

VIOLATION DE CP, MATIERE-ANTIMATIERE, SAVEURS LOURDES

N. Arnaud, D. Becirevic, E. Ben-Haim, J. Charles, S. Descotes-Genon, S. Emery
J.-P. Lees, R. Le Gac, P. Nedelec, D. Rebreyend, Y. Sacquin, M.-H. Schune
A. Stocchi, V. Tisserand, S. T'Jampens, G. Wormser

Executive summary

Au cours de la décennie passée, les expériences *BABAR* et *Belle*, installées auprès des usines à mésons *B*, ont fourni une quantité impressionnante d'informations sur la physique des saveurs dans le domaine des quarks. Dans la limite des incertitudes théoriques et expérimentales, cet ensemble de mesures dessine une image remarquablement cohérente de la violation de la symétrie CP, en accord avec les mesures effectuées dans les secteurs des quarks légers, notamment le quark étrange. Le mécanisme de Kobayashi-Maskawa incorporé dans le Modèle Standard a ainsi été validé avec une grande précision.

La physique des saveurs connaît actuellement un changement de paradigme. Si elle a longtemps été perçue comme un outil de précision pour valider le Modèle Standard, elle est de plus en plus comprise comme un ensemble de contraintes extrêmement fortes sur ses extensions potentielles. En effet, les processus qui changent la saveur sont sensibles à des contributions de haute énergie par l'intermédiaire de diagrammes mettant en jeu des particules virtuelles. Leurs mesures permettent d'accéder à l'échelle de masse des nouvelles particules et à leurs couplages. Dans le passé, les mesures de précision, en particulier dans le domaine des saveurs, ont permis d'estimer les masses des quarks charmé, beauté et top avant leur découverte directe. Aujourd'hui, les contraintes émanant des transitions $K^0 - \bar{K}^0$ ou des transitions radiatives $b \rightarrow s\gamma$ sont si fortes qu'elles impliquent que les nouvelles particules sont soit très massives (deux à trois ordres de grandeur au dessus du TeV) soit qu'elles se couplent très faiblement aux particules du Modèle Standard. Un moyen de bâtir des modèles satisfaisant automatiquement ces contraintes consiste à accepter le principe de *violation minimale de la saveur*, à savoir que la seule brisure de la symétrie des saveurs est entièrement contenue dans les couplages de Yukawa du Modèle Standard. Mais ce principe minimal, ne découlant pas d'une dynamique spécifique, n'a pas actuellement de justification théorique profonde. S'il devait être observé, il serait donc essentiel de découvrir l'origine de son existence. Les études de la violation de la symétrie CP et des désintégrations rares dans le secteur de la beauté et du charme sont donc des outils privilégiés pour mettre en évidence des phénomènes au-delà du Modèle Standard et du principe de violation minimale de la saveur.

La recherche indirecte de la nouvelle physique en utilisant des transitions entre saveurs est organisée autour de quelques projets au niveau mondial. On citera notamment KOTO et NA62 pour la mesure du rapport de branchement $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ et $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, LHCb et son *upgrade*

pour l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares dans le système des mésons beaux mais aussi des baryons beaux et des hadrons charmés, les projets Belle-2 et *SuperB* pour l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares dans les systèmes des mésons *B* et charmés. Par ailleurs des expériences dédiées sont en préparation pour mesurer plus précisément le moment dipolaire électrique du neutron, étudier l'atome d'antihydrogène, pour déterminer la constante de gravitation des antiparticules ou bien encore pour étudier la violation de la saveur dans les transitions leptoniques comme l'expérience MEG le fait actuellement, ou comme la prochaine génération d'expériences en préparation comme Mu2E.

Sur le plan expérimental, le panorama des expériences a évolué ces dernières années, ce qui a entraîné des modifications dans la répartition de la communauté française. L'expérience NA48 s'est achevée, et avec elle une étude expérimentale approfondie de la violation de CP et de certaines désintégrations très rares dans le secteur des kaons. La fin de la prise des données auprès de *BABAR* a aussi occasionné des changements dans les thématiques de recherche. Une partie des physiciens de *BABAR* poursuit les mêmes thématiques scientifiques via l'expérience LHCb ou le projet *SuperB*, une autre partie s'est tournée vers d'autres expériences auprès du LHC, des expériences de physique du neutrino ou de cosmologie.

En France, l'avenir de la thématique *violation de CP, matière-antimatière, saveurs lourdes* s'organise autour de cinq projets : l'upgrade de LHCb, *SuperB*, nEDM, GBAR et AEGIS. Les deux premiers sont des projets de grande taille qui couvrent un large domaine scientifique allant de la violation de CP dans les mésons beaux et charmés à la recherche de particules exotiques et de violation du nombre leptonique. Les trois derniers sont des expériences dédiées, de petite taille, pour la mesure du moment dipolaire électrique du neutron et de la constante de gravitation des antiparticules. Ces cinq projets sont très ambitieux. Ils montrent la vitalité de cette communauté et l'importance de cette thématique pour mettre en évidence et comprendre la physique au-delà du Modèle Standard en parfaite complémentarité avec les expériences de recherche directe.

- Nous recommandons de soutenir l'upgrade de LHCb pour son potentiel unique notamment à travers la très grande statistique de mésons B_s et l'accès à des désintégrations exclusives extrêmement rares, son enracinement dans la communauté et la très grande visibilité des équipes françaises ;
- Suite à l'approbation récente par le gouvernement italien du projet *SuperB*, nous recommandons d'approuver la participation d'équipes françaises dans ce programme, au vu de la capacité du laboratoire Nicola Cabibbo de le conduire dans le calendrier prévu et de la capacité des groupes français à agréger de nouveaux collaborateurs autour du noyau qui y participe depuis l'origine. Nous soulignons la complémentarité du potentiel de physique des super usines à *B* avec celui des expériences sur machine hadronique et leur potentiel unique pour les états finaux contenant des particules neutres.
- Nous recommandons de soutenir l'expérience nEDM dans sa phase III pour atteindre une sensibilité de 10^{-28} e.cm, et de s'engager dans le projet GBAR et/ou AEGIS pour la mesure de la constante gravitationnelle de l'antimatière. Nous notons également le caractère pluridisciplinaire de ces projets.

1 État de l'art

Au cours de la décennie passée, les expériences *BABAR* et Belle, installées auprès des usines à mésons *B*, ont fourni une quantité impressionnante d'informations sur la physique des saveurs dans le domaine des quarks¹. Dans la limite des incertitudes théoriques et expérimentales, cet ensemble de mesures dessine une image remarquablement cohérente de la violation de la symétrie

CP, en accord avec les mesures effectuées dans les secteurs des quarks légers, notamment le quark étrange. Le mécanisme de Kobayashi-Maskawa incorporé dans le Modèle Standard a ainsi été validé avec une grande précision². Pour preuve, les quatre paramètres de Wolfenstein décrivant la matrice CKM, A , λ , $\bar{\rho}$ et $\bar{\eta}$ sont connus respectivement à 2%, 0.4 %, 18% et 5%. A ce niveau de détail, il n'est pas surprenant que des corrections à cette image commencent à se faire jour. Par exemple, le rapport de branchement $\text{BR}(B_u \rightarrow \tau\nu)$ mesuré par *BABAR* et *Belle*, ou l'asymétrie dimuonique A_{SL} mesurée par *DØ*, semblent en désaccord avec les prédictions du Modèle Standard à trois ou quatre déviations standard³.

La physique des saveurs connaît actuellement un changement de paradigme. Si elle a longtemps été perçue comme un outil de précision pour valider le Modèle Standard, elle est de plus en plus comprise comme un ensemble de contraintes extrêmement fortes sur ses extensions potentielles. En effet, les processus qui changent la saveur sont sensibles à des contributions de haute énergie par l'intermédiaire de diagrammes mettant en jeu des particules virtuelles (en boucle). Leurs mesures permettent d'accéder à l'échelle de masse des nouvelles particules et à leurs couplages. Dans le passé, les mesures de précision, en particulier dans le domaine des saveurs, ont permis d'estimer les masses des quarks charmé, beauté et top avant leur découverte directe. Aujourd'hui, les contraintes émanant des transitions $K^0 - \bar{K}^0$ ou des transitions radiatives $b \rightarrow s\gamma$ sont si fortes qu'elles impliquent que les nouvelles particules sont soit très massives (deux à trois ordres de grandeur au dessus du TeV) soit qu'elles se couplent très faiblement aux particules du Modèle Standard⁴. Un moyen de bâtir des modèles satisfaisant automatiquement ces contraintes consiste à accepter le principe de *violation minimale de la saveur*, à savoir que la seule brisure de la symétrie des saveurs est entièrement contenue dans les couplages de Yukawa du Modèle Standard. Mais ce principe minimal, ne découlant pas d'une dynamique spécifique, n'a actuellement pas de justification théorique profonde⁵. S'il devait être observé, il serait donc essentiel de découvrir les lois encore inconnues à l'origine de son existence. Les études de la violation de la symétrie CP et des désintégrations rares dans le secteur de la beauté et du charme sont donc des outils privilégiés pour mettre en évidence des phénomènes au-delà du Modèle Standard et du principe de violation minimale de la saveur.

Deux types d'approches existent : les "tests nuls" du Modèle Standard et les déviations par rapport à une prédiction précise. Dans le premier cas ("tests nuls"), on considère une observable qui est strictement nulle ou très supprimée dans le Modèle Standard, du fait de lois de conservation ou de hiérarchie de masses et de couplages, de sorte que toute observation revient à mettre en évidence la présence de nouvelle physique. Dans le second cas (déviations), on cherche à quantifier l'écart entre observations et prédictions du Modèle Standard pour déterminer la taille maximale des effets de nouvelle physique. Ce deuxième cas est plus courant, et nécessite à la fois des observations de grande qualité et des prédictions théoriques précises. Pour les transitions entre quarks, cela nécessite en particulier une bonne compréhension des effets hadroniques non perturbatifs qui *habillent* les transitions entre saveurs et compliquent l'extraction de la physique électrofaible sous-jacente.

