

Stage au laboratoire de l'accélérateur linéaire  
sous la direction de Nicolas Delerue

# Mesure du front d'onde d'un faisceau laser

pour empiler des impulsions laser  
dans un accélérateur de particules

dans le cadre de la L3 Phytem  
Juin - Juillet 2011

## Le LAL

Le Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL), situé sur le campus d'Orsay, fut créé en 1955 dans le but de créer un accélérateur d'électrons pour le laboratoire de physique de l'ENS. Aujourd'hui, il étend ses activités de recherche sur les domaines de la physique des particules, l'astrophysique et la cosmologie. Le laboratoire participe notamment à de grands projets comme ATLAS, LHCb, Virgo ...

Le laboratoire dispose à la fois de groupes de recherche en physique et de groupes de développement de technologies. Ces derniers interviennent dans la conception et la réalisation des accélérateurs et autres dispositifs expérimentaux.

Ce stage fut effectué au Service d'étude et de réalisation d'accélérateurs (SERA), qui développe et réalise des accélérateurs de particules et les technologies associées.

## Créer des sources de rayons X

Mon stage s'inscrit dans le projet Mighty Laser (au KEK, à Tsukuba au Japon), ainsi que, de manière plus lointaine et indirecte, dans la réalisation de l'accélérateur ThomX (à Orsay), qui reprendra des principes du fonctionnement de Mighty Laser.

L'objectif du projet est de produire une source compacte et intense de rayons X. L'appareil devra être suffisamment compact pour être installé dans un hôpital ou un musée, et d'un prix relativement faible. L'objectif est de créer un faisceau directionnel d'environ  $10^{12}$  photons par seconde d'une énergie d'environ 50keV. Une source similaire pourrait aussi servir à créer des paires électrons-positons polarisées pour de futurs collisionneurs (notamment ILC) par interaction photon-noyau.

Pour y arriver, l'idée est d'utiliser l'interaction entre impulsion laser et paquet d'électrons. L'impulsion laser croise le faisceau d'électrons et est partiellement rétro-diffusée. Par effet Compton inverse, les photons rétro-diffusés sont plus énergétiques que les photons incidents, passant de l'infrarouge proche aux rayons X.

L'appareil est donc composé d'un accélérateur d'électrons (50 MeV) et d'un laser infrarouge. Pour minimiser les pertes, les électrons sont injectés dans un anneau et les impulsions laser dans une cavité 4 miroirs. Les deux faisceaux se croisent avec l'angle le plus faible possible pour maximiser l'effet Compton.

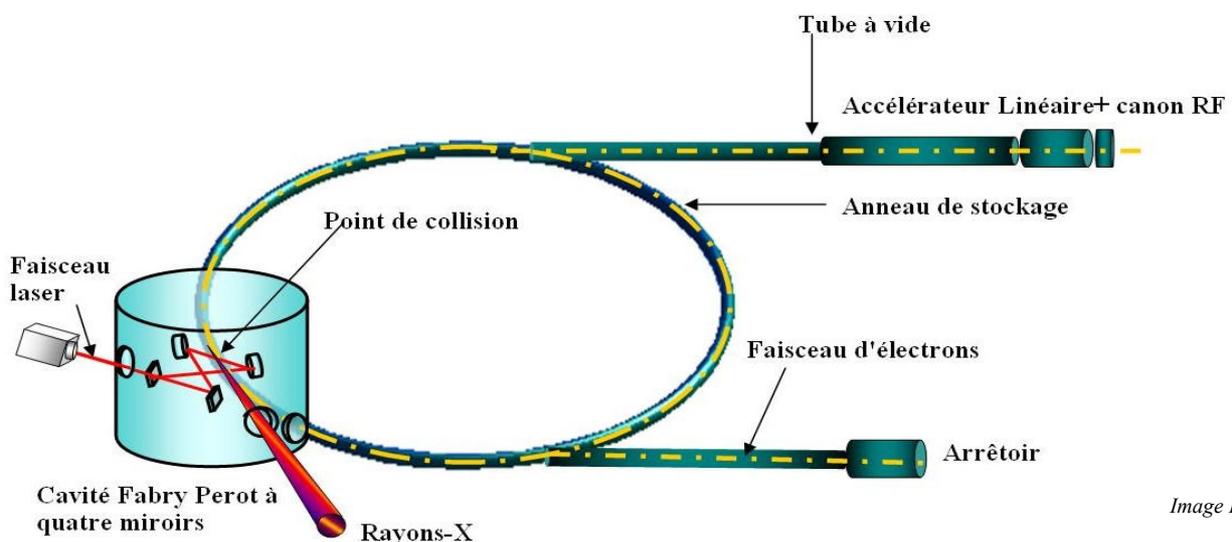
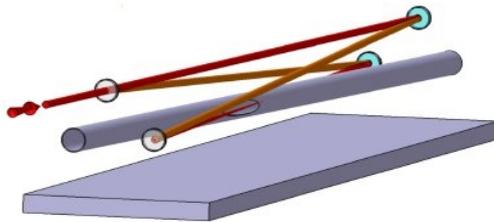


