

# ACCELERATEURS: INSTRUMENTATION DES FAISCEAUX

PATRICK AUSSET

*Institut de Physique Nucléaire  
15 rue Georges Clémenceau  
91406 Orsay Cedex*

## **Résumé**

Ce cours a pour but de décrire les principales techniques de diagnostics des faisceaux de particules accélérées. L'accent est mis sur les concepts car la technologie est essentiellement liée à l'électronique et est en évolution permanente. Les diagnostics décrits et l'instrumentation sont ceux qui sont principalement employés dans les machines circulaires ou linéaires ainsi que dans les lignes de transport. En conclusion l'évolution probable de l'instrumentation pour les prochaines années est indiquée.

## **Abstract**

The intent of this lecture is to present an overview of the most significant diagnostics on operation for accelerated particles beam in circular and linear accelerators and in primary beam transport lines. Due to the continuous development of the electronics hardware, emphasis is on the physical concepts of those diagnostics. Finally the most likely perspectives for improvement of the instrumentation in the next future are pointed out.

<b>Préambule</b> .....	3
<b>1. Introduction</b> .....	3
<b>2. Les mesures à effectuer</b> .....	4
<b>3. Les caractéristiques du faisceau</b> .....	6
3.1 Champ électromagnétique attaché au faisceau. ....	6
3.2 Champ électromagnétique dû au rayonnement synchrotron.....	7
3.3 Caractéristiques énergétiques et pouvoir d'ionisation du faisceau. ....	8
<b>4. Exemples de diagnostics de faisceau</b> .....	8
4.1 Mesure de l'intensité.....	8
4.1.1. <i>Mesure destructive de l'intensité</i> .....	8
4.1.2. <i>Mesure non destructive de l'intensité</i> .....	9
4.2 Mesure de la position du faisceau.....	10
4.2.1 <i>Pick-up électrostatique</i> .....	10
4.2.2. <i>Electrode Pick-up électromagnétique</i> . ....	12
4.2.3. <i>Electrode Pick up magnétique</i> .....	13
4.3 Profils transverses de faisceau.....	13
4.3.1. <i>Chambres à ionisation multi - fils</i> .....	13
4.3.2. <i>Chambres à émission secondaire</i> .....	13
4.3.3. <i>Wire - scanners</i> .....	13
4.3.4. <i>Ecrans scintillants</i> .....	14
4.3.5. <i>Méthodes optiques</i> . ....	14
4.4. Mesure de l'émittance transverse .....	17
4.5. Mesure de l'émittance longitudinale .....	18
<b>5. Mesure des pertes de faisceau</b> .....	19
<b>6. Mesures plus complexes.</b> .....	19
6.1 Mesure du nombre d'onde. Fonction de transfert du faisceau .....	19
6.2 Analyse Schottky du faisceau .....	20
<b>7. Conclusion</b> .....	21
<b>Bibliographie</b> .....	21

## Préambule

Les diagnostics de faisceaux de particules accélérées sont devenus des constituants essentiels des machines modernes. En effet ces dispositifs permettent d'observer le comportement réel du faisceau et de mesurer les écarts des grandeurs par rapport aux valeurs nominales prévues par les simulations de dynamique du faisceau. Ils sont généralement constitués d'un capteur interagissant avec le faisceau associé à une électronique d'amplification et de traitement des signaux. Ceux-ci sont maintenant pratiquement toujours transmis au système général de Contrôles et Commandes de l'installation pour effectuer, si besoin, manuellement ou automatiquement les corrections indispensables au bon fonctionnement de ces machines.

## 1. Introduction

La multiplicité des types de machines utilisées dans les installations modernes, la nécessaire adaptation des faisceaux au sens de la dynamique de faisceau entre ces machines, les modes de fonctionnement de plus en plus nombreux et les demandes de faisceau de caractéristiques très différentes sur cible ont conduit à développer une instrumentation et des diagnostics de faisceau adaptés pouvant couvrir une grande dynamique d'utilisation tant du point de vue de la gamme de mesure que de la bande passante.

Cependant, l'expérience acquise dans les différents laboratoires permet de distinguer aisément plusieurs classes d'exigences :

- Les diagnostics permettant d'atteindre rapidement les caractéristiques du faisceau voisines du nominal et essentielles à une vérification rapide du bon fonctionnement des machines. On demande alors à ces diagnostics d'effectuer les mesures « on line » et donc de perturber le moins possible les caractéristiques du faisceau.
- Les diagnostics et l'instrumentation permettant un contrôle permanent des paramètres et de la stabilité du faisceau pendant le fonctionnement journalier des machines. Ces diagnostics sont également utilisés pour effectuer les changements des modes de fonctionnement des machines. Ils peuvent également permettre de remédier à des dysfonctionnements simples et de remettre en route l'accélérateur le plus rapidement possible. Les diagnostics utilisés ici seront non destructifs du faisceau.
- L'instrumentation « sophistiquée » utilisée pour la mise en fonctionnement des machines ou celle d'un nouveau composant, l'amélioration des performances ou l'analyse poussée d'un dysfonctionnement de la machine. L'exigence première est ici de fournir une mesure fiable au prix de la destruction du faisceau. Ces diagnostics ne sont pas utilisés en fonctionnement normal des machines.

La frontière d'utilisation des diagnostics n'est évidemment pas très nette. En outre, il n'existe pas plus de diagnostics « spéciaux » pour les synchrotrons que pour les Linac ou encore des diagnostics uniquement utilisés pour les faisceaux d'électrons ou pour les faisceaux de hadrons. Il vaut mieux s'intéresser aux mesures à effectuer et aux propriétés physiques du faisceau permettant de le diagnostiquer.

Le faisceau sous sa forme la plus générale peut être décrit comme suit:

- Il circule à l'intérieur d'un tube à vide. La pression résiduelle dépend de la nature des particules, de leur énergie et du type de machine.

- Il est constitué d'une succession de micro-paquets de particules (bunch en anglais). Ils contiennent la plus petite quantité de particules accélérée par la machine.
- La période des micro-paquets est égale à celle de la tension accélératrice des cavités de l'accélérateur ou à l'un de ses multiples. On assimile souvent la forme de ces micro-paquets à une gaussienne pour la commodité des calculs.
- Les micro-paquets peuvent être regroupés pour les besoins des expérimentateurs par divers dispositifs de l'accélérateur sous forme de macro-pulse. On peut citer par exemple : pulsation de la source, chopper de faisceau, kicker rapide....

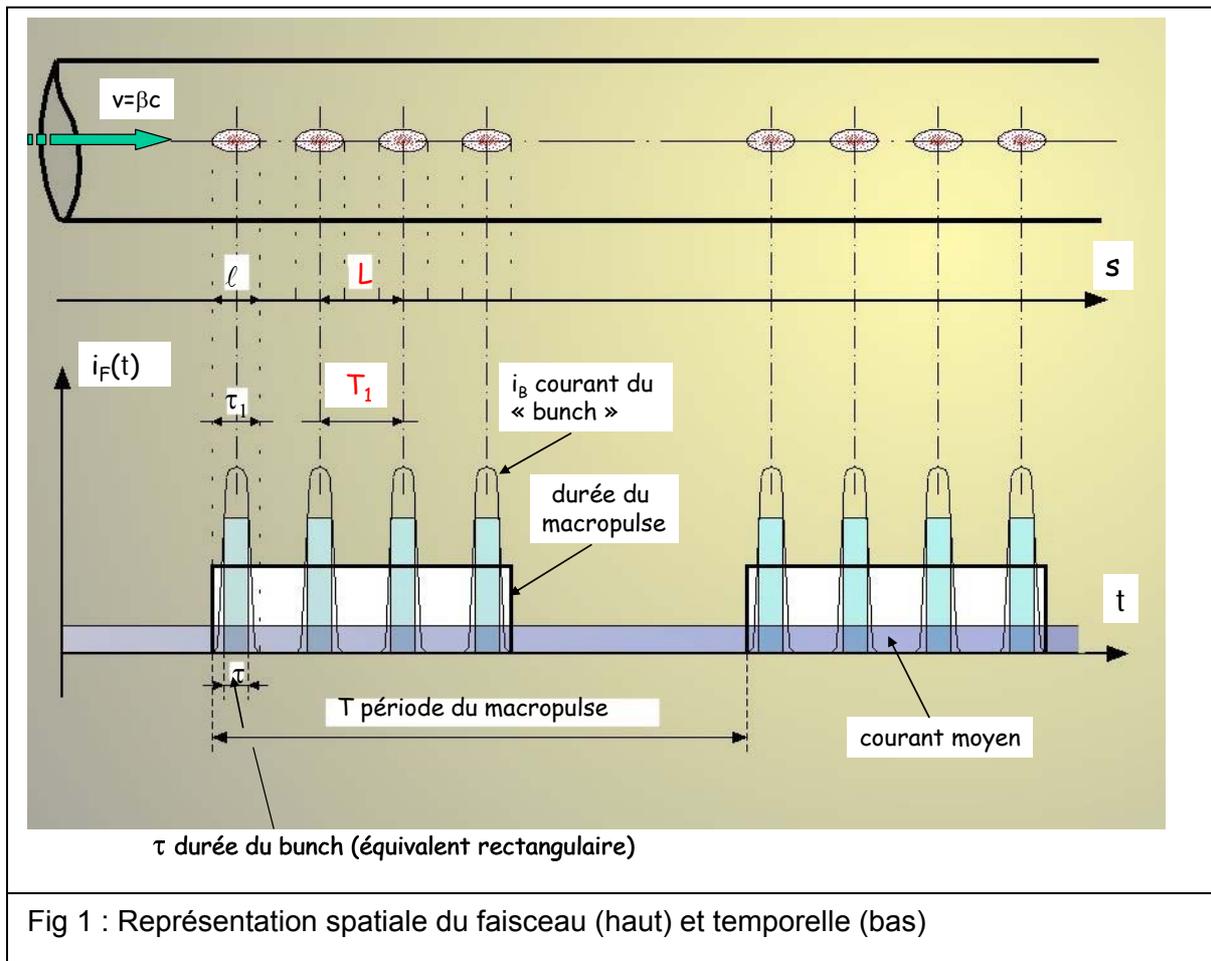


Fig 1 : Représentation spatiale du faisceau (haut) et temporelle (bas)

En physique des accélérateurs, le faisceau est repéré dans un système orthogonal à trois axes :

- L'axe longitudinal parallèle à la direction de déplacement des particules sur lequel on mesure les caractéristiques temporelles du faisceau.
- Les deux axes  $x$  « horizontal » et  $y$  « vertical » situés dans le plan transverse à la direction de déplacement des particules sur lesquels on mesure les caractéristiques spatiales du faisceau.

