



# Projet de détection

R&D laser pulsé/cavité pour mesurer la polarisation à l'ILC

BANAHA Mehdi & OCHANDO Christophe

*Sous la direction de Fabian Zomer*

13 mars 2005



## Résumé

Les mesures de précision qu'effectuera le futur ILC sur les particules connues ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ,...) ou nouvellement découvertes par le LHC (boson de Higgs, supersymétriques,...) nécessitera des faisceaux polarisés. La mesure rapide et précise de cette polarisation est donc un élément crucial à la réussite du projet. Une équipe du LAL est ainsi chargée par EUROTEV de réaliser une cavité Fabry-Perot en vue d'amplifier un laser pulsé, indispensable à la technique de polarimétrie Compton. La finesse et les précisions demandées posent de nombreux problèmes auxquels il faudra trouver une solution.

# 1 Contexte général

## 1.1 Motivations physiques

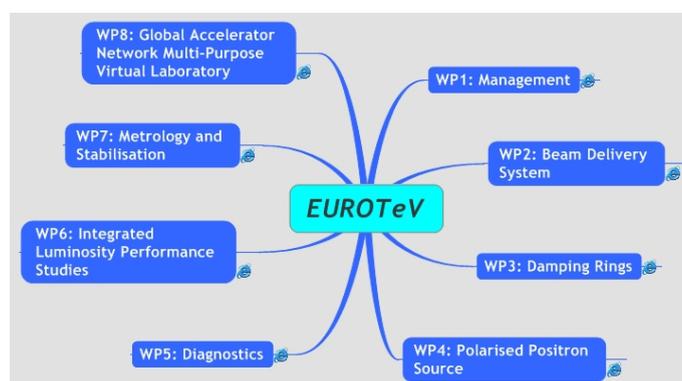
Aux alentours de 2007-2008, le LHC<sup>1</sup> entrera en service au Cern, à Genève. Ce collisionneur proton-antiproton permettra, les physiciens l'espèrent, d'enfin découvrir le fameux boson de Higgs grâce aux immenses détecteurs ATLAS et CMS, et peut-être de mettre à jour des manifestations de physique au-delà du Modèle Standard.

Cependant, si les nouvelles découvertes seront aisées, tant la plage d'énergie qu'il sera possible de balayer est importante, étudier dans le détail les propriétés des nouvelles particules ne sera pas chose facile. En effet, si les collisions hadroniques permettent d'atteindre de très hautes énergies, elles ne sont pas "propres" : la présence de jets, le fait que l'état initial exact de la réaction (un mélange de trois quarks) ne peut être connu, allié au grand nombre de modes de production, rendent extrêmement difficiles les mesures dites de précision. Ainsi, il sera presque impossible au LHC de prendre le relai du LEP (collisionneur électron-positron du Cern, arrêté en 2000) et de ses expériences ALEPH et DELPHI dans l'étude fine des propriétés (hélicité, masse, rapport d'embranchements, ...) des  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , Higgs et autres éventuelles nouvelles particules.

Après que les nouvelles technologies de supraconduction aient été approuvées par l'ITRP<sup>2</sup>, un effort mondial a été entrepris pour trouver une solution alternative. Profitant ainsi des derniers progrès en matière d'accélérateurs linéaires (qui ne souffrent pas des pertes énergétiques par émission synchrotron), la communauté internationale s'est regroupée pour construire le futur ILC<sup>3</sup> : collisionneur électron-positron de très hautes énergies et luminosité (1000 fois celle du LEP), véritable complément au LHC.

## 1.2 EUROTEV

Dans la perspective de ce projet (dont la mise en fonctionnement pourrait intervenir aux alentours de 2015), de nombreuses études R&D doivent encore être menées pour améliorer les performances des technologies actuelles. C'est dans ce contexte qu'est né EUROTEV, consortium regroupant vingt-sept instituts européennes, dans le but de participer aux études de conception de l'ILC. Bénéficiant d'un financement de la Commission Européenne, EUROTEV a pour mission, sous l'égide du groupement mondial GDI<sup>4</sup>, d'étudier ces différents aspects :



Ces activités seront complétées par des études effectuées aux Etats-Unis et en Asie. Elles serviront non seulement à construire un ILC pouvant explorer des domaines d'énergie avoisinant le TeV, mais aussi pour des ILC fonctionnant dans des régimes de plusieurs TeV afin de parcourir toute la plage couverte par le LHC.

