

Rapport de pré-thèse

Etude des désintégrations semileptoniques des mésons D_s dans BaBar



Master 2 Physique
Spécialité : Noyaux, Particules, Astroparticules, Cosmologie

1-Contexte général

Le Modèle standard de Glashow, Salam et Weinberg est la théorie qui décrit aujourd'hui les interactions forte, faible et électromagnétique des quarks et des leptons. Un des thèmes principaux de la recherche en physique des particules à l'heure actuelle consiste à tester cette théorie et à mesurer les différents paramètres qu'elle fait intervenir. D'après le Modèle standard, les bosons vecteurs de l'interaction faible W^\pm ne se couplent pas de la même façon avec tous les quarks, et les différents couplages sont décrits par la matrice CKM (ou matrice de mélange des quarks). L'existence d'une phase dans certains termes de cette matrice (V_{ub} et V_{td}) semble être à l'origine du phénomène de la violation de la symétrie CP (Parité, Conjugaison de charge).

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Afin de valider la description de la violation CP par le modèle standard, et de mesurer les paramètres de la matrice CKM, des expériences telles que BaBar (à SLAC, en Californie) ou BELLE (au Japon) ont été construites. On les appelle couramment « usines à B » car elles produisent une grande quantité de paires $b\bar{b}$.

Pour étudier le couplage des quarks aux bosons W^\pm , on peut par exemple s'intéresser aux désintégrations des mésons qui produisent des hadrons et /ou des leptons dans l'état final par l'intermédiaire d'un W^\pm . En fait, suivant les particules produites dans l'état final, on classe les désintégrations en trois types : leptonique, hadronique et semileptonique. Les désintégrations leptonique et semileptonique sont les plus simples à interpréter du point de vue théorique car elles peuvent se décomposer en un produit d'un courant faible pour le système lepton-neutrino et d'une partie hadronique pour les quarks. Le courant faible étant bien connu, ces désintégrations permettent d'étudier les effets de l'interaction forte (théorie QCD) dans un environnement propre, dans la suite nous considérerons uniquement les désintégrations semileptoniques.

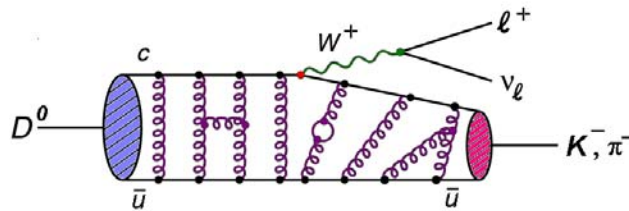


Diagramme de la désintégration semileptonique du méson charmé D^0

On peut mesurer expérimentalement les rapports d'embranchement et en déduire les valeurs des paramètres de la matrice CKM, car ces deux quantités sont égales à un facteur théorique près : le facteur de forme. Il faut donc calculer ce facteur de manière très précise en utilisant QCD pour remonter aux paramètres intéressants. Cependant, aux énergies typiques de la désintégration des mésons, l'interaction forte ne peut pas être calculée par la méthode habituelle des perturbations car la valeur de la constante de couplage est trop importante. Les

théoriciens ont donc développé une méthode qui consiste à discrétiser l'espace-temps et à calculer la théorie de QCD sur un réseau. Cette méthode n'est pas totalement maîtrisée à l'heure actuelle et il existe plusieurs modèles de calcul qui donnent des valeurs différentes pour les facteurs de formes.

Un moyen de contraindre ces modèles est d'utiliser la physique du charme, pour laquelle les termes de couplage de la matrice CKM sont déjà connus, ce qui permet de faire une mesure des facteurs de formes pour la comparer ensuite aux valeurs fournies par les calculs théoriques. Pour cela on peut utiliser les données de l'expérience BaBar qui fabrique en plus des mésons beaux une grande quantité de paires $c\bar{c}$.

Actuellement, ni la collaboration BaBar, ni la collaboration BELLE n'ont publié de résultats concernant les désintégrations semileptoniques des mésons charmés. L'expérience CLEO-c qui est destinée à étudier les propriétés des particules charmées vient de démarrer. Jusqu'en avril 2006, elle doit étudier les mésons non-étranges et devrait commencer l'enregistrement des données relatives aux mésons étranges D_s au cours de l'année 2006. BaBar possède l'avantage d'avoir déjà enregistré des données et détient ainsi une statistique supérieure à celle espérée par CLEO-c de plus d'un ordre de grandeur pour ce type de canal. La viabilité du programme de recherche a été étudiée et montre que les mesures réalisées dans BaBar devraient être très compétitives.

