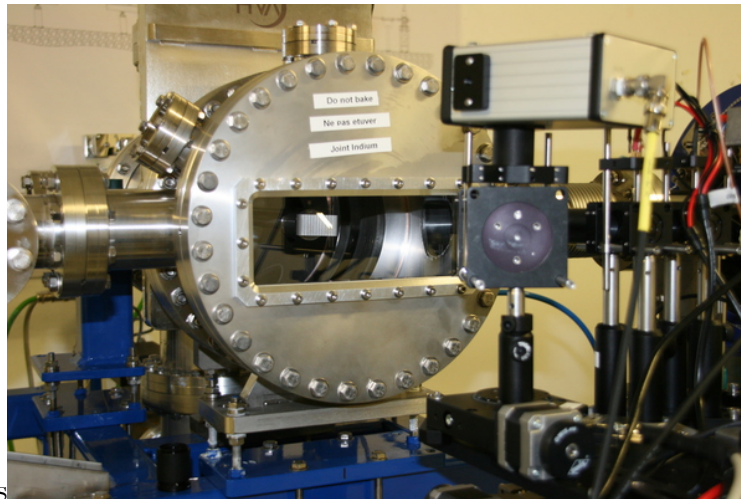


UNIVERSITÉ PARIS-SUD XI
MAGISTÈRE DE PHYSIQUE FONDAMENTALE 1
ANNÉE 2013-2014

Stage du 26 mai au 25 juillet :
Etude de la radiation de Smith-Purcell



Auteur :
Théo JOUBAUD

Sous la responsabilité de :
Dr. Nicolas Delerue

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, bât. 200, Campus d'Orsay

Table des matières

Introduction	2
1 Présentation théorique de la radiation de Smith-Purcell	3
1.1 Cas à une particule	3
1.2 Cas à plusieurs particules-Cohérence	4
1.3 Deux modèles	4
1.3.1 Ondes evanescentes	4
1.3.2 Courant de Surface	4
1.4 Méthode de Kramer-Krönig	5
2 Les différentes expériences	5
2.1 L'expérience SPESO	5
2.1.1 Présentation de SOLEIL	5
2.1.2 Dispositif expérimental	6
2.2 Expérience E-203	7
2.2.1 Présentation de SLAC	7
2.2.2 Dispositif expérimental	7
3 Analyse de données de E-203	8
4 Les détecteurs, expérience à CLIO	9
4.1 Les détecteurs	9
4.2 Présentation de CLIO	10
4.3 Dispositif expérimental	10
4.4 Analyse des données	11
4.4.1 Filtrage	11
4.4.2 Amplitude de réponse et position	12
4.4.3 Recherche du temps de réponse	13
Conclusion	16
Annexe	17
Remerciements	18
Références	19

Introduction

Introduction

Ce stage de 8 semaines a été effectué au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire à Orsay. Cette unité mixte de recherche du CNRS et de l'université Paris-Sud a été fondée en 1956. Elle concentre ses activités sur la physique des particules, la cosmologie et l'astrophysique. Toutes les activités concernant les accélérateurs de particules ont été regroupées dans un département en 2012.

C'est au sein de cette structure qu'évolue le groupe ETALON (Emittance Transverse And LONgitudinal) dirigé par Nicolas Delerue. Son objectif est de développer des diagnostics avancés pour les accélérateurs de particules, en particulier pour mesurer le profil longitudinal de paquets d'électrons en utilisant la radiation de Smith-Purcell cohérente. Un tel diagnostic est utile dans les accélérateurs, que ce soit des collisionneurs ou des accélérateurs pour lasers à électrons libres. La méthode étudiée repose sur l'émission de radiations lors du passage de particules chargées à proximité d'un réseau métallique. En détectant ces radiations sur une large plage angulaire, on peut reconstruire le profil temporel du paquet de particules. Ce n'est pas la seule méthode existante, mais elle présente différents avantages. Elle est en particulier non intrusive, réalisable sur un seul tir et les longueurs d'émissions peuvent être choisies à travers le pas du réseau.

Dans la première partie de ce rapport, de plus amples détails seront donnés sur l'aspect théorique du phénomène. On abordera ensuite la partie expérimentale, avec la présentation des deux collaborations sur lesquelles le groupe s'appuie. Les deux dernières parties seront consacrées aux travaux plus spécifiquement réalisés durant ce stage.

Abstract

During this eight weeks internship, I worked in the "Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire" (Laboratory of the Linear Accelerator) in Orsay. It was founded in 1956 and is dedicated to particles physics, cosmology and astrophysics. All the activities linked to the accelerators have been united in a department for accelerators physics in 2012.

In this department, you can find the group ETALON (Emittance Transverse And LONgitudinal) directed by Nicolas Delerue. Its main purpose is to reconstruct the time profile of an electrons bunch thanks to Smith-Purcell radiation. This radiation is emitted when the bunch of charged particles passes close to a metal grating. The detection of this radiation in a wide angular range allows the reconstruction of the time profile. Other methods exist, but this one presents different advantages. Among them, the fact that it is non invasive, it can be done with a single shot and the wavelengths of the radiations can be chosen through the period of the grating.

In a first part, the theory of this phenomenon will be discussed. The experimental aspect will be the topic of a second part, with the presentation of two experiments. The last two parts will focus on the work done during the internship.

1 Présentation théorique de la radiation de Smith-Purcell

C'est en 1953 que le phénomène fut pour la première fois observé par les physiciens américains S.J Smith et E.M Purcell. Depuis, de nombreuses théories ont été proposées et deux principales se distinguent.

1.1 Cas à une particule

La figure 1 présente schématiquement la disposition du réseau par rapport au faisceau. Ce dernier se propage selon Z à la vitesse v et à une distance X_0 du réseau de pas l . On repère la direction de l'onde émise grâce aux angles ϕ et θ , respectivement dans les plans xOy et $x'Oz$ (x' étant le nouvel axe x après rotation de ϕ).

