

# Expérience BaBar sur le collisionneur PEP-II à SLAC

## Participation du LAPP

**Expérimentateurs :** B. Aubert, R. Barate, D. Boutigny, J-M. Gaillard (éméritat), F. Galeazzi, A. Hicheur, Y. Karyotakis, J-P. Lees, P. Robbe, V. Tisserand, A. Zghiche

**Equipe technique :** A. Bazan, B. Camberlin, J-M. Dubois, T. Le Flour, S. Lieunard

**Stagiaires :** V. Billot, L. Perotto, M. Trillat

## Collaboration

72 Instituts (Allemagne, Italie, France, Royaume Uni, Canada, Etats-Unis, Chine, Russie, Norvège) dont 5 laboratoires français : LAPP Annecy, LAL Orsay, LPNHE Ecole Polytechnique Palaiseau, LPNHE Université Paris 6 et 7, CEA-DAPNIA Saclay.

## Dates Clés

1993 : SLAC décide de construire une usine à mésons B

1995 : L'expérience BaBar est approuvée par les comités

1999 : Premières Collisions et prise de données

2001 : Observation de la violation de CP dans le système des mésons  $B^0$

## Abstract

*The observation of CP violation effects in the  $B^0\bar{B}^0$  system is one of the last untested sectors of the Standard Model. The aim of BaBar is to study the CP violation and improve our knowledge of the CKM matrix elements. The experiment takes place at SLAC and began to take data in May 1999. A group of LAPP physicists contributes to this experiment. They have built the gas system of the central drift chamber and participate actively to the data taking and to the analysis.*

## Présentation générale

La violation de CP, mise en évidence pour la première fois en 1964, reste encore un phénomène complexe, difficile à étudier, et qui n'avait été observé jusqu'à ce jour que dans le système des mésons  $K^0$ . Dans le cadre du Modèle Standard, son origine est liée à l'existence d'un terme complexe dans la matrice de mélange entre quarks ; ce modèle prédit que des asymétries mesurables, liées à ce phénomène, devraient se manifester dans certaines désintégrations (rares) des mésons  $B^0$  vers un état propre de CP. Les exemples les plus connus en sont les désintégrations  $B^0 \rightarrow J/\Psi K_s^0$  ou  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ . La mesure de ces asymétries permettra d'améliorer considérablement notre connaissance des éléments de la matrice CKM et en particulier de sa phase complexe. Elle permettra également de nouveaux tests de la validité du modèle standard : dans certains modèles, la description de la violation de CP est modifiée par la présence de nouvelles particules et de nouveaux couplages ; cette nouvelle physique pourrait être mise indirectement en évidence par l'existence d'incompatibilités entre les valeurs des asymétries violant CP mesurées dans les différents canaux accessibles à l'expérience.

L'observation et l'étude des violations de CP dans le système des mésons B ont justifié le lancement de deux programmes expérimentaux, l'un aux USA et l'autre au Japon, incluant le développement d'accélérateurs capables de produire chaque année plusieurs dizaines de millions de mésons  $B^0$ , et la construction de détecteurs pour en analyser les désintégrations.

L'expérience BaBar, installée sur l'anneau PEP-II à SLAC, étudie la violation de CP dans le système des mésons B. Les

effets prédits par le Modèle Standard sont importants et expérimentalement observables. L'expérience est capable de mesurer les cotés et deux des angles ( $\alpha$  et  $\beta$ ) du triangle d'unitarité dans un grand nombre de canaux, et de mettre à l'épreuve les prévisions du modèle standard. Elle sera ainsi capable d'identifier la signature d'une nouvelle physique. La construction de BaBar s'est achevée fin 1998. Après une première phase où le fonctionnement du détecteur a été testé en rayons cosmiques, les premières collisions  $e^+e^-$  ont été enregistrées à la fin du mois de mai 1999. Depuis cette date,

