



HAL
open science

Contribution française à l'upgrade de LHCb

I. de Bonis, S. Cap, D. Decamp, C. Drancourt, Ph. Ghez, P. Hopchev, J.-P. Lees, I.V. Machikhiliyan, M.-N. Minard, B. Pietrzyk, et al.

► **To cite this version:**

I. de Bonis, S. Cap, D. Decamp, C. Drancourt, Ph. Ghez, et al.. Contribution française à l'upgrade de LHCb. 2014. in2p3-00925089

HAL Id: in2p3-00925089

<https://in2p3.hal.science/in2p3-00925089v1>

Preprint submitted on 7 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution française à l'upgrade de LHCb

I. De Bonis, S. Cap, D. Decamp, C. Drancourt, Ph. Ghez, P. Hopchev, J.-P. Lees,
I.V. Machikhiliyan, M.-N. Minard, B. Pietrzyk, S. T'Jampens, V. Tisserand, E. Tournefier,
G. Vouters

LAPP, Université de Savoie, CNRS/IN2P3, Annecy-Le-Vieux, France

Z. Ajaltouni, H. Chanal, E. Cogneras, O. Deschamps, I. El Rifai, P. Henrard, M. Hoballah,
M. Jahjah Hussein, R. Lefèvre, L. Li Gioi, S. Monteil, V. Niess, P. Perret, D.A. Roa Romero,
K. Sobczak

Clermont Université, Université Blaise Pascal, CNRS/IN2P3, LPC, Clermont-Ferrand, France

C. Adrover, E. Aslanides, J.-P. Cachemiche, J. Cogan, P.-Y. Duval, F. Hachon, B. Khanji,
R. Le Gac, O. Leroy, G. Mancinelli, E. Maurice, M. Perrin-Terrin, F. Rethore, M. Sapunov,
J. Serrano, A. Tsaregorodtsev

CPPM, Aix-Marseille Université, CNRS/IN2P3, Marseille, France

S. Barsuk, C. Beigbeder-Beau, T. Cacérés, O. Callot, D. Charlet, O. Duarte, J. He,
B. Jean-Marie, O. Kochebina, J. Lefrançois, F. Machefert, A. Martín Sánchez, M. Nicol,
P. Robbe, M.-H. Schune, M. Teklishyn, V. Tocut, B. Viaud, I. Videau

LAL, Université Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Orsay, France

E. Ben-Haim, M. Benayoun, P. David, L. Del Buono, A. Martens, F. Polci

LPNHE, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, Paris, France

Résumé

La contribution française à l'upgrade de LHCb est détaillée dans ce document et s'inscrit dans le prolongement du *Framework TDR* soumis au LHCC le 25 mai 2012. 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 et l'initiatrice du projet DIRAC, progiciel de traitement et d'analyse de données dans un environnement distribué. Les physiciens et ingénieurs français ont de nombreuses responsabilités de premier plan et sont très fortement impliqués dans l'analyse des données. Les groupes français souhaitent poursuivre leur forte participation à l'expérience en contribuant à son *upgrade*, notamment l'électronique de lecture des calorimètres et du trajectographe en fibres scintillantes ainsi qu'au *data processing*.

1 Introduction

Fin 2017, l'expérience LHCb aura accumulé environ 6.5 fb^{-1} de données. À cette époque, les sensibilités sur les observables phares seront comparables aux valeurs attendues. Pour aller au-delà et tester les prévisions théoriques, une modification du détecteur est nécessaire car le système de déclenchement de premier niveau 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 de longue durée du LHC en 2018 (LS2). Il permettra de fonctionner à une luminosité instantanée de $1 \text{ à } 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, de lire l'ensemble du détecteur à la fréquence de croisement des faisceaux de 40 MHz et d'utiliser un système de déclenchement uniquement logiciel implémenté sur une ferme de processeurs. Ces améliorations permettront d'augmenter très significativement les efficacités du système de déclenchement ainsi que les taux d'événements annuels, par rapport à ceux de 2011. Un facteur dix environ est attendu pour les désintégrations muoniques des mésons beaux et un facteur vingt ou plus pour les désintégrations des quarks lourds dans des états finals hadroniques. Il est prévu de collecter 5 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 $\sim 2,3$. 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 efficacités due à l'empilement d'interactions sera faible.

La collaboration LHCb a soumis une lettre d'intention [1] au *LHC Committee* en mars 2011. Celui-ci en a apprécié le programme de physique [2] et approuvé la proposition. Il enjoint la collaboration de poursuivre vers la publication des *Technical Design Reports* en 2013 [3]. Le *Framework TDR* qui décrit les évolutions du projet depuis la lettre d'intention en ce qui concerne ses performances et précise le calendrier, le coût et l'intérêt scientifique des différents laboratoires a été soumis le 25 mai 2012 [4]. La contribution française à l'upgrade de LHCb détaillée dans ce document s'inscrit dans le prolongement de ce dernier document.

1.1 Le programme de physique

La physique des saveurs étudie les interactions qui différencient la saveur des quarks. Elle fut un ingrédient majeur dans l'élaboration de la structure particulière en saveur du Modèle Standard par l'étude des désintégrations de kaons. Elle reste essentielle dans la construction de la théorie au-delà du Modèle Standard en mettant des contraintes sur les structures possibles de couplages et de mélanges.