Cette thèse s'inscrit donc dans le cadre d'un vaste programme de physique qu'est l'étude des paramètres contrôlant la physique des saveurs, mais en l'abordant sous un angle original : celui de l'utilisation des désintégrations semileptoniques des mésons charmés afin de valider des calculs d'interaction forte sur réseau. L'étude de ces désintégrations pourra conduire à l'exploration d'autres phénomènes hadroniques plus rares ou difficiles à isoler. Il faut souligner également la création récente d'un groupement de recherche « Physique Subatomique et Calculs sur Réseau » dont un des sujets majeurs porte sur les études des processus électrofaibles, concernant en particulier les mésons beaux et charmés.

2-Présentation de l'équipe :

Mon travail sera effectué au sein du groupe BaBar du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL) d'Orsay. Ce groupe comprend actuellement huit physiciens permanents, trois post-docs et deux doctorants. Il a des activités dans plusieurs domaines:

- A-M. Lutz, M. Davier, Wenfeng Wang, S. Rodier travaillent sur les mesures de précision de la section efficace hadronique d'annihilation électron-positron à partir du seuil et jusqu'à 5 GeV en masse environ, ce qui fournit l'information nécessaire pour les calculs de polarisation du vide.
- M-H. Schune, A. Stocchi, S. Pruvot (première année de thèse), F. Polci (thèse en cotutelle) et M. Pierini s'occupent des mesures des angles α et γ du triangle d'unitarité. N. Arnaud fait aussi partie de ce groupe mais il est actuellement à SLAC pour un an et travaille sur le DIRC (détecteur Tchérénevov du BaBar). A. Hoecker participe aussi à ces études jusqu'en Juillet 2005. F. Le Diberder, responsable de la physique des particules à l'IN2P3, contribue à temps partiel à cette activité.
- P. Roudeau et A. Oyanguren travaillent sur les désintégrations semileptoniques du quark charmé.
- G. Wormser travaille sur la désintégration du B en K inclusif et s'intéresse à la mise en place future d'une « super usine » à B.
- G. Grosdidier travaille sur le GRID et la visualisation des événements du DIRC.

Le chef d'équipe est A-M. Lutz. Ce groupe fait partie de la collaboration internationale de BaBar qui regroupe près de 600 physiciens et ingénieurs répartis dans 75 instituts.

L'utilisation des données de l'expérience implique une participation à l'enregistrement des données et à des tâches d'intérêt général (suivi technique de l'appareillage ou participation au futur projet d'usines à B de très haute luminosité) effectuées à SLAC.

3-Présentation de la thèse

3.1 Sujet

L'étude des hadrons charmés permet d'obtenir des informations importantes pour la physique des mésons beaux et du mélange des saveurs intervenant dans la matrice CKM. Des expériences comme CLEO-III et FOCUS se sont intéressées au charme mais elles avaient peu de statistique et les barres d'erreur sur les mesures expérimentales restaient assez grandes.

Les données déjà enregistrées par BaBar (260 millions d'évènements $c\bar{c}$) ont l'avantage de constituer un excellent réservoir pour étudier la physique des hadrons charmés.

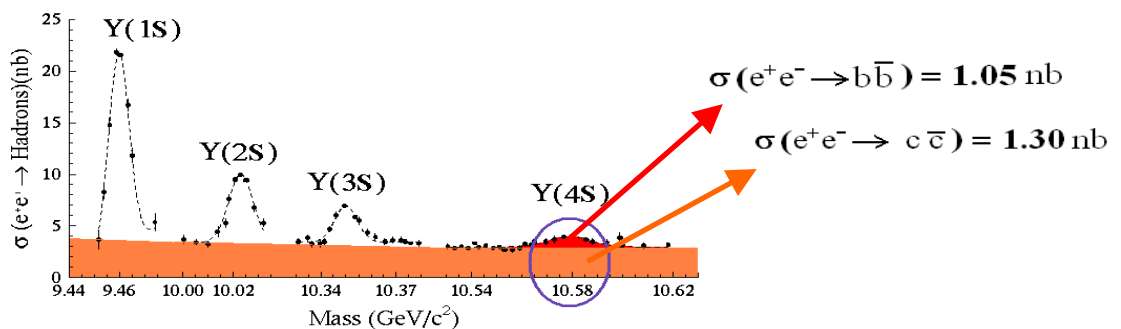
Le sujet de cette thèse prévoit d'exploiter les désintégrations semileptoniques des mésons charmés étranges D_s de trois manières différentes :