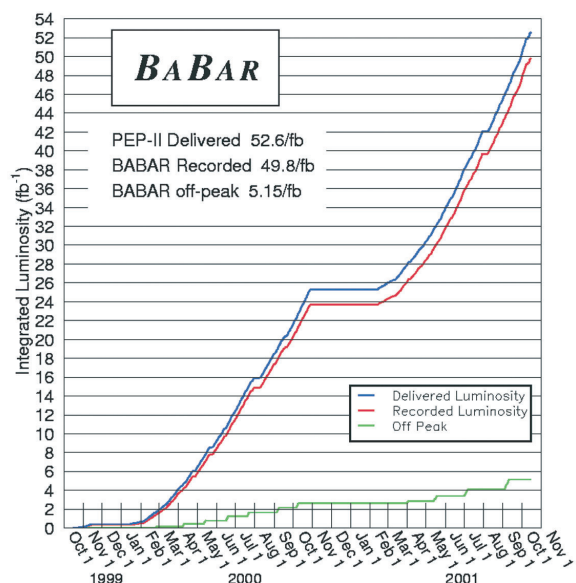


Figure 1 : La luminosité intégrée enregistrée par BaBar en fonction du temps, depuis le démarrage de l'expérience en 1999

les performances de l'accélérateur n'ont cessé de s'améliorer, dépassant même les prévisions du calendrier de mise en route. A la fin octobre 2001, la luminosité intégrée enregistrée par l'expérience s'élevait déjà à plus de  $50 \text{ fb}^{-1}$  (Figure 1), correspondant à plus de 50 Millions de désintégrations  $e^+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow B\bar{B}$ . Aux conférences de l'été 2001, BaBar a ainsi pu présenter la première observation significative de la violation de CP dans le secteur des B, avec une mesure de  $\sin(2\beta) = 0.59 \pm 0.14(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst})$ .

Le groupe du LAPP participe à BaBar depuis la formation de la collaboration en 1993. Il a construit et est responsable du système de gaz qui alimente la chambre à dérive et a également construit une petite chambre servant à surveiller en ligne le gain du mélange gazeux utilisé. Il a joué un rôle important dans l'installation des différents logiciels de l'expérience au CCIN2P3. Ce rôle se poursuit activement aujourd'hui avec l'importation des données au centre, la transformation du CCIN2P3 en centre de calcul BaBar (Tier-A) ainsi que les développements liés au projet de grille de calcul appliquée à BaBar. Depuis le démarrage de l'expérience, le groupe participe également à la prise de données et à la vie de la collaboration, avec plusieurs séjours de longue durée à SLAC (Y. Karyotakis, D. Boutigny et V. Tisserand). Y. Karyotakis assure depuis l'automne 2000 la responsabilité de coordinateur technique de l'expérience. Enfin, l'analyse des données est devenue une part importante de l'activité du groupe BaBar LAPP, avec d'une part la reconstruction exclusive de désintégrations hadroniques des mésons B et d'autre part la reconstruction de désintégrations rares.

## La Chambre à dérive

### Le système de gaz :

Le LAPP a conçu et construit le système de gaz de la chambre à dérive du détecteur BaBar. Ce système a été installé en juin 1998 et mis en marche en septembre 1998. Depuis lors, le suivi de son fonctionnement, de son entretien, les améliorations et les modifications qui y sont apportées continuent d'être la responsabilité du LAPP. D. Boutigny (1999-2000) et V. Tisserand (2001) ont assuré sur site une grande partie de ces responsabilités. Les principales caractéristiques du système ont été décrites dans le rapport d'activité 1998-1999. Au cours de l'année 2001, V. Tisserand a assuré, au nom du groupe, la responsabilité du suivi opérationnel du fonctionnement de la chambre à dérive.

### La Chambre de contrôle du gain :

Afin de pouvoir mesurer le gain du gaz en différents points du système, le LAPP a construit pour ces contrôles une petite chambre à dérive. Celle-ci est constituée de cellules qui ont la même géométrie que celles de la chambre à dérive de BaBar. La valeur moyenne de l'énergie déposée par les photons de désintégration d'une source de  $^{55}\text{Fe}$  permet de suivre l'évolution du gain au cours du temps. Un spectre est enregistré toutes les 30 minutes et le résultat de l'ajustement du pic est stocké dans la base de données par l'intermédiaire du système de contrôle EPICS. La chambre de contrôle fonctionne en permanence et assure un suivi efficace en temps réel de

l'évolution du gain du gaz. Courant 2000, un développement a été réalisé pour remplacer le système d'acquisition PC/CAMAC par sa version définitive basée sur un ensemble ADC/Analyseur multi-canaux directement piloté par le logiciel EPICS.