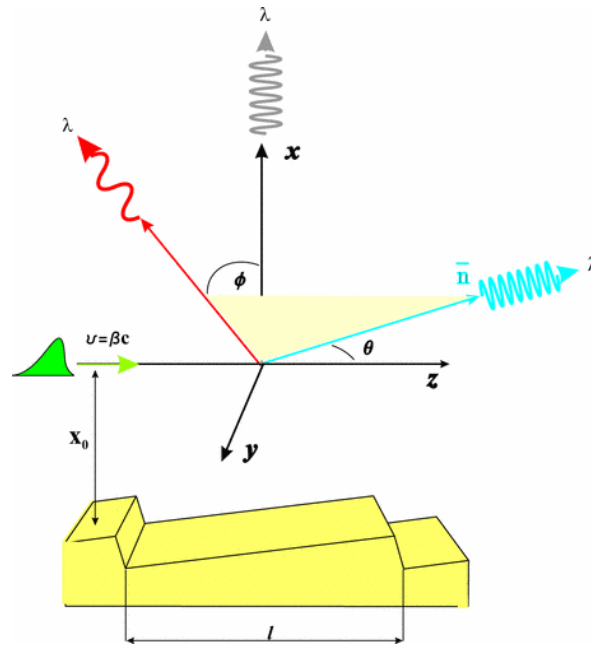


FIGURE 1 – Propagation du faisceau.

On se place pour $\phi = 0$, suffisamment loin du réseau (à une distance grande devant la longueur du réseau) et on considère des particules relativistes ($\beta \cong 1$). La distribution en longueurs d'ondes dans ce plan était déjà connue par Smith et Purcell et est donnée par la relation suivante [1] :

$$\lambda = \frac{l}{n} \left(\frac{1}{\beta} - \cos \theta \right) \quad (1)$$

avec n l'ordre de la radiation. On obtient donc de petites longueurs d'onde vers l'avant, de grandes vers l'arrière et à $\theta = 90^\circ$ (et au premier ordre), la longueur d'onde est égale au pas du réseau. On peut ainsi choisir la longueur d'onde à détecter en changeant l'angle d'observation θ et le pas du réseau l .

1.2 Cas à plusieurs particules-Cohérence

Intéressons nous maintenant à la distribution en énergie de la radiation pour une longueur d'onde donnée. Pour un paquet de N_e électrons, l'énergie par angle solide est [1] :

$$\left(\frac{dI}{d\omega}\right)_{N_e} = \left(\frac{dI}{d\omega}\right)_1 (N_e S_{inc} + N_e^2 S_{coh}) \quad (2)$$

avec $\left(\frac{dI}{d\omega}\right)_1$ l'énergie pour un électron. Les termes dans la parenthèse décrivent comment les énergies de chaque électron se combinent pour donner l'énergie totale. Ainsi, on dira que l'on est dans le *régime cohérent* lorsque S_{coh} est prédominant devant S_{inc} . Cela arrive lorsque la longueur du paquet devient plus petite que la longueur d'onde considérée.

En prenant l'hypothèse d'une distribution aux composantes indépendantes $q(x, y, t) = X(x)Y(y)T(t)$ où T représente la distribution longitudinale recherchée, l'expression de S_{coh} est :

$$S_{coh} = \left| \int_0^\infty X e^{-(x-x_0)/\lambda_e} dx \right|^2 \cdot \left| \int_{-\infty}^\infty Y e^{-ik_y y} dy \right|^2 \cdot \left| \int_{-\infty}^\infty T e^{-i\omega t} dt \right|^2 \quad (3)$$

où k_y est la composante du vecteur d'onde sur y , ω la fréquence et λ_e un paramètre appelé *longueur d'onde évanescence*. Ainsi, en régime cohérent, on obtient l'approximation :

$$\left(\frac{dI}{d\omega}\right)_{N_e} \approx \left(\frac{dI}{d\omega}\right)_1 N_e^2 \left| \int_{-\infty}^\infty T e^{-i\omega t} dt \right|^2 \quad (4)$$

L'énergie pour N_e électrons et N_e lui-même peuvent être mesurés. Pour obtenir la transformée de Fourier du profil -appelée *facteur de forme*- il faut maintenant calculer l'énergie pour un électron : $\left(\frac{dI}{d\omega}\right)_1$. C'est à cet endroit qu'interviennent les différents points de vue théoriques.

1.3 Deux modèles

1.3.1 Ondes évanescences

Le premier modèle a été développé par Van Den Berg en 1971. Il considère le champ électromagnétique de l'électron comme un ensemble d'ondes évanescences. Les ondes émises sont alors le résultats de la réflexion ou de la diffraction de ces ondes sur le réseau.

1.3.2 Courant de Surface

Le second modèle considère que la radiation résulte de l'accélération des charges induites sur le réseau par le paquet d'électrons. C'est ce point de vue qu'a adopté le groupe ETALON. Le choix de ce modèle est motivé notamment par sa clarté physique. Il faut savoir que les deux modèles diffèrent peu. Les intensités prédites sont par exemple proches.

Dans ce modèle, les calculs donnent :

$$\left(\frac{dI}{d\omega}\right)_{N_e} = 2\pi e^2 \frac{Z}{l^2} \frac{n^2 \beta^3}{(1 - \beta \cos \theta)^3} \exp\left[-\frac{2x_0}{\lambda_e}\right] R^2 \quad (5)$$

Avec Z la longueur du réseau et R qui représente l'efficacité du réseau à émettre une onde. On obtient ainsi le module du facteur de forme, reste à connaître sa phase pour reconstruire le profil.