- Le couplage faible de ces désintégrations étant bien connu, on peut étudier les effets de l'interaction forte pour les transposer ensuite aux désintégrations semileptoniques des mésons B et en déduire le couplage faible pour celles-ci donc les éléments de la matrice CKM.
- On pourra mesurer les facteurs de formes de ces désintégrations pour les comparer aux calculs de QCD sur réseau et avoir ainsi un moyen de tester les différents modèles théoriques. Les calculs de QCD sur réseau validés pourront ensuite servir à des prédictions pour la physique du B.
- Grâce à la forte statistique dont on disposera, on pourra étudier pour la première fois des phénomènes rares comme les désintégrations qui sont supprimées par la valeur de l'angle de Cabibbo ou la production d'états hadroniques correspondants à des excitations orbitales ou radiales.

D'autre part, dans le cadre du Groupement de Recherche, et avec l'aide d'un ingénieur du service électronique du LAL, il est prévu de s'intéresser à un développement technique lié aux études sur les ordinateurs futurs pour les calculs de QCD sur réseau.

3.2 Présentation de l'expérience BaBar

BaBar est installée à SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) et utilise l'accélérateur de particules PEP II. C'est un collisionneur électron-positron asymétrique qui fonctionne à l'énergie de la résonance $Y(4s)$ (10.58 GeV). Il produit en plus des paires $b\bar{b}$ des paires $c\bar{c}$ avec une section efficace de 1.30 nb.



Section efficace de production de hadrons en fonction de la masse

Le détecteur BaBar se trouve autour du point d'interaction e^+e^- et il est constitué de plusieurs sous détecteurs :

- Le détecteur de vertex SVT (Silicon Vertex Tracker) assure une mesure précise des trajectoires des particules chargées au voisinage du point d'interaction. Il détecte également les traces de faible impulsion transverse qui n'arrivent pas aux détecteurs suivants. Il permet aussi de mesurer la perte d'énergie par unité de longueur des particules chargées dE/dx .
- La chambre à dérive DCH (Drift Chamber) dont le but est de reconstruire efficacement, avec une grande précision la trajectoire des particules chargées de grande impulsion transverse et de mesurer le dE/dx .
- Le détecteur de lumière Cherenkov DIRC (Detection of Internally Reflected Cerenkov) permet l'identification des particules chargées : connaissant l'impulsion de la particule grâce aux détecteur précédents, et l'angle d'émission de la lumière Cherenkov donnée par le DIRC, on peut obtenir la masse de la particule.
- Le calorimètre électromagnétique EMC (ElectroMagnetic Calorimeter) mesure l'énergie et la position des électrons et des photons principalement.
- Le détecteur de muons et de hadrons neutres IFR (Instrumented Flux Return)

L'expérience BaBar est en fonctionnement depuis 1999 et a enregistré une luminosité intégrée de 244 fb^{-1} , une grande quantité de données a donc déjà été collectée.

3.3 Spécificité

Bien que l'exploitation des données relatives aux mésons D_s soit plus difficile que celles concernant les mésons non étranges D , le D_s (qu'il soit de charge négative ou positive) à l'avantage de se prêter plus facilement aux calculs de QCD sur réseau car il contient des quarks relativement lourds (c et s). En effet, les calculs qui concernent des hadrons lourds présentent actuellement une grande difficulté pour inclure des quarks légers (u, d) car ces derniers ont une longueur d'onde très grande devant la taille du réseau. De plus, le méson D_s n'a pas encore été étudié par l'expérience CLEO-c : BaBar dispose déjà d'environ 30 000 désintégrations semileptoniques dans le canal $D_s \rightarrow \phi l \nu$ (où l représente un lepton et ν le neutrino de même famille) ce qui diffère d'un facteur 30 par rapport à ce que prévoit CLEO-c fin 2006. CLEO-c fonctionne pour l'instant à l'énergie de la résonance $\Psi(3770)$ (3770 MeV) et produit uniquement des paires $\bar{D}^0 D^0$ et $D^+ D^-$. L'analyse des données de cette expérience pour les mésons charmés non étranges est cependant plus facile que celle de BaBar dans laquelle les mésons sont produits à l'intérieurs de jets.

