
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

DIAGNOSTICS FAISCEAUX POUR LES ACCELERATEURS HADRONIQUE A HAUTE PUISSANCE

Auteur principal

Nom : Cheymol Benjamin

Affiliation : CNRS-LPSC

Email et coordonnées : cheymol@lpsc.in2p3.fr

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
Pôle Accélérateurs & Sources d'Ions
53 Avenue des Martyrs
38026 Grenoble cedex
FRANCE

Co-auteurs

(liste des noms et affiliations)

Luc Perrot CNRS/IN2P3/IPNO

Dominique Bondoux CNRS/IN2P3/LPSC

Mohammed Abdillah CNRS/IN2P3/IPNO

Guillaume Martinet CNRS/IN2P3/IPNO

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

Informations générales

Titre : DIAGNOSTICS FAISCEAUX POUR LES ACCELERATEURS HADRONIQUE A HAUTE PUISSANCE

Résumé

Le développement et la construction ces dernières années d'accélérateur linéaire de forte puissance tel que LINAC4 (CERN), ESS (Lund, Suède), SPIRAL2 (Caen, France) ou encore MYRRHA (Mol, Belgique) imposent des contraintes nouvelles sur l'ensemble des systèmes constituant ces accélérateurs. De même, une fiabilité fortement accrue est requise.

Dans ce contexte, les diagnostics faisceaux sont essentiels à la mise en route de ces accélérateurs afin d'assurer une opération fiable. Ils permettent notamment de :

- Caractériser les paramètres clés du faisceau, tel que l'émittance transverse, et de fournir des données d'entrée aux codes de simulations de transport ou de valider ces derniers.
- Régler les différents composants des accélérateurs tel que les cavités RF en mesurant la phase et l'énergie du faisceau ou les éléments de guidage magnétique en mesurant les profils transverses du faisceau ainsi que sa position le long de l'accélérateur.
- Et finalement de protéger les composants de l'accélérateur de toute perte involontaire du faisceau par l'emploi d'anneaux de pertes, de moniteurs de pertes et de mesures de courant en transmission.

Les densités de puissance importantes de ces nouveaux projets limitent le recours à des instruments interceptifs et/ou destructifs. Par conséquent, des méthodes limitant l'interaction du faisceau avec la matière doivent être déployées. Des instruments avec une plage dynamique élevée doivent aussi être développés pour permettre une caractérisation fine des paramètres des faisceaux. Enfin des mesures multidimensionnelles de l'émittance sont à développer ainsi que des mesures de profil longitudinal ayant une résolution inférieure à la picoseconde.

Préciser le domaine de recherche

- *Diagnostique faisceau, instrumentation et contrôle intelligent*

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*

1. Description des objectifs scientifiques et techniques

Dans ce cadre du projet MYRRHA/MINERVA nous proposons de développer plusieurs types de diagnostics pour la mise en route de l'accélérateur et son opération couvrant une gamme d'énergie de 1.5 à 600 MeV. Ces développements porteront sur l'ensemble des sous-systèmes constituant ces diagnostics, à savoir le(s) détecteur(s), la mécanique, l'électronique et le contrôle commande afin de fournir une solution totalement intégrée.

Émittance-mètre

Pour des accélérateurs comme MYRRHA, la mise en service des premières sections accélératrices est une phase importante d'un tel projet permettant à la fois de valider les simulations de dynamiques faisceau, fournir des données d'entrées pour ces dernières, tester tous les sous-systèmes de l'accélérateur avec en point de mire l'augmentation de la fiabilité.

Lors de cette phase, les paramètres du faisceau sont généralement mesurés par une série d'instruments installés dans un banc test mobile, dont le ou les émittance-mètres sont un des éléments fondamentaux. Un système de type fente-grille (voir figure 1 pour le principe) similaire à celui développé pour le projet LINAC4 au CERN [1], est à concevoir. Il permettra de mesurer les émittances transverse avec une précision importante, un cycle utile élevé et pour des énergies de 1,5 à 17 MeV, cela pour une intensité maximale de 5 mA.