Les techniques d'observation sont très différentes entre ces deux catégories de mesures.

## 2. Les mesures à effectuer

- Intensité ou nombre de charges du faisceau

- Caractéristiques spatiales du faisceau : Profils transverses horizontal et vertical:

Les profils transverses horizontal et vertical du faisceau sont mesurés par la projection de la densité de particules sur les axes transverses à la direction de propagation du faisceau.

- Position transverse du centre de gravité du faisceau :

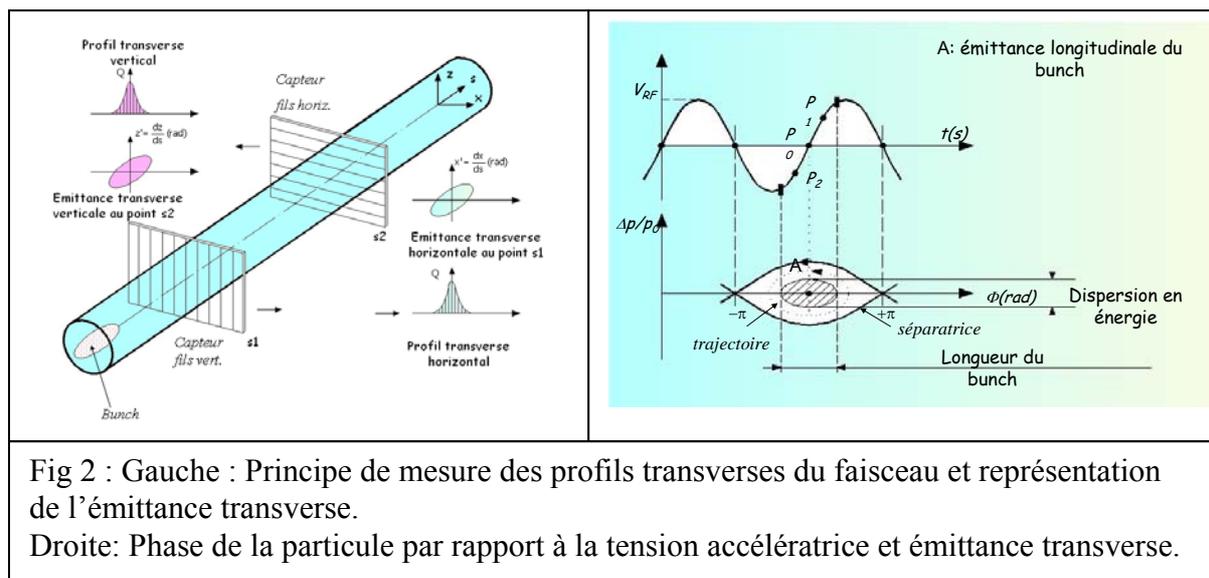
Elle est définie par ses coordonnées sur les axes transverses horizontal et vertical. Elle peut être déduite de la mesure des profils mais elle est généralement mesurée à l'aide de diagnostics spécifiques. Cette mesure est de la plus haute importance pour l'optimisation du fonctionnement des machines circulaires et en particulier des synchrotrons. Elle est dans ce dernier cas à la base d'autres mesures telles que l'orbite fermée, le nombre d'onde, la chromaticité...

- Caractéristiques temporelles du faisceau : Phase

Cette mesure est en fait celle du profil temporel du faisceau (donc de sa structure temporelle). La mesure consiste en général à mesurer l'écart en temps entre la tension accélératrice radiofréquence pour une amplitude sélectionnée et le maximum mesuré pour l'amplitude du bunch.

- Émittance transverse et émittance longitudinale du faisceau

Un faisceau peut être décrit comme un ensemble de particules ayant chacune leurs coordonnées dans l'espace :  $(x, p_x, y, p_y, W, \varnothing)$  où  $x, p_x$  et  $y, p_y$  sont les coordonnées de la position et de la quantité de mouvement dans le plan transverse à la direction de propagation du faisceau.  $W$  et  $\varnothing$  sont les écarts en énergie et en phase de la particule considérée par rapport à la particule synchrone. En pratique, on ne mesure pas  $p_x$  et  $p_y$  mais les divergences horizontale et verticale données par les rapports de vitesse  $x' = v_x / v_z$  et  $y' = v_y / v_z$ . Les émittances transverses horizontale et verticale du faisceau sont les surfaces occupées par les particules dans les espaces  $(x, x')$  et  $(y, y')$ . Les émittances transverses représentent en fait la « facilité » avec laquelle le faisceau peut être transporté. L'émittance longitudinale est en général plutôt repérée dans l'espace  $\Delta p/p_0$  et  $\varnothing$ .



- Énergie du faisceau :

C'est naturellement avec la dispersion d'énergie une grandeur importante pour le réglage de l'accélérateur.

- Perte de faisceau :

Cette mesure prend de plus en plus d'importance pour l'optimisation du rendement de l'accélération et du transport des faisceaux avec l'augmentation constante de l'intensité des faisceaux maintenant accélérés. Elle sert souvent de donnée d'entrée dans les systèmes de protection du matériel des machines.

- Autres mesures :

Des mesures spécifiques aux machines sont parfois nécessaires : nombre d'onde par exemple dans les synchrotrons. Ces mesures sont souvent déduites de celles fournies par les diagnostics cités précédemment.

Enfin d'autres mesures particulières dépendant de l'utilisation des faisceaux doivent parfois être effectuées : état de charges des particules, polarisation du faisceau...

### 3. Les caractéristiques du faisceau

#### 3.1 Champ électromagnétique attaché au faisceau.

Ces caractéristiques sont particulièrement intéressantes pour la construction de détecteurs de faisceaux non destructifs du faisceau. Ce sont les détecteurs qui ne présentent pas, à quelques exceptions près, de matière au faisceau dans laquelle celui-ci perdrait une part importante de son énergie ainsi que de ses caractéristiques optiques (straggling multiple) se traduisant par une augmentation de son émittance transverse.

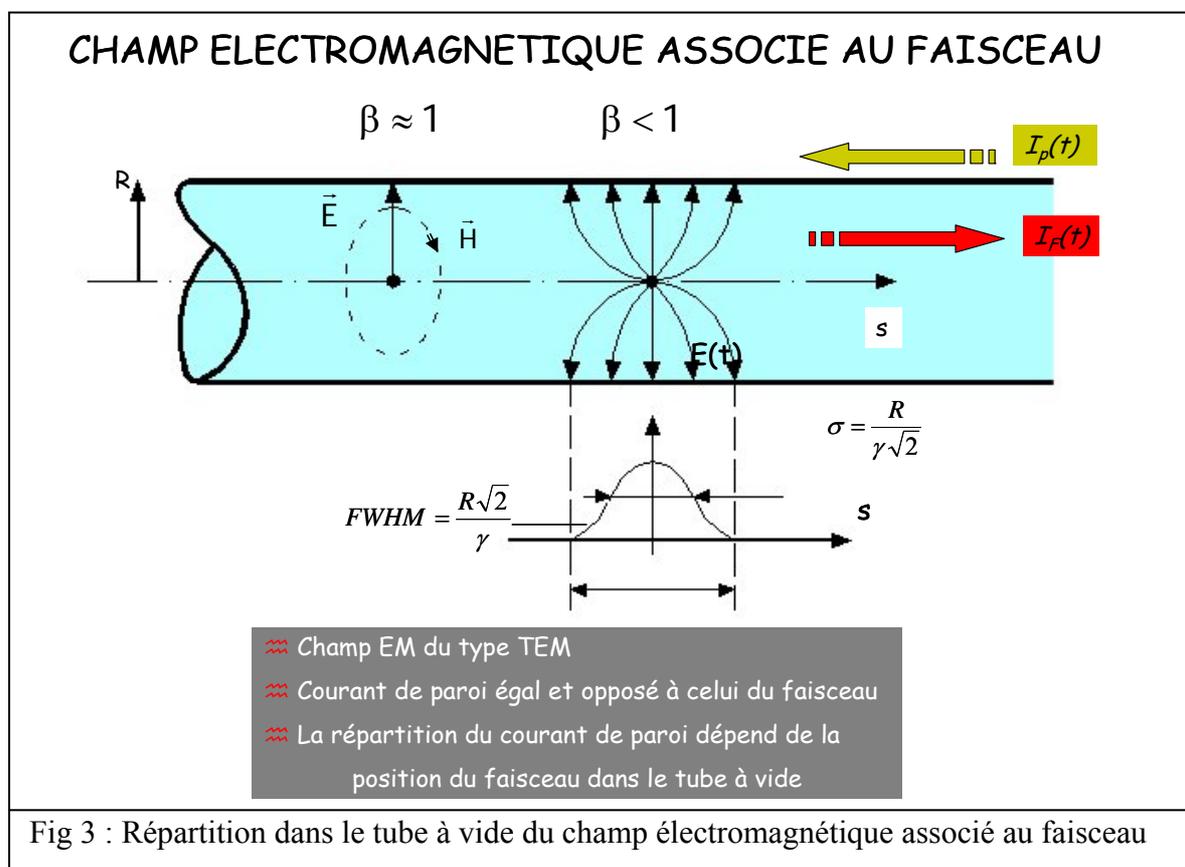


Fig 3 : Répartition dans le tube à vide du champ électromagnétique associé au faisceau

Un champ électromagnétique est attaché à un faisceau de particules chargées circulant à l'intérieur d'un tube à vide. Supposons pour simplifier l'ensemble des charges réduit à un point se déplaçant à la vitesse  $\beta.c$  dans un tube à vide circulaire :

Si  $\beta \sim 1$ :

- Un courant de même valeur, de signe opposé à celui du faisceau mais ne contenant pas la composante continue est induit sur la paroi du tube :  $I_p(t) = - ( I_F(t) - \langle I_F(t) \rangle )$
- Un champ électromagnétique dont la composante électrique est radiale et la composante magnétique est azimutale est attaché au faisceau.