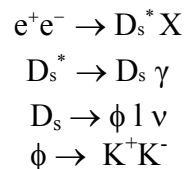
Aucun physicien du groupe BaBar n'a exploité les désintégrations semileptoniques des hadrons charmés jusqu'à présent. Patrick Roudeau et Arantza Oyanguren ont étudié la viabilité de ce programme de recherche en utilisant une simulation partielle du détecteur pour le canal le plus simple $D \rightarrow K l \nu$. Ils ont vérifié que l'on peut avoir une efficacité et une résolution suffisante pour mesurer les facteurs de formes. La statistique attendue doit permettre d'être compétitif par rapport à CLEO-c. Ils travaillent maintenant sur la mise en place des outils nécessaires à l'analyse de données en utilisant ce même canal.

Mon travail de thèse consistera dans un premier temps à transposer ces outils pour le méson D_s et à étudier la désintégration la plus simple : $D_s^+ \rightarrow \phi e^- \bar{\nu}$ avec le ϕ qui se désintègre ensuite en $K^+ K^-$. Actuellement le rapport d'embranchement sur ce canal possède une

incertitude de l'ordre de 25 % (PDG 2004). On pense pouvoir réduire l'incertitude à 2 % en utilisant un canal de référence pour les désintégrations du D_s : $D_s \rightarrow \phi \pi$.

3.4 Déroulement du stage

L'équipe a accueilli un stagiaire au mois de janvier-février. Il a travaillé sur le canal de désintégration suivant :



Le D_s^* est une particule dont la masse est supérieure à celle du D_s d'environ 140 MeV, elle peut être considérée comme un état excité du D_s .

Une simulation partielle du détecteur a été utilisée pour étudier l'efficacité de reconstruction (c'est à dire le rapport du nombre d'événements reconstruits par le nombre d'événements produits réellement) et le rapport signal sur bruit. Cette analyse n'est pas facile car le neutrino n'est pas détecté. Au cours de mon stage j'effectuerai une analyse semblable mais avec une simulation complète du détecteur BaBar et un canal de désintégration légèrement différent faisant intervenir la réaction $D_s \rightarrow \phi \pi$ dont tous les produits peuvent être détectés. Cette étude portera principalement sur la reconstruction du D_s^* et notamment du photon issu de sa désintégration.

3.5 Bibliographie

Les deux articles qui se trouvent en annexe présentent des mesures concernant le méson D_s faites par deux collaborations différentes. Le premier date de 1994 et est intéressant car il explicite l'aspect analyse de données alors que le second, plus récent, aborde une mesure qui pose problème dans le secteur du charme.

Le premier article, de la collaboration CLEO, donne une mesure du rapport des rapports d'embranchement $B(D_s^+ \rightarrow \phi l^+ \nu)/B(D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+)$. Le but est d'obtenir une mesure précise de $B(D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+)$ qui est souvent utilisé comme référence pour d'autres mesures. Cet article est une bonne illustration de mon travail de thèse car il montre comment estimer le rapport de branchement d'une désintégration semileptonique du D_s à partir de données prises dans des conditions similaires à celle de BaBar. En effet, les données proviennent de CLEO II, un collisionneur e^+e^- qui fonctionne à l'énergie de la résonance $Y(4s)$ mais avec une luminosité intégrée beaucoup plus faible que celle de BaBar (1.71 fb^{-1}). L'étude porte sur un échantillon de 2 millions d'événements $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$. Les mésons ϕ sont identifiés par leur désintégration en K^+K^- . L'analyse des données comporte plusieurs étapes : il faut tout d'abord appliquer différents critères de sélection afin d'éliminer un maximum de bruit de fond. Pour la désintégration ($D_s^+ \rightarrow \phi l^+ \nu$), des limites sont imposées sur l'impulsion des ϕ et des leptons et sur la région de l'espace d'émission des leptons (on se restreint aux régions pour lesquelles les efficacités d'identification d'un lepton et le taux d'erreur de reconstruction d'un hadron à la place d'un lepton sont bien connues). On a également des contraintes sur le système ϕl^+ avec

une impulsion supérieure à 2.4 GeV/c pour réduire le bruit de fond et une masse invariante inférieure à 1.9 GeV/c² afin de sélectionner les particules provenant de la bonne réaction.