Image LAL

## Objectif du stage

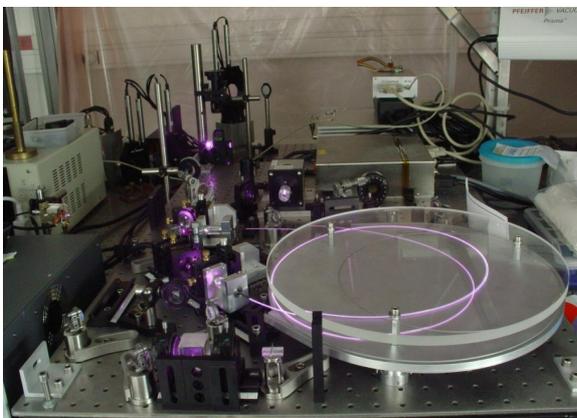
La section efficace de rétro-diffusion du laser par le faisceau d'électrons étant assez faible, il est nécessaire de boucler le faisceau laser dans une cavité Fabry-Perot. Pour des raisons techniques, comme la minimisation de l'angle d'interaction entre les deux faisceaux, on utilise une cavité 4 miroirs tridimensionnelle comme représentée ci-dessous.



(Images LAL)

Schéma de la cavité et de son point d'interaction avec le faisceau d'électron et photo de la cavité réelle.

Pour assurer la bonne propagation des impulsions dans la cavité et l'empilement idéal des impulsions successives dans la cavité, il faut connaître au mieux toutes les caractéristiques du faisceau : longueur d'onde, profil d'intensité et divergence angulaire du front d'onde.



L'expérience MightyLaser utilise un laser à fibre optique de 1031nm dont le front d'onde est mal connu. Pour optimiser son utilisation, il peut être utile de connaître précisément la forme du front d'onde laser à l'entrée de la cavité.

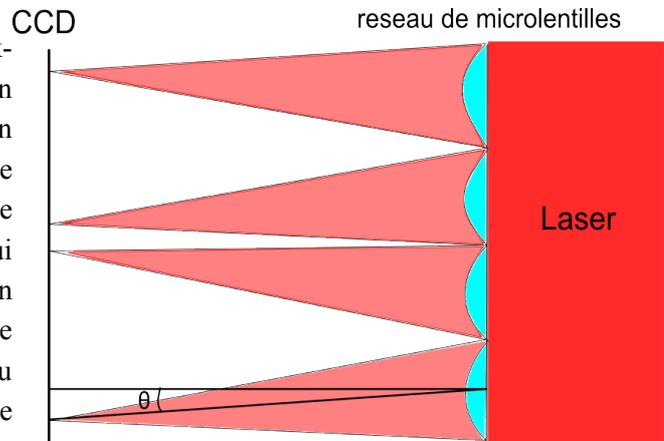
Ci contre, une photographie du laser à fibre optique de MightyLaser dont le front d'onde doit être caractérisé.

Il m'a donc été demandé de créer un analyseur de front d'onde de type Shack-Hartmann, capable de donner l'intensité et la divergence angulaire du faisceau en tout point, et ainsi permettre de reconstruire précisément le profil du front d'onde. Cet analyseur pourra ensuite être utilisé pour caractériser les différents lasers du laboratoire, ainsi que celui de MightyLaser au KEK.