Si  $\beta \ll 1$ :

- Le champ électrique associé au faisceau s'étale sur la paroi du tube à vide proportionnellement au rayon du tube à vide.

C'est le champ « proche » associé au faisceau. Ce champ ne rayonne pas car sa longueur d'onde est supérieure en général au diamètre du tube à vide au moins jusqu'à des fréquences de l'ordre du GHz.

### 3.2 Champ électromagnétique dû au rayonnement synchrotron.

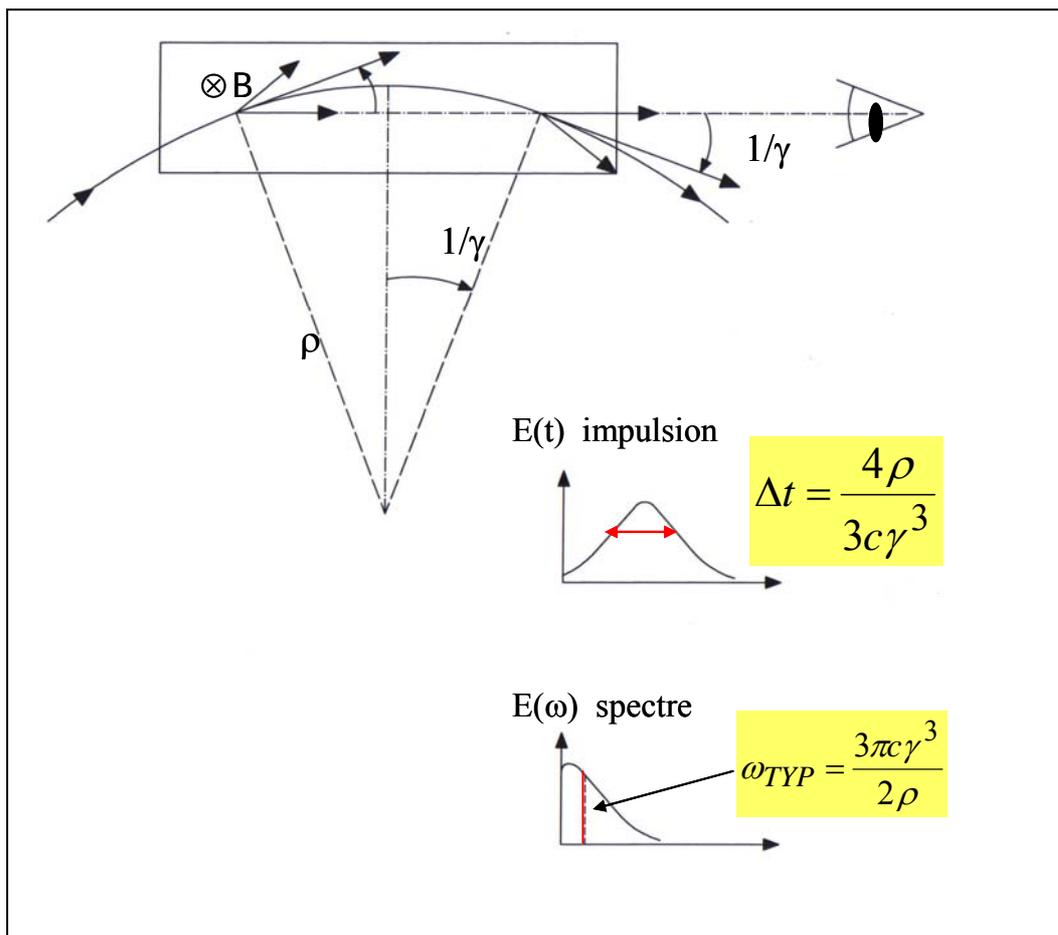


Fig4 : Rayonnement synchrotron émis dans un dipôle long

C'est le rayonnement émis par les particules ultra relativistes subissant une modification de leur accélération donc par exemple par les faisceaux d'électrons passant dans un dipôle de la machine. Comme nous l'avons vu dans le cours accélérateur, l'angle d'ouverture de ce rayonnement est voisin de  $\pm 1/\gamma$ . La durée d'observation et la fréquence critique de ce rayonnement sont indiquées sur la figure 4. La longueur d'onde de ce rayonnement est évidemment très inférieure à la dimension du tube à vide et peut donc se propager et être observé à travers une fenêtre du dipôle.

Les champs électriques et magnétiques induits par le passage du faisceau sont à la base de la réalisation des diagnostics non destructifs.

### 3.3 Caractéristiques énergétiques et pouvoir d'ionisation du faisceau.

Pour les diagnostics faiblement ou complètement destructifs du faisceau, donc présentant de la matière (solide, liquide ou gaz) au passage du faisceau, il faut considérer :

- La perte d'énergie du faisceau dans le capteur donnée par la formule de Bethe Bloch et qui conduit à un échauffement du capteur. Cet échauffement peut d'ailleurs être utilisé pour la mesure de la puissance du faisceau par exemple.
- Le pouvoir d'ionisation du faisceau, très important à basse énergie, conduit à de nombreux phénomènes physiques exploitables pour réaliser des diagnostics de faisceau. On peut citer parmi les plus utilisés : émission secondaire d'électrons, rayonnement de transition, émission de lumière par excitation atomique de la cible ou du gaz résiduel.....

Cependant les perturbations apportées au faisceau par le capteur doivent être évaluées et rester acceptables si l'on veut assurer le transport du faisceau après son passage dans celui-ci. Nous allons décrire quelques diagnostics parmi les plus utilisés pour effectuer les mesures de base citées ci dessus.

## 4. Exemples de diagnostics de faisceau

### 4.1 Mesure de l'intensité

#### 4.1.1. Mesure destructive de l'intensité

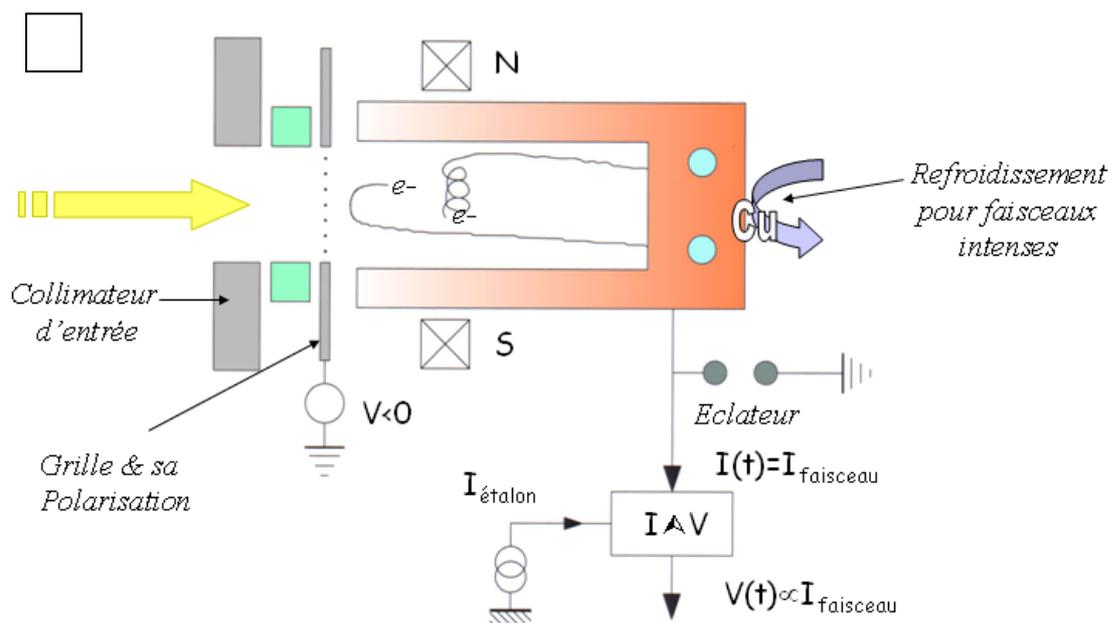


Fig 5 : schéma de principe d'une cage de Faraday

C'est certainement le diagnostic le plus ancien et qui a donné lieu à de nombreux développements : La cage de Faraday. Elle arrête par principe complètement le faisceau pour diriger les charges collectées vers un dispositif de mesure de l'intensité. Réaliser une cage de Faraday nécessite de prendre en compte les points suivants :

- L'épaisseur de la partie sensible doit être suffisante pour arrêter complètement le faisceau. En pratique on se limite aux énergies basses en hadrons (quelques MeV protons)
- Le courant des électrons secondaires émis lors de l'arrêt du faisceau primaire perturbe la mesure si ces électrons sont effectivement perdus par la cage de Faraday. On y remédie par exemple par l'emploi d'une grille de suppression à l'entrée, d'un champ magnétique repoussant les électrons dans la cage.
- L'électronique associée permet de mesurer des courants de faisceau extrêmement faible : quelques pA voire moins. C'est d'ailleurs le diagnostic qui reste le plus sensible de tous et c'est la raison pour laquelle il est toujours employé.
- Une configuration coaxiale peut être adoptée pour mesurer les composantes haute fréquence. Dans ce cas la cage de Faraday peut servir pour la mesure de longueur de bunch.
- C'est un moniteur absolu dont la réponse ne dépend pas de l'énergie du faisceau.

D'autres diagnostics de faisceau moins destructifs du faisceau sont également employés: détecteur à émission secondaire par exemple dont le principe de fonctionnement consiste à mesurer le courant électronique secondaire créé par le passage du faisceau primaire à travers une mince feuille métallique (en pratique quelques  $\mu\text{m}$  d'épaisseur). Ce moniteur est relatif et nécessite un étalonnage en fonction de l'énergie du faisceau primaire.

