de faisceaux d'ions basse énergie (< 60 keV) et peu intenses (de 1 pA voire 1000 ions/s à 100 pA - 1 nA nominale) est un sujet de R&D. Dans le cadre du développement et la qualification d'un quadripôle radiofréquence refroidisseur/regroupeur destiné à mettre en forme un faisceau d'ions pour un piège de Penning, nous avons été amenés à utiliser un émission-mètre pour des mesures à basse énergie. Il serait intéressant de doter l'émission-mètre d'une auto-calibration des facteurs de correction pour la reconstruction des figures d'émission.

Pour assurer l'autonomie, il faudra mettre en place des moyens en contrôle-commande capable de piloter les séquences d'acquisition et le système de pompage. Plusieurs solutions sont envisageables pour leur coût et robustesse : CompactRio ou Redpitaya avec un développement sous Labview ou avec un environnement avancé tel que EPICS (Experimental Physics & Industrial Control system) ou TANGO (TAco Next Generation Object).

#### **Diagnostiques avec nouveaux matériaux**

Le développement de nouvelles générations d'accélérateurs d'ions, pour la physique (nucléaire - hautes énergies) ou pour les applications médicales (radiothérapies « flash »), crée la nécessité d'une surveillance très précise du faisceau avec un comptage rapide dans un environnement fortement radiatif. Les qualités intrinsèques du diamant (rapidité, faible courant de fuite, excellent rapport signal sur bruit, résistance aux radiations) en font un excellent candidat, proposé par le LPSC [5], pour répondre à de telles exigences en termes de conception de détecteurs innovants pour le contrôle en ligne de faisceaux pulsés. Aussi le LPC Caen est impliqué sur l'électronique de tels diagnostics. Pour les machines médicales ( $E < 250$  MeV), le LLR développe un diagnostic quasi-transparent basé sur l'émission d'électrons secondaires par des pistes métallisées déposées sur des polymères ultra-minces [6]. Notons que ce détecteur devrait pouvoir assurer un diagnostic des faisceaux envisagés pour les thérapies flash.

#### **Diagnostiques rapides et nouvelles technologies**

Les instruments devront donc être capables de mesurer des faisceaux de plus en plus petits et de plus en plus puissants. Ils devront être capables de s'adapter à des machines subissant des fluctuations d'un tir à l'autre. En même temps, ils devront être capables de fournir l'information de plus en plus rapidement. Leur conception et leur fonctionnement devra s'appuyer sur les dernières évolutions technologiques, en particulier celles de l'Industrie 4.0 (impression 3D).

Le LAL [4] est un initiateur sur ces technologies et construction, et envisage de développer des projets futurs sur les mesures de longueur, BPM et diagnostics capables de faire des mesures en un tir unique avec des charges relativement basses.

#### **Emittance-mètre et diagnostics de hautes puissances**

Parmi les diagnostics développés à l'IPHC pour les accélérateurs de faisceaux d'ions et pour la radiobiologie, deux systèmes, qui bénéficient d'un retour d'expérience de plusieurs années, présentent un potentiel important de progrès : D'une part, le scanner des distributions des particules dans l'espace des phases du faisceau pour la mesure des émissions transverses utilisé sur les lignes d'injection des accélérateurs, et d'autre part, le banc de test intermédiaire (BTI) utilisé pour caractériser les faisceaux d'ions en basse et moyenne énergie. Le BTI développé dans le cadre de

SPIRAL 2, est composé de 12 diagnostics [7]. L'émission-mètre basé sur le principe Allison d'échantillonnage par double fente qui analyse le faisceau avec un déflecteur électrostatique, présente une haute résolution en position et en angle et permet des caractérisations détaillées [8]. Ce système est prévu d'être employé sur plusieurs accélérateurs.

Une réflexion est actuellement aussi en cours sur la faisabilité et le développement de diagnostics faisceaux dans le cadre du projet européen ESSnuSB. Dans ce projet, qui est actuellement dans sa phase d'étude de conception (financement H2020), les diagnostics qui implémenteront les lignes, tels que celles qui conduiront le faisceau sur une station de 4 cibles, devront être capables de scanner, avec une grande efficacité, des paquets de pulses de protons d'une durée de 1,32 us (espacés de 0,650 ms) pour une intensité totale de  $2,2 \times 10^{14}$  particules (puissance totale 5MW).

#### Détecteurs de pertes faisceaux

La sensibilité et la précision des mesures des pertes faisceau sont très importantes sur les accélérateurs haute-puissances. Les exigences de sensibilités, rapidités et fiabilités sont nécessaires pour pouvoir maintenir ses accélérateurs dans un état de bon fonctionnement à court, moyen et long terme (GANIL).