Ce dernier est employé avec la cavité 4 miroirs représentée en haut de page. L'ensemble est installé sur l'accélérateur ATF2 au KEK. Pour contrôler la forme du front d'onde laser, on utilise un télescope en amont de la cavité, mais encore faut-il pouvoir mesurer ce front d'onde pour pouvoir le corriger.

## L'analyseur de Front d'onde de Shack-Hartmann

Un analyseur de front d'onde de Shack-Hartmann est composé d'un capteur CCD et d'un réseau de microlentilles (ou à défaut, de trous, on parle alors d'un analyseur de Hartmann ). Chaque lentille focalise sur un point du capteur CCD. Si le faisceau diverge, il produira sur le CCD une tache qui ne correspondra pas au point focal de la lentille. En mesurant l'écart entre la position de la tache et le point focal, on trouve la divergence ponctuelle du faisceau à l'endroit de la lentille. on obtient ainsi le profil de phase du faisceau incident.



En mesurant le "poids" de chaque tache sur le CCD, on obtient aussi le profil d'intensité du faisceau ( Notons que celui ci peut s'obtenir aisément sans recourir à un réseau de lentilles ).

### Première étape : Simuler et commander le matériel

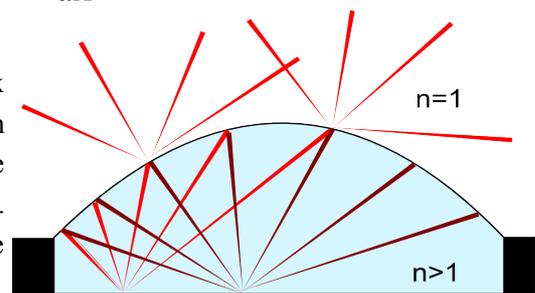
La première étape consiste à se procurer les éléments nécessaires à la création de l'analyseur, les seuls éléments à ma disposition au début du stage étant une caméra Ethernet et quatre réseaux de simples trous, pour procéder à des essais avant d'installer un réseau de lentilles. Il était donc nécessaire de commander une alimentation correspondant à la caméra (par *Power over Ethernet*) et un réseau de microlentilles adaptées.

L'effet principal contraignant le dimensionnement du réseau est la diffraction. Chaque lentille ayant un diamètre de l'ordre de la centaine de microns, les taches de diffraction sont relativement grandes. Pour obtenir une image correctement analysable, il est nécessaire que les taches de diffraction produites par le CCD ne se recouvrent pas. A cause de la proximité entre le réseau et le CCD (environ 1cm), le motif de diffraction ne correspond pas à une simple transformée de Fourier du motif du réseau et les taches de diffraction ne correspondent pas à des taches d'Airy.

J'ai donc écrit un programme sous Matlab qui simule le motif de diffraction observé sur l'écran à partir de la géométrie du réseau (trous ou lentille, rayon de courbure, épaisseur, indice, diamètre et espacement entre les trous/lentilles) et des caractéristiques du faisceau (longueur d'onde, forme du front d'onde, intensité). Selon les cas (lentilles ou trous), la méthode de calcul est assez différente. Pour des trous, il s'agit d'une propagation simple déterminée par la formule :