<sup>1</sup>Large Hadron Collider

<sup>2</sup>International Technology Recommendation Panel

<sup>3</sup>International Linear Collider

<sup>4</sup>Global Design Initiative

### 1.3 Mesure de la polarisation : nécessité du R&D

Au futur ILC, le faisceau d'électrons (éventuellement de positrons) devra être polarisé longitudinalement. Ceci est rendu nécessaire par la présence de couplages dits chiraux dans la théorie électrofaible ; les sections efficaces des processus sont notamment dépendantes des polarisations. Un des problèmes à résoudre, en vue de construire le futur collisionneur linéaire, est donc la réalisation d'un polarimètre précis et rapide. C'est un des défis majeurs que devront relever les équipes de recherche.

A haute énergie, la méthode la plus précise pour mesurer la polarisation est la "polarimétrie Compton" [1]. Les interactions Compton  $\gamma + e \longrightarrow e + \gamma$  sont produites en envoyant un laser sur un faisceau d'électrons. Il peut alors être montré [1] que lorsque la polarisation de la lumière laser est circulaire, la polarisation du faisceau d'électrons est déterminé en analysant le photon diffusé ou le spectre en énergie de l'électron.

Afin que la section efficace différentielle soit suffisamment élevée pour cette mesure de polarimétrie, des pulses laser de haute énergie sont requis au point de collision. En outre, un certain nombre de paramètres du faisceau laser doivent être ajustés [2]. La luminosité minimale au point d'impact nécessite ainsi une énergie de 10 à 100  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  avec une largeur temporelle de 1 ps ; le taux de répétition doit être de 5 MHz (ce qui correspond à un pulse tous les quatre mètres). Enfin, le faisceau d'électrons étant très "pincé", de l'ordre de 10 $\mu\text{m}$  de largeur, celle du faisceau laser devra être de 50 $\mu\text{m}$ .

Plusieurs possibilités ont été envisagées pour le choix du laser. Ceux présents dans le commerce ne pouvant fournir ni un taux de répétition assez élevés, ni des pulses assez énergétiques, l'utilisation du laser pulsé multi-étage de forte puissance, développé par le Max Planck Institute, a été un temps évoqué. Mais le coût exorbitant (près de 600 000 euros) allié à un encombrement excessif, ont poussé les physiciens à se tourner vers une solution R&D : l'achat d'un laser pulsé de moindre puissance (10nj/pulse) qui sera amplifié au moyen d'une cavité Fabry-Perot de grande finesse. Cette solution, outre un coût de développement moindre, présente l'intérêt de pouvoir également servir pour deux autres applications dans l'ILC : la possibilité, à partir des faisceaux d'électrons, de concevoir un collisionneur photon-photon [3], ainsi que la réalisation directe de faisceaux de positrons polarisés.

Le gain recherché dans la cavité est de  $10^4$  (voire de  $10^5$ ). Actuellement, des gains de l'ordre de 9000 sont obtenus avec un laser continu [4], et de 12000 avec un laser pulsé de 30ps (dans une expérience au SLAC [5]). Il s'agit donc de gagner un à deux ordres de grandeur et d'optimiser le couplage laser/cavité.