## Calcul et traitement des données

Durant l'été 2000 la collaboration BaBar a redéfini son modèle de calcul afin de minimiser les coûts d'exploitation et de faciliter l'accès aux données. Ce nouveau modèle repose sur une stratégie de calcul distribué ou "multi-Tier" similaire à celle adoptée pour les expériences LHC. Les Tier-A reçoivent une fraction importante des données dans un format détaillé, les Tier-B reçoivent l'ensemble des données dans un format réduit et les Tier-C correspondent typiquement aux universités et petits instituts travaillant localement sur un ensemble réduit de données. Il est prévu d'avoir 3 ou 4 Tier-A dans l'expérience possédant à eux tous la totalité des données détaillées.

Dans ce cadre, le centre de Lyon joue un rôle pionnier et assure depuis le début 2001 le rôle de premier Tier-A en dehors de SLAC. La coordination pour la mise en œuvre du Tier-A au CCIN2P3 est assurée par Dominique Boutigny. Le groupe du LAPP a, en outre, activement participé à l'élaboration des outils de distribution de données, qui permettent l'importation dans les différents Tier. Ces outils offrent des fonctionnalités diverses parmi lesquelles la recherche des bases de données et l'importation par le réseau via une simple requête envoyée par e-mail, en spécifiant un minimum de paramètres. Les données Tier-A sont, quant à elles, automatiquement importées depuis l'été 2001 au CCIN2P3, grâce au développement de ces outils. L'ensemble de la collaboration a la possibilité de calculer au CCIN2P3 et déjà plusieurs analyses complètes ont été menées entièrement en France par des physiciens basés à l'étranger. Le développement du Tier-A passe par la maîtrise de technologies de pointe telles que les bases de données Orientées Objets (Objectivity), les systèmes de stockage hiérarchique (HPSS), les réseaux longue distance à haut débit ou encore GRID. En 2001, ce sont 15 TB de données qui ont été importées à Lyon par le réseau. Ce nombre devrait croître jusqu'à  $\sim 100$  TB par an d'ici l'année prochaine.

## Analyse

### a) Etude des interactions dans la matière

La mesure précise des temps de vie des particules instables nécessite une connaissance approfondie des échelles de longueur selon l'axe des faisceaux (mésons B) et dans le plan transverse (mésons charmés,  $\tau$ ).

Dans le cadre de son travail de thèse, Patrick Robbe a développé, en collaboration avec des physiciens de SLAC, une méthode originale pour radiographier le détecteur. Cette méthode est basée sur l'étude des interactions secondaires provoquées dans la matière par un électron ou un positron perdu par le faisceau. Une grande partie de ces interactions contient un proton dans l'état final ; l'utilisation du DIRC et celle de la chambre à dérive (dE/dx) permettent d'identifier ces protons avec une grande pureté et une grande efficacité. La reconstruction des vertex

des interactions secondaires contenant un proton dans l'état final (Figure 2) a permis de vérifier les échelles de distance dans le plan transverse avec une précision relative de 0.23%. L'échelle longitudinale, essentielle pour les mesures de violation de CP

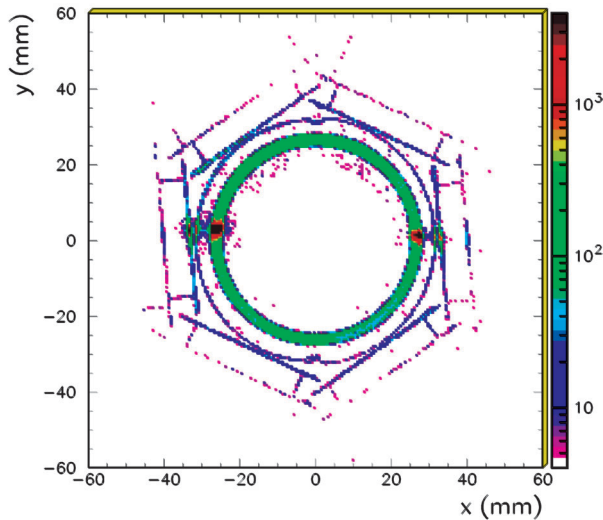


Figure 2 : Position des vertex des interactions secondaires dans le plan transverse. On voit nettement la structure du détecteur avec le tube à vide et les premières couches du détecteur de vertex.

et de temps de vie des mésons B, a elle été mesurée avec une précision relative de 0.11%.