Dans ce contexte, une dizaine d'observables *en or*, présentées dans la section 3 ont été identifiées. Ce sont les mesures de leurs déviations qui, couplées aux recherches directes menées par les expériences généralistes comme ATLAS ou CMS, permettront de comprendre la nature de la nouvelle physique et sa structure en saveur. Par ailleurs, des efforts importants sont actuellement fournis pour réduire les incertitudes théoriques, notamment par les simulations de QCD sur réseau. Ces points sont discutés avec plus en détail dans la section 2.

La recherche indirecte de la nouvelle physique en utilisant des transitions entre saveurs est organisée autour de quelques projets au niveau mondial. On citera notamment KOTO et NA62 pour la mesure du rapport de branchement $K^0 \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ et $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$, LHCb et son *upgrade* pour l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares dans le système des mésons beaux mais aussi des baryons beaux et des hadrons charmés, les projets Belle-2 et *SuperB* pour

l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares dans les systèmes des mésons B et charmés. Par ailleurs des expériences dédiées sont en préparation pour mesurer plus précisément le moment dipolaire électrique du neutron (un autre "test nul" du Modèle Standard), étudier l'atome d'antihydrogène, pour déterminer la constante de gravitation des antiparticules ou bien encore pour étudier la violation de la saveur dans les transitions leptoniques comme l'expérience MEG le fait actuellement. Certains de ces projets sont présentés plus avant dans la section 5.

Sur le plan expérimental, le panorama des expériences a évolué ces dernières années, ce qui a entraîné des modifications dans la répartition de la communauté française. L'expérience NA48 s'est achevée, et avec elle une étude expérimentale approfondie de la violation de CP et de certaines désintégrations très rares dans le secteur des kaons. La fin de la prise des données auprès de *BABAR* a aussi occasionné des changements dans les thématiques de recherche. Une partie des physiciens de *BABAR*/IN2P3 poursuit les mêmes thématiques scientifiques via l'expérience LHCb ou le projet *SuperB*, une autre partie s'est tournée vers d'autres expériences auprès du LHC, des expériences de physique du neutrino ou de cosmologie. En ce qui concerne les saveurs de quarks, la communauté expérimentale française est centrée sur l'expérience LHCb (section 3) et s'intéresse au projet *SuperB* (section 4). Les physiciens de l'IRFU ne sont actuellement plus impliqués dans les expériences de physique de la beauté, par un concours fortuit de circonstances et de facteurs humains, mais sont impliqués dans les expériences dédiées (section 5).

En 2011 l'expérience LHCb a d'ores et déjà obtenu des résultats dont les précisions sont supérieures à celle du Tevatron dans le secteur du méson B_s . Le bon accord de ces résultats avec le Modèle Standard semble aller dans le sens du principe d'une violation minimale de la saveur pour les processus au-delà du Modèle Standard et permettent d'exclure de larges régions de l'espace des paramètres de modèles spécifiques (supersymétrie, quatrième génération, dimensions supplémentaires...). A la fin 2011, les précisions attendues dans le secteur du B , ou du charme devraient être comparables (voire supérieures) à celles des usines à B pour les modes accessibles auprès d'un collisionneur hadronique. Ces premières avancées montrent que la structure de la nouvelle physique est complexe et que des mesures de précision sont nécessaires pour l'identifier.

À l'horizon 2017, les sensibilités de LHCb seront comparables aux valeurs prédites par le Modèle Standard pour les observables phares telles que l'angle ϕ_s , le rapport d'embranchement du $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$, les paramètres liés à la désintégration $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$. Pour dépasser cet objectif et entrer en compétition avec les incertitudes théoriques, il sera nécessaire de modifier le détecteur. La proposition de la mise à niveau et son potentiel de physique ont été approuvés par le LHCC en juin 2011. Le détecteur, modifié pendant l'année 2018, accumulera de 5 à 10 fb⁻¹ par an pour atteindre une luminosité intégrée de 50 fb⁻¹. Du côté des usines à mésons B , dans le cadre du projet SuperKEKB, le collisionneur KEK et le détecteur Belle sont en train d'être modifiés pour fonctionner à une luminosité instantanée de 8×10^{35} cm⁻²s⁻¹. Les premières données sont attendues à l'horizon 2014 et une luminosité intégrée de 50 ab⁻¹ sera atteinte à l'horizon 2020. Par ailleurs un projet d'usine à mésons B , *SuperB*, a été approuvé en Italie fin 2010. Il fonctionnera à une luminosité de 10^{36} cm⁻²s⁻¹ avec des faisceaux polarisés. Les premiers faisceaux sont prévus à l'horizon 2016 et une luminosité intégrée de 75 ab⁻¹ à l'horizon 2022. Les sensibilités attendues sont similaires pour les observables accessibles à la fois auprès d'un collisionneur hadronique et auprès d'une usine à mésons B , et elles devraient être comparables aux incertitudes théoriques espérées. Il faut noter la très grande complémentarité de ces recherches de par les systèmes étudiés, les processus de création des hadrons, les méthodes de détection et les modes de désintégrations.

Les objectifs ambitieux sur ces différents sujets montrent que dans les années à venir, l'étude des transitions de saveur sera un élément essentiel pour mettre en évidence et comprendre la physique au-delà du Modèle Standard, en parfaite complémentarité avec les expériences de recherche directe.

2 Avancées théoriques

Les expériences ATLAS et CMS du LHC ont largement commencé à rechercher le boson de Higgs, ainsi qu'à restreindre l'espace des paramètres dans le cadre de diverses extensions du Modèle Standard (supersymétrie avec unification des couplages, dimensions supplémentaires, quarks ou bosons de jauge supplémentaires, leptoquarks...). À l'horizon 2018, trois possibilités sont envisageables : ou bien ATLAS et CMS ont seulement identifié le boson de Higgs et déterminé sa masse avec précision (et éventuellement des déviations par rapport au Modèle Standard), ou bien ils ont mis en évidence des particules supplémentaires, ou bien aucune particule, pas même le Higgs, n'a pas été observée.

Dans les premier et troisième cas, la physique des saveurs complète les expériences à grande impulsion transverse pour contraindre les modèles possibles, en exigeant qu'ils décrivent les données sur une très grande gamme d'énergie – depuis les basses énergies (neutrinos, désintégration du proton) jusqu'au TeV (physique du top), en passant par quelques centaines de MeV (mélange $K^0 - \bar{K}^0$) et quelques GeV (physique du b). Les méthodes de théories effectives seront particulièrement utiles dans ce contexte, car elles permettent de séparer physiques de haute et de basse énergie, en laissant non spécifiées les quantités décrivant la physique de haute énergie, toujours inconnue à ce stade.

Dans le second cas, l'identification des particules nouvelles réorientera une nouvelle fois l'exploitation de la physique des saveurs : les masses (au moins certaines) étant connues, les données de saveurs seront utilisées pour déterminer la structure des couplages de ces nouvelles particules avec celles du Modèle Standard. Parmi les observables de choix, on peut citer : les transitions radiatives ($b \rightarrow s\gamma$, $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$) ; les transitions faisant intervenir des neutrinos ($b \rightarrow s\nu\bar{\nu}$) ; le mélange de mésons neutres ($K - \bar{K}$, $D - \bar{D}$, $B - \bar{B}$, $B_s - \bar{B}_s$) ; les tests d'universalité, en particulier la comparaison de processus semileptoniques mettant en jeu e , μ ou τ .

Toutes ces analyses nécessitent et nécessiteront encore le calcul théorique des éléments de matrice hadroniques qui interviennent en physique des saveurs, et elles constitueront le principal gisement de progrès dans les années à venir. En effet, le calcul des processus inclusifs, s'appuyant au moins sur la théorie des perturbations jusqu'au deuxième ordre en logarithmes sous-dominants, a déjà atteint une précision remarquable (en dessous de 10% pour $b \rightarrow s\gamma$ et $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ ⁶, bien meilleure encore pour $b \rightarrow c\ell\nu$ et $b \rightarrow u\ell\nu$ ¹). Il est à noter que dans ces résultats, l'estimation des incertitudes d'origine non perturbative domine d'ores et déjà les contributions perturbatives proprement dites. On peut donc s'attendre à ce que ces approches inclusives atteignent au mieux les quelques pourcents de précision.

Les processus exclusifs offrent une plus grande variété d'observables et sont généralement plus faciles à mesurer, mais sont beaucoup plus sensibles à des effets de la QCD non-perturbative. Une bonne maîtrise des incertitudes hadroniques est et sera possible grâce aux progrès récents des simulations numériques de la QCD sur réseau⁷. Ces progrès continus viennent de l'amélioration : (a) des performances des processeurs et des systèmes de communication entre composants électroniques ; (b) des algorithmes utilisés pour la production des configurations du vide de QCD, ainsi que des fonctions de corrélation permettant d'extraire des quantités physiques phénoménologiquement intéressantes ; (c) des approches théoriques (nouvelles stratégies de calcul d'observables, meilleures discrétisation du Lagrangien de QCD accélérant la convergence vers la limite de continu, inclusion des quarks dynamiques u , d , s , c). Ces trois sources de progrès ont permis aux simulations de s'approcher de la situation physique (quarks légers u , d et lourd b proches de leurs valeurs physiques), tout en préservant une bonne maîtrise des effets de discrétisation et de volume fini. Ainsi les effets des extrapolations sont contrôlables et seront progressivement éliminés pour les processus n'impliquant qu'un hadron dans les états initiaux et finaux.

Ces améliorations ont ouvert la voie à une réduction spectaculaire des erreurs hadroniques dans les quantités qui entrent dans la description des désintégrations leptoniques et semileptoniques au sein et au delà du Modèle Standard. Elles sont désormais au niveau d'un pourcent pour les désintégrations des mésons légers π et K . Une précision en dessous de 5% est donc envisageable prochainement pour les désintégrations similaires des mesons D (D_s). Pour des mésons B et B_s une telle précision est attendue dans les 5 prochaines années. Dans ce contexte, le calcul de précision des amplitudes du mélange $K^0 - \bar{K}^0$ et $B_{d,s} - \bar{B}_{d,s}$ dans le Modèle Standard ainsi que dans ses extensions, devient possible et très utile pour la recherche des effets de la nouvelle physique à basse énergie.