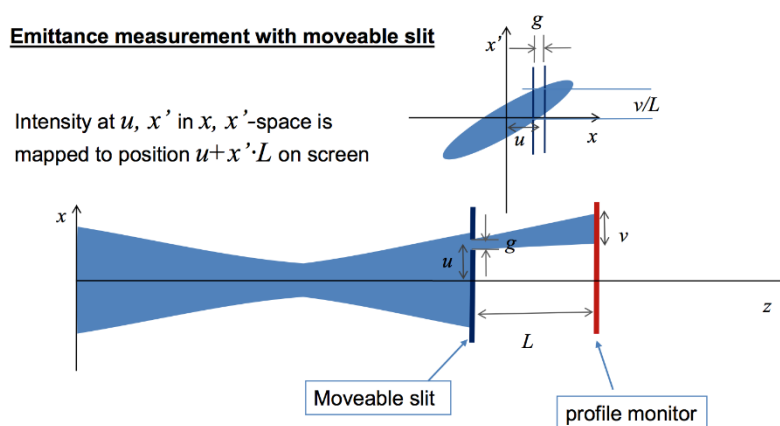


Figure 1 : Principe de fonction d'un émittance-mètre fente/grille

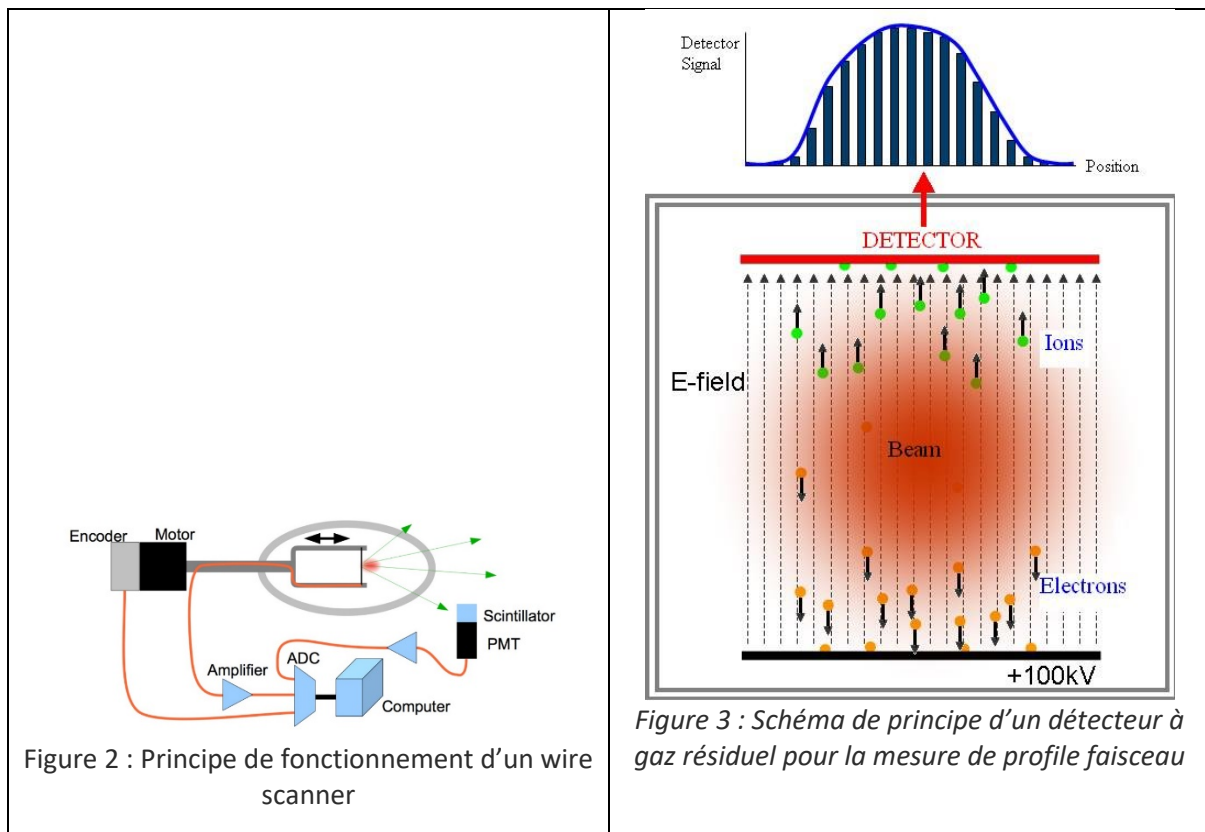
En parallèle et pour répondre aux demandes de caractérisation fine des faisceaux de particules, des émittance-mètres à 4 dimensions sont à développer, à la fois pour les lignes basse énergie ($E_{\text{faisceau}} < 100$ keV) et pour des lignes à plus haute énergie (jusqu'à quelques MeV). En effet, la méthode classique de mesure avec des détecteurs de type poivrière n'est pas adapté pour des énergie élevées (au-delà du MeV) et pour des puissances importantes. Un programme de recherche et développement doit être mis en place pour répondre à cette problématique. Une des voies envisagée est de de faire une mise à jour de l'émittance mètre fente-grille par l'ajout de fentes supplémentaire et ainsi mesure