### 1.4 Equipe et budget

C'est dans le cadre du "Work Package : Beam Diagnostic" que l'équipe du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay<sup>5</sup>, composée de :

- 3 physiciens (dont un opticien de Moscou)
- 1 ingénieur de recherche en électronique associé à des techniciens
- 1 ingénieur d'étude en électronique
- 2 ingénieurs de recherche en mécanique aidés d'un dessinateur et d'un monteur
- 1 ingénieur d'étude en mécanique

a obtenu un financement à la hauteur de 370 000 euros de la part d'EUROTEV (qui consacre en tout 9 millions d'euros pour le R&D sur l'ILC) pour tester la faisabilité d'une cavité Fabry-Perot de haute finesse pour une mesure précise de la polarisation longitudinale. A cela s'ajoute de plus un apport de la part de l'IN2P3 d'environ 200 000 euros. Au final, le budget total s'élève ainsi à près de 570 000 euros étalés sur 3 ans, répartis comme suit :

- 370 000 euros pour l'achat de matériel (dont le laser qui, à lui seul, coûte 110 000 euros)
- 200 000 euros pour couvrir le salaire du physicien russe

L'arrivée des fonds est attendue dans le courant du mois de mars. De plus, une fois la commande effectivement passée, trois mois seront nécessaires à la livraison du laser pulsé par la société "Coherent". Ce dernier est un oscillateur Ti :sa (modèle MIRA) pompé par un laser vert de 6W. Il possède deux modes de fonctionnement (1ps et 100ps) et émet dans le proche infra-rouge (sa longueur d'onde étant de 800nm).

## 2 L'expérience

### 2.1 Dispositif expérimental

Le laser commercial Ti :sa envoie des pulses de 10nJ, à un taux de répétition de  $f_{rep}=5\text{MHz}$ , dans une cavité Fabry-Perot d'une longueur  $L=2$  mètres (d'où une fréquence de résonance  $f_0=c/2L=75\text{MHz}$ ) (cf figure 1). Les pulses pénètrent dans la cavité les uns après les autres et effectuent des aller-retours en se réfléchissant sur les miroirs. Ceux-ci sont traités avec un revêtement multi-couches permettant d'assurer d'excellents coefficients de réflexions.

<sup>5</sup>Equipe du Pulse Laser Polarimeter (PLP)



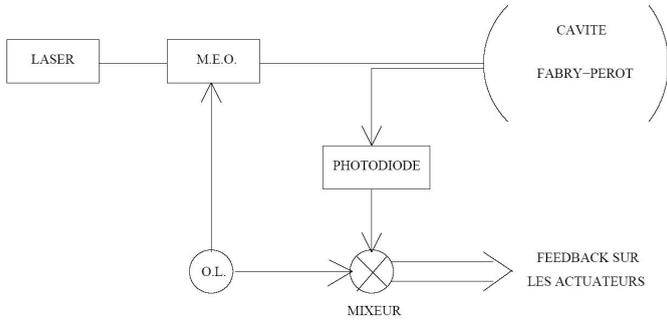


FIG. 2 – Schéma de la chaîne d'asservissement utilisant la méthode Pound-Drever

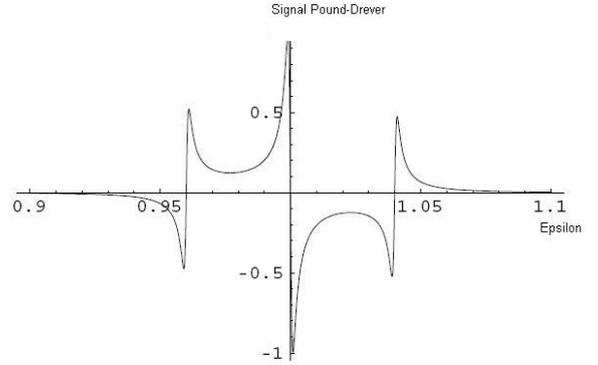


FIG. 3 – Signal d'erreur Pound-Drever en réflexion. Pour de petits écarts à la résonance, un asservissement linéaire est possible.

### 2.2.2 Problème de déphasage

Les multiples réflexions des pulses sur les super miroirs vont induire une dispersion chromatique responsable d'un déphasage  $\Delta\phi$  (cf figure 4) entre le maximum de l'enveloppe du pulse et le maximum du champ électrique oscillant dans le pulse. Ce déphasage va causer une perte de couplage champ/cavité puisque le maximum du champ de chaque pulse se retrouvera légèrement en retard ou en avance par rapport à la fréquence de résonance de la cavité FP (cf figure4) et limitera par conséquent le gain. Notons qu'il existe des miroirs dits "shurped" qui évite les effets de dispersion chromatique. Mais à l'heure actuelle, leur coefficient de réflexion sont insuffisants pour l'expérience et la finesse voulue ici.