### b) Désintégrations des B en charmonium et participation à la mesure de la violation de CP

L'étude des modes désintégrations des mésons B incluant une résonance charmonium ( $J/\Psi$ ,  $\Psi(2s)$ ,  $\eta_c$ ,  $\chi_{c1}$  ou  $\chi_{c2}$ ) dans l'état final permet de tester avec précision la dynamique des interactions fortes et des transitions électrofaibles dans les mésons lourds. Pour l'expérience BaBar, ces études ont également servi de validation des premières analyses de physique (identification des particules, reconstruction et mesure des caractéristiques cinématiques des traces chargées et des particules neutres, vertexing, développement des outils d'analyse...). Elles ont permis de préparer la mesure de l'angle  $\beta$  du triangle d'unitarité, représentation graphique de la matrice CKM qui illustre l'amplitude du phénomène de la violation de CP dans le cadre du Modèle Standard.

Le LAPP participe, depuis le début de l'expérience, au groupe de travail en charge de la sélection et de la reconstruction des

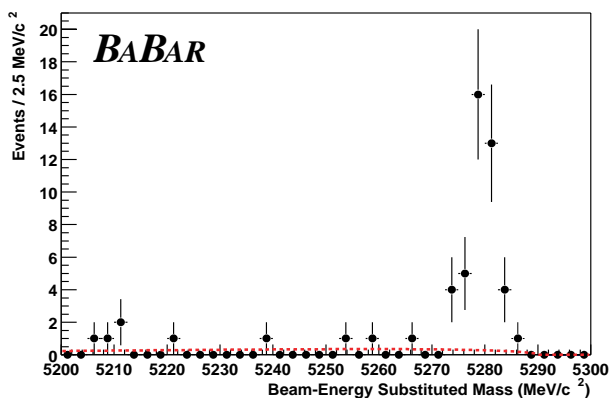


Figure 3 : Distribution en masse des candidats  $B^0 \rightarrow \chi_{c1} K^0_S$

mésons beaux impliquant des signatures en modes charmonium, notamment les désintégrations vers des états propres de CP ( $B \rightarrow J/\Psi K^0_S$ ,  $\Psi(2S) K^0_S$ ,  $\chi_{c1} K^0_S$ ).

Les études de ce groupe portent en particulier sur la mesure des rapports de branchement et des propriétés cinématiques et angulaires des désintégrations inclusives et exclusives des mésons B en charmonium. Ces mesures sont publiées ou en cours de publication et ont une précision comparable, ou meilleure, que celles connues à ce jour, certains de ces modes étant même observés sans ambiguïté pour la première fois. Le groupe d'Annecy est chargé de l'étude des modes inclusifs  $B \rightarrow \chi_{c1} X$  et  $B \rightarrow \chi_{c2} X$ , des désintégrations exclusives  $B^0 \rightarrow \chi_{c1} K^0_S$  et  $B^\pm \rightarrow \chi_{c1} K^\pm$  (Figure 3), ainsi que des modes plus exotiques comme  $B \rightarrow J/\Psi D$ . Le mode  $B^0 \rightarrow \chi_{c1} K^0_S$  fait partie du lot d'événements servant à la mesure de  $\sin(2\beta)$ , dont le premier résultat significatif (Figure 4) a été présenté au cours de l'été 2001.