1.4 Méthode de Kramer-Krönig

La méthode de Kramer-Krönig est une méthode mathématique permettant de retrouver la phase minimale de la transformée de Fourier. Elle décrit les relations entre la partie réelle et la partie imaginaire, la connaissance de l'une permettant d'obtenir l'autre. Dans notre cas, on peut exprimer F comme [2] :

$$F(\nu) = \rho(\nu) \exp(i\phi(\nu)) \quad (6)$$

sachant qu'on connaît déjà $|F(\nu)|^2 = \rho(\nu)^2$. Cela signifie qu'on connaît la partie réelle de :

$$\ln(F(\nu)) = \ln(\rho(\nu)) + i\phi(\nu) \quad (7)$$

La méthode de Kramer-Krönig nous donne alors sa partie imaginaire, c'est-à-dire le $\phi(\nu)$ minimum, ce qui permet d'obtenir le facteur de forme. En appliquant une transformation de Fourier inverse, on obtient le profil temporel de la distribution.

2 Les différentes expériences

2.1 L'expérience SPESO

2.1.1 Présentation de SOLEIL

SOLEIL, pour Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE (Laboratoire d'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique) est une source de rayonnement synchrotron située à Gif-Sur-Yvettes et créée en 2001 par le CNRS et le CEA. Ci-dessous un schéma de l'installation :

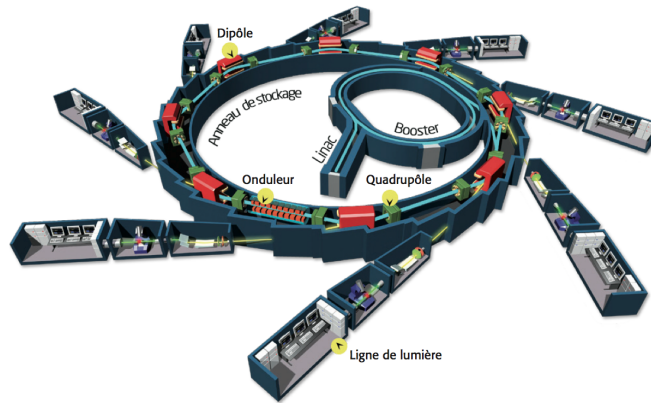


FIGURE 2 – Installation SOLEIL.

Les électrons sont accélérés et regroupés en paquets dans le LINAC, notamment grâce à une onde électromagnétique hyperfréquence (3000 MHz) introduite par un klystron. Après avoir atteint une énergie de 110 MeV, ils sont envoyés dans le booster. Cet accélérateur

circulaire (de 157m de périmètre) va donner au faisceau son énergie finale : 2,75 GeV [3]. Les électrons passent alors dans l’anneau de stockage où ils vont tourner pendant plusieurs heures à une vitesse proche de celle de la lumière. Le rayonnement synchrotron recherché provient de la perte d’énergie des électrons lors de leur changement de trajectoire. On provoque ce dernier avec le champ magnétique des quadrupôles dans les sections courbes et des onduleurs dans les sections droites.

C’est au niveau du LINAC de SOLEIL que le groupe ETALON a installé son matériel expérimental.

2.1.2 Dispositif expérimental

Cette expérience a pour nom SPESO : Smith-Purcell Experiment at SOleil. Elle fut installée en juin 2013 entre le LINAC et le booster. Ses objectifs principaux sont :

- mieux comprendre la formation de la radiation de Smith-Purcell,
- tester différentes géométries de réseau pour minimiser le bruit de fond,
- tester différents matériaux pour le réseau,
- comparer mesures expérimentales et prédictions théoriques,
- pouvoir diagnostiquer à partir d’un seul tir pour un paquet de largeur de quelques picosecondes.

Le principe de l’expérience est de disposer un réseau à proximité du faisceau dans une chambre à vide et de détecter le rayonnement produit sur une certaine gamme d’angles.

Dans la chambre à vide, un bras motorisé permet de rentrer ou sortir le réseau. C’est une pièce d’environ 20×40 mm en aluminium [1]. Afin de récupérer la radiation lors du passage du faisceau, une plaque de quartz transparente aux infrarouges sert de hublot. En face, une série de détecteurs est disposée sur une platine motorisée en translation (parallèlement à la direction du faisceau).

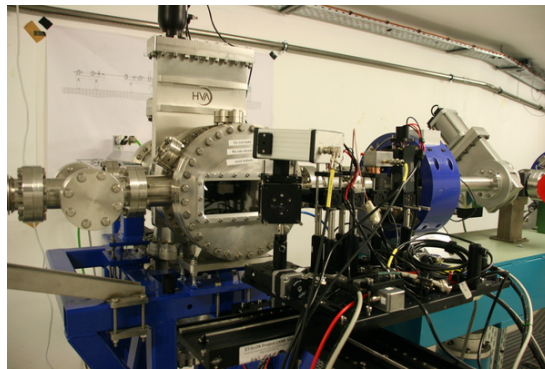


FIGURE 3 – SPESO.

2.2 Expérience E-203

2.2.1 Présentation de SLAC

L'accélérateur linéaire SLAC se trouve dans l'université de Stanford aux Etats-Unis. Avec ses 3073 mètres de long, c'est le plus long accélérateur linéaire au monde. Il peut accélérer des électrons jusqu'à 22.5 GeV en les groupant par paquets de longueurs de quelques centaines de femtosecondes [4].

Les deux premiers tiers de l'accélérateur sont occupés par le dispositif FACET (Facility for Advanced Accelerator Experimental Test), dédié à la physique des accélérateurs. C'est dans cette partie de SLAC qu'a été insérée l'expérience de la collaboration E-203. Son objectif est de déterminer la longueur et le profil des paquets d'électrons avec la radiation de Smith-Purcell.

2.2.2 Dispositif expérimental

Le principe de l'expérience est le même que pour SPESO. On retrouve la chambre à vide et le bras motorisé. Cependant, les réseaux sont cette fois placés sur un carrousel pour pouvoir les changer plus facilement. L'un deux est complètement plat, il permet de faire une mesure du bruit. Les autres ont des pas de 50, 250 et 1500 μm .