l'espace des phases en 4 dimensions, au détriment de la rapidité de mesure. Un développement spécifique devra être mené pour accroître la rapidité de la prise de mesure.

Profil transverse

Plusieurs moniteurs permettant la reconstruction de l'émittance transverse du faisceau devront être installés tout au long de la ligne accélératrice et ainsi permettre le réglage de l'accélérateur. Ces diagnostics devront répondre à plusieurs critères notamment, avoir une plage dynamique importante ($>10^4$), couvrir des cycles utiles de la machine de 10^{-4} à 1 (CW) et une maintenance faible du fait de leurs installations en environnement cryogénique.

Pour répondre à ces critères, plusieurs instruments pourront être couplés. Ainsi il est envisageable de concevoir un module unique où un wire scanner (voir figure 2) et des profileurs non invasifs comme les IPM (Ionization Profile Monitor, voir figure 3) pourront être installés. Une R&D devra être menée pour estimer l'influence des paramètres pouvant influencer la mesure, telle que la charge d'espace, et définir le meilleur design des détecteurs.



En parallèle, des solutions permettant de reconstruire le profil 2D du faisceau par tomographie seront à développer, basées sur des profileurs non interceptifs.

Mesures de position BPM (IPNO)

Pour la thématique des diagnostics « Beam Position Monitor » (BPM), il émerge les propositions suivantes :

Il semble pertinent de réaliser la R&D d'un banc de test évolutif pour la caractérisation précise et exhaustive de l'électronique associée aux capteurs (BPM, BEM, BLM ...). L'objectif est ici de fournir un banc de caractérisation de l'électronique d'acquisition sans que le capteur y soit associé. Cela permet de découpler la partie faisabilité du capteur de l'électronique. Ce banc de caractérisation des BPM (sans le BPM) pourrait être constitué de cinq voies synchrones avec des niveaux de puissance variant sur une dynamique parfois très large (60dB) et des niveaux très bas (jusqu'à -70dBm) pour des déphasages complets (360°). Ce banc de test pourrait également être utilisé afin de caractériser notamment les performances des BPM à cavités et des systèmes LLRF.

Une autre voie d'intérêt concerne l'étude de BPM à cavités. En effet, ces CBPM (cavités BPM) ont été développées dans le cadre de XFEL et donnent de très bons résultats pour les faisceaux d'électrons relativistes que ce soit en mesure de position qu'en angle de déviation. Le monitoring de faisceaux intenses de hadrons reste une problématique importante notamment en fonctionnement nominal. La proposition vise d'une part à évaluer la faisabilité de ce type de diagnostics pour ces faisceaux et de déterminer un domaine d'application (charge par bunch, gamme d'énergie et d'intensité, taux de répétition, etc...) en exploitation. Cette étude doit permettre d'évaluer dans un second temps un premier concept de cavité pour ces applications, de lancer en fabrication un premier prototype puis d'effectuer des tests sur les installations disponibles. L'étude concerne le design et le couplage électromagnétique avec le faisceau, mais également le traitement électronique aboutissant au conditionnement des signaux (démodulation I/Q, amplitude, rapport signal sur bruit, résolution accessible).

Ces deux propositions sont reprises de celle du réseau instrumentation faisceau.

Mesure de profil longitudinal

La mise en service d'accélérateur linéaire ayant une énergie supérieure à la centaine de MeV a mis en évidence l'absence de technique pour mesurer le profil longitudinal de faisceaux de protons à haute énergie avec suffisamment de précision. Dans l'état de l'art, Le BSM (Bunch Shape Monitor) développé par S. Feshenko équipe la majorité des LINACs (SNS, Linac4, ESS, Jparc...) et donne d'excellents résultats pour des longueurs de paquets supérieures à quelques picosecondes [2]. Il apparaît nécessaire de disposer de moyen de mesure ayant une résolution inférieure ou égal à la picoseconde.