Outre ces progrès dans les méthodes numériques, il faut souligner la complémentarité d'autres méthodes de calcul, analytiques et/ou phénoménologiques, pour les observables qui restent inaccessibles aux simulations de QCD sur réseau, ou pour les réduire à des éléments de matrice plus simples qui eux sont calculables numériquement. Ainsi on peut espérer que la maîtrise des théories effectives à des ordres supérieurs (aussi bien dans le développement perturbatif que dans le développement en puissances), ainsi que la meilleure compréhension des incertitudes intrinsèques aux approches semi-phénoménologiques comme les règles de somme, conduisent *in fine* à des prédictions plus précises des observables désirées.

3 Violation de CP et saveurs lourdes auprès du LHC

3.1 LHCb à l'horizon 2017

Après l'arrêt du Tevatron, l'expérience LHCb installée auprès du LHC, est actuellement la seule expérience à prendre des données pour étudier la violation de CP et les désintégrations rares dans le secteur de la beauté et du charme. La prise de données a débuté en mars 2010, à une énergie de $\sqrt{s} = 7$ TeV. Après une première année qui a permis de calibrer le détecteur et de mesurer les sections efficaces de production des quark b et c , la prise de données a continué avec un grand succès en 2011. Le détecteur fonctionne à une luminosité instantanée de $3,5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ qui est constante en fonction du temps. Le nombre d'interactions par croisement des faisceaux est de 1,6 permettant de fonctionner dans des conditions maîtrisées et stables. Ces valeurs sont supérieures aux paramètres de *design* de l'expérience par un facteur 1,75 et 4 respectivement⁸. Fin 2012, l'expérience aura accumulé une luminosité intégrée supérieure à 2 fb^{-1} ^a.

Après un arrêt technique de 18 mois environ, la prise de données continuera à une énergie de $\sqrt{s} = 13$ ou 14 TeV. Cette seconde période se poursuivra jusqu'à fin 2017. Cette date marquera l'achèvement de la première phase de fonctionnement du détecteur LHCb, dans sa configuration actuelle. L'objectif est d'accumuler d'ici là une luminosité intégrée de 5 fb^{-1} , ce qui paraît extrêmement raisonnable au vue des performances du détecteur et de la machine.

Le programme de physique de LHCb est centré sur la physique de la beauté et du charme⁹. Il inclut aussi la physique électrofaible et la recherche de particules exotiques, à grande valeur de pseudo-rapacité. La géométrie vers l'avant du détecteur, son système précis de mesure des vertex déplacés et ses capacités d'identification des particules offrent des possibilités uniques de recherche dans le domaine de pseudo-rapacité élevée ($2 < \eta < 5$) et à basse impulsion transverse. Le programme de recherche comporte la mesure d'observables clés :

1. Mesure du rapport de branchement des désintégrations très rares $B_{d,s} \rightarrow \mu^+ \mu^-$;
2. Mesure de la phase faible ϕ_s du mélange $B_s - \bar{B}_s$ avec les modes $B_s \rightarrow J/\psi \phi$ ou $J/\psi(f_0, \eta, \eta')$, $D_s^+ D_s^- \dots$;
3. Mesure des asymétries avant-arrière (A_{FB}) des désintégrations $B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ en fonction de q^2 et détermination du point de croisement à la valeur nulle avec une précision

^aA la fin de 2011, une luminosité intégrée de $1,1 \text{ fb}^{-1}$ a été enregistrée.

0,5 GeV², ou meilleure. Une grande partie des observables angulaires pourront être également mesurées ;

4. Mesure de l'angle γ du triangle d'unitarité à une précision meilleure que 4°. Notons que ces mesures se font à l'aide des désintégrations à l'arbre $B^- \rightarrow DK^{(*)(-)}$ ou $B_s \rightarrow D_s^+ K^-$ très peu sensibles aux incertitudes théoriques et à la nouvelle physique. Ces mesures de γ fixeront un point de référence standard très stable pour les tests de cohérence de CKM ;
5. Mesure de la polarisation des photons dans les désintégrations radiatives $b \rightarrow s\gamma^{(*)}$;
6. Recherche de la violation de CP dans les mésons charmés, et étude des paramètres du mélange $D^0 - \bar{D}^0$.
7. Mesures des asymétries de charges dans les désintégrations semi-leptoniques des mésons beaux (A_{SL}^s) ;

Ces mesures sont des exemples représentatifs des recherches possibles avec les données de l'expérience LHCb. Bien d'autres canaux sont aussi utilisés pour améliorer la précision et pour vérifier la cohérence des prédictions du Modèle Standard. De plus, au delà de ces mesures, un vaste programme lié à la spectroscopie des hadrons beaux et à l'étude du méson B_c a aussi lieu dans LHCb.

Avec un peu plus de 300 pb⁻¹ de données collectées mi-2011, la collaboration LHCb a présenté des résultats déjà meilleurs ou de précisions comparables à ceux du Tevatron et des usines à mésons B , dans de nombreux domaines clés de son programme de recherche ¹⁰ :

- Limite sur le branchement $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ la plus contraignante, avec seulement un facteur quatre au-dessus du Modèle Standard ¹¹.
- Mesures les plus précises de la violation de CP dans les désintégrations $B_s \rightarrow J/\psi(\phi, f_0)$ $\phi_s = [0, 13 \pm 0, 18(stat.) \pm 0, 07(syst.)]$ rad, des paramètres de mélange $B_s^0 - \bar{B}_s^0$: $\Delta\Gamma_s = [0, 123 \pm 0, 029(stat.) \pm 0, 008(syst.)]$ ps⁻¹, $\Gamma_s = [0, 656 \pm 0, 009(stat.) \pm 0, 008(syst.)]$ ps⁻¹, et la fréquence du mélange à une précision 2,5 fois meilleure que CDF: $\Delta m_s = [17, 725 \pm 0, 041(stat.) \pm 0, 026(syst.)]$ ps⁻¹. La valeur de ϕ_s obtenue est compatible avec la prédiction du Modèle Standard ¹¹.
- Etude de l'asymétrie A_{FB} dans les désintégrations $B_d \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$ avec une précision comparable ou meilleure que celles des autres expériences précédentes et un comportement tout à fait standard.
- Indication à quatre écarts standard d'un signal pour la mesure de l'angle CKM γ dans désintégrations $B^- \rightarrow DK^-$, où le D se désintègre dans le mode doublement supprimé de Cabibbo $K^+\pi^-$ (ADS). Cette mesure a déjà une signification comparable au résultat final de Belle. Indication de la première asymétrie directe de CP dans les modes $B_s \rightarrow K^+\pi^-$ et confirmation avec une précision comparable à la valeur mondiale pour les modes $B_d \rightarrow K^+\pi^-$. Mise en évidence d'un signal $B_s \rightarrow \pi^+\pi^-$ et mesure la plus précise du rapport des désintégrations radiatives $B_d \rightarrow K^{*0}\gamma/B_s \rightarrow \phi\gamma$.
- Etude de la violation directe de CP et du paramètre de mélange y_{CP} dans le système $D^0 - \bar{D}^0$. Les précisions obtenues sont déjà comparables à celles des moyennes mondiales. Avec près de 600 pb⁻¹ de données, la première indication de violation directe de CP dans le secteur du charme est obtenue à 3,5 écarts à l'aide de la double différence ΔA_{CP} intégrée sur le temps des désintégrations D^0/\bar{D}^0 en $K^+K^-/\pi^+\pi^-$ ($[-0, 82 \pm 0, 21(stat.) \pm 0, 11(syst.)]$ %).

Cinq laboratoires français CNRS/IN2P3 participent à l'expérience LHCb : le LAPP, à Annecy-le-Vieux, associé à l'Université de Savoie, le LPC, à Clermont-Ferrand, associé à l'Université Blaise Pascal, le CPPM, à Marseille, associé à l'Université d'Aix-Marseille, le LAL, à Orsay, associé à l'Université de Paris-Sud et le LPNHE, à Paris, associé à l'Université Pierre et Marie Curie et Paris Diderot. Les effectifs sont peu fluctuants d'une année à l'autre : environ 38 physiciens (chercheurs CNRS, enseignants-chercheurs et post-docs), 22 ITAs (majoritairement CNRS), une douzaine de doctorants. Le nombre *équivalent PhD* est de l'ordre de 43 correspondant à 12% de la collaboration.

Le budget annuel est de l'ordre de 700 kiloeuros dont 320 kiloeuros en *Maintenance & Operation*.

La France a contribué à la conception et à la réalisation de la mécanique et de l'électronique de lecture des calorimètres. Elle est l'acteur principal du système de déclenchement de premier niveau. Elle est aussi l'initiatrice du projet DIRAC, système de traitement et d'analyse de données dans un environnement distribué comme les grilles de calcul. Les physiciens et ingénieurs français ont de nombreuses responsabilités de premier plan et sont très fortement impliqués dans l'analyse des données. Ils contribuent à la mesure de la phase ϕ_s , de l'angle γ , à la recherche de modes de désintégrations très rares comme le $B_s \rightarrow \mu\mu$, l'étude des désintégrations $B_d \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ et des désintégrations radiatives, aux modes de désintégration sans charme du B mais aussi à la spectroscopie de hadrons beaux et charmés et à la physique du charme.

3.2 Upgrade de LHCb

À l'horizon 2017, l'expérience LHCb aura accumulé environ 5 fb^{-1} de données. À cette époque, les sensibilités sur les observables phares seront comparables aux valeurs attendues du Modèle Standard. Pour aller au-delà, une modification du détecteur est nécessaire. La principale limitation expérimentale est due au système de déclenchement de premier niveau qui introduit une saturation dans les efficacités de sélection des canaux hadroniques au-delà d'une luminosité instantanée de quelques $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

L'upgrade de LHCb est planifié lors de l'arrêt du LHC d'une année, en 2018. Il permettra de fonctionner à une luminosité instantanée de $1 - 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, avec une amélioration significative des efficacités de déclenchement des canaux hadroniques. La solution proposée est de lire l'ensemble du détecteur à la fréquence de croisements des faisceaux (40 MHz) et d'utiliser un système de déclenchement uniquement logiciel implémenté sur une ferme de processeurs. Les gains attendus sur les efficacités de reconstruction des canaux hadroniques varient de 2 à 7. Il est prévu de collecter de 5 à 10 fb^{-1} par an pour atteindre une luminosité intégrée de 50 fb^{-1} .