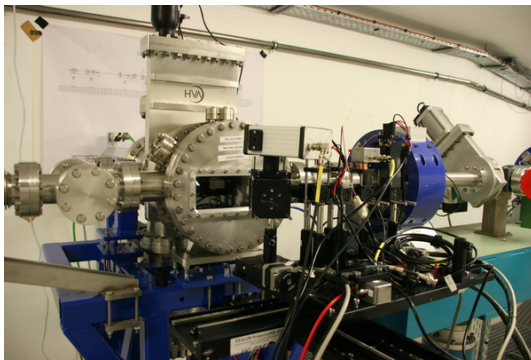


FIGURE 4 – Détecteurs montés sur le carrousel à SLAC.

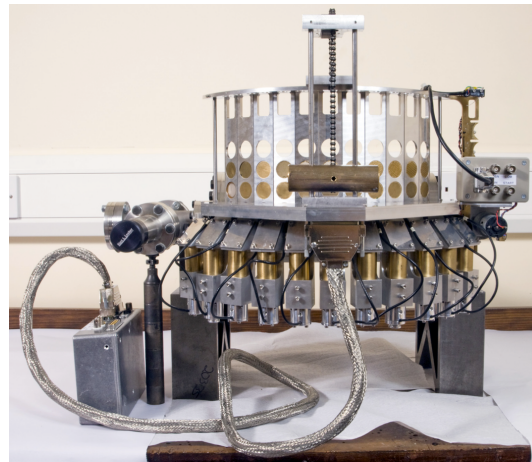


FIGURE 5 – Dispositif de détection.

La disposition des détecteurs n'est pas la même. Il y en a en effet onze en arc de cercle, disposés tous les dix degrés, chaque détecteur couvrant 5 degrés. De plus, pour sélectionner la longueur d'onde détectée, on ajoute des filtres devant chacun. Ce sont de simples disques de cuivre percés, le diamètre et l'écart entre les trous déterminant les propriétés du filtre [1]. Après ce filtrage, le rayonnement est refocalisé sur le détecteur par un cône Winston. Enfin, pour récupérer les données des détecteurs, un système d'acquisition (DAQ) est utilisé.

3 Analyse de données de E-203

Avec les mesures faites à E-203, des profils de paquets ont pu être reconstruits. Les données brutes de ces mesures sont les réponses de chaque détecteur pour différentes impulsions de faisceau. Cependant, ces données comportent des points aux valeurs parfois surprenantes. Ils peuvent être le résultat d'un dysfonctionnement matériel : panne de détecteur, soucis électroniques, faisceau anormal... Pour éviter d'entacher les mesures par ces erreurs, il est nécessaire de faire un tri. Ce fut la première mission de ce stage.

Un premier programme Matlab donnant certaines caractéristiques des mesures avait déjà été écrit. En plus de la réponse de chaque détecteur, d'autres informations étaient également données, notamment la position du faisceau dans les directions transversales (Beam Position Monitor). Une variation importante dans une des deux directions indique une déviation anormale du faisceau.

C'est à partir de ces deux types de données que le critère de tri a été construit. Après une première phase de familiarisation avec Matlab, il a fallu commencer un nouveau programme. Sa tâche principale est de détecter les impulsions où les BPM varient de façon trop importante et ceux où les détecteurs prennent des valeurs anormalement éloignées de la moyenne. En fonction de la proportion de ces points 'étranges', une variable indique si les données sont à considérer ou non.

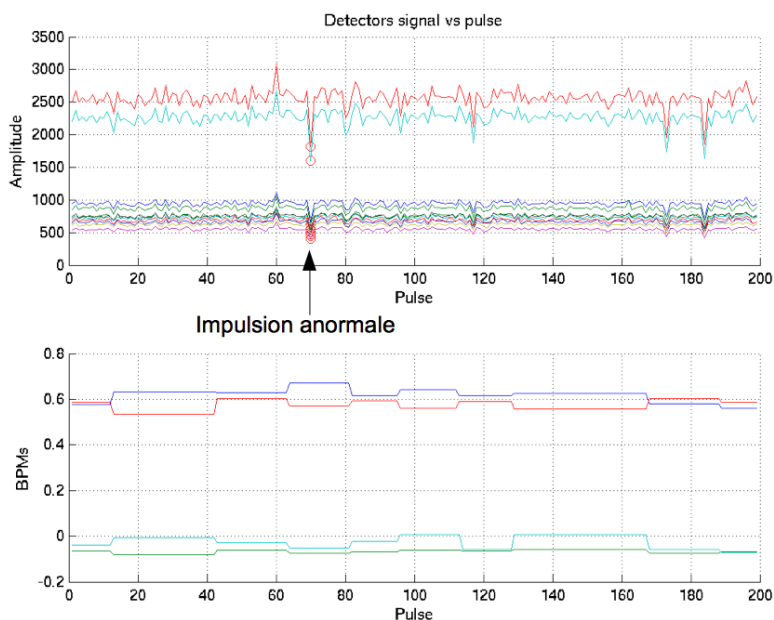


FIGURE 6 – Données analysées.

On voit sur la figure ci-dessus qu'une impulsion a été détectée comme anormale (points entourés en rouge), mais cela ne suffit pas pour exclure le fichier.

4 Les détecteurs, expérience à CLIO

Un des points importants dans le diagnostic par radiation de Smith-Purcell concerne les détecteurs. En effet, étant rarement utilisés à ces longueurs d'onde (infrarouge et infrarouge lointain), il est difficile de les caractériser. L'expérience présentée par la suite a donc pour but de déterminer différentes caractéristiques, avec la finalité d'identifier un détecteur optimal. Ces caractéristiques sont :

- le temps de réponse des détecteurs,
- la réponse en fonction de la puissance de la source,
- la réponse en fonction de la longueur d'onde.

4.1 Les détecteurs

Les longueurs d'ondes à détecter sont dans les gammes de l'infrarouge ($0.8\mu\text{m}$ - $5000\mu\text{m}$). On va pour cela utiliser deux types de détecteurs : les pyroélectriques et les thermopiles.

Les thermopiles sont une association de thermocouples. Un thermocouple est constitué de deux matériaux soudés, qui créent une tension aux extrémités du système lorsque la température à la soudure change.