#### 4.1.2. Mesure non destructive de l'intensité

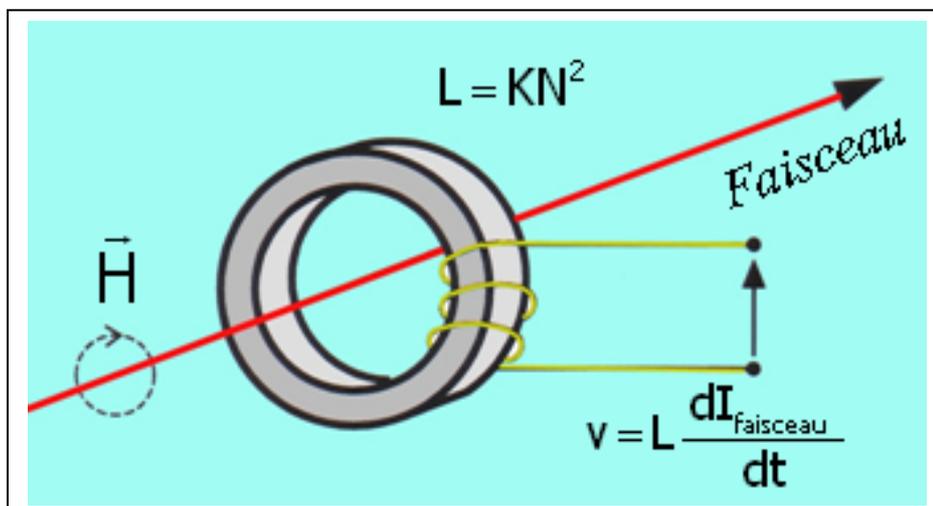


Fig 6 : schéma de principe du transformateur d'intensité

Le transformateur de courant a donné lieu lui aussi à de très nombreux développements : Le faisceau traverse un tore réalisé avec un matériau à très haute perméabilité sur lequel on a disposé un enroulement secondaire (Le faisceau joue le rôle de primaire).

- Aucune matière n'est présente sur le passage du faisceau. Ce type de diagnostic est donc parfaitement adapté aux passages multiples du faisceau (anneau des synchrotrons par exemple) et peut être donc employé « on line ».
- La valeur de la tension au secondaire ne dépend pas de la nature des particules primaires ni de leurs énergies mais uniquement du nombre de charges. Seul le signe de la charge du faisceau primaire influe sur le signe de cette tension. Le transformateur est par contre incapable de différencier les courants dus à deux faisceaux de charges opposées circulant dans deux directions opposées. (ce qui peut être un problème dans les collisionneurs)
- Le transformateur ne restitue pas par principe la composante continue de l'intensité du faisceau.
- Sa réponse électrique dépend fortement de la structure temporelle du faisceau et il est absolument nécessaire de prendre en compte la constante de temps de réponse vers les fréquences basses ( $L/R$  où  $R$  est la charge du transformateur). La réponse vers les fréquences hautes est limitée par la technologie : capacités parasites, perméabilité magnétique du matériau décroissant avec la fréquence, câblage...

De très nombreuses solutions, impossibles à énumérer ici, ont été apportées pour étendre la bande passante en fréquence aussi bien vers le haut (électronique active associée au transformateur) que vers le bas (matériau à très forte perméabilité :  $> 100\,000$ , diminution apparente de la charge par un système électronique approprié, dispositif de rétroaction...)

Des fréquences basses de 1Hz voire moins sont réalisables mais cependant rien n'y fait puisque par principe le transformateur ne « passe » pas le continu. Ce point est un réel problème pour la mesure non destructive dans les anneaux de stockage ou les machines à rayonnement synchrotron par exemple pour lesquels il faut considérer des périodes de l'ordre de plusieurs heures voire plusieurs jours (Le record est de 999h dans l'anneau accumulateur d'antiprotons du CERN ).

Une amélioration décisive a été apportée par le DCCT comportant un système électronique de mesure à détection synchrone. La fréquence de détection est calée sur celle utilisée par un générateur auxiliaire décrivant le cycle d'hystérésis du matériau. Par cet artifice, on restitue la composante continue du faisceau jusqu'à quelques  $\mu A$  environ mais au prix d'une bande passante faible : Quelques dizaines de Hz.

Les très hautes fréquences sont atteintes avec le transformateur « standard » : 1GHz environ, ce qui peut permettre la mesure des longueurs de bunch. De ce fait on associe souvent les deux types de transformateurs pour disposer d'une mesure du continu à plusieurs centaines de MHz.

Enfin d'autres diagnostics non destructifs sont employés : le « wall current monitor » basé sur la détection du courant de paroi induit sur le tube à vide. On peut atteindre également les très hautes fréquences : quelques GHz et mesurer ainsi la longueur des bunch du faisceau toujours sans mesurer la composante continue.

## 4.2 Mesure de la position du faisceau

Excepté la mesure déduite de celle des profils transverses, les diagnostics de mesure de position du centre de gravité du faisceau sont essentiellement basés sur l'utilisation du champ électromagnétique proche associé au faisceau.

### 4.2.1 Pick-up électrostatique

Des charges électriques sont induites sur un cylindre métallique disposé à l'intérieur du tube à vide lorsque le faisceau traverse cette électrode. Si on sépare cette électrode en deux parties diamétralement disposées dans le tube à vide, plus de charges sont induites sur l'électrode la plus proche du faisceau et moins sur l'électrode la plus éloignée. La somme

restant naturellement constante. Ces charges électriques développent une tension aux bornes d'une résistance extérieure à l'électrode.

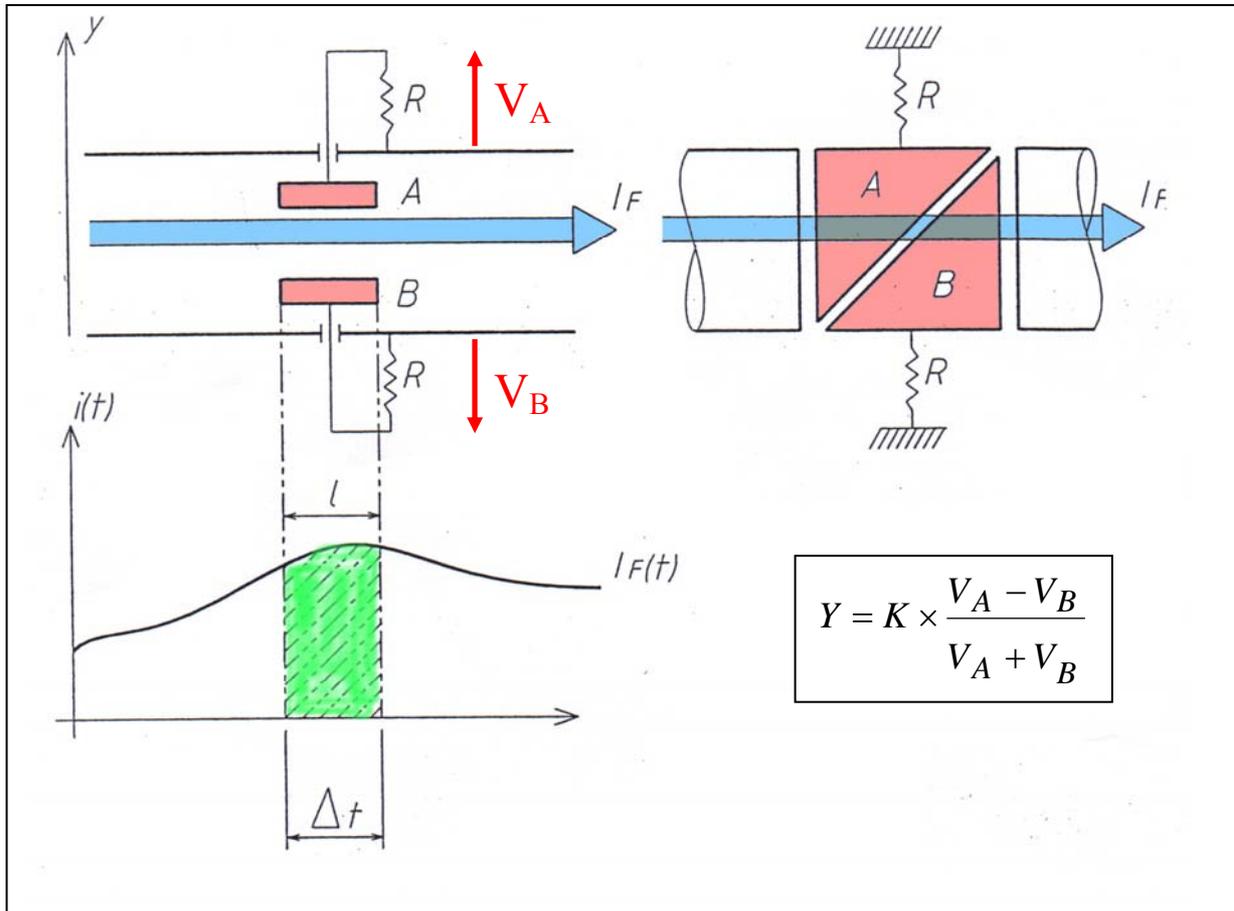


Fig 7 : Principe de fonctionnement d'une électrode de position de faisceau

Si la projection sur le plan transverse d'observation de la courbe de séparation des deux électrodes est une fonction linéaire sur l'axe de mesure considéré, on démontre que la position mesurée est proportionnelle au rapport  $\frac{V_A - V_B}{V_A + V_B}$ . (Fig7)

La longueur des bunch de faisceau est en général longue comparée à celle des électrodes dans les machines à hadrons. Pour mesurer des bunch de longueur plus courte, donc par exemple ceux des machines à électrons, le concept d'entourer le faisceau avec l'électrode doit être abandonné afin de diminuer la dimension des électrodes. De plus, les électrodes ne peuvent plus être placées dans le plan médian à cause du rayonnement synchrotron. La disposition alors généralement retenue est illustrée en Fig. 8.

La linéarité de mesure des électrodes des machines à hadrons est perdue.

#### 4.2.2. Electrode Pick-up électromagnétique.

Le coupleur directionnel, aussi appelé strip-line est constitué d'une portion de ligne formant avec le tube à vide une ligne hyperfréquence (Fig9) dont l'impédance caractéristique  $Z_0$  dépend de ses dimensions géométriques et de son écartement par rapport au tube à vide.