On estime ensuite les efficacités de reconstruction des désintégrations $D_s^+ \rightarrow \phi l^+ \nu$: les réactions sont produites par une simulation Monte Carlo et analysées par une simulation complète du détecteur suivie de la chaîne de reconstruction utilisée pour les données réelles. Avec les critères de sélection précédents et après correction des effets de radiation des états finals des leptons, l'efficacité d'identification est estimée à 10.5% pour la désintégration en électron et 2.9% pour celle en muon.

Les systèmes K^+K^- vérifiant les critères sont utilisés pour sélectionner les événements intéressants : on trace la distribution de la masse invariante et on sépare le signal du bruit de fond, 359 ± 22 désintégrations en électron sont gardées et 85 ± 75 en muon.

Il faut ensuite estimer le bruit de fond par des simulations puis comparer les résultats avec les données réelles. Ici, le bruit de fond provient de deux sources principales : les faux leptons reconstruits par erreur et les coïncidences fortuites des ϕl^+ . Après soustraction des bruits de fond il ne reste que 282 ± 22 candidats pour la désintégration en électrons et 85 ± 15 pour celle en muons. On peut à partir de là déduire la valeur du rapport :

$$B(D_s^+ \rightarrow \phi l^+ \nu)/B(D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+) = 0.54 \pm 0.05 \pm 0.04$$

La première erreur étant l'erreur statistique et la seconde, l'erreur systématique qu'il faut estimer à partir des incertitudes sur les reconstructions des leptons, sur les niveaux des bruits de fond, etc. La mesure obtenue permet ensuite de remonter au rapport d'embranchement $B(D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+)$ en utilisant des valeurs théoriques.

Cet article montre donc bien comment on peut calculer un rapport d'embranchement relatif à une désintégration semileptonique. Il faut noter le faible nombre d'événements utilisés qui est de l'ordre de la centaines alors qu'on en aura plusieurs dizaines de milliers avec BaBar.

Le deuxième article, de la collaboration FOCUS, présente des mesures des rapports des facteurs de formes de la désintégration semileptonique : $D_s^+ \rightarrow \phi \mu^+ \nu$. L'amplitude de cette désintégration est décrite par quatre facteurs de forme, ou encore par trois rapports de ces facteurs : r_ν , r_2 , r_3 . En théorie, à cause de la symétrie SU(3) de saveur, les rapports décrivant $D_s^+ \rightarrow \phi \mu^+ \nu$ devraient être très proches de ceux décrivant la désintégration $D^+ \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \nu$. D'après les calculs de QCD sur réseau, ils devraient même se trouver à une valeur inférieure à 10 % de ceux décrivant $D^+ \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \nu$. Or le problème actuel est que les mesures expérimentales donnent des valeurs proches pour les rapports r_ν mais pas pour les rapports r_2 . Cet article donne une nouvelle estimation pour r_2 et r_ν dans le cas de la désintégration $D_s^+ \rightarrow \phi \mu^+ \nu$. Il est donc également représentatif du travail que j'aurai à effectuer au cours de ma thèse. Cependant, les données exploitées ici proviennent d'une expérience sur cible fixe, la méthode d'analyse est donc assez différente de celle utilisée pour BaBar et je ne la commenterai pas. Les auteurs de cet article arrivent à une valeur de r_2 qui est compatible avec la valeur de r_2 pour la désintégration $D^+ \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \nu$, ce qui remet en question les mesures précédentes. C'est un problème que j'aurai peut être l'occasion d'aborder.

4-Choix de la thèse et perspectives professionnelles

4.1 Motivations personnelles

En intégrant l'ex-DEA CPM, je pensais suivre le parcours « astroparticules et cosmologie ». Finalement c'est plutôt vers les particules que je me suis tournée, trouvant plus excitant d'étudier le modèle standard que les premières secondes de l'Univers. J'ai donc choisi de faire une thèse en physique des particules, malgré les propositions de la collaboration ANTARES avec qui j'avais passé trois mois de stage l'année dernière. ANTARES est une expérience d'astroparticule très intéressante mais il n'y a pas encore de données physiques et je n'avais pas envie d'arriver au moment de l'installation et des calibrations (et puis, pourquoi aller faire une thèse à Marseille à deux pas des calanques, sous le soleil, alors qu'on peut aller à Orsay ?). Le problème de commencer une thèse en physique des particules en 2005 est que l'on a le choix entre des expériences qui tournent déjà depuis quelques années comme BaBar ou des expériences qui vont démarrer en 2007 avec le LHC. Dans le premier cas, le risque est de soutenir une thèse sur une expérience passée de mode, et dans le deuxième cas de ne pas avoir de données réelles ou bien de découvrir le Higgs en même temps que 3000 personnes. J'ai opté pour le premier cas car j'avais quand même envie de faire de l'analyse de donnée et d'éviter l'aspect expérimental.