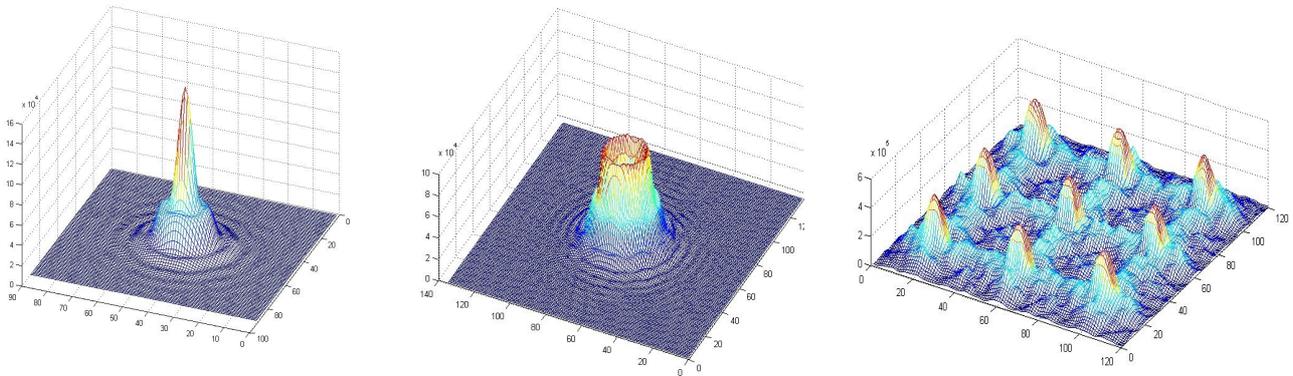
$$E(M) = \int_S E_0(A) e^{i\phi(A)} e^{-ikAM} dA$$

Alors que pour les lentilles, il s'agit d'une diffraction en deux étapes : le faisceau se propage dans la lentille et produit un champ diffracté sur la surface de sortie de lentille. Puis il se propage dans le vide et subit donc deux étapes de diffraction. Aux échelles utilisées dans l'expérience, il n'est pas possible de négliger ou d'approximer l'une ou l'autre de ces deux étapes.



Diffraction du faisceau laser par la lentille.

Ci dessous, différentes taches de diffraction obtenues en faisant varier les paramètres du système (taille et rayon de courbure des lentilles, distance lentilles-CCD). Ainsi que le motif créé par un réseau de 9 microlentilles.



Sur la deuxième image, on remarque clairement l'allure déformée de la tache de diffraction : le centre de la tache n'est plus ici un maximum mais un minimum de l'intensité lumineuse. La troisième image présente une configuration acceptable de l'analyseur : la tache centrale n'est pas déformée par la présence de ses voisines, chaque point peut donc être analysé indépendamment, ce qui permet une bonne reconstruction du faisceau.

La sensibilité de l'analyseur est meilleure pour une grande distance réseau-CCD, mais la taille des taches de diffraction augmente avec cette distance, chaque réseau de lentille présente donc une distance optimale qui maximise la sensibilité sans brouiller l'image obtenue. Plus le rayon d'une lentille est petit, plus la diffraction est importante et donc plus la sensibilité est réduite. Mais en même temps, de plus petites lentilles, plus rapprochées, permettent d'augmenter la résolution de l'analyseur - le nombre de points de mesure. Il faut faire un compromis. J'ai choisi des microlentilles Thorlabs de 300 microns de rayon et de 1,4 cm de focale (à  $\lambda=1\mu\text{m}$ ).

## Deuxième étape : Créer un programme pour exploiter les données

En attendant l'arrivée du matériel, j'ai écrit un programme Matlab qui retrouve les propriétés du faisceau à partir de l'image obtenue sur le CCD.

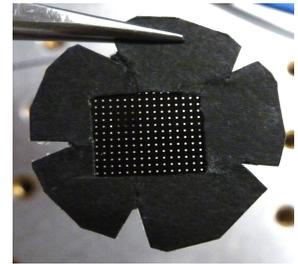
Il s'agit d'abord de retrouver les coordonnées du centre de chaque tache et le comparer avec un tableau de coordonnées de références qui correspondent aux points obtenus théoriquement dans le cas d'un front d'onde plan. Pour chaque lentille on obtient donc un vecteur caractérisant le déplacement du spot par rapport à une onde plane, et donc l'inclinaison ponctuelle du faisceau.

Les taches obtenues n'étant pas de simples taches d'Airy mais des motifs inconnus, il n'est pas possible d'utiliser une fonction de fit par une gaussienne (la fonction d'Airy est très proche d'une gaussienne). J'ai donc écrit un algorithme cherchant le centre de masse de chaque tache par un procédé itératif.