Le défi de cette amélioration est lié aux nombres d'interactions proton-proton par croisement de faisceaux. Avec $\mathcal{L} = 1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, le nombre moyen d'interactions est de 2,3. Il augmente à 4 pour $\mathcal{L} = 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Dans ce dernier cas, tous les croisements de faisceaux produisent au moins une interaction visible dans le détecteur. Il est à noter que l'expérience LHCb a quasiment toujours fonctionné au delà des conditions nominales qui prévoyaient de tourner avec un nombre moyen d'interactions de 0,4. Fin 2010 et début 2011, certaines conditions de l'upgrade ont été atteintes, avec un nombre moyen d'interactions de 2,5. Les études faites sur différents canaux de physique montrent que la détérioration des performances due à l'empilement d'interactions sera faible.

La collaboration LHCb a soumis une lettre d'intention¹² au *LHC Committee* en mars 2011. Celui-ci en a apprécié le programme de physique¹³ et approuvé la proposition. Il a enjoint la collaboration de poursuivre vers la publication d'un *Technical Design Report* en 2013¹⁴.

Modifications du détecteur

Lire l'ensemble du détecteur LHCb à 40 MHz et envoyer les données à la ferme de processeurs implique de :

- remplacer l'ensemble de l'électronique *front-end* limitée à 1,1 MHz par une nouvelle électronique fonctionnant à 40 MHz ;
- remplacer l'ensemble des détecteurs silicium (VELO, IT, TT) ainsi que l'électronique intégrée des HPD du RICH ;
- enlever certains détecteurs du fait de l'augmentation du taux d'occupation à plus haute luminosité (aérogel du RICH, première station du détecteur à muon M1, le PS et le SPD) ;
- remplacer les cartes de lecture communes à l'ensemble des détecteurs, modifier l'infrastructure de l'acquisition des données et agrandir la ferme de processeurs.

Afin d'optimiser les coûts, les temps de développement et de mise au point, il est prévu d'utiliser autant que possible l'infrastructure et l'électronique existantes, ainsi que de développer des solutions communes à l'ensemble des sous-détecteurs.

Le détecteur de traces de LHCb comprend le détecteur de vertex (VELO) entourant le point d'interaction et un ensemble de stations de mesure situées avant (TT) et après l'aimant (IT, OT).

- La solution de base envisagée pour remplacer le VELO est un détecteur silicium pixel de 256×256 pixels de taille $55 \times 55 \mu\text{m}^2$. Cette géométrie a un faible taux d'occupation pour chaque cellule et réduit la combinatoire dans l'algorithme de reconstruction des traces. La puce de lecture front-end retenue, VELOPix, est une version modifiée de la puce TimePix développée par la collaboration Medipix au CERN. Une option alternative est d'utiliser un détecteur silicium à micro-pistes résistant aux radiations¹⁵. Un programme de R&D est en cours afin d'obtenir la meilleure résolution, la moindre longueur de radiation et un refroidissement efficace.
- Pour les détecteurs silicium (TT, IT), deux options sont prévues : utiliser les modules silicium actuels mais avec une puce de lecture résistante aux radiations et pouvant fonctionner à 40 MHz. La deuxième option est un détecteur à fibres scintillantes de $250 \mu\text{m}$ de diamètre. La collecte de lumière se ferait par des SiPM et toute l'électronique front-end serait placée hors détecteur évitant ainsi les contraintes de résistance aux radiations.
- Le détecteur OT est un détecteur de tubes à paille remplis de gaz. Seule l'électronique front-end est à remplacer. Cependant, cette configuration limite la luminosité à $\mathcal{L} = 1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Au delà, le taux d'occupation de la zone centrale ne permet plus de faire du tracking. Plusieurs solutions sont à l'étude. Une première solution est d'étendre la surface de l'IT afin de couvrir la région la plus dense en traces et ainsi réduire la taille des tubes de l'OT. Une deuxième solution est de supprimer complètement les tubes de l'OT pour les remplacer par des fibres scintillantes de 1 mm de diamètre.

Les électrons, photons et muons sont identifiés respectivement par les calorimètres (PS, SPD, ECAL, HCAL) et le détecteur de muons (M2-M5). Pour l'identification des kaons, pions et protons, deux détecteurs RICH avant et après l'aimant fournissent la séparation sur une gamme d'impulsion de 2 à 100 GeV/c.

- Pour les RICHs, le candidat pour remplacer les HPD est un photo-multiplicateur multi-anode MaPM de Hamamatsu pouvant être lu à 40 MHz. L'anode est une matrice de 8×8

pixels où chaque pixel couvre une surface de $2 \times 2 \text{ mm}^2$. La forme carrée du MaPM permet de réduire les zones mortes. Afin d'améliorer le PID pour les traces de faible impulsion (1 à 10 GeV/c), un détecteur (TORCH) de temps de vol utilisant la radiation Cerenkov dans le quartz est envisagé. Ce détecteur pourrait être installé après 2018 si nécessaire.

- Pour les détecteurs calorimètres, seule l'électronique front-end est à remplacer. Les gains des photomultiplicateurs des calorimètres seront abaissés, avec la possibilité de remplacer les modules internes du calorimètre électromagnétique s'ils sont trop endommagés par les radiations.

Enfin, le système de déclenchement de premier niveau sera intégré dans la nouvelle architecture d'acquisition. Il permettra d'ajuster le taux d'évènements envoyés à la ferme de processeurs de 1 à 40 MHz.

Le programme de physique

L'upgrade de LHCb a un potentiel unique par rapport aux expériences auprès des super usines à B dans un certain nombre de domaines qui sont inaccessibles à ces dernières. En particulier sur la statistique des canaux exclusifs composés uniquement de traces chargées dans l'état final ainsi que sur les mesures des asymétries dépendantes du temps des mésons B_s et sur la physique des baryons beaux. Les sensibilités attendues sur des canaux clés permettront d'atteindre les limites théoriques¹².

Le programme des saveurs ne se restreint pas aux quarks, mais s'étend aux leptons : neutrino de Majorana¹⁶, violation de saveur dans les désintégrations des τ . La couverture unique en pseudo-rapacité permet aussi de contribuer de manière spécifique à la physique électrofaible, à QCD ainsi qu'à la recherche de particules exotiques¹². Ce programme, loin d'être figé, évoluera avec les progrès du LHC.

Les atouts principaux de LHCb pour mener à bien son programme de physique sont des taux de production de hadrons beaux et charmés très élevés, la production de l'ensemble des hadrons beaux^b, la grande distance de vol des mésons beaux permettant d'obtenir des échantillons avec un faible niveau de bruit de fond, bien qu'étant produits dans un environnement hadronique.

Contribution française, moyens humains et financiers

La contribution française à la construction du détecteur LHCb correspond à environ 12%, pourcentage proche du nombre de physiciens présents. Le niveau des contributions française envisagées pour l'upgrade est également de l'ordre de 12 % du cout total de l'upgrade de LHCb. Ces contributions portent sur des points stratégiques et s'inscrivent dans les savoir-faire des laboratoires. Les développements s'orientent vers la prise en charge de l'électronique de lecture des calorimètres^c, la conception et la réalisation de la carte de lecture à 40 MHz, une éventuelle contribution à l'électronique de lectures des détecteur de traces à fibres scintillantes, la migration du système de déclenchement de premier niveau dans la nouvelle architecture et l'optimisation des algorithmes de tracking.

Le coût envisagé de l'upgrade est de 52 MCHF. Le calendrier est organisé autour de six phases : R&D et choix technologiques (2011-2012), TDRs et validations des prototypes (2013), production (2014-2015), contrôle qualité et tests (2016-2017), installation et mise au point (2018), prise de données (2019-...).

Les risques principaux de ce projet sont liés au retard du calendrier du LHC.

^b B_u , B_d , B_s , B_c et baryons b avec un rapport relatif de 4:4:1:0.1:1.

^c Ceci en lien avec le groupe de Barcelone qui a déjà participé aux calorimètres pour LHCb.

4 Violation de CP et saveurs lourdes auprès des usines à B

*SuperB*¹⁷ est une usine à saveurs de nouvelle génération dont l'objectif très ambitieux est de découvrir la structure de la Nouvelle Physique (NP) à l'échelle du TeV par l'observation systématique de ses effets indirects sur les quarks et les leptons à basse énergie. L'accélérateur sera construit sur le site de l'Université Tor Vergata (Rome 2) à quelques kilomètres des Laboratoires Nationaux de Frascati (INFN). Le design très novateur de la région d'interaction¹⁸, testé avec succès sur le collisionneur DAΦNE en 2008-2009¹⁹, permettra d'atteindre une luminosité instantanée de 10^{36} cm⁻²s⁻¹ à l'énergie de la résonance $\Upsilon(4S)$ et d'intégrer 75 ab⁻¹ en cinq ans de fonctionnement nominal – pour comparaison, *BABAR* et Belle ont respectivement accumulé 0.52 et 1.04 ab⁻¹ de données. Ces performances record seront obtenues avec des niveaux de courant similaires à ceux utilisés dans les usines à mésons B de première génération, *BABAR* et Belle ; ainsi, les bruits de fond machine seront sous contrôle.

SuperB a donc des objectifs plus ambitieux en terme de luminosités instantanée et intégrée que ceux du projet concurrent Belle-2 – respectivement 8×10^{35} cm⁻²s⁻¹ et 50 ab⁻¹. Le collisionneur *SuperB*²⁰ a deux autres avantages principaux.

- D'une part la possibilité de prendre des données sur une large plage en énergie, du seuil de production des mésons charmés – donnant ainsi accès aux effets de violation de CP dépendante du temps dans le système $c\bar{c}$ – à la résonance $\Upsilon(6S)$.
- D'autre part, l'utilisation d'un faisceau d'électrons polarisé à ~ 80 % ce qui permettra de mesurer le moment magnétique anormal du lepton τ , d'améliorer la sensibilité des modes $\tau \rightarrow l\gamma$ ou encore de mesurer l'angle de Weinberg $\sin^2(\theta_W)$ à l'énergie de l' $\Upsilon(4S)$. Sans polarisation, ces analyses sont soit impossibles, soit fortement pénalisées.