### c) Désintégrations hadroniques des B

Les désintégrations hadroniques  $B \rightarrow D^{(*)}\pi$ ,  $D^{(*)}\rho$ ,  $D^{(*)}a_1$ , sont une source relativement abondante de lots très purs d'événements B complètement reconstruits. Ces événements sont utilisés dans l'analyse  $\sin(2\beta)$  pour étudier les performances des algorithmes de vertexing et d'étiquetage (étude des fonctions de résolution, mesure de la fraction d'événements mal étiquetés). La mesure de leurs taux de branchement permet aussi de tester les modèles de factorisation. Enfin, ces événements

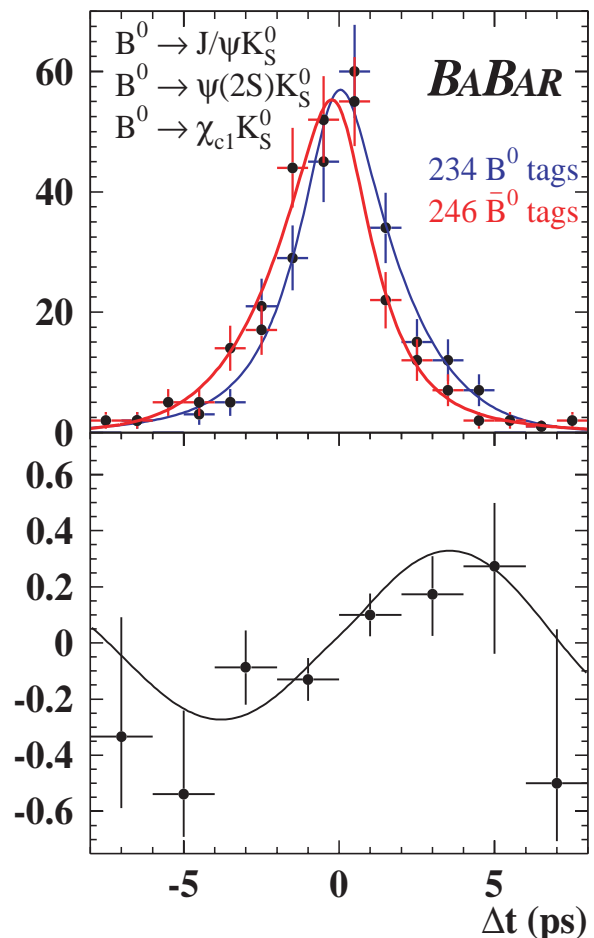


Figure 4 : Distribution de la différence de temps de vie ( $\Delta t$ ) entre les deux B des événements états propres de CP étiquetés  $B^0$  et asymétrie correspondante.

sont également utilisés pour mesurer les temps de vie des mésons  $B^0$  et  $B^+$  et étudier le mélange  $B^0 \bar{B}^0$ . Notre groupe a participé à la mise en place des outils nécessaires pour sélectionner et analyser ces événements et a en particulier travaillé sur l'étude des modes mettant en jeu un  $D^{*0}$  dans l'état final.

Un autre sujet pour lequel notre groupe joue un rôle moteur est l'étude des désintégrations  $B \rightarrow D^{(*)} D^{(*)} K$ . On pense que ce type de désintégrations forme une fraction significative des transitions  $b \rightarrow ccs$ , mais jusqu'à présent seule une poignée d'événements complètement reconstruits avait pu être observée dans les expériences ALEPH et CLEO. Les dizaines de millions de mésons B accumulés par BaBar devraient permettre une mesure précise et systématique de tous les modes  $D^{(*)} D^{(*)} K$  (Thèse de Patrick Robbe) ce qui permettra peut être de résoudre l'énigme du taux du charme dans les désintégrations du B et également de mieux comprendre le taux de production de K de mauvais signe dans les désintégrations des mésons B (ce dernier paramètre influe directement sur la fraction d'événements mal étiquetés dans les études de violation de CP). Des premiers résultats sur la mesure des taux de branchement  $D^0 D^{*+} K^+$ ,  $D^{*0} D^{*+} K^+$  et  $D^{*+} D^{*+} K^+$  (première observation de désintégrations supprimées de couleur autres qu'en charmonium) ont été publiés pour les conférences de l'hiver 2001.

Notons enfin que nous avons depuis peu démarré une activité d'analyse pour la recherche et la mesure des modes de désintégration supprimés de couleur  $B^0 \rightarrow D^{(*)0} \pi^0, \rho^0, \omega, \eta, \eta'$ . L'observation de telles transitions devrait permettre de tester les modèles de désintégrations des mésons B, en particulier les modèles basés sur la factorisation.