Les pyroélectriques ont quant à eux pour matériau de base un cristal ferroélectrique. Le signal lumineux va chauffer le cristal, le faire se dilater et ainsi changer son moment dipolaire. Cela provoque l'appartition de charges de surface. Le retour à l'équilibre entraîne des courants détectables.

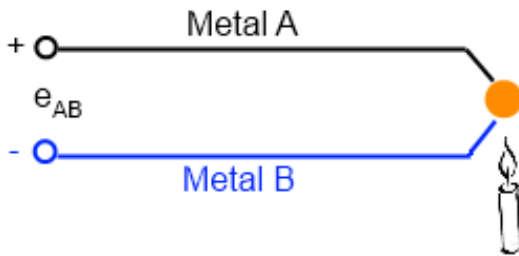


FIGURE 7 – Principe d'un thermocouple.



FIGURE 8 – Détecteur pyroélectrique.

4.2 Présentation de CLIO

Le Centre Laser Infrarouge d'Orsay (CLIO) est depuis 2005 une composante du laboratoire de Chimie Physique (LCP) [5]. C'est un centre serveur de lumière dont la principale source est un laser à électrons libres. Ce type de laser comporte un accélérateur de particules d'une vingtaine de mètres. Les électrons accélérés sont envoyés dans un onduleur qui permet de créer un faisceau lumineux. Le faisceau est conservé dans une cavité optique pour augmenter sa cohérence et son intensité jusqu'à sa distribution dans les lignes de lumières. Il est important de noter qu'il est pulsé.

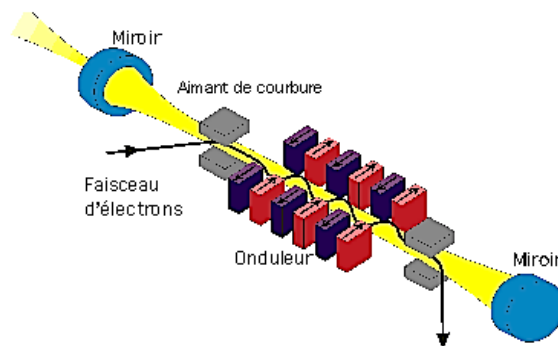


FIGURE 9 – Principe du Laser à Electrons Libres.

Un tel laser permet d'atteindre des longueurs d'onde jusqu'à $120 \mu\text{m}$ en variant des paramètres tels que l'énergie des électrons, la période de l'onduleur ou le champ magnétique appliqué. C'est, entre autres, cette capacité de réglage qu'utilise le groupe ETALON pour son projet.

4.3 Dispositif expérimental

Le montage permettant d'acheminer le faisceau aux détecteurs se base sur un jeu de miroirs. Sur le trajet, une première séparatrice a été placée pour envoyer le signal sur un détecteur de référence, une seconde l'envoie sur un puissance-mètre (non représenté ici). La référence sert à tenir compte des variations de puissance du laser. Enfin, les différents détecteurs sont placés sur une platine motorisée afin de ne pas les changer manuellement.

Deux types de mesures ont été effectuées :

- la première consiste à faire des acquisitions de la réponse du détecteur pour une dizaine de positions de la platine ;
- la seconde consiste à se placer à la position où le signal est maximum et à faire une série de mesures en ajoutant à chaque fois un atténuateur. Le but est ici de connaître la réponse en fonction de la puissance du laser et notamment de trouver le seuil où il y a détection.

Ces deux types de mesures ont été effectuées à 4 longueurs d'onde différentes : $38.8 \mu\text{m}$, $79.3 \mu\text{m}$, $95.3 \mu\text{m}$, $96.3 \mu\text{m}$ et se sont étalées sur plusieurs séances. Au cours de ces dernières, il a été possible de tester différents détecteurs.

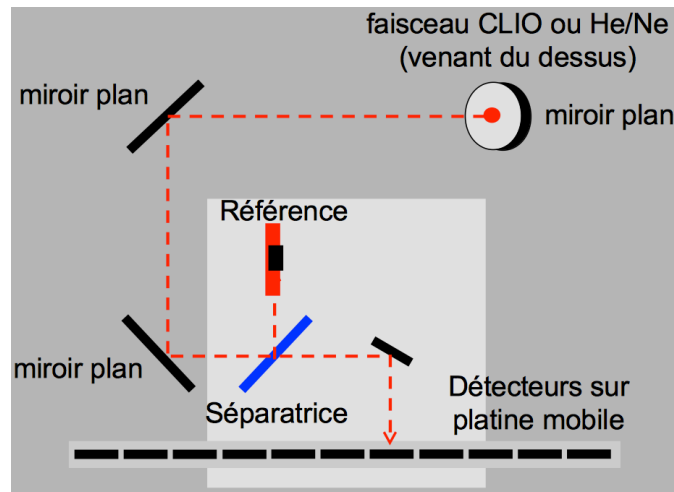


FIGURE 10 – Schéma de l'expérience à CLIO.

La première, à $79.3 \mu\text{m}$, a eu lieu avant mon arrivée. La seconde, à $95.3 \mu\text{m}$ et $38.8 \mu\text{m}$, s'est déroulée au milieu de mon stage et avec ma participation. Mon rôle était autant de manipuler la platine des détecteurs que de lancer les acquisitions de données. Il en a été de même pour la troisième, à $96.3 \mu\text{m}$. L'objectif de cette mesure était de reprendre la même longueur d'onde que la veille pour tester la répétabilité des tests. C'est lors de cette séance que des mesures avec arrêt du canon ont été effectuées. Elles seront détaillées dans la suite. J'ai également pu installer un système de hachage de faisceau sur la table optique. Il était destiné à des tests dans le visible avec le laser à Helium-Néon de Clio, normalement utilisé pour les alignements optiques. Ce signal continu avait besoin d'être haché pour les détecteurs car ils ne répondent qu'en cas de variations de température. Cependant ce test n'a pas pu être fait à cause des séparatrices utilisées, opaques dans le visible.