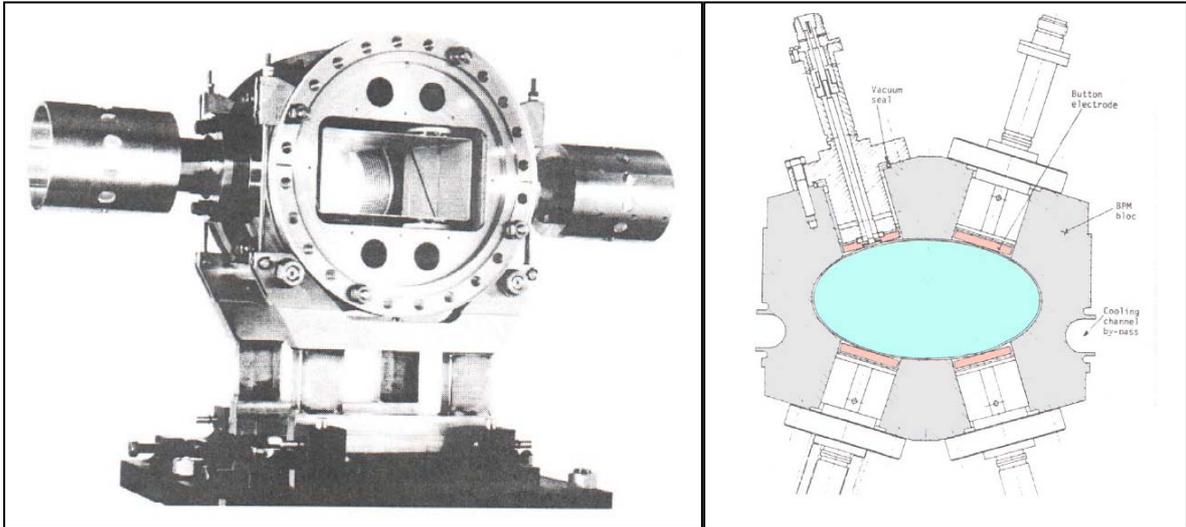


Fig 8 : Gauche : Exemple d'électrodes P.U. de mesure de position pour synchrotron à protons (ISR - CERN). La coupe diagonale de l'électrode du fond est parfaitement visible. (Mesure de la position verticale). Droite : P.U. électrostatique de mesure de position pour machine à électrons (LEP- CERN)

La composante électrique du champ électromagnétique associé au faisceau traversant le détecteur induit des charges électriques sur l'électrode. La composante magnétique de ce même champ induit une tension dans la boucle créée entre l'électrode et le tube à vide.

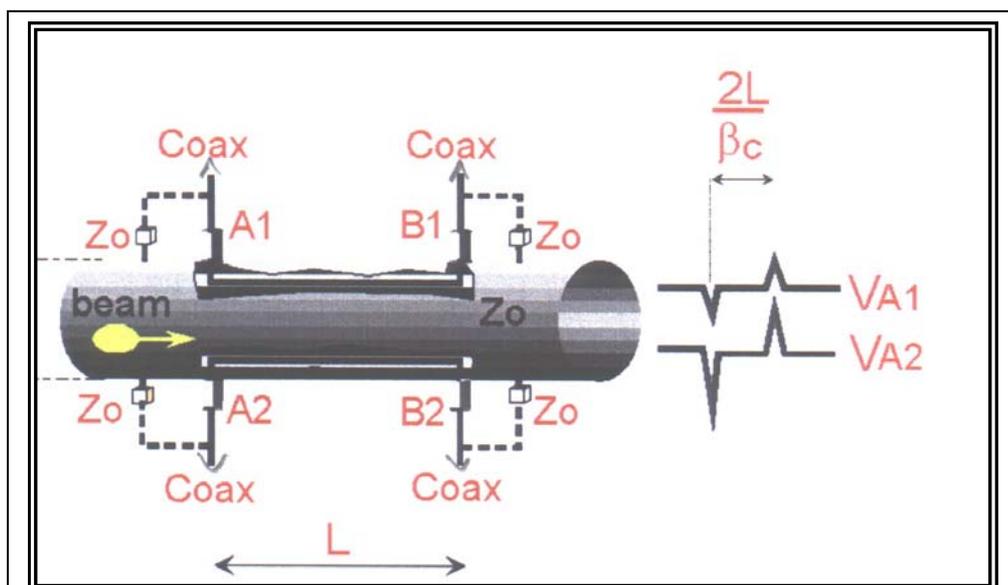


Fig 9 : Schéma d'un coupleur directionnel (Longueur de l'électrode: L)

Ces deux contributions au signal électrique fourni par l'électrode sur l'un de ses ports s'ajoutent pour une ligne terminée sur son impédance caractéristique pour un sens de passage du faisceau mais se retranchent pour le sens opposé. Cette propriété importante des lignes de transmission est utilisée avantageusement dans les collisionneurs à un seul anneau du type « particule - antiparticule ». Avec une disposition adaptée de quatre électrodes, il est possible de réaliser un détecteur de position horizontale et verticale du faisceau. La sensibilité d'un tel diagnostic dépend donc de la fréquence et est maximum pour une ligne quart d'onde. Le LHC est par exemple équipé de coupleurs directionnels.

Ces coupleurs directionnels sont parfaitement adaptés à la détection des bunch courts. Enfin, le concept de ce type de diagnostic électromagnétique peut encore être poussé en réalisant en utilisant des guides d'ondes ou des cavités. Ces derniers, que nous ne décrivons pas ici, sont utilisés dans les LINAC à positons ou à électrons.

#### *4.2.3. Electrode Pick up magnétique.*

Il est possible de n'utiliser que la composante du champ magnétique associé au faisceau et de réaliser des diagnostics « magnétiques » de position. Ceux ci sont d'un emploi relativement rare. Ils sont utilisés pour les machines dans lesquelles les problèmes de pertes de faisceau sont importants et peuvent créer des électrons secondaires lors de l'impact du faisceau primaire sur les électrodes.

### 4.3 Profils transverses de faisceau

Cette mesure dans le plan transverse du faisceau est destructive car elle nécessite d'interposer de la matière dans le passage du faisceau. Elle a donné lieu à de très nombreux diagnostics qui ont été eux mêmes à l'origine de nombreux développements. Nous n'en citerons que quelques uns parmi les plus utilisés.

#### *4.3.1. Chambres à ionisation multi - fils*

Les chambres à ionisation sont des détecteurs dans lesquels il y a création de paires ions- électrons par ionisation d'un gaz traversé par le faisceau. Ces détecteurs sont en fait dérivés de ceux utilisés en physique des hautes énergies. Ils peuvent être utilisés en mode de comptage ou en mode proportionnel. Le taux de comptage ou l'amplitude du signal observé sur chaque fil représente le profil du faisceau. Ces détecteurs sont principalement utilisés dans les lignes de transport de faisceau et permettent l'acquisition des profils de faisceau jusqu'à des intensités aussi basse que  $10^6$  P/s. La résolution spatiale est de l'ordre du mm. Le fonctionnement de ces détecteurs a été décrit maintes fois par ailleurs et nous ne les détaillerons pas ici.

#### *4.3.2. Chambres à émission secondaire*

Elle est constituée d'un plan de fils le plus souvent en tungstène. Chaque fil émet des électrons secondaires pendant son bombardement par le faisceau. Ce courant est mesuré pour chaque fil et le profil peut alors être acquis. La résolution spatiale atteint 0,5 à 1mm. La sensibilité dépend naturellement de l'énergie du faisceau incident mais est bien inférieure à celle des chambres à ionisation. Par contre, elle ne nécessite pas de fenêtre pour enfermer un gaz et est de ce fait beaucoup plus transparente au faisceau que la chambre à ionisation.

#### *4.3.3. Wire - scanners*

La recherche de profileurs transparents aux faisceaux conduit naturellement à interposer le moins de matière possible sur son passage. C'est l'un des buts recherché dans

la réalisation des wire scanner : Un seul fil traverse dans ce cas le faisceau et intercepte à chaque position une petite partie des particules du faisceau. Un courant électronique secondaire est également produit. Le courant total est mesuré pour chaque position et le profil est alors reconstitué. Le mouvement de ce fil peut être linéaire, pseudo circulaire, pendulaire. La nature de ce fil peut être du tungstène, carbone (supportant mieux les hautes puissances de faisceau), Beryllium suivant les faisceaux à diagnostiquer. La résolution spatiale dépend du mécanisme de propulsion et peut aisément être inférieure à 100  $\mu\text{m}$ . La sensibilité totale dépend du diamètre du fil, du nombre de particules interceptées, du coefficient d'émission secondaire du fil et enfin de l'électronique associée

#### 4.3.4. Ecrans scintillants

Ces diagnostics sont les plus anciens dans le domaine des accélérateurs. Les écrans sont fabriqués avec des plaques d'alumine dopées dont l'épaisseur est de l'ordre du mm. Lorsque le faisceau dépose une partie ou la totalité de son énergie lors de son passage dans cet écran, les atomes d'impuretés sont excités et émettent une lumière de longueur d'onde bien définie lors de leur retour à l'état fondamental. Une caméra dont le capteur est adapté au spectre de lumière à détecter mesure l'intensité de cette lumière à travers une fenêtre du tube à vide (Fig 10).

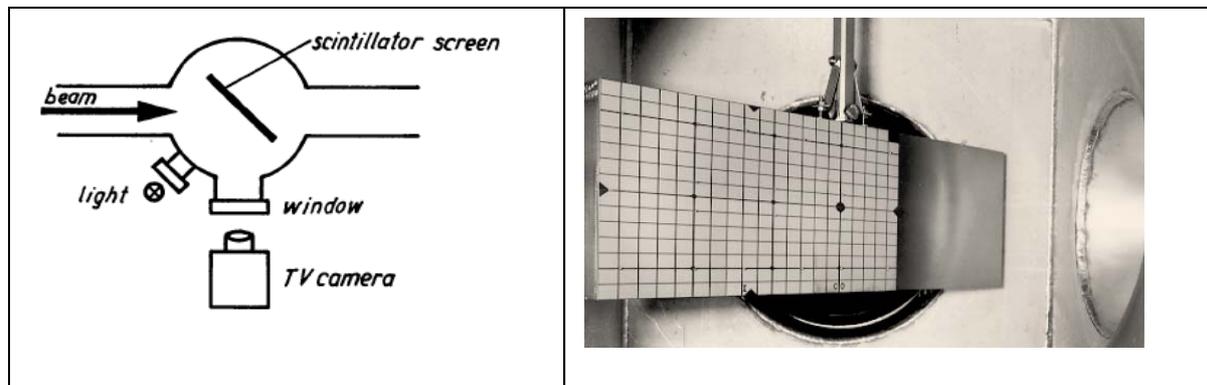


Fig 10 : Gauche : principe de mesure d'un profil avec un écran scintillant. Droite : plaque d'alumine dopée au chrome sur laquelle est imprimé un graticule. (CERN)

Les plaques d'alumine sont étuvables et par conséquent ce type de diagnostic peut être utilisé dans l'ultraviolet.