Le chapitre *Accélérateurs* de ce document de prospective contient une description plus détaillée de l'accélérateur *SuperB*. Quant au détecteur²¹, il reprendra l'architecture globale de *BABAR*, modifiée pour tenir compte des augmentations de luminosité et de bruit de fond. Le but de la collaboration *SuperB* est d'obtenir partout des performances supérieures à celles de *BABAR* malgré les conditions de prises de données plus compliquées. En allant du point d'interaction vers l'extérieur, la configuration nominale du détecteur comprend les éléments suivants.

- Le SVT, un détecteur de vertex composé de six double-couches de silicium instrumentées. La couche la plus interne (L0) sera à peine à $1,5$ cm de rayon et sera soumise à un bruit de fond très important, provenant en particulier de paires électron-positron de très faibles impulsions qui spiralent à petits rayons à cause du champ magnétique longitudinal de $1,5$ tesla. Son design fait donc encore l'objet d'activités R&D très poussées et plusieurs solutions sont étudiées en parallèle. On s'oriente vers l'utilisation d'une couche L0 temporaire au démarrage de la prise données qui sera remplacée par la couche finale un à deux ans plus tard. L'ajout de la couche L0 est nécessaire pour compenser la réduction du boost ($\beta\gamma = 0,24$ dans *SuperB* au lieu de $0,56$ dans *BABAR*) due au choix de l'énergie du faisceau d'électrons ($4,18$ GeV) pour maximiser la polarisation longitudinale de ce faisceau.
- La DCH, une chambre à dérive multi-fils qui comportera quarante couches.
- Le FDIRC (Focusing Detector of Internally Reflected Cherenkov light) est le détecteur principal pour l'identification des particules chargées (PID) dans la partie tonneau de *SuperB*. C'est le successeur du DIRC de *BABAR*²² dont il réutilisera les 144 barres de quartz, préservées de toute dégradation pendant la prise de données, puis extraites de *BABAR* lors de son démantèlement et actuellement stockées dans un environnement contrôlé à SLAC. La caméra du FDIRC a été complètement repensée : le grand volume d'eau ultra-pure de *BABAR* – générateur de bruit de fond et sujet constant d'inquiétude à cause du

danger de fuites vers le reste du détecteur – est remplacé par douze petits volumes de quartz indépendants et collés optiquement aux barres du DIRC. Les photons Cherenkov y subissent plusieurs réflexions sur deux miroirs avant d’être détectés par des photomultiplicateurs MaPMT Hamamatsu H-8500 situés dans le plan focal.

- Le calorimètre électromagnétique EMC qui réutilise les cristaux de *BABAR* couvre le tonneau et la partie avant de *SuperB*.
- L’IFR, le retour instrumenté du champ magnétique – 1,5 tesla fourni par le solénoïde supraconducteur de *BABAR* – est utilisé pour détecter les muons et les hadrons neutres à longue durée de vie comme les K_L .

Une des caractéristiques essentielles de *SuperB* sera l’étude des canaux de désintégration des mésons B rares avec un ou plusieurs neutrinos dans l’état final pour lesquels la reconstruction complète de l’autre B est obligatoire. Pour tirer partie au mieux de cette physique, la collaboration a créé un groupe de travail chargé de l’optimisation du détecteur. Il a recommandé l’ajout de deux détecteurs supplémentaires : un calorimètre électromagnétique à l’arrière et un détecteur de PID vers l’avant. Plusieurs technologies se sont retrouvées en concurrence pour ce dernier détecteur et c’est finalement la solution portée par le LAL (en collaboration avec SLAC) qui a été choisie. Le FTOF utilise la méthode du temps de vol associée à une électronique de lecture ultra-précise (développée au LAL en collaboration avec l’IRFU) et à des photomultiplicateurs très rapides.

Le trigger de *SuperB* sera ouvert comme pour *BABAR*, avec une efficacité proche de 100 % pour les événements $B\bar{B}$ et très élevée (90-95%) pour les événements $\tau^+\tau^-$ et $c\bar{c}$. Le taux de déclenchement de premier niveau sera de 150 kHz répartis comme suit : 50 kHz d’événements Bhabha ; 25 kHz de bruit de fond faisceau ; 25 kHz irréductibles (physique + bruit de fond) ; enfin, une marge de sécurité de 50% pour éviter toute mauvaise surprise. Quant aux triggers de haut niveau, leur taux de sélection temps réel sera de l’ordre de 25 kHz. Dans *SuperB* les activités électroniques (parties commune à l’ensemble de l’expérience et spécifique aux sous-détecteurs), acquisition des données (DAQ) et trigger sont rassemblées dans un même système appelé *ETD*.

Résultats de physique attendus pour *SuperB*

Le potentiel de physique de *SuperB* est décrit en détails dans le document d’étape²³ paru à l’été 2010 et récemment précisé par le rapport²⁴ qui compare les résultats attendus à *SuperB* avec ceux d’autres expériences en physique des saveurs, en particulier LHCb et Belle-2. Le programme de physique de *SuperB* est centré sur l’étude de modes dorés qui donnent accès à des observables prédites avec précision par la théorie et qui permettent de contraindre des modèles de NP et de tester le Modèle Standard avec précision (métrologie CKM au niveau du pourcent, mesure de $\sin^2(\theta_W)$ à basse énergie, etc.). Parmi les domaines couverts on peut citer la physique du τ (violation de saveur leptonique, violation de CP, facteur de forme pour $g-2$), des mésons $B_{u,d}$ (états finaux avec neutrinos ou de nombreuses particules neutres, recherche de violation de CP dépendante du temps, modes pingouins) et B_s (étude des taux de désintégration, mesure de l’asymétrie semileptonique ou de $B_s \rightarrow \gamma\gamma$) ou encore du charme (mesure précise des paramètres de mélange et recherche de violation de CP). La physique des saveurs a la chance de s’appuyer sur un grand nombre d’expériences complémentaires, en phase de prise de données, de construction ou encore en projet. Seule la mise en commun de tous leurs résultats permettra de sélectionner les modèles de NP en accord avec les données et de contraindre leurs espaces de paramètres.

Statut du projet *SuperB*

SuperB est porté par l'Italie, pays hôte et principal contributeur financier du projet, tant au niveau de la machine que du détecteur. L'expérience a été sélectionnée par le gouvernement italien pour son plan de relance de l'économie, ce qui lui garantit un financement pluriannuel. Ainsi, suite à l'approbation du projet en décembre 2010, des enveloppes de 19 et 50 millions d'euros ont déjà été allouées en 2010 et 2011. L'Italie financera l'ensemble de la machine : seules les infrastructures et le personnel locaux seront à la charge des instituts participants. Quant au détecteur, son financement sera partagé à parts égales entre l'INFN et les autres pays impliqués dans *SuperB* : France, États-Unis, Royaume-Uni, Canada, Russie, Pologne, Espagne. Ces pays sont actuellement en contact avec leurs tutelles respectives pour présenter leurs demandes de participation à l'expérience et obtenir les financements correspondants. Le consortium *Laboratoire Nicola Cabibbo* dont les deux partenaires sont l'Université Tor Vergata et l'INFN, sous l'égide du Ministère italien de la Recherche, vient d'être créé ; sa mission est de gérer la construction de la machine et l'intégration du détecteur. Cette étape importante marque l'entrée du projet dans la phase de construction avec les premières dépenses propres et le démarrage des activités de génie civil.

Le calendrier prévisionnel prévoit une année de transition en 2012, avec des activités R&D liées à la préparation des TDRs et le début de la construction proprement dite. Celle-ci s'étendra probablement jusqu'en 2016, année du commissioning avant un démarrage de la prise de données en 2017. *SuperB* devrait donc avoir intégré autour de $5\text{-}10 \text{ ab}^{-1}$ de données avant 2020 et atteindrait alors les 75 ab^{-1} vers 2022. Plus que la date exacte du démarrage, ce sont ces deux jalons qui nous paraissent essentiels.

Projet de contribution française pour la construction de *SuperB*

Les groupes français impliqués dans le développement de l'accélérateur *SuperB* (actuellement le LAL, le LAPP et le LPSC) sont principalement intéressés par trois projets : la source de positrons, la polarisation du faisceau d'électrons et les aspects d'interface machine-détecteur. Comme indiqué dans l'introduction, les contributions porteront essentiellement sur le personnel et les infrastructures locales puisque c'est *SuperB* qui assurera de manière centralisée le financement de la machine. Ainsi, pour un investissement relativement limité, les équipes pourront exercer des responsabilités importantes et participer aux développements de pointe nécessités par *SuperB*.

Pour la partie détecteur (IPHC, LAL, LPNHE et LPSC pour le moment, soit une dizaine de physiciens et un nombre équivalent d'ingénieurs), le cœur des activités sera l'identification des particules chargées (PID), un système clef de *SuperB* nécessaire à la fois pour sélectionner efficacement des canaux de désintégration rares et pour reconstruire totalement de nombreux modes hadroniques. Cet engagement s'inscrit dans la suite des activités sur *BABAR*, déjà majoritairement tournées vers le DIRC. Côté tonneau, les groupes français ont la responsabilité de l'électronique d'acquisition et sont impliqués sur de nombreux aspects : simulation, reconstruction, bruits de fond, sélecteurs pour la physique, etc. Nous voulons aussi contribuer à l'achat et aux tests des composants principaux du FDIRC : 12 caméras en quartz et environ 600 photomultiplicateurs. Côté FTOF, l'étape suivante consiste à réaliser un prototype de secteur instrumenté à l'échelle une et à démontrer son bon fonctionnement. La France est également très impliquée dans la partie ETD : co-direction du groupe, suivi des différents projets, système temps réel et monitoring global de l'expérience. Enfin, des activités R&D sur la couche L0 du SVT vont démarrer à l'IPHC. Nous souhaitons également jouer un rôle de premier plan dans la physique : participation aux échanges avec les théoriciens de la physique des saveurs, préparation des analyses, développements logiciels associés, etc. Enfin, *SuperB* souhaite que la France participe au computing de l'expérience, en particulier via le CC-IN2P3 qui pourrait par

exemple accueillir une copie des données brutes en plus de couvrir une partie des ressources de stockage et de CPU du projet.