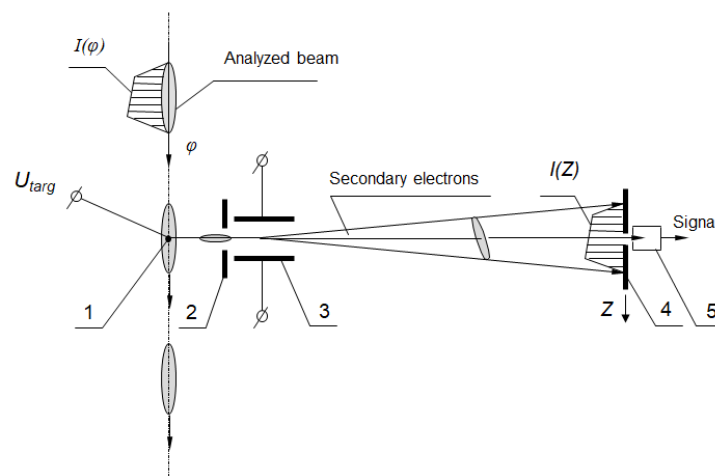


Figure 4 Principe du BSM (Bunch Shape Monitor) : 1 – la cible, 2 – le collimateur d'entrée, 3 – un déflecteur RF combiné avec une lentille électrostatique, 4 - le collimateur de sortie, 5 – le point de collection des électrons

Des solutions existent pour des faisceaux d'électrons relativistes ou ultra relativistes, mais une phase de R&D importante est nécessaire pour avoir un détecteur équivalent pour des accélérateurs linéaires de protons couvrant la gamme d'énergie de 500 MeV à 5 GeV, avec, dans un premier, une étude de faisabilité afin d'identifier les techniques de mesure utilisées dans les accélérateurs léptonique pouvant être adapté à des faisceaux de protons. En fonction des résultats de cette étude, l'option la plus favorable sera adapté au conditions des accélérateurs hadroniques et devra être validé sur des faisceaux d'électrons de basse énergie.

2. Développements associés, calendrier et budget indicatifs

2.1 Emission mètre

Le temps de travail estimé pour livrer un émission mètre de type fente-grille est de l'ordre de 24 mois, dont une phase de dimensionnement d'environ 6 mois permettant de définir le meilleur design pour minimiser les erreurs de mesures et fournir les paramètres de design de l'électronique. En terme de ressource humaine, environ 40 homme-mois seront nécessaires pour finaliser ce projet (en incluant aussi le contrôle-commande), avec un budget matériel d'environ 200 k€ pour la construction d'un système complet mesurant les 2 plans transverses.

Afin de développer un nouveau système pour mesurer l'émission en 4 dimensions, il est envisagé de recruter un doctorant (environ 100 k€) et d'allouer 50 k€ en matériel à ce projet pour réaliser des tests sur prototypes.

2.2 Profil transverse

Pour cette tâche, à savoir développer des moniteurs de profil transverse pour l'accélérateur MYRRHA, la durée du projet est estimée à environ 5 ans avec comme livrable finale un prototype fonctionnel. Un doctorant devra être recruté pour définir les meilleures techniques de mesure en tenant compte des spécificités de l'accélérateur et dimensionner les instruments ; environ 100 k€ seront nécessaires à la construction du prototype.

3. Impact

Le point de mire de ces développements de diagnostics faisceaux dédiés aux accélérateurs de haute puissance est de se donner des moyens de mesure robustes pour l'augmentation de la fiabilité des machines. De plus, ces R&D portant sur les diagnostics faisceaux doivent assurer une montée en compétence des personnels des laboratoires engagés et assurer la formation d'étudiants du niveau M1 au doctorat de nos laboratoires.

Des partenariats doivent être envisagés avec les entreprises gravitant autour des accélérateurs pour leur permettre d'accroître leur visibilité dans le domaine des capteurs, de la mécanique et en électronique accélérateurs.

Références

- [1] B.Cheymol, "Development of beam transverse profile and émittance monitors for the CERN LINAC4"
- [2] A.V. Feschenko, AIP Conf. Proc. 281, 185 (1992).