## 2.4) CONCLUSION

Les diagnostics jouent un rôle important dans les accélérateurs et au cours de la décennie à venir ils seront amenés à s'adapter à des besoins nouveaux. Pour disposer des outils nécessaires aux accélérateurs à venir il est important de maintenir au sein de l'IN2P3 une R&D vigoureuse dans le domaine de l'instrumentation. L'identification des technologies émergentes, les compétences locales et une forte collaboration nationale permettront de répondre à ces besoins. Les projets émis à travers ce document constituent des outils fondamentaux dans la capacité à disposer de machines performantes et qui contribuent fortement à identifier les futures adaptations des accélérateurs.

## 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).*

NA



## 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.*

Les diagnostics faisceaux sont essentiels au développement et au bon fonctionnement des accélérateurs de particules. Forts des réalisations passées et actuelles et riche de leurs expériences, les experts nationaux du domaine sont sans cesse confrontés aux avancées technologiques et aux projets audacieux et doivent s'adapter et innover en permanence. Une réflexion sur les verrous technologiques a d'ores et déjà commencé. Elle s'établit ici à travers des visions et technologies communes et projets spécifiques des équipes de l'IN2P3, dont le réseau instrumentation faisceau s'en fait l'écho. Cette structuration se positionne aussi dans une compétition au niveau international et un contexte de collaboration européenne [9] sur les accélérateurs et spécifiquement dans le domaine des diagnostics. Les retombées espérées sont d'une part directe, c'est-à-dire une réponse circonstanciée et évolutive face aux besoins des accélérateurs et indirecte car la R&D étaye les connaissances de base qui impactent des domaines plus larges par exemple la santé et celui de la technologie des capteurs en général.

Étant donné la variété des compétences et technologies nécessaires, et l'exigence des acteurs du réseau sur l'instrumentation, ceux-ci ont des liens privilégiés avec les industriels du domaine. Un rapprochement, afin d'assurer un accompagnement industriel pourrait être envisagé dans le cadre du réseau. Ceci reste à être défini d'autant que quelques industriels ont formulés un intérêt face aux réseaux. Aussi, le réseau peut servir de point de contact pour des activités de formation, bénéfiques aux étudiants.

L'adaptation des ressources aux projets diagnostics variés et le développement de l'activité diagnostics sont des éléments primordiaux de la capacité des accélérateurs à atteindre leur performance, les maintenir et les améliorer. La valorisation des projets et personnels du domaine est aussi une composante de la bonne réussite des objectifs des accélérateurs.

## Références

[1] European Strategy Particle Physics Preparation Group, « Physics Briefing Book : Update 2020 », p.203, arXiv:1910.11775, Sept. 2019

[2] V. Langlois *et al*, « Study and Characterization of SPIRAL2 BPMs », WEPP001, IBIC2019, Malmö, Sweden.

[3] B. Cheymol *et al*, « Diagnostiques faisceaux pour les Accélérateurs Hadroniques a Hautes puissances », Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030, GT07, Nov. 2019.

[4] N. Delerue *et al*, « Vers l'instrumentation sur accélérateurs de 2030 », Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030, GT07, Nov. 2019.

- [5] M.L. Gallin-Martel *et al*, « Conception d'un moniteur faisceau basé sur l'utilisation de détecteurs diamants pour le contrôle en ligne de faisceaux pulsés : application à la radiolyse et aux radiothérapies « flash », Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030, GT07, Nov. 2019.
- [6] C. Thiebaux *et al*, « Development of a transparent profiler based on secondary electrons emission for charged particle beams », To be published in Proc. 22th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications (Cyclotrons'19), Cape Town, South Africa, Sep. 2019, <https://cyclotrons2019.vrws.de/papers/thb04.pdf>
- [7] P. Ausset, T.A Andre, C. Maazouzi *et al*, « Spiral 2 Injector Diagnostics », Proceedings of DIPAC09, <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/d09/papers/mopd27.pdf>
- [8] F.R. Osswald *et al*, « Transverse Phase Space Scanner Developments at IPHC », TUPP007, IBIC2019, Malmö, Sweden.
- [9] Accelerator Research and Innovation for European Science and Society (ARIES), « Work-Package 8 - Advanced Diagnostics at Accelerators », <http://aries.web.cern.ch/content/wp8>
- [10] G. Balik, B. Caron, B. Aimard, L. Brunetti, G. Deleglise, « Vibration Control Using a Dedicated Inertial Sensor », IEEE Sensor Journal ( Volume : 18, Issue: 1 ), 2018
- [11] D.R. Bett *et al*, « Compensation of orbit distortion due to quadrupole motion using feed-forward control at KEK ATF », NIM A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 895, 2018