Aucun permanent impliqué dans *SuperB* n'envisage de rejoindre Belle-2 au cas où la France ne s'engagerait pas sur le long terme dans ce projet. Côté accélérateur, il n'existe pas non plus de perspective d'implication au niveau des possibilités offertes par *SuperB* ; de plus, la machine japonaise est moins ambitieuse et pourrait bien être moins performante. Quant à l'activité détecteur, elle s'inscrit en grande partie dans la continuité d'un partenariat de plus de quinze ans dans *BABAR*. Enfin, le planning de Belle-2 qui prévoit le démarrage de l'accélérateur début 2015 et la mise en service du détecteur un an plus tard, nous semble optimiste et pourrait être impacté par la situation énergétique actuelle du Japon.

Pour terminer nous voudrions souligner que le collisionneur *SuperB* est conçu pour servir également de source de lumière synchrotron. Une participation forte de la France au projet assurerait à la communauté française des utilisateurs de lignes de lumière un accès privilégié à cette machine dont les simulations montrent qu'elle se situerait au niveau des meilleures installations modernisées de troisième génération.

Risques

Les risques stratégiques associés au projet *SuperB* sont de deux ordres : d'une part un risque scientifique qui serait de ne pas s'associer à un projet majeur de physique des particules en Europe et qui constitue l'une des meilleures voies d'accès pour découvrir et explorer la structure de la physique au-delà du Modèle Standard. La non participation à *SuperB* comporterait également un risque technologique important au niveau de la physique des accélérateurs leptoniques, étant donnée l'importance cruciale pour les futurs projets du domaine des avancées apportées par *SuperB*.

Une fois cette participation actée, il existe un risque de nature technologique et de management : les responsabilités de construction confiées aux équipes françaises tant sur le détecteur que sur la machine pourront-elles être honorées ? Dans la mesure où les contributions côté accélérateur ne seront pas financées par la France, ce risque se réduit à un problème de main d'œuvre et de plan de charge des experts concernés. Pour le détecteur, les risques sont de ne pas constituer des groupes suffisamment solides au fur et à mesure de l'avancement du projet et qu'il apparaisse un décalage entre le financement décidé au début du projet et celui nécessaire pour le mener à bien.

Conclusion

SuperB sera une expérience phare de notre discipline dans les années 2015-2025. Le projet bénéficie du soutien de l'Italie, pays hôte et principal contributeur de la machine et du détecteur, qui l'a inscrit dans le cadre de son plan de relance. L'engagement sans faille du gouvernement italien, encore confirmé récemment par la création du laboratoire Nicola Cabibbo, permet la construction du projet dans de très bonnes conditions malgré la mauvaise situation économique mondiale actuelle. Des groupes français font partie de *SuperB* depuis son démarrage et ont obtenu des positions clefs, visibles et à responsabilités dans la phase TDR, tant au niveau technique que pour la physique. Participer à la construction, puis la prise de données de *SuperB* et enfin à leur exploitation est donc une réelle opportunité à saisir pour la France. *SuperB* tiendra une place de choix dans le panorama de la recherche en physique des saveurs de la prochaine décennie, au côté des autres expériences en cours ou programmées comme l'upgrade de LHCb ou Belle-2.

5 Expériences ciblées

5.1 nEDM : mesure du moment dipolaire électrique du neutron

La limite actuelle sur le moment dipolaire électrique du neutron est $|d_n| \leq 3 \times 10^{-26} e.cm$ (90 % CL)²⁵. Les expériences de nouvelle génération prévoient d'atteindre une sensibilité dans la gamme $10^{-28} e.cm$ aux alentours de 2020. Le Modèle Standard prédit une contribution CKM de $\sim 10^{-32} e.cm$, inaccessible à l'expérience. Un signal non nul serait donc la signature d'une nouvelle physique. Les extensions du Modèle Standard prédisent de façon générique $d_n \sim \sin(\Phi_{CP}) (M_{NP}/TeV)^{-2} \times 10^{-25} e.cm$ ²⁶ et sont donc déjà fortement contraintes à l'échelle du LHC. Par ailleurs, les modèles de baryogénèse à l'échelle électrofaible ne sont viables que si $d_n \sim 10^{-26} - 10^{-27} e.cm$. Ainsi, les expériences en cours de démarrage permettront de tester les mécanismes à l'origine de l'asymétrie matière-antimatière.

Il existe à l'heure actuelle 6 projets à différents stades d'avancement : 4 en Europe (dont 3 en cours de démarrage), un aux USA et un au Japon (à échéance plus lointaine), ce qui montre l'intérêt fort suscité par cette mesure au niveau international. Ces projets constituent la justification essentielle de la construction de nouvelles sources de neutron ultrafroids (UCN). Jusqu'alors, la source la plus intense se trouve à l'Institut Laue Langevin (ILL) à Grenoble, où la limite actuelle sur d_n a été obtenue. Parmi les sources de nouvelle génération, permettant d'augmenter la statistique de deux ordres de grandeur, celle de l'Institut Paul Scherrer en Suisse est entrée en fonctionnement à l'automne 2011.

Deux laboratoires de l'IN2P3, le LPC Caen (4 physiciens) et le LPSC Grenoble (2 physiciens), sont impliqués depuis 2004 dans le projet nEDM@PSI²⁷. Ce projet est porté par une collaboration de 25 physiciens permanents, venant de 11 laboratoires européens (Allemagne, Belgique, France, Pologne, Suisse). La contribution française constitue donc une part conséquente de la collaboration. Si la taille du projet, en terme de moyens humains, est très inférieure aux expériences de la physique des particules à haute énergie, l'expérience nEDM@PSI est le deuxième plus gros projet (l'expérience américaine nEDM@SNS compte 68 physiciens, postdocs inclus) de toute la physique des particules utilisant les neutrons.

Le projet nEDM@PSI vise à améliorer la limite ou découvrir le moment dipolaire électrique du neutron. L'expérience utilise des neutrons ultrafroids polarisés, stockés pendant plusieurs minutes dans un volume baigné par un faible champ magnétique et par un fort champ électrique. La fréquence de précession du spin des neutrons est mesurée avec la méthode des champs alternés de Ramsey, et on cherche une dépendance de la fréquence de précession en fonction du champ électrique appliqué. Le projet s'organise en trois phases successives. La phase I (2004-2009) : l'ensemble de l'appareillage détenant la meilleure limite a été cédé par la collaboration anglaise à la collaboration nEDM@PSI. La phase I a consisté à moderniser cet appareil, en le caractérisant auprès de la source UCN de l'ILL. Les laboratoires de l'IN2P3 ont contribué de façon décisive dans la réussite de cette phase, le LPSC assurant la coordination technique du projet. La phase II (2009 - 2014) : l'appareil modernisé de l'ILL a été transporté auprès de la source UCN de PSI, où une deuxième série d'améliorations a été conduite. Il est maintenant prêt pour la prise de données qui a démarré en automne 2011, pour une durée totale de 2-3 ans. On s'attend à améliorer la précision statistique par un facteur 10 (grâce à l'intensité de la source UCN de PSI) tout en contrôlant les effets systématiques au même niveau (avec une magnétométrie améliorée). Ainsi, le projet nEDM@PSI pourrait être la première expérience à sonder le domaine $10^{-27} e.cm$. La contribution française dans cette phase est aussi essentielle puisque nous sommes responsables des détecteurs de neutrons (LPC), de l'analyse et du transport du spin, des cartographies de champ magnétique (LPC), du magnétomètre mercure (LPSC), du module principal de l'électronique d'acquisition et de la source de courant stabilisée (LPSC). La phase III (2014 - 2018) consiste à construire le spectromètre de prochaine génération pour explorer le domaine $10^{-28} e.cm$. Le travail de conception a déjà débuté depuis plusieurs années

et un avant-projet détaillé existe.

Il est à noter que les performances remarquables de l'installation ont permis d'obtenir lors des mesures à l'ILL des résultats compétitifs dans deux canaux spécifiques de nouvelle physique. Deux résultats ont été publiés, l'un concernant la possibilité de l'oscillation du neutron dans un secteur miroir, et l'autre, un test de haute précision de l'invariance de Lorentz (ce résultat a été proposé, conduit et analysé par les physiciens de l'IN2P3).

La prise de données de la phase II est à ce jour garantie, seul le flux de neutrons ultrafroids de la source de PSI présente un risque modéré concernant la sensibilité statistique de la phase II. Le risque principal pour les groupes français est donc de ne pas participer à la phase III et que l'IN2P3 ne soit pas signataire de la mesure d'un moment électrique dipolaire du neutron non nul.

Les moyens humains limités que nous mettons au service de la collaboration (6 physiciens) nous permettent de contribuer de façon significative, en support à l'équipe leader de PSI. Avec un renforcement modéré, les groupes français pourraient être leaders de l'analyse des données de la phase II. La contribution des groupes français est assurée par une bourse ANR jusqu'en 2012. Par contre, notre participation à la phase III n'est pas assurée.

5.2 GBAR et AEGIS

Les expériences actuelles au CERN auprès de l'AD (Antiproton Decelerator) ont connu des succès récents avec l'annonce du stockage d'atomes d'anti-hydrogène (ALPHA) ou du contrôle de la production de ces antiatomes (ASACUSA). Parmi les tests fondamentaux que la maîtrise de l'antihydrogène permettra, la mesure de l'accélération ressentie par l'antimatière dans le champ gravitationnel de la Terre constitue un test du principe d'équivalence faible qui n'a jamais été réalisé. Le modèle standard cosmologique semble indiquer une composition de l'Univers qui serait due pour plus de 95% à deux composantes non encore observées, l'Énergie Noire et la Matière Noire, dont la première a pour conséquence une gravité répulsive et une accélération de l'expansion de l'univers. Cette composition étrange est une forte indication que notre compréhension de la gravitation n'est pas complète. Ainsi, des modèles de nouvelle physique, tels la supergravité, offrent la possibilité d'introduire des composantes induisant une part de gravité répulsive. Des modèles incluant une violation de CPT et de l'invariance de Lorentz ont également été proposées. Deux expériences auprès de l'AD vont tester le comportement gravitationnel de l'antihydrogène, et pour cela doivent le ralentir au delà de ce qui a été réalisé jusqu'à présent. Alors que GBAR se propose de produire de l'antihydrogène ultra-froid en passant par une phase ionisée, AEGIS vise le refroidissement des antiprotons pour créer des antihydrogènes froids.