Pour espérer atteindre un gain de l'ordre de  $10^4$ , il ne faut pas que le décalage en fréquence excède 3 KHz (largeur de la bande passante de la cavité). Or, la largeur naturelle d'un pulse vaut  $1/(1 \text{ ps})=10^{12} \text{ Hz}$ , il faudra en conséquence faire fonctionner le laser en "blocage de mode" (dit aussi "mode lock") permettant de délivrer des impulsions ultra-brèves [8], piquées autour d'une fréquence définie. Cette contrainte, à laquelle il faut ajouter l'effet de variation lente de  $\Delta\phi$  avec la variation thermique dans le laser (qui peut atteindre l'ordre du MHz) nous montre que la seule chance de salut sera de minimiser ce déphasage, en recalant la fréquence du champ E sur la fréquence de résonance de la cavité FP  $f_0$  au moyen d'un "feedback" (en utilisant des signaux d'erreurs issus de la cavité FP).

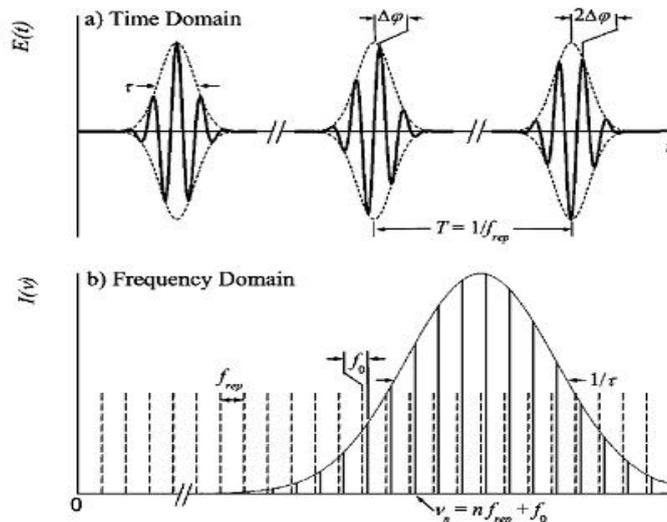


FIG. 4 – Représentation du déphasage  $\Delta\phi$  entre l'enveloppe du champ et le maximum du champ oscillant dans l'enveloppe. Son existence décale le peigne de fréquence du laser (donné par  $\nu_n = n \cdot f_{rep} + f_0$ ) et peut faire perdre le couplage cavité/laser.

### 2.2.3 Dilatation thermique

Avant de se lancer dans les réglages avancés de la cavité laser, il est d'abord nécessaire de s'assurer que la longueur de la cavité FP ne varie pas elle-même.

Le principal problème auquel il faut alors faire face pour maintenir les conditions de résonance dans la cavité FP est la dilatation thermique du tube ou de la table qui relie les miroirs, ainsi que celle des miroirs eux-même. Par exemple, sur une table en inox, pour une variation de  $1^{\circ}\text{C}$  les miroirs s'éloignent de  $30\mu\text{m}$ . Après 5 aller-retours, le pulse initial aura déjà  $300\mu\text{m}$  de retard et arrivera quand le suivant sera déjà complètement rentré.

Pour en limiter les effets, l'utilisation de matériel en invar a été un temps invoqué (car son coefficient de dilatation thermique est de  $1,1.10^{-6}$ , contre  $16.10^{-6}$  pour l'inox, finalement choisi) mais le coût trop important de cette solution l'a écartée.

Afin de corriger ces effets de dilatation, l'ingénieur mécanicien [9] compte installer un système de piézos à l'arrière de la rotule dans laquelle est placé le miroir (cf figure 5). Ces piézos pourront être réglés manuellement ou être asservie en fonction du degré de précision recherché.