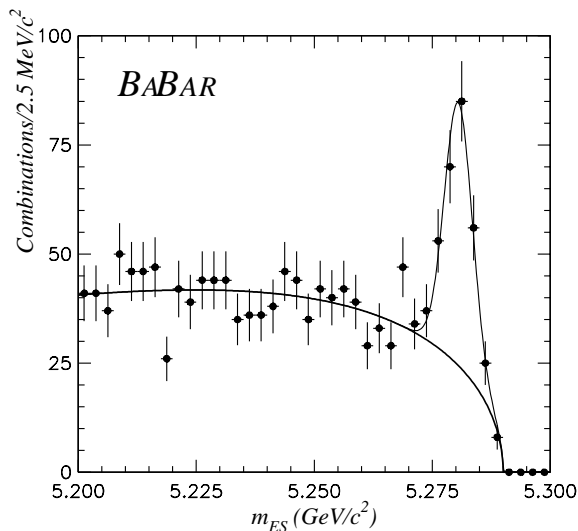


Figure 5b : Distribution en masse des événements  $B^+$  en  $D^{(*)} D^{(*)} K$  complètement reconstruits

## d) Désintégrations rares

Ces études (thèse de Adlène Hicheur) s'inscrivent dans le cadre des désintégrations non charmées des mésons B. Il s'agit ici de mesurer le taux de branchement de la désintégration  $B \rightarrow \eta' X_S$  où  $X_S$  est un ensemble de particules comprenant un kaon et un ou plusieurs pions, pour des  $\eta'$  de haute impulsion dans le centre de masse. Cette désintégration est une des signatures du processus à une boucle  $b \rightarrow sg^*$  (pingouin gluonique). Cependant, l'interférence entre les processus  $b \rightarrow sg^*$  et  $b \rightarrow u$  (à l'arbre) peut conduire à une

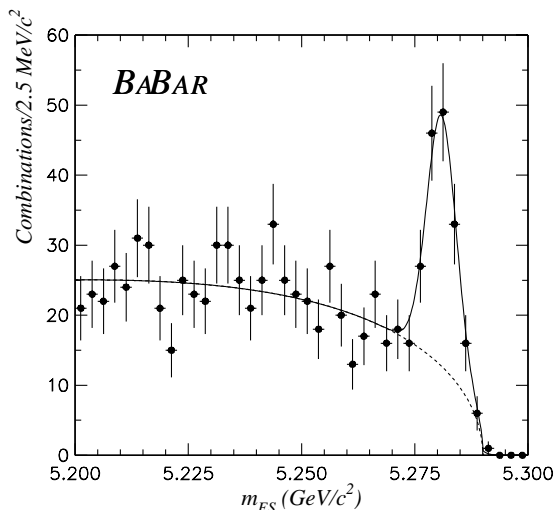


Figure 5a : Distribution en masse des événements  $B^0$  en  $D^{(*)} D^{(*)} K$  complètement reconstruits

asymétrie CP directe appréciable. D'autre part, la désintégration  $B \rightarrow \eta' X_S$  permet de tester l'hypothèse de l'existence d'un état gluonium dans la fonction d'onde du  $\eta'$  et l'intervention d'un couplage  $\eta' - g - g$  selon la chaîne  $b \rightarrow sg^*, g^* \rightarrow g\eta'$ . En effet, le taux anormalement élevé pour la transition  $B \rightarrow \eta' X_S$  mesuré par la collaboration CLEO (1998), ainsi que le spectre de la masse du système  $X_S$ , tendent à être en accord avec des modèles théoriques incluant la production de  $\eta'$  à partir de gluonium. La mesure préliminaire présentée récemment par BaBar est compatible avec le résultat de CLEO. L'analyse prend en compte la possibilité de pollution par les désintégrations supprimées de couleur  $\bar{B}^0 \rightarrow \eta' D^{(*)0}$ . L'absence de toute mesure concernant ces modes amène naturellement à les étudier. Leur étude présente un double intérêt : tester l'hypothèse de factorisation dans les transitions  $b \rightarrow c$  et mesurer l'écart par rapport au taux de branchement prédit dans le cas où seule la structure en quark du  $\eta'$  est prise en compte ; un écart significatif irait en faveur d'une contribution de la composante gluonique du  $\eta'$  dans la désintégration.