4.4 Analyse des données

4.4.1 Filtrage

Les analyses effectuées ont concerné le premier type de mesures. Pour un détecteur (à une longueur d'onde donnée), les données brutes donnaient donc le signal en fonction du temps pour chaque position (run). En réalité, une centaines de mesures ont été faites pour chaque run. La première étape fut de s'occuper du bruit parasitant le signal.

Tout d'abord, grâce à la centaine de mesures pour chaque position, il a été possible de faire une moyenne pour lisser le signal. Une transformée de Fourier a ensuite permis de situer en fréquences les bruits restants. Un premier à 50Hz -provenant du secteur- a pu être supprimé en soustrayant une regression non-linéaire du signal. Ceux de fréquences supérieures ont été traités grâce à une convolution par une fonction porte (la fréquence de coupure étant déterminée par la largeur temporelle de la porte). Toutes les hautes

fréquences n'ont cependant pas pu être enlevées. En effet, la brusque montée de la réponse du détecteur peut être comparée à un pic de dirac. C'est pour cela qu'elle comporte des fréquences élevées qui ne doivent pas être filtrées.

Cette méthode de filtrage a été appliquée dès le début de mon travail sur l'analyse des données. Cependant, elle a pu être améliorée après la deuxième séance de mesures. En effet lors de cette dernière, une mesure supplémentaire a été faite en bloquant le faisceau grâce à un puissance-mètre en amont du dispositif expérimental. Elle correspond ainsi au bruit et peut être soustraite au signal. Les figures suivantes montrent le signal avant et après le filtrage final.

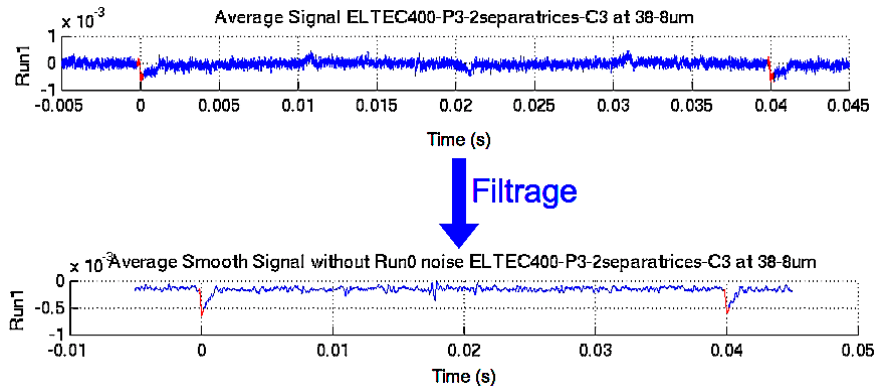


FIGURE 11 – Signal avant et après le filtrage.

On constate une réduction notable du bruit et une mise en valeur des pics de réponse. Les runs extrêmes comportant encore un bruit important correspondent aux positions éloignées du centre du détecteur.

4.4.2 Amplitude de réponse et position

Le signal ainsi nettoyé, il faut encore déterminer où commence la réponse du détecteur. On utilise pour cela la voie du trigger de l'oscilloscope. Une partie du programme sert ainsi à détecter les deux pics dans le signal du trigger et à donner leurs positions temporelles. Il a été constaté qu'ils étaient tous aux mêmes instants pour les différents détecteurs.

Cette position du trigger permet de déterminer les instants juste avant et juste après la réponse du détecteur. La différence de signal entre ces instants nous donne l'amplitude de la réponse. On peut alors la calculer pour chaque position. Afin d'améliorer la précision de ce calcul, il a été effectué sur les deux triggers apparents, et c'est la moyenne des deux qui est considérée au final.

La figure suivante montre un exemple de résultat. La forme de cloche obtenue est conforme à ce qui était attendu, avec une réponse plus intense lorsque le détecteur passe juste devant le faisceau.

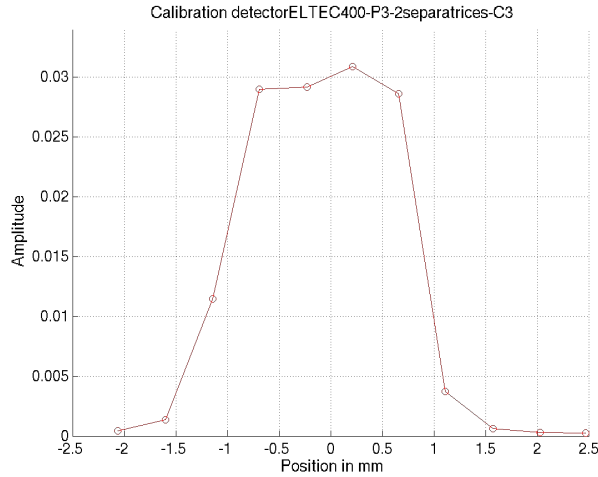


FIGURE 12 – Réponse en fonction de la position.

4.4.3 Recherche du temps de réponse

Dans les données utilisées pour la reconstruction de profil, il est parfois difficile de déterminer la zone de réponse du détecteur lorsque le bruit est trop important. C'est pour cela qu'il est utile de connaître son temps de réponse.

Modèle : Pour connaître le temps de réponse, on a supposé que la réponse était exponentielle (à cause de l'électronique du détecteur) puis on a cherché à fitter la courbe de réponse. Le temps caractéristique de l'exponentielle permettrait alors de connaître le temps de réponse. Le modèle a donc d'abord été : $A * \exp(B * (t - C)) + D$. Puis, en mettant le temps du trigger comme origine des temps : $A * \exp(B * t) + D$.

Fit : C'est ici qu'un problème important du programme se pose : les résultats de fit étant parfois incertains, il était nécessaire de pouvoir les contrôler et vérifier leur qualité. Le premier point a été de jouer sur les points de départ des paramètres du fit.