La thèse que j'ai choisie possède, à mes yeux, plusieurs avantages. Tout d'abord, je trouve le sujet intéressant (c'est un minimum) et assez original puisque contrairement aux mesures des angles du triangle d'unitarité, c'est un sujet sur lequel travaille peu de gens dans la collaboration BaBar et même en dehors. Il représente pourtant des enjeux importants pour la compréhension de l'interaction forte et de la physique du B. De plus, c'est un travail qui doit être fait en collaboration avec les théoriciens qui développent les calculs de QCD sur réseau, ce qui peut m'apporter beaucoup je pense. Ensuite, l'équipe que je vais rejoindre, c'est à dire Patrick Roudeau et Arantza Oyanguren, a commencé ce travail depuis quelques mois seulement. Il y a donc beaucoup de choses à faire, notamment pour avoir des résultats avant l'expérience CLEO-c, et il me semble intéressant d'arriver au début, je ne serai ainsi peut être pas trop dépassée. L'avantage d'utiliser l'expérience BaBar est qu'il y a déjà beaucoup de données enregistrées, même si le détecteur connaît quelques problèmes, il y a largement de quoi faire. D'un autre côté, c'est une grande collaboration qui se trouve principalement aux Etats-Unis avec tous les désagréments que cela peut avoir (nécessité d'effectuer des travaux d'intérêt général pour les nouveaux arrivants au sein de la collaboration), j'aurai au moins la possibilité de voyager. Enfin, le LAL est un laboratoire important et le groupe BaBar qui s'y trouve est le plus grand au niveau national.

Choisir une thèse n'est pas facile car c'est un engagement pour trois ans, j'espère avoir fait le bon choix.

4.2 Perspectives professionnelles

Une thèse sur un sujet de physique des particules n'offre pas forcément un large panel de débouchés. Bien évidemment, ce que je souhaite le plus est d'intégrer la recherche publique, plutôt en tant que chercheur qu'enseignant chercheur. Mais étant donnée la situation de la recherche en France aujourd'hui, je ne refuserai pas un poste de maître de conférence à l'université, j'aimerai d'ailleurs faire un monitorat pendant ma thèse pour mieux connaître le métier d'enseignant. Je pense que le fait d'avoir des responsabilités au sein d'un laboratoire

ou bien d'une université me plairais beaucoup, même si cela doit être fait au détriment du travail de recherche.

Je suis bien consciente qu'il n'y a pas de place pour tout le monde au CNRS et que beaucoup de docteurs se retrouvent en entreprise, mais c'est un monde que je connais peu. Bien sûr, si je n'ai toujours pas de poste après quelques années de post-doctorat, je me tournerai vers le secteur privé. C'est une voie que je n'est pas encore creusée jusque là mais je pense avoir le temps d'y réfléchir pendant ces trois ans et de m'intéresser aux différentes passerelles qui existe entre la formation doctorale et l'entreprise. Dans tous les cas, une thèse apporte beaucoup de connaissances qui ne sont pas exclusivement utilisées dans la recherche, ce n'est pas une perte de temps.

5-Conclusion

L'important, je pense, est de faire une thèse non pas parce que c'est la continuation logique des études universitaires mais bien parce qu'on en a envie. J'espère avoir montré dans ce rapport que ma décision était mûrement réfléchi, tant en ce qui concerne le choix de faire une thèse que le sujet de la thèse elle-même. En effet, celui-ci concerne un domaine très important de la physique des particules qui lie théorie et expérience. Le domaine des astroparticules m'intéresse aussi, il y a beaucoup de choses à découvrir grâce à des expérience comme HESS ou ANTARES. Je pense que j'aurai encore la possibilité de bifurquer vers cette voie après ma thèse, mais pour l'instant la physique des particules m'attire plus. J'espère que cette thèse sera pour moi une expérience enrichissante.

ANNEXES