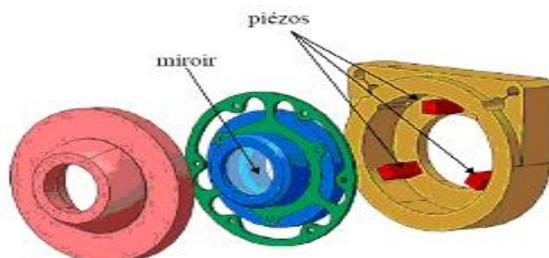


FIG. 5 – Schéma d'implémentation des piézos. Le miroir est fixé sur une rotule entourée d'une fine membrane en inox sur laquelle appuie les piézos.

### 3 Réalisation

#### 3.1 Validation en deux étapes

La réalisation de ce projet ambitieux va conduire l'équipe à faire face à de nombreux problèmes (physiques, mécaniques, électroniques,...). Celle-ci a donc opté pour une validation en deux étapes afin de les séparer et, ainsi, de mieux les appréhender individuellement :

- Fabrication d'une cavité FP de type confocale, sans asservissement et stable dans le temps.
- Fabrication d'une cavité FP de type concentrique avec asservissement dynamique.

La condition de fonctionnement d'une cavité laser est l'alignement du faisceau sur l'axe optique (ligne joignant les deux centres des miroirs). Une cavité confocale diffère d'une cavité concentrique de par le rayon de courbure des miroirs les composants ainsi que par la position des centres des miroirs (cf figure 6 et figure 7). Ce rayon de courbure plus important dans le cas de la cavité confocale lui assure une plus grande stabilité puisque le faisceau sera moins dévié en cas de non alignement avec l'axe optique.

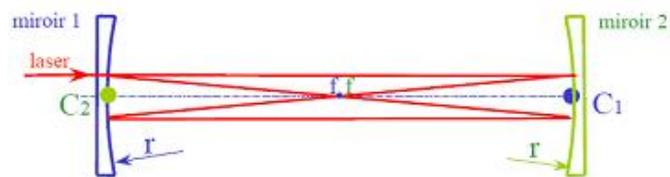


FIG. 6 – Schéma d'une cavité confocale. La distance  $d$  entre les miroirs est égale au rayon des miroirs :  $d=r_1=r_2=2m$ .

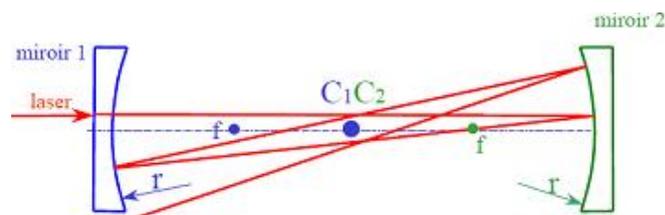


FIG. 7 – Schéma d'une cavité concentrique. La distance  $d$  entre les miroirs est égale à la somme des rayons des miroirs :  $d=r_1+r_2=2m$ .

#### 3.2 Cavité confocale

Cette cavité étant plus stable que la cavité concentrique (il sera ainsi possible d'effectuer le réglage manuellement sans faire intervenir de "feedback"), elle servira d'étape intermédiaire pour vérifier que les paramètres physiques sont suffisamment compris et maîtrisés pour obtenir le gain voulu. En contrepartie de sa plus grande stabilité, la taille du faisceau laser ne pourra être inférieure à  $500\mu\text{m}$ .

Afin de garantir la stabilité de cette cavité, il faut s'affranchir de tout ce qui pourrait empêcher le faisceau et l'axe optique d'être aligné (dilatations, vibrations, ...). Cependant, avant de corriger ces effets correctement, il convient de les quantifier : cela sera fait grâce à la méthode dite "réglage par vis et coin" (cf figure 8). Ainsi, lorsque le miroir se décale et que l'axe optique ne se trouve plus aligné avec le faisceau laser, le coin se déplace et le point d'appui se surélève/s'abaisse d'une certaine hauteur qui est connue. Il suffira juste d'installer un système de vis par pas agissant sur le piézo afin de recalibrer le coin manuellement sur sa position initiale. En transposant cette méthode à 3 dimensions, il est possible d'obtenir une cavité suffisamment stable .