Pour les faisceaux de faible intensité, la camera peut être éventuellement équipée d'un intensificateur de lumière. Des faisceaux de  $10^9$  protons / $\text{cm}^2$  à 1GeV ont été observés (CERN). Ce type de diagnostic très simple à mettre en oeuvre est extrêmement utile pendant les phases de réglages car il permet d'affirmer de manière certaine la présence du faisceau.

#### 4.3.5. Méthodes optiques.

##### a) Fluorescence

L'interaction des faisceaux de basse énergie avec le gaz résiduel ou avec un gaz ajouté (azote par exemple) conduit également à l'émission de lumière par fluorescence dans le domaine visible. Cette production de lumière est prépondérante vers les basses énergies (forte interaction du faisceau avec le gaz résiduel). Par exemple, pour les faisceaux de protons de haute intensité et de quelques MeV, cette lumière peut être visible à « l'œil nu ». Cette lumière peut être également analysée avec une caméra. Le profil du faisceau peut être

reconstitué. Elle fournit une information plutôt qualitative mais est d'une grande utilité car elle est très peu destructrice du faisceau et fournit une information «on line». Cette méthode reste limitée aux faisceaux de faible énergie.

b) *Rayonnement de transition:*

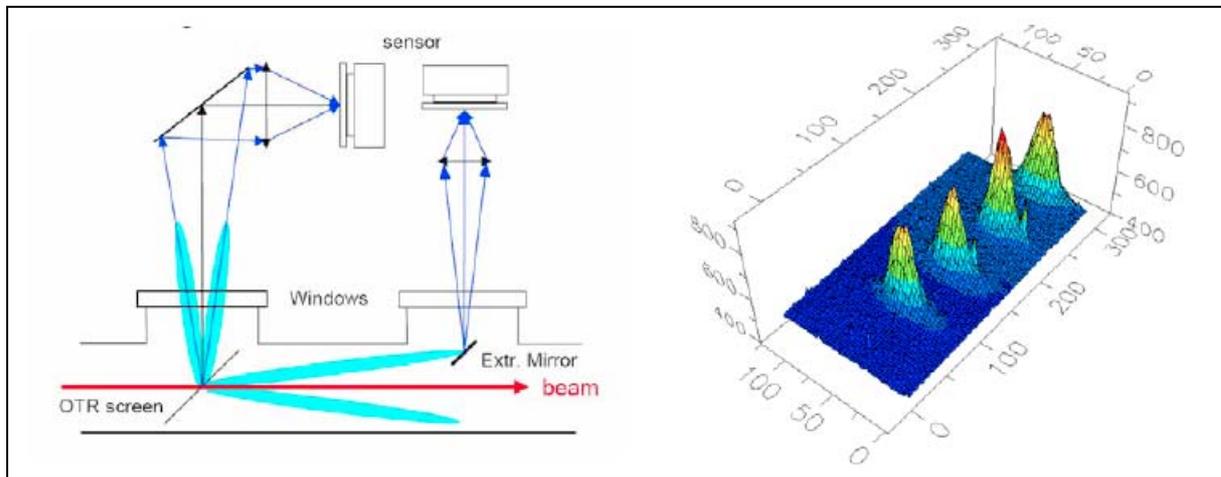


Fig 11 : Gauche : cônes de rayonnement émis vers l'arrière et vers l'avant d'un écran traversé par le faisceau incident. Droite : exemple d'images obtenues lors de l'injection du faisceau dans le SPS du CERN. [1]

Le rayonnement de transition est émis par les particules chargées franchissant l'interface de deux milieux de constante diélectrique différente. Par exemple l'interface vide-feuille métallique. C'est un phénomène de surface et les écrans peuvent donc être de faible épaisseur, ce qui présente l'avantage supplémentaire de minimiser le dépôt d'énergie par le faisceau incident et donc l'échauffement cet écran.

Le rayonnement est émis dans deux cônes (Fig. 11) autour de l'angle de réflexion du faisceau (passage de l'interface vide - métal) et deux cônes autour de l'axe du faisceau lors du passage de l'interface métal -vide. L'intensité du rayonnement augmente avec  $\gamma$  et l'angle d'ouverture du cône de lumière est  $1/\gamma$ , ce qui conduit à une utilisation de ce rayonnement pour les leptons et les hadrons de très haute énergie.

c) *Rayonnement synchrotron*

L'utilisation de ce rayonnement est limitée aux particules ultra relativistes et donc essentiellement dans l'immédiat aux faisceaux d'électrons ou de positons. Les diagnostics utilisant le rayonnement synchrotron sont donc non destructifs par nature : Le champ est rayonné « loin » de la source et peut donc être détecté par des dispositifs optiques à l'extérieur de la machine (Fig. 12). Les informations provenant de la source (faisceau d'électrons) sont ensuite traitées. Le rayonnement étant produit lors de la modification de l'accélération du faisceau d'électrons, les diagnostics sont donc disposés après un dipôle ou un onduleur de la machine. La mesure des profils se fait habituellement en analysant la lumière émise en formant une image à la sortie d'un dipôle et en l'analysant avec une camera. L'ouverture angulaire du faisceau est obtenue par observation directe de l'angle d'ouverture du rayonnement. On peut remonter ainsi à l'émittance du faisceau d'électrons. La résolution spatiale provient des effets dus à la diffraction. Cependant si le faisceau est suffisamment énergétique, le rayonnement atteint la gamme des X et ces effets deviennent négligeables pour l'observation : Au L.E.P. (CERN), des photo - détecteurs en tellure de cadmium ont été utilisés pour mesurer des faisceaux de 300  $\mu\text{m}$  de dimension avec une résolution de 10  $\mu\text{m}$ . Enfin, il est également possible de mesurer par des optiques la structure temporelle du faisceau.

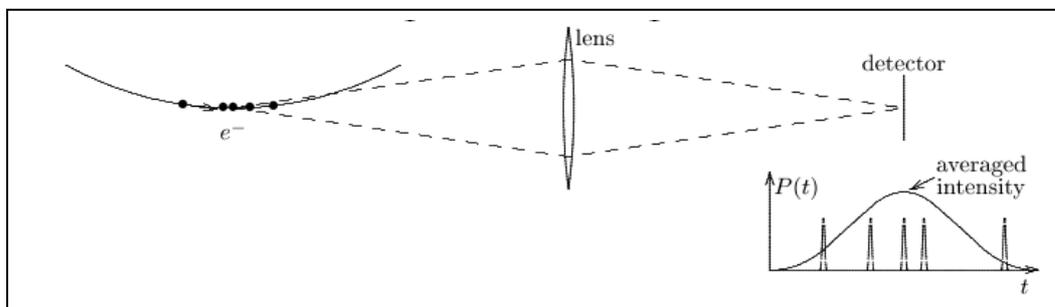
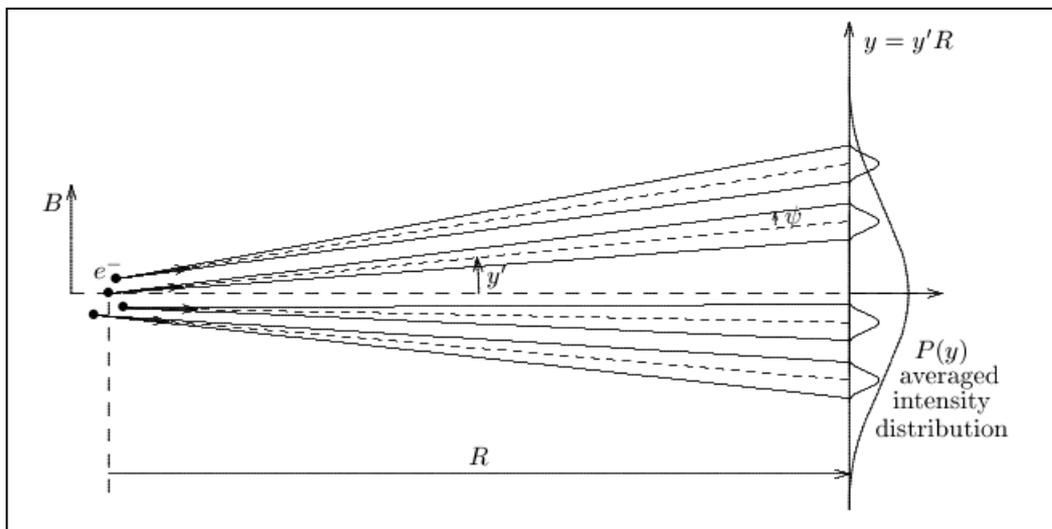
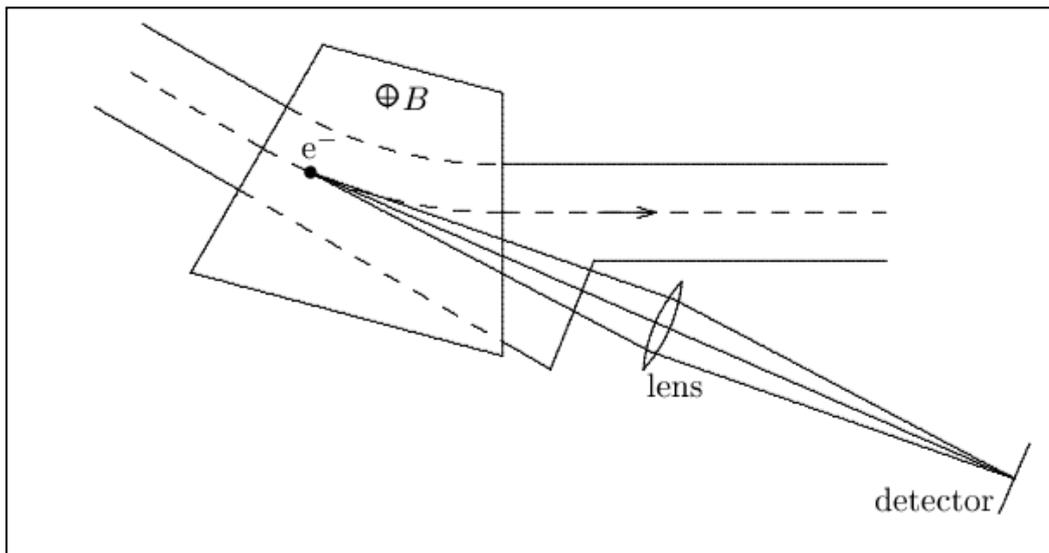


Fig 12 : Mesures possibles en utilisant le rayonnement synchrotron à la sortie d'un dipôle.