GBAR : mesure de la gravitation sur l'anti-hydrogène

Le projet GBAR, initié à Saclay, vise à mesurer directement la chute libre d'atomes d'anti-hydrogène dans le champ gravitationnel de la Terre. Les atomes d'anti-hydrogène, qui sont créés à des énergies de l'ordre du keV, doivent être ralentis à quelques dizaines de nano-électronvolts. La technique expérimentale adoptée par l'expérience GBAR reprend une idée de T. Hänsch et J. Walz, qui consiste à fabriquer des ions \bar{H}^+ ($\bar{p} + 2 e^+$), que l'on peut refroidir à des températures de l'ordre du micro-kelvin. Cela se fait par la technique du refroidissement sympathique, qui consiste à introduire les ions dans un plasma d'ions Be^+ préalablement refroidi par des techniques laser. La fabrication de ces ions anti-hydrogène se fait par interaction des antiprotons sur un nuage très dense ($7.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) de positronium, état lié e^+e^- ; la production de ce positronium nécessite une source très intense de positons. L'expérience consistera en un enchaînement d'un linac pour produire les positons, d'un piège à positons, d'une cible de production de positronium où seront amenés les antiprotons, d'un laser pour l'excitation du

positronium, d'un piège pour capter et refroidir les ions, d'un laser pour dés-ioniser l'ion refroidi, et d'un détecteur d'annihilation autour de la zone de chute libre. Cette expérience fait appel à d'autres disciplines que la physique des particules, notamment lasers, physique des positons lents, physique atomique, pièges à plasma.

Les études ont démarré en 2002 ; l'ANR a soutenu en 2005 la construction de la SOURCE de Positons de Haute Intensité (SOPHI), et en 2010 la mise à niveau du piège de Riken (POSITRAP). Outre le groupe du CEA/Irfu, la collaboration GBAR comprend un groupe de l'IN2P3/CSNSM et des groupes français du LKB (Paris), de l'IPCMS (Strasbourg) et de l'ILL (Grenoble), ainsi que des groupes japonais, anglais, suisse et russe.

- Apports scientifiques

Le projet GBAR vise à réaliser la première mesure de la constante gravitationnelle de l'antimatière, \bar{g} . La sensibilité visée dans la première phase de l'expérience permettra d'établir le signe de la constante gravitationnelle \bar{g} et de mesurer sa valeur avec une précision de 1%. Le projet rassemble des spécialistes de différentes disciplines de la physique. Il permettra l'acquisition d'un savoir-faire en physique de l'anti-hydrogène, inexistant en France.

- Planning et jalons

L'expérience est programmée pour être installée auprès du nouvel anneau ELENA (Extra Low ENergy Antiprotons), dont le Cern a approuvé la construction en juin 2011. La production de positons a été réalisée à Saclay. Les travaux vont porter en 2012 et 2013 sur le piégeage des positons produits par un faisceau pulsé, et sur l'optimisation du piège actuel pour atteindre de hautes intensités. En 2012 également les études d'excitation laser du positronium doivent commencer, avec l'optimisation de la production de positronium. En parallèle et jusqu'en 2014, les études sur la production de l'ion \bar{H}^+ et son piégeage, sur le détecteur de mesure de la chute libre et sur l'implantation au Cern vont se poursuivre. L'installation au Cern devrait débuter en 2014 pour des premières prises de données en 2016, en phase avec le démarrage d'ELENA.

- Risques

Des retards peuvent provenir du mode de financement par projet. Le développement de la source de positons a été financé par une ANR et une subvention ASTRE (Conseil Général de l'Essonne), la ligne de positons par un soutien P2I, les études avec le piège à positons par une ANR en cours. Une subvention IFRAF (Institut Francilien des Atomes Froids) va permettre d'avancer sur les excitations du positronium. D'autres dossiers vont être déposés pour les étapes suivantes. Cette multiplication de sources limitées de financement entraîne des difficultés à planifier l'arrivée d'étudiants en thèse, car on ne peut proposer des sujets que sur des étapes dont le financement est déjà assuré.

Concernant les risques techniques, la production intense de positons est conditionnée par la mise au point de modérateurs (pour passer de positons rapides à positons lents) efficaces et d'un linac performant. L'obtention de taux élevés d'accumulation et de transfert des particules à chaque étape est un point crucial à cette échelle. Les sections efficaces de production des ions \bar{H}^+ sont actuellement mal connues et font l'objet d'études actives. Le refroidissement envisagé pour les ions est une technique déjà utilisée dans d'autres contextes, mais constituerait une première pour des ions aussi légers.

- Moyens humains et financiers

La collaboration est en cours de formation, le *proposal* ²⁸ a été soumis au Cern le 30 septembre 2011, et a été présenté au SPSC le 25 octobre 2011. Une première décision du SPSC est attendue pour janvier 2012. Le consortium a besoin de se renforcer et de

compléter l'ensemble du financement sur les années à venir. Avec 4 groupes français, dont un du CEA/Irfu et un de l'IN2P3 (ces deux groupes totalisent 13 personnes sur un total de 46), la présence française est importante et pourrait encore s'accroître, pour s'équilibrer avec celle de laboratoires étrangers de tout premier plan. Le montant de l'investissement nécessaire est estimé à 8 MEuros sur 10 ans, dont 0,55 déjà investis par l'Irfu.

L'expérience GBAR se caractérise par de nombreuses avancées techniques, mais sur une échelle de temps plus petite que celle devenue habituelle pour les accélérateurs. La mesure de \bar{g} à 1 % pourra être atteinte en quelques mois de prise de données, mais nécessitera une longue mise au point.

Les perspectives à plus long terme s'inscrivent à l'horizon 2018-2019 ; elles consistent dans une mesure des niveaux quantiques d'énergie gravitationnelle, analogue à ce qui a été fait avec des neutrons à l'ILL, et avec la collaboration des auteurs de ces travaux. Cela permettrait d'atteindre une mesure à 10^{-5} de précision sur \bar{g} . Cette mesure entraînera une modification du dispositif de mesure de la chute libre, qui ne présente pas de difficultés majeures.

Le projet nécessite un suivi actif et un soutien continu pour aboutir, les risques se concentrant plus sur les facteurs humains et financiers. Un renforcement en physiciens post-doc et seniors français est nécessaire, de même qu'une continuité financière entre les subventions ANR ou autres.

AEGIS - Chute gravitationnelle de l'anti-hydrogène

L'expérience du CERN AD6 - AEGIS - Antihydrogen Experiment, Gravitation, Interference & Spectroscopy - est la première expérience qui cherche à mesurer le couplage du champ gravitationnel terrestre à l'antimatière, en l'occurrence à des atomes d'antihydrogène \bar{H} . Cette mesure constituera le premier test du principe d'équivalence faible avec de l'antimatière. Cette expérience a été initiée par une partie de la collaboration ATHENA à laquelle se sont adjoints des collaborateurs, notamment français, venus de différentes disciplines²⁹. En 2007 la proposition d'expérience a été soumise au SPCS du CERN qui l'a approuvée en décembre 2008.

L'expérience ATHENA a utilisé le décélérateur d'antiprotons (AD) du CERN pour produire dès 2002 plusieurs dizaines de milliers d'atomes d'antihydrogène froids. La production d' \bar{H} se faisait par stockage dans un piège de Penning des \bar{p} et des e^+ refroidis. Dans le cas de l'expérience AEGIS, l'antihydrogène est produit par interaction des antiprotons \bar{p} avec des atomes d'orthopositronium produits dans des états excités de Rydberg oPs^* suivant la réaction d'échange de charge résonante³⁰ : $\bar{p} + e^+(oPs^*) \rightarrow \bar{H}^* + e^-$. Les \bar{p} de 5 MeV provenant de l'AD sont ralentis puis confinés dans un piège de Penning où règne un champ magnétique de 5 T. Une phase de refroidissement des \bar{p} permet de descendre leur température à moins de 100 mK. Les positroniums sont produits par l'interaction de positons lents sur une cible de silice. Les orthopositroniums sortants de la cible sont excités en états de Rydberg par l'intermédiaire d'excitation laser à deux niveaux. La maîtrise de la production du positronium ainsi que son excitation par laser ont été démontrées en 2011³¹. L'antihydrogène ainsi produit sera mis sous forme de faisceau de \bar{H} via une accélération Stark, qui a été validée, dans la collaboration, pour de l'hydrogène dans des états de Rydberg similaires. Le faisceau d' \bar{H} sera ensuite transféré vers la zone de mesure gravitationnelle constituée, dans une première phase, d'un défectomètre de Moiré. La détection de la position finale se fait à l'aide de détecteurs classiques de la physique des particules : détecteurs à silicium, calorimètre, galettes multicanaux,...

Pour valider les mesures de chute gravitationnelle de l'antihydrogène ainsi que pour évaluer les incertitudes de mesure nous envisageons de produire dans AEGIS de l'hydrogène de façon C-symétrique à la production de \bar{H} via la réaction d'échange de charge : $p + e^-(oPs^*) \rightarrow H^* + e^+$. La technique de détection de l'hydrogène final a été validée dans la collaboration.