La réalisation et l'installation de la cavité confocale, avec obtention du gain souhaité est prévue pour octobre 2005.

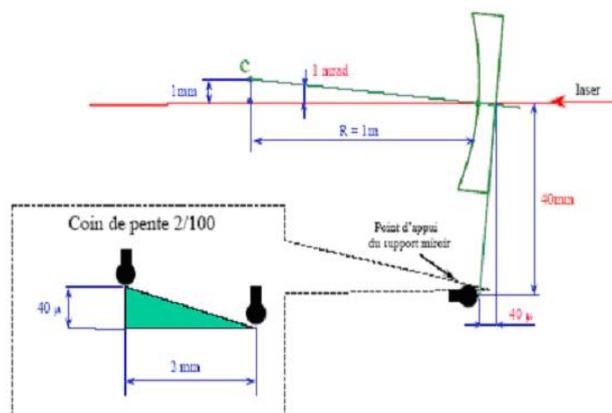


FIG. 8 – Méthode de réglage par vis et coin.

### 3.3 Cavité concentrique

Toutes les solutions trouvées et techniques utilisées pour la cavité confocale devront être pensées de manière évolutive et modulable afin de les transposer ou de les adapter à la cavité concentrique. En effet, seule cette dernière permet de focaliser le faisceau jusqu'à la taille recherchée de  $50 \mu\text{m}$ . Comme dit plus haut, elle souffre en contre-partie d'une grande instabilité : comme les centres optiques des miroirs sont confondus, le moindre déplacement de l'un de ces miroirs fait immédiatement basculer l'axe optique à la perpendiculaire du faisceau. Afin de minimiser cet effet, l'astuce suivante sera employée : rapprocher les miroirs pour espacer les centres optiques, puis, par un jeu de rotation de ces derniers, réaligner l'axe optique sur le faisceau. Plus les centres optiques seront éloignés, plus l'axe optique sera aligné sur le faisceau et la cavité s'en trouvera donc d'autant plus stabilisée. Cependant, le fait d'espacer les centres optiques s'accompagnera irrémédiablement d'une défocalisation du faisceau. Il faudra donc trouver un compromis acceptable.

Afin d'illustrer l'extrême sensibilité de la cavité, si on imagine un basculement d'un des miroirs de  $125\text{nm}$  par rapport à sa position d'équilibre, le miroir s'inclinera de  $10 \mu\text{rad}$ , l'angle entre l'axe optique et le laser sera de  $1 \text{ mrad}$  et la distance entre l'axe optique et le laser sera de  $1\text{mm}$  au niveau du miroir ! (cf figure 9)

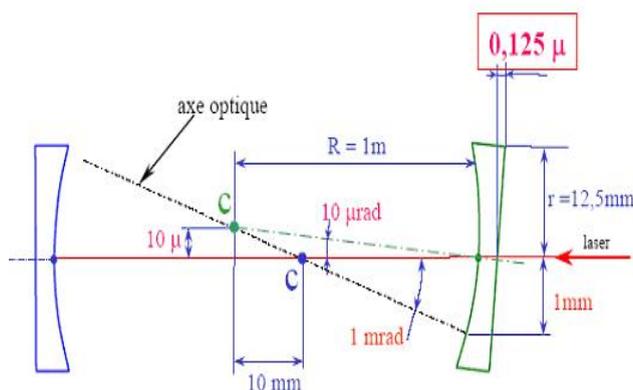


FIG. 9 – Evaluation des déplacements

Compte tenu de la précision recherchée, il faudra donc prendre en considération les phénomènes physiques susceptibles de provoquer des déplacements des miroirs et notamment :

- la dilatation thermique des miroirs, de l'ordre du micromètre. Celle-ci n'était pas un obstacle à la stabilité de la cavité confocale mais pourrait le devenir ici.
- les vibrations dues à des perturbations extérieures à même de se propager jusqu'à la table sur laquelle repose le banc optique.