Haut : Mesure des dimensions transverses du faisceau en formant une image sur un détecteur. Milieu : Mesure de l'ouverture angulaire du faisceau par la mesure de celle du rayonnement émis. Bas : mesure de la structure temporelle du faisceau.

#### 4.4. Mesure de l'émittance transverse

Mesurer une émittance transverse d'un faisceau revient par définition à mesurer une position de faisceau et un angle. L'émittancemètre de type scanner (Fig 13) ou encore

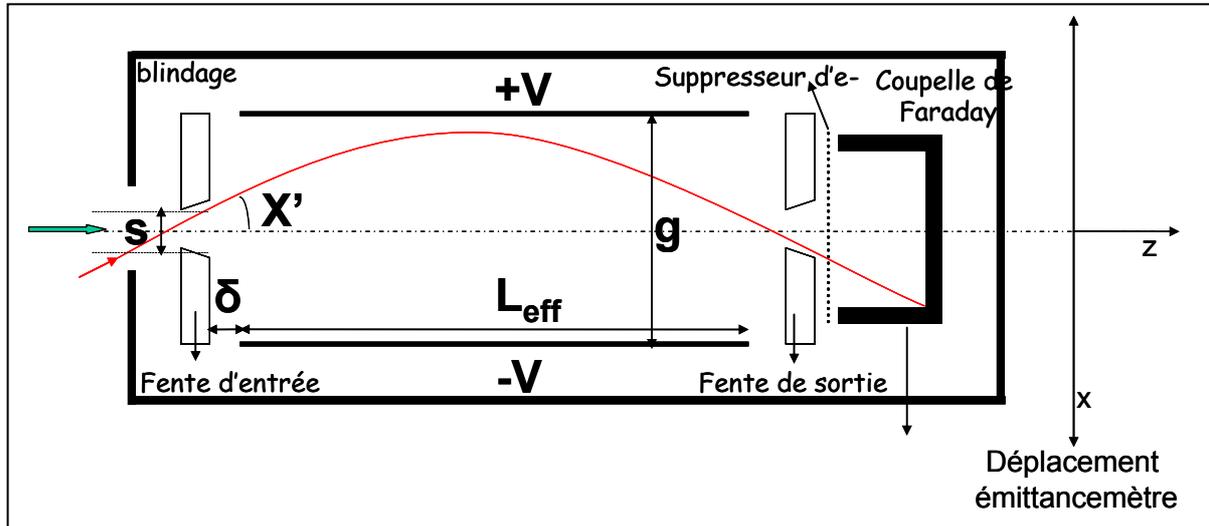


Fig13 : Emittancemètre transverse de type scanner (Allison)

appelé Allison répond strictement à la définition : Le faisceau rentre dans le scanner (placé à une position déterminée) par une fente d'entrée puis est dévié par un condensateur plan dans lequel règne un champ électrique. Pour un angle d'entrée donné et une déviation adaptée, le beamlet sélectionné à l'entrée passe dans la fente de sortie du scanner : il y a donc sélection en angle du faisceau. Puis l'ensemble est déplacé à la position suivante et le processus d'analyse en angle recommence : c'est l'analyse en position. Cette mesure est destructrice du faisceau et peut prendre plusieurs minutes au total.

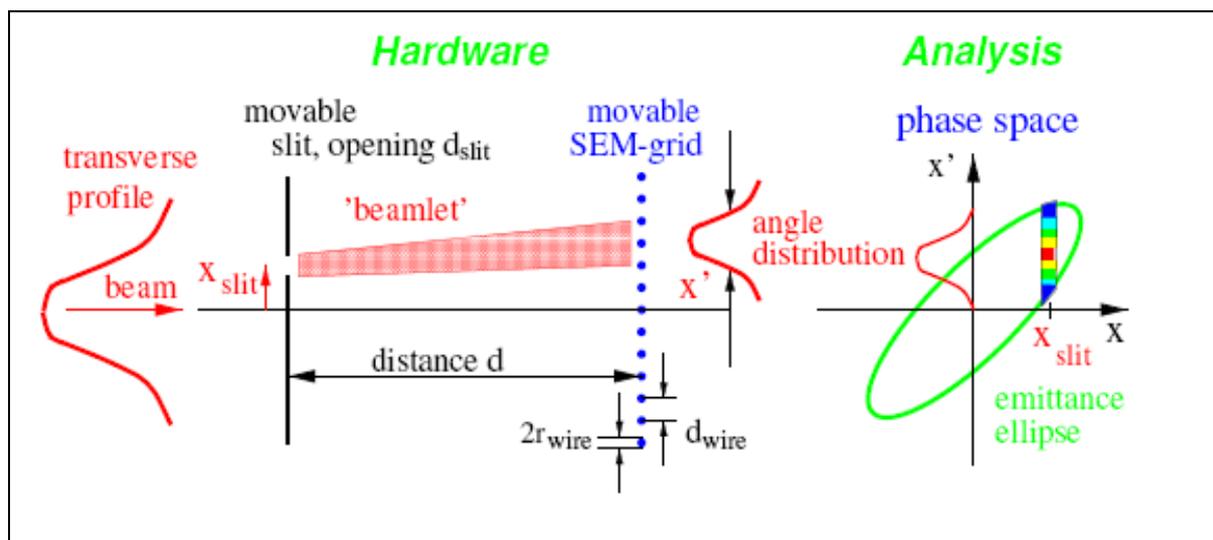


Fig 14 : Mesure de l'émittance transverse par un dispositif fente – profileur

Dans le même ordre d'idée, le dispositif illustré en Fig. 14 relève aussi de la définition de l'émittance transverse. La position du faisceau est sélectionnée par une fente d'entrée puis le beamlet est analysé à une distance  $d$  par un profileur. L'angle par rapport à l'horizontal est mesuré puis la fente est déplacée à une nouvelle position [2].

#### 4.5. Mesure de l'émittance longitudinale

Mesurer l'émittance longitudinale se réduit à la mesure de la longueur de bunch dans le cas d'un faisceau bunché.

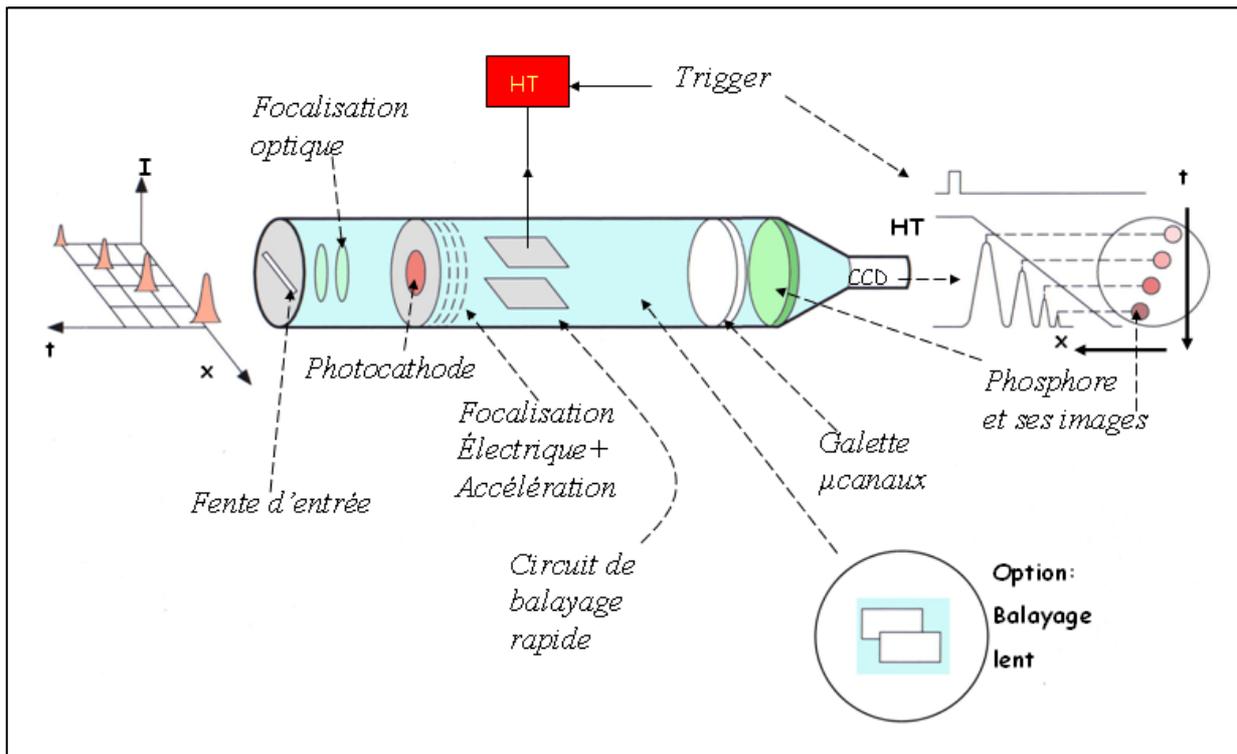


Fig 15 : Schéma de principe d'une caméra à balayage de fente

Dans le cas des machines circulaires (cyclotrons ou synchrotrons) accélérant des hadrons, la durée temporelle des bunch de faisceaux ultra-relativistes peut souvent être mesurée de manière non destructive par des pick-up : Transformateur de courant rapide, électrode, moniteur à courant de paroi. La bande passante pouvant atteindre plusieurs GHz pour ces derniers. La mesure des bunch de faisceaux non relativistes peut se faire par des diagnostics destructifs : Chambre à émission secondaire ou Cage de Faraday associées à une électronique suffisamment rapide.