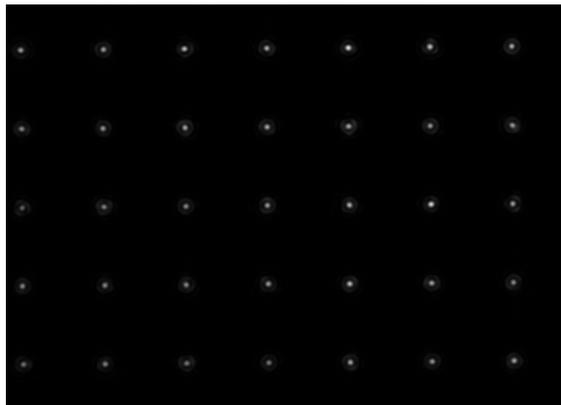
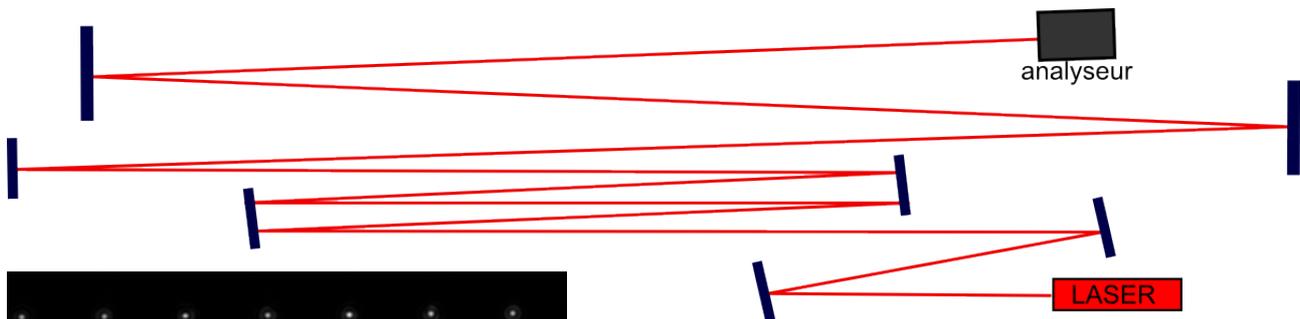
Une fois obtenue la divergence angulaire en chaque point du faisceau, il est possible de reconstruire le front d'onde par intégration numérique. Pour cela, mon programme choisit un point de départ et somme selon une direction arbitraire par la méthode des trapèzes. On obtient donc une vue en coupe du front d'onde. Ensuite, on somme par la même méthode selon toutes les droites (*pseudo-*) orthogonales pour obtenir la surface d'onde complète. Par souci de vérification, on effectue à nouveau l'opération en changeant la direction choisie au départ et on compare les surfaces obtenues.

### Troisième étape : Créer l'analyseur

La création de l'analyseur comporte une phase d'assemblage puis une phase de calibration. J'ai tout d'abord utilisé un réseau de trous de 200 microns espacés d'un demi millimètre de leurs voisins. Après avoir créé une monture en carton sur laquelle j'ai collé le réseau, j'ai introduit celle-ci dans le pas de vis de la caméra, à la place de la lentille, à 2 cm du CCD.

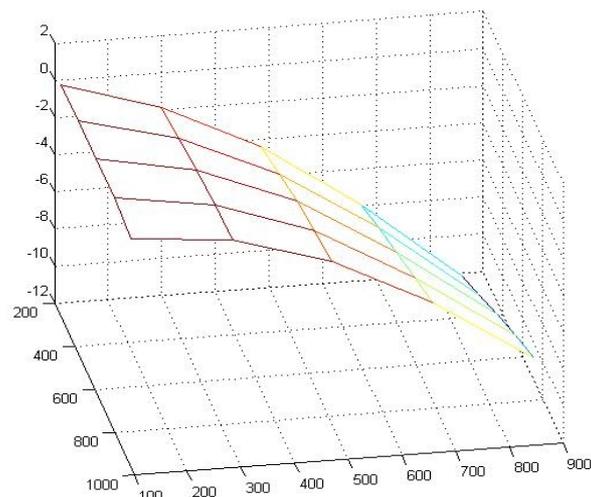
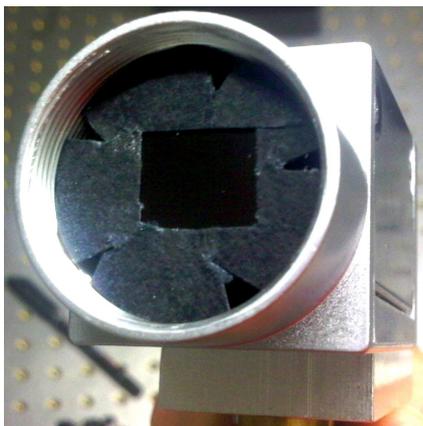