Tous ces réglages, trop fins pour être fait manuellement, nous laisse entrevoir la nécessité d'effectuer un asservissement dynamique sur les piézos. Malheureusement, à l'heure actuelle, il n'existe aucune méthode d'asservissement qui permette de savoir s'il faut tourner plus un miroir que l'autre, ni dans quel sens il faut tourner. Les électroniciens devront donc développer une méthode spécifique à ce problème.

Afin d'espérer atteindre ce degré de précision, il faudra apporter une attention toute particulière aux points suivants :

- Amortir la table
- Réguler la température et isoler le dispositif du sol
- Isoler du rayonnement extérieur
- Réduire au strict minimum toutes les parties mobiles entre le miroir et la table optique : c'est à dire ne mettre dans la cavité uniquement les réglages qui ne peuvent être placés à l'extérieur.
- Réduire au maximum tout les éléments sujets à dilatation qui se trouvent entre le miroir et la table et surtout ceux qui relient les miroirs entre eux (faire des capots pour les différents éléments, faire des supports séparés pour l'électronique,...)

La réalisation et l'installation de la cavité concentrique, avec obtention du gain souhaité, est prévue pour octobre 2006.

## 4 Conclusion et perspectives

Nous avons vu à travers ce rapport les différents problèmes auxquels sont confrontés l'équipe ainsi que les solutions ou les axes de recherche proposés. Une fois la cavité mise en place, un contrôle continu sera opéré à chaque étape et ce, jusqu'à la fin du projet en 2008. Il faudra ainsi s'assurer que l'amplification désirée puisse bien être obtenue, que les algorithmes de contrôle soient bien compris et surtout que la cavité est bien stable dans le temps.

Cependant, la conception de la cavité Fabry-Perot concentrique ne constituera qu'une étape dans le projet R&D global. Dans un deuxième temps, il sera impératif d'étudier le couplage du système à un faisceau externe à la cavité (par exemple un faisceau d'électrons) afin de prouver que la puissance nécessaire peut-être ainsi maintenue et que la cavité peut être alignée spatialement avec l'axe du faisceau [10]. Aux alentours de 2010, le développement du polarimètre pourra ainsi être envisagé.

## 5 Remerciements

Nous voudrions remercier Fabian Zomer pour avoir accepté de diriger ce stage. Son aide et ses profondes connaissances ont été de précieux atouts tout au long de ce projet.

Nous tenons également à témoigner notre reconnaissance à Ronic Chiche et Richard Cizeron pour leurs précieuses techniques utiles et leur disponibilité, ainsi qu'à Didier Jehano pour nous avoir permis d'accéder à quantité de documents profitables.

Nous souhaitons enfin remercier Thomas Patzak pour l'organisation de ces stages de détection.

## Références

- [1] Voir par exemple, D.P. Barber et al., Nucl. Instr. and Meth., A329(1993) **79**.
- [2] V.Gharibyan, N.Meyners and P.Schuler, Linear Collider detector note (2001) LC-DET-2001-047.
- [3] I.Will, T.Quast, H.Redlin and W.Sandner, Nucl.Instrum. Meth. A **472** (2001) 79.
- [4] F.Zomer, Habilitation, Université Paris 11-Orsay (2003) LAL/0312.
- [5] R.J. Loewen, *A compact light source : design and technical feasibility study of a laser-electron storage ring X-ray source*, SLAC-Report-632 (2003).
- [6] Eric Black, LIGO Technical Note (98) LIGO-T980045- 00- D.
- [7] R.Chiche, *Eléments de réflexion pour la réalisation du contrôle d'un LASER pulsé*, Note technique du PLP, (2005)
- [8] F.Zomer et al., *Cavités Fabry-Perot dans le contexte du International Linear Collider*, Présentation au Conseil Scientifique du LAL (2004)
- [9] R.Cizeron, *Présentation de quelques solutions mécaniques*, Note technique du PLP, (2005)
- [10] F.Zomer et al., *Test of a Fabry-Perot cavity for a precise measurement of the longitudinal polarisation in a future linear collider*, Note interne au LAL, (2005)