En effet, la fonction matlab du fit choisit aléatoirement des points de départ pour les coefficients du modèle. A partir de là, de petites variations leurs sont appliquées et un critère permet au programme de savoir si, à chaque variation, le fit est meilleur ou non. La fonction seule est donc normalement suffisante pour avoir un fit correct. Cependant, afin de compenser le caractère aléatoire de ce choix de départ, j'ai choisi de faire réaliser cette opération vingt fois et de prendre ensuite la moyenne des coefficients obtenus. Le fit avec ces coefficients moyens était très médiocre au départ : c'est l'utilisation d'une moyenne arithmétique qui se révéla inadaptée pour le coefficient B . Deux autres méthodes furent alors proposées, une moyenne 'exponentielle' : $\log\left(\frac{\sum_i \exp(B_i)}{20}\right)$ et une moyenne 'logarithmique' : $-\exp\left(\frac{\sum_i \log(|B_i|)}{20}\right)$. Par la suite, pour des tests où les B_i atteignirent des

valeurs d'environ -1500, la moyenne exponentielle devint inefficace à cause de considérations informatiques ($\exp(-1500) \simeq 0$).

Résidu : Le fit et ses coefficients ainsi obtenus, il restait à vérifier sa qualité. Un jugement à l'oeil était suffisant pour la déterminer grossièrement, mais il était impossible de la quantifier ainsi. C'est pour cela que le *résidu* a été considéré. Cet indicateur de qualité est le résultat de la différence entre le signal et le fit. Réalisant cette opération pour chaque point, il reste ensuite à sommer pour obtenir un unique scalaire. Ainsi, plus un résidu est proche de zéro, meilleur est le fit. Cependant, des modifications successives ont été apportées à cette méthode de calcul. Tout d'abord, afin de pouvoir comparer des fits avec des nombres de points (noté N) différents, une division par le nombre de points a été ajoutée. Le second problème concerne les signaux de faible amplitude. En effet, pour un tel signal, un très mauvais fit aura un résidu plus petit qu'un bon fit à grande amplitude. Pour prendre en compte cet effet d'amplitude, on divise le résidu par la valeur du signal. La formule finale est alors :

$$R = \frac{1}{N} \times \sum_i \frac{x_i^{signal} - x_i^{fit}}{x_i^{signal}} \quad (8)$$

Le traitement complet donne pour chaque position du détecteur un graphique du type :

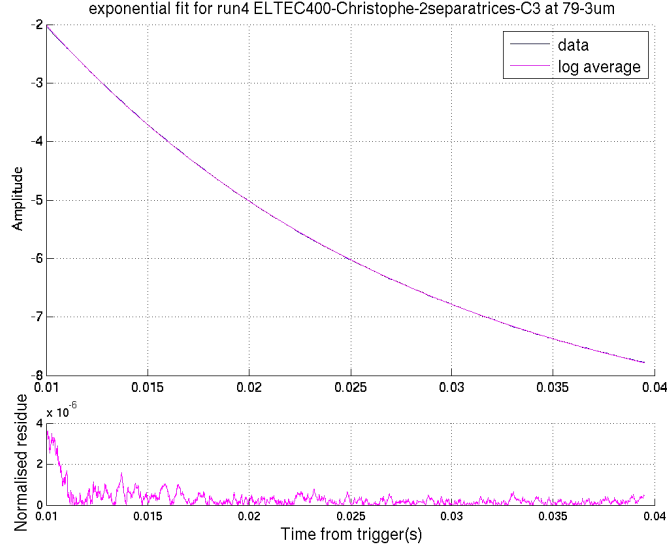


FIGURE 13 – Fit et résidu avant sommation.

On obtient ainsi pour chaque position une valeur de temps caractéristique (τ) et une valeur de résidu. Une première façon de tester cette méthode de calcul de temps de réponse est de comparer les résultats pour les différentes positions. On s'attend à ne pas voir de variations importantes.

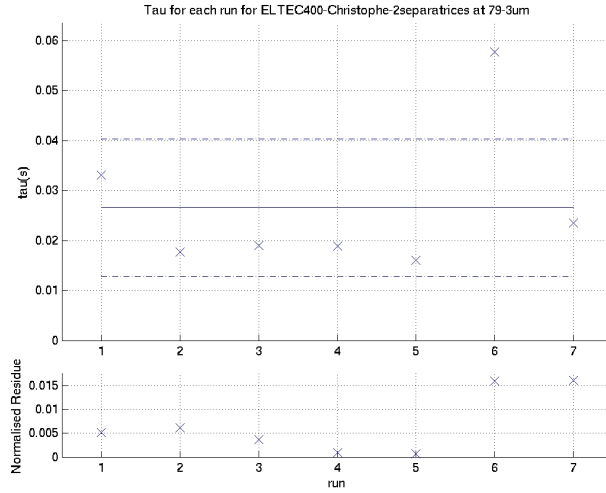


FIGURE 14 – Tau et résidu pour les différentes positions.

Sur cet exemple, on voit la distribution des taus avec leur moyenne et la bande à un écart-type. Malgré un point légèrement plus éloigné, la distribution semble cohérente et les résidus faibles par rapport aux limites acceptables (fixées empiriquement à environ 0.1).

Cette méthode présente cependant un inconvénient. En effet, le laser de CLIO est pulsée à 40 ms. Ainsi, pour les détecteurs avec une réponse beaucoup plus lente, la mesure ne donne qu'un petit bout de l'exponentielle, insuffisant pour un fit.

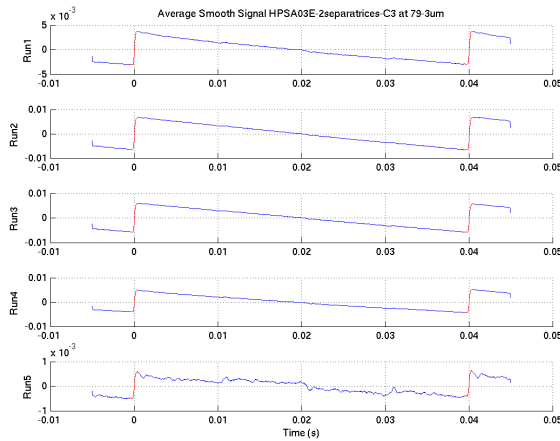


FIGURE 15 – Décroissance trop lente.