Dans le cas des accélérateurs à électrons et en particulier des LINAC la mesure est beaucoup plus difficile car la bande passante nécessaire augmente et les résolutions temporelles à obtenir sont de l'ordre de la ps et parfois moins. De nombreuses méthodes ont été imaginées. Toutes sont sophistiquées et ne peuvent pas être décrites ici. Cependant les besoins, en particulier pour les machines à rayonnement synchrotron, ont conduit à développer des systèmes maintenant commercialement disponibles : la caméra à balayage de fente dont le principe de fonctionnement est illustré en Fig. 15. Le rayonnement synchrotron est reconverti en électrons par une photocathode. Un balayage électronique rapide du faisceau d'électrons synchronisé sur la radiofréquence de la machine permet

d'effectuer l'analyse en temps de l'impulsion électronique. Les électrons sont ensuite envoyés sur un phosphore et le profil temporel est affiché. Ce dispositif réalise en fait la transformation temps- espace : largeur du buche en profil sur un écran CCD. Par calibration on déduit le facteur d'échelle. Un balayage lent permet d'afficher sur une même image plusieurs profils.

## **5. Mesure des pertes de faisceau**

Les moniteurs de pertes de faisceau deviennent de plus en plus nécessaires dans les machines modernes et notamment les machines supraconductrices. En effet toute perte trop importante (le seuil étant naturellement à fixer par avance) de faisceau peut entraîner la destruction d'un composant de la machine. Dans les cas des dispositifs supraconducteurs, les pertes de faisceau peuvent entraîner une transition à l'état normal, avec pour conséquence minimum un arrêt prolongé de l'accélérateur. Une autre fonction des moniteurs de perte de faisceau est de localiser ces pertes afin d'effectuer les réglages nécessaires pour maintenir la radio activité à un niveau compatible avec la sûreté du fonctionnement.

Les moniteurs de perte de faisceau sont alors intégrés dans la chaîne de sûreté de l'accélérateur et servent au déclenchement des dispositifs d'arrêt lents ou rapides du faisceau.

Ces moniteurs ne diffèrent pas par nature des diagnostics de faisceau utilisés par ailleurs dans la machine. Ils sont montés en dehors du tube à vide et adaptés aux besoins. On retrouve donc sous d'autres formes les chambres à ionisation, les scintillateurs couplés à des photomultiplicateurs, les diodes PIN .....

## **6. Mesures plus complexes.**

Ces mesures sont plus caractéristiques des machines que du faisceau.

### **6.1 Mesure du nombre d'onde. Fonction de transfert du faisceau**

La mesure typique est celle du nombre d'onde (nombre d'oscillations bêta-tron par tour de machine) dans les synchrotrons. La connaissance de cette grandeur est essentielle dans les anneaux de stockages dans lesquels l'orbite du faisceau peut se dégrader à cause de sa propre charge ou de celle du deuxième faisceau dans un collisionneur par exemple. Le principe est d'apporter une perturbation au faisceau et d'analyser la réponse sur un moniteur adapté. Ceci peut s'effectuer de plusieurs manières :

- On dégrade volontairement les conditions d'injection ou bien on crée un défaut d'orbite dans la machine et les effets successifs sont lus sur un moniteur de position.
- En vertu du théorème de réciprocité en électromagnétisme, le faisceau est excité par un kicker transverse qui n'est ni plus ni moins qu'un système de plaques parallèles et on balaye la fréquence du générateur jusqu'à trouver la perte de faisceau sur l'électrode (Méthode dite « R.F. knock out »)
- Une méthode plus douce que la précédente consiste à envoyer une impulsion perturbative dont la durée est inférieure à celle d'un tour de machine par le faisceau. Les informations recherchées concernant le faisceau peuvent être déduites par Transformation de Fourier Rapide du signal délivré par le moniteur de position (Fig. 16). La réponse du moniteur dépend dans ce cas de la forme de l'impulsion donnée au faisceau et de très nombreux traitements mathématiques ont été proposés pour traiter le signal du moniteur et déterminer la bande de fréquence dans laquelle le faisceau est perturbé.

## 6.2 Analyse Schottky du faisceau

Cette méthode s'applique dans les synchrotrons. Les diagnostics de faisceau précédemment cités : Transformateur de courant, électrode de position... permettent d'étudier le comportement global du faisceau qui est considéré dans ce cas comme un courant électrique modulé. Les diagnostics Schottky sont de même nature et mesurent également le champ électromagnétique associé au faisceau mais sont conçus avec leur électronique de telle manière que l'on s'intéresse maintenant à la microstructure du faisceau

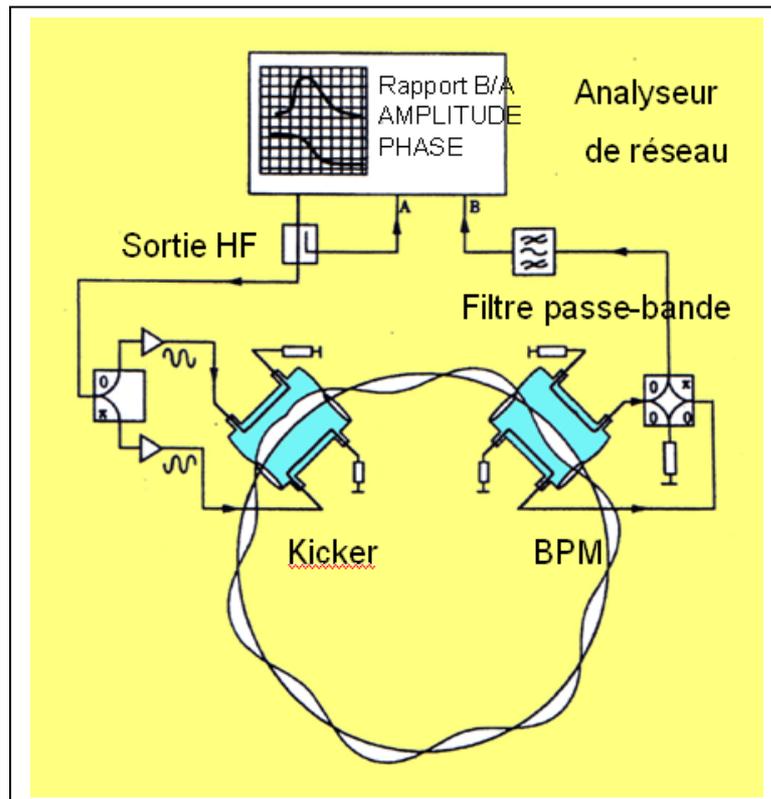


Fig. 16 : Méthode perturbative : le faisceau est excité par un kicker. La réponse est lue sur une P.U.

en utilisant le fait que le faisceau n'est plus un courant électrique « certain » mais est constitué d'un ensemble de charges élémentaires soumises à des fluctuations statistiques. Ce phénomène a été mis en évidence par **Schottky** en 1918. C'est pourquoi on parle d'analyse du bruit Schottky du faisceau. Les signaux Schottky provenant des faisceaux circulaires sont à la base du cooling stochastique des faisceaux.

Dans les synchrotrons l'analyse des signaux fournis par les diagnostics repose sur le fait que la fréquence fondamentale à considérer est celle de la révolution des particules et que les fluctuations statistiques du faisceau conduisent à mesurer des écarts par rapport cette fréquence fondamentale. Le très grand avantage de cette analyse des signaux résulte du fait qu'elle ne nécessite pas une excitation du faisceau.

Cette méthode a été perfectionnée de manière continue de sorte qu'on peut l'appliquer pour les plans longitudinaux et transverses des faisceaux aussi bien debunchés (« coasting beam ») qui sont les plus faciles à analyser, que bunchés. Dans ce dernier cas les traitements mathématiques peuvent devenir très complexes.

## 7. Conclusion

- Les diagnostics de faisceau et l'instrumentation associée ont traité dans un premier temps le faisceau comme une macro particule. L'échelle de temps est celle de la révolution dans une machine circulaire ou de la répétition dans un LINAC. Le contrôle précis de la qualité des faisceaux et l'étude de la machine ont nécessité la mesure de plus en plus fine de l'intensité, de la position et des profils.
- On en a déduit les rendements de transmission, les durées de vie (anneaux de stockage), les émittances en vue de l'adaptation entre les machines,
- L'augmentation de la bande passante de l'électronique associée aux capteurs a permis l'étude des oscillations du faisceau, des instabilités, des couplages entre les bunch.
- Le faisceau a ensuite été considéré comme un ensemble de charges indépendantes et une analyse beaucoup plus fine des propriétés par analyse du bruit Schottky du faisceau a été possible.
- La demande évolue inexorablement vers une mesure de plus en plus précise des faisceaux de très petites dimensions, c'est à dire submicronique pour les futurs collisionneurs et machines à rayonnement synchrotron. Pour les machines à haute intensité la bande passante des diagnostics devra encore augmenter pour mettre en œuvre les corrections nécessaires pour vaincre les instabilités du faisceau. Enfin les détecteurs de pertes seront également très importants pour la sûreté du fonctionnement.

## Bibliographie

- [1] R. Jones et H. Schmickler. Introduction to beam instrumentation and diagnostics. CAS 2003
- [2] P. Forck . Lecture Notes on beam Instrumentation end diagnostics. JUAS Mars 2002
- [3] P. Ausset. Diagnostics de faisceau et Instrumentation pour accélérateur. Ecole IN2P3 2007 Du détecteur à la mesure
- [4] H. Koziol. Beam Diagnostics for accelerators CAS octobre 2000. Loutraki - Greece