- Mesures scientifiques
L'expérience AEGIS est la première expérience à préparer la mesure de l'accélération gravitationnelle de l'antimatière avec une précision de 1%. Conjointement à la production d'anti-hydrogène, la production d'hydrogène y est prévue. L'existence du faisceau de e^+ pour la production d' oPs permettra d'ajouter un volet lié à la physique atomique du positronium.
- Collaboration AEGIS
La collaboration AEGIS regroupe des scientifiques de plusieurs disciplines, physiciens des particules : CERN, INFN, IN2P3 (groupe de l'IPN-Lyon), ainsi que des physiciens atomistes : ETH-Zurich, CNRS (Laboratoire Aimé Cotton-LAC) permettant des échanges fructueux de part et d'autres.
- Etat de l'art et planning AEGIS
L'expérience est en cours d'installation dans la zone AD au CERN. La ligne de positons est installée. Le premier cryostat (5T) de piégeage des \bar{p} est opérationnel. Une première période de faisceau a eu lieu fin 2011. L'instrument sera complété en 2012. Une période de faisceau de 6 mois permettra de régler le piégeage des antiprotons. Au cours de cette même année, la production de positronium *in-situ* doit commencer. L'étude et la réalisation de la source de proton pour la production symétrique d'hydrogène est aussi prévue pour l'année 2012. En 2013 le faisceau de \bar{p} sera arrêté. Nous souhaitons profiter de cette année pour étudier la production d'hydrogène dans AEGIS. A partir de 2014 la production de \bar{H} devrait commencer. Plusieurs mois seront nécessaires et des prises de données sont envisagées jusqu'en 2016 (avant l'arrivée d'ELENA) pour accumuler les $10^5 \bar{H}$ nécessaires à une mesure à 1 %. Au delà de 2016, et avec la mise en route programmée du successeur de l'AD, ELENA, nous espérons travailler avec un faisceau de \bar{p} de 100 keV et un gain d'un facteur 10^3 en antiprotons. Des modifications/améliorations du détecteur, notamment du dispositif final sont envisagées. Avec la production d'atomes ultra-froids ($T \leq 1$ mK) on peut songer à étudier la violation de CPT dans les transitions spectroscopiques 1s-2s.
- Participation française
Dans sa phase initiale AEGIS comprend deux groupes du CNRS : le groupe de l'IPN-Lyon et le groupe du LAC. Le premier groupe, outre une contribution générale à l'étude mécanique d'AEGIS, développe le faisceau de protons nécessaire à la production d'hydrogène de Rydberg. L'instrumentation de détection associée est aussi prévue. Le second groupe, spécialiste des lasers, étudie le refroidissement d'atome d'antihydrogène et d'hydrogène par lasers Lyman- α quasi continus jusqu'à des températures sub-milliKelvin. Les deux groupes ont en commun leur intérêt pour l'étude du \bar{H} et du H , mais aussi pour la physique du positronium (spectroscopie, désintégrations rares,...).
- Moyens humains et financiers
Les équipes sont limitées au niveau du nombre de physiciens. L'arrivée d'étudiants devrait améliorer la situation. Du point de vue support technique, les moyens sont en adéquation avec les projets. La réalisation de la source de protons et de l'instrumentation afférente nécessite un budget envisageable par l'Institut. Par contre le système de refroidissement laser nécessite un soutien extérieur (ANR ou autre) qui n'est pas encore effectif.

6 Recommandations

En France, l'avenir de la thématique *violation de CP, matière-antimatière, saveurs lourdes* s'organise autour de cinq projets : l'upgrade de LHCb, *SuperB*, nEDM, GBAR et AEGIS. Les deux premiers sont des projets de grande taille qui couvrent un large domaine scientifique

allant de la violation de CP dans les mésons beaux et charmés à la recherche de particules exotiques et de violation du nombre leptonique. Les trois derniers sont des expériences dédiées, de petite taille, pour la mesure du moment dipolaire électrique du neutron et de la constante de gravitation des antiparticules. Ces cinq projets sont très ambitieux. Ils montrent la vitalité de cette communauté et l'importance de cette thématique pour mettre en évidence et comprendre la physique au-delà du Modèle Standard en parfaite complémentarité avec les expériences de recherche directe.

- Nous recommandons de soutenir l'upgrade de LHCb pour son potentiel unique notamment à travers la très grande statistique de mésons B_s et l'accès à des désintégrations exclusives extrêmement rares, son enracinement dans la communauté et la très grande visibilité des équipes françaises ;
- Suite à l'approbation récente par le gouvernement italien du projet *SuperB*, nous recommandons d'approuver la participation d'équipes françaises dans ce programme, au vu de la capacité du laboratoire Nicola Cabibbo de le conduire dans le calendrier prévu et de la capacité des groupes français à agréger de nouveaux collaborateurs autour du noyau qui y participe depuis l'origine. Nous soulignons la complémentarité du potentiel de physique des super usines à B avec celui des expériences sur machine hadronique et leur potentiel unique pour les états finaux contenant des particules neutres.
- Nous recommandons de soutenir l'expérience nEDM dans sa phase III pour atteindre une sensibilité de 10^{-28} e.cm, et de s'engager dans le projet GBAR et/ou AEGIS pour la mesure de la constante gravitationnelle de l'antimatière. Nous notons également le caractère pluridisciplinaire de ces projets.

References

1. Heavy Flavor Averaging Group Collaboration, D. Asner et al., *Averages of b -hadron, c -hadron, and τ -lepton Properties*, arXiv:1010.1589 [hep-ex].
2. M. Antonelli, D. M. Asner, D. A. Bauer, T. G. Becher, M. Beneke, A. J. Bevan, M. Blanke and C. Bloise et al., *Flavor Physics in the Quark Sector*, Phys. Rept. 494 (2010) 197 [arXiv:0907.5386 [hep-ph]].
3. A. J. Buras, *Minimal flavour violation and beyond: towards a flavour code for short distance dynamics*, Acta Phys. Polon. B 41 (2010) 2487 [arXiv:1012.1447 [hep-ph]] ; O. Buchmueller et al., *Supersymmetry in Light of 1/fb of LHC Data*, arXiv:1110.3568v1 [hep-ph] (2011) ; W. Altmannshofer et al., *Model-independent constraints on new physics in $b \rightarrow s$ transitions*, arXiv:1111.1257v1 [hep-ph] (2011) ; CKMfitter Group, A. Lenz et U. Nierste, J. Charles et al., *Anatomy of new physics in $B - \bar{B}$ mixing*, Phys. Rev. D 83 (2011) 036004.
4. G. Isidori, Y. Nir and G. Perez, *Flavor Physics Constraints for Physics Beyond the Standard Model*, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 60 (2010) 355 [arXiv:1002.0900 [hep-ph]].
5. G. D'Ambrosio, G. F. Giudice, G. Isidori and A. Strumia, *Minimal Flavour Violation: an effective field theory approach*, Nucl. Phys. B 645 (2002) 155 [hep-ph/0207036].
6. T. Hurth et M. Nakao, *Radiative and Electroweak Penguin Decays of B Mesons*, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 60 (2010) 645 [arXiv:1005.1224 [hep-ph]].
7. R. Gupta, *Introduction to lattice QCD: Course*, hep-lat/9807028 ; C. McNeile, *Heavy quarks on the lattice*, Lect. Notes Phys. **647** (2004) 100 [hep-lat/0210026] ; C. Davies, *Lattice QCD*, hep-ph/0205181.
8. LHCb Collaboration, A. Augusto Alves Jr. et al., *The LHCb Detector at the LHC*, J. Instrum. 3 (2008) S08005.

9. LHCb Collaboration, B. Adeva et al., *Roadmap for selected key measurements of LHCb*, arXiv:0912.4179 (2009).
10. présentations de T. Gershon, Y. Kwon, G. Raven et D. Van Kooten à 25th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, Mumbai, India, 22-27 August 2011 ; Présentations de M. Charles à Hadron Collider Physics Symposium 2011 (HCP2011),
11. CKMfitter Group, J. Charles et al., *Predictions of selected flavor observables within the standard model*, Phys. Rev. D 84 (2011) 033005 [arXiv:1106.4041 [hep-ph]].
12. LHCb Collaboration, R. Aaij et al., *the LHCb Upgrade Letter of Intent*, CERN-LHCC-2011-001.
13. Minutes of LHCC 105th meeting, March 2011, CERN-LHCC-2011-004.
14. Minutes of LHCC 106th meeting, June 2011, CERN-LHCC-2011-008.
15. P. Collins et al., *The LHCb VELO upgrade* Nucl. Instr. and Meth. A 636 (2011) S185.
16. J. M. Zhang and G. L. Wang, *Lepton-Number Violating Decays of Heavy Mesons*, Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1715 [arXiv:1003.5570 [hep-ph]] ; G. Cvetič, C. Dib, S. K. Kang and C. S. Kim, *Probing Majorana neutrinos in rare K and D, D_s, B, B_c meson decays*, Phys. Rev. D 82 (2010) 053010 [arXiv:1005.4282 [hep-ph]] ; A. Atre, T. Han, S. Pascoli and B. Zhang, *The Search for Heavy Majorana Neutrinos*, JHEP 0905 (2009) 030 [arXiv:0901.3589 [hep-ph]] ; A. Ali, A. V. Borisov and M. V. Sidorova, *Majorana neutrinos in rare meson decays*, Phys. Atom. Nucl. 69 (2006) 475 [Yad. Fiz. 69 (2006) 497] ; A. Ali, A. V. Borisov and N. B. Zamorin, *Majorana neutrinos and same-sign dilepton production at LHC and in rare meson decays*, Eur. Phys. J. C 21 (2001) 123 [arXiv:hep-ph/0104123].
17. M. Bona et al., *SuperB Conceptual Design Report*, arXiv:0709.0451 (2007).
18. P. Raimondi in 2nd LNF Workshop on SuperB, Frascati, Italy (2006) and in Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC 07), Albuquerque, USA, 32 (2007).
19. M. Zobov et al., *Test of “Crab-Waist” Collisions at the DAΦNE Φ Factory*, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 174801.
20. M. Biagini et al., *The SuperB Progress Report*, arXiv:1009.6178 (2010).
21. E. Grauges et al., *The SuperB Detector Progress Report*, arXiv:1007.4241 (2010).
22. I. Adam et al., *The DIRC particle identification system for the BaBar experiment*, Nucl. Instr. and Meth. A 538 (2005) 281.
23. B. O’Leary et al., *The SuperB Physics Progress Report*, arXiv:1008.1541 (2010).
24. B. Meadows et al., *The impact of SuperB on flavour physics*, arXiv:1109.5028 (2011).
25. C. A. Baker et al., *An Improved experimental limit on the electric dipole moment of the neutron*, Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 131801.
26. D. Dubbers and M. G. Schmidt, *The neutron and its role in cosmology and particle physics*, Rev. Mod. Phys. 83 (2011) 1111.
27. nEDM Collaboration web site (<http://nedm.web.psi.ch/>)
28. P. Pérez et al., *Proposal to measure the Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest*, CERN-SPSC-2011-029 ; SPSC-P-342.
29. G. Drobychev, P. Nedelec, D. Sillou et al., *Proposal for the AEGIS experiment at the CERN antiproton decelerator*, SPSC-2007-17 (2007).
30. A. Kellerbauer et al., *Proposed antimatter gravity measurement with an antihydrogen beam*, Nucl. Instr. and Meth. B 266 (2008) 351.
31. S. Cialdi et al., *Efficient two-step Positronium laser excitation to Rydberg levels*, Nucl. Instr. and Meth. B 269 (2011) 1527.