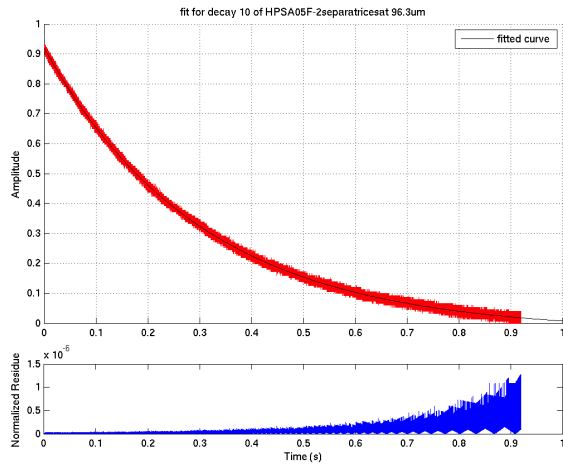


FIGURE 16 – Fit pour un signal avec arrêt du canon.

Une autre méthode de mesure a ainsi été utilisée pour de tels détecteurs. Pour avoir la fin de la décroissance, on coupe manuellement le canon à électrons au moment de la mesure. On traite ensuite les mesures de la même manière.

Conclusion

Le premier programme de nettoyage de données a servi de base pour une amélioration dans le code servant à la reconstruction de profils. Ce dernier a servi pour traiter les données recueillies à SLAC, aux Etats-Unis. De nouvelles mesures pourraient d'ailleurs être effectuées là-bas dans les prochains mois.

Le second programme a permis de connaître les temps de décroissance des différents détecteurs testés. Certains n'ont pu être étudiés car ils étaient à ce moment utilisés sur SPESO à SOLEIL. Les résultats obtenus permettent tout de même une optimisation du traitement des données, ce dernier étant difficile à cause d'un signal extrêmement faible depuis le lancement de l'expérience. De plus, ces temps présentent une invariance attendue en fonction de la position et de la longueur d'onde. On peut ajouter à cela la répétabilité de l'expérience, confirmée par des mesures faites sur deux jours consécutifs.

Des tests sur les détecteurs restants sont envisagés pour la suite. De même, les mesures d'atténuation visant à connaître la réponse en fonction de l'intensité du faisceau sont encore à traiter. On peut noter que ces données peuvent également servir pour caractériser CLIO, notamment la largeur de la tâche pour différentes longueurs d'onde ou la différence de puissance entre la sortie de la cavité optique et la table de travail.

Sur un plan personnel, ce stage a d'abord été une découverte du métier de chercheur. Les différents partenariats et les discussions au sein du groupe m'ont notamment montré l'importance de l'échange dans ce métier, que ce soit à l'international ou autour d'un café. Plus spécifiquement, dans les différentes étapes de l'expérience, je me suis surtout consacré à l'analyse de données. J'ai aussi pu participer à la prise de données à CLIO. Pour SPESO, même si je ne me suis pas directement impliqué, j'ai pu visiter les installations et constater les difficultés que l'on peut rencontrer aux débuts d'une expérience.

Annexe

Détecteur	Tau	écart-type
ELTEC400-Christophe2-79-3um	0.0343	0.0075
ELTEC400-Christophe-79-3um	0.0266	0.0138
ELTEC400-P2-95-3um	0.4544E-3	0.0235E-3
ELTEC400-P3-95-3um	0.4651E-3	0.0264E-3
ELTEC400-P3-96-3um	0.4471E-3	0.0066E-3
ELTEC400-P3-38-8um	0.4508E-3	0.0059E-3
ELTEC400-P4-38-8um	0.5098E-3	0.0111E-3
ELTEC400-P4-95-3um	0.4876E-3	0.0320E-3
ELTEC400-P4-96-3um	0.5296E-3	0.0102E-3
Eltec400-P4-Vitalii-amp-again-79-3um	0.0825 E-3	0 (1 run)
ELTEC404VM-79-3um	0.2102	0.0771
HPSA03E-79-3um	0.2029	0.1300
HPSA05F-79-3um	0.2530	0.0592
HPSA05F-96-3um (arrêt canon)	0.2877	0.0306
P3-Vitalii-79-3um	0.0849	0.0389 (1 point éloigné)
Thermopile-38-8um	0.0049	0.0038 (1 point éloigné)
Thermopile-96-3um	0.0086	0.0024
Thermopile-79-3um	0.0072	0 (1run)
Thermopile-96-3 (arrêt canon)	0.0088	0 (5/6 runs sans decay)

FIGURE 17 – Récapitulatifs des résultats.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Achille Stocchi, directeur du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire et Alessandro Variola, directeur du département accélérateurs, de m'avoir accueilli au sein de leur laboratoire. Je remercie également Nicolas Delerue de m'avoir encadré et aidé tout au long de ce stage. Je remercie enfin Joanna Barros et Melissa Vieille GrosJean pour leurs conseils et leur bonne humeur.

Références

- [1] V. Blackmore, G. Doucas, C. Perry, B. Ottewell, M.F. Kimmitt, M. Woods, S. Molloy, and R. Arnold, *First measurements of the longitudinal bunch profile of a 28.5 GeV beam using coherent Smith-Purcell radiation*, Phys. Rev. Special Topics-Accelerators and Beams. **12**, 032803 (2009).
- [2] Oliver Grimm and Peter Schmüser, *Principles of longitudinal beam diagnostics with coherent radiation*, (2006).
- [3] <http://www.synchrotron-soleil.fr>
- [4] <https://www6.slac.stanford.edu/about>
- [5] <http://www.lcp.u-psud.fr/rubrique.php3?id-rubrique=95>