La calibration, plus complexe, demande un front d'onde plan et d'orientation maîtrisée. Pour cela, j'utilise un laser Hélium Néon dont je fais propager le faisceau sur une grande distance. N'ayant qu'une table de 2,5 m, j'ai utilisé un ensemble de miroirs plans comme un *Fabry - Perot désaligné* permettant au faisceau laser de parcourir 12,5 m avant de rencontrer l'analyseur.



On obtient alors l'image de calibration ci-contre. Grâce à une recherche des centres de masse, on peut alors créer un tableau recensant les points de référence correspondant à une onde plane.

Pour tester l'analyseur, j'ai utilisé une lentille cylindrique que j'ai placée à différentes distances de l'analyseur et en tournant l'axe du cylindre. J'ai ainsi pu obtenir les fronts d'ondes reconstitués et vérifier que mon analyseur fonctionne.



Ci dessus, une photo de l'analyseur ainsi que la reconstitution du faisceau issu d'une lentille cylindrique par l'analyseur.

La prochaine étape consiste à créer une monture convenable pour utiliser le réseau de micro-lentilles à la place du réseau de trous. On devrait ainsi obtenir une résolution et une précision plus que suffisante pour caractériser le laser utilisé au KEK. Cet analyseur pourra aussi être utilisé pour d'autres manipulations du laboratoire.

## Ce que ce stage m'a apporté

Grâce à ce stage, j'ai pu tout d'abord découvrir un nouveau domaine de la physique expérimentale qui m'était inconnu : l'instrumentation. Les TP consistent surtout à utiliser des appareils pré-construits pour analyser les données qu'ils nous délivrent sans vraiment se poser de questions sur leur fabrication (et donc leur composition). Ce stage m'a permis de découvrir la conception des instruments, leur fabrication ainsi que la programmation qui les accompagne. C'est un élément de culture scientifique que je n'aurais peut être jamais eu l'occasion d'acquérir sinon.

J'ai aussi pu, de manière générale, découvrir la recherche. J'ai eu à mener un projet entier, de la théorie à la fabrication de l'instrument, en passant par la simulation et le choix du matériel. Et cela en affrontant des impératifs d'ordre matériel et temporel. Ce fut aussi la découverte de la vie quotidienne d'une équipe de recherche : réunions de service, rapports d'activité, séminaires recherche, barbecues, démarches administratives ... Ainsi que la découverte du déroulement d'une soutenance de thèse, ce qui me donne un premier aperçu de ce que l'on va attendre de moi à la fin du doctorat.

Je tirerai aussi de ce stage un enrichissement culturel certain. Ce fut la découverte du monde de la recherche en physique des particules. J'ai aussi pu assister à diverses réunions et conférences (et soutenances) sur des domaines comme les accélérateurs et détecteurs, la cosmologie ou encore un peu de chromodynamique quantique.

Enfin, ce stage m'a permis de découvrir les zones boisées du campus d'Orsay, qui ne sont pas désagréables en cette saison. Je regretterai uniquement de ne pas avoir eu plus de temps libre pour en profiter.

Je voudrais remercier toute l'équipe du SERA pour leur accueil. Plus particulièrement, je remercie Nicolas Delerue pour m'avoir proposé ce stage, mais aussi pour son aide, ses conseils, son intérêt constant et son implication importante dans le travail des stagiaires. Je voudrais aussi remercier Ronic Chiche pour sa participation et Isabelle Sokolsky pour son efficacité. Enfin, je voudrais remercier les autres stagiaires, Maxime Eurin, Clément Godfrin, Clémentine Santamaria et Cyril Verrier pour leur compagnie, alors que j'effectuais un travail essentiellement solitaire.