La précision des mesures actuelles des usines à B , du Tevatron et de LHCb mettent déjà des contraintes importantes sur différentes extensions proposées du Modèle Standard. Par exemple, les données du mélange et de violation de CP des kaons, du charme et de la beauté impliquent soit une structure particulière des couplages si l'échelle de la nouvelle physique est au TeV, soit une structure générique mais à des échelles d'énergie supérieures à 10^2 TeV [5]. De même, les résultats récents de la désintégration $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ placent de fortes contraintes sur les extensions au Modèle Standard contenant des couplages scalaires [6].

Malgré ces résultats remarquables, de nombreuses mesures restent limitées par leurs incertitudes expérimentales, autorisant des déviations au Modèle Standard de plusieurs dizaines de pourcent, voire plus. Ces premières avancées montrent aussi que la structure de la nouvelle physique est complexe et que seules des mesures de précision permettront de distinguer clairement cette structure parmi différentes classes de modèles. C'est tout l'enjeu de l'upgrade de LHCb. Il est donc primordial de poursuivre le programme de physique des saveurs afin que les incertitudes expérimentales atteignent les limites théoriques des prédictions du Modèle Standard attendues dans la décennie à venir. Bien que de nombreuses mesures aient un potentiel individuel de découverte de nouvelle physique, le plus pertinent dans l'élaboration de l'extension du Modèle Standard ne dépendra pas d'une mesure particulière mais de la façon dont l'ensemble de ces mesures dévieront ou non des prédictions du Modèle Standard.

Par rapport aux expériences auprès des super usines à B , et au-delà de l'accès exclusif au méson B_s , l'upgrade de LHCb a un potentiel unique dans un certain nombre de domaines en particulier l'étude des canaux exclusifs composés uniquement de traces chargées dans l'état final, les mesures des asymétries dépendant du temps des mésons B_s et la physique des baryons beaux. Les sensibilités attendues sur ces canaux clés permettront d'atteindre les limites théoriques comme le montre la Table 1 [4].

Le programme des saveurs ne se restreint pas aux quarks, mais s'étend aux leptons : neutrino de Majorana, violation de saveur dans les désintégrations des τ . La couverture unique de LHCb en pseudo-rapacité permet aussi de contribuer de manière spécifique à la physique électrofaible, à QCD ainsi qu'à la recherche de particules exotiques [1]. 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 beaux¹, 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.

1.2 Modifications du détecteur

Lire l'ensemble du détecteur LHCb (Figure 1) à 40 MHz et envoyer les données à la ferme de processeurs implique de :

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

Type	Observable	Current precision	LHCb 2018	Upgrade (50 fb ⁻¹)	Theory uncertainty
B_s^0 mixing	$2\beta_s (B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi)$	0.10	0.025	0.008	~ 0.003
	$2\beta_s (B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980))$	0.17	0.045	0.014	~ 0.01
	$A_{fs}(B_s^0)$	6.4×10^{-3}	0.6×10^{-3}	0.2×10^{-3}	0.03×10^{-3}
Gluonic penguin	$2\beta_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi\phi)$	–	0.17	0.03	0.02
	$2\beta_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow K^{*0}K^{*0})$	–	0.13	0.02	< 0.02
Right-handed currents	$2\beta_s^{\text{eff}}(B^0 \rightarrow \phi K_S^0)$	0.17	0.30	0.05	0.02
	$2\beta_s^{\text{eff}}(B^0 \rightarrow \phi\gamma)$	–	0.09	0.02	< 0.01
Electroweak penguin	$\tau^{\text{eff}}(B^0 \rightarrow \phi\gamma)/\tau_{B^0}$	–	5%	1%	0.2%
	$S_3(B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.08	0.025	0.008	0.02
Higgs penguin	$s_0 A_{\text{FB}}(B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-)$	25%	6%	2%	7%
	$A_{\Gamma}(K\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.25	0.08	0.025	~ 0.02
Unitarity triangle angles	$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \pi^+\mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+\mu^+\mu^-)$	25%	8%	2.5%	$\sim 10\%$
	$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$	1.5×10^{-9}	0.5×10^{-9}	0.15×10^{-9}	0.3×10^{-9}
Charm CP violation	$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$	–	$\sim 100\%$	$\sim 35\%$	$\sim 5\%$
	$\gamma(B \rightarrow D^{(*)}K^{(*)})$	$\sim 10 - 12^\circ$	4°	0.9°	negligible
Charm CP violation	$\gamma(B_s^0 \rightarrow D_s K)$	–	11°	2.0°	negligible
	$\beta(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)$	0.8°	0.6°	0.2°	negligible
CP violation	A_{Γ}	2.3×10^{-3}	0.40×10^{-3}	0.07×10^{-3}	–
	ΔA_{CP}	2.1×10^{-3}	0.65×10^{-3}	0.12×10^{-3}	–

TABLE 1 – Sensibilités statistiques pour les observables clés accessible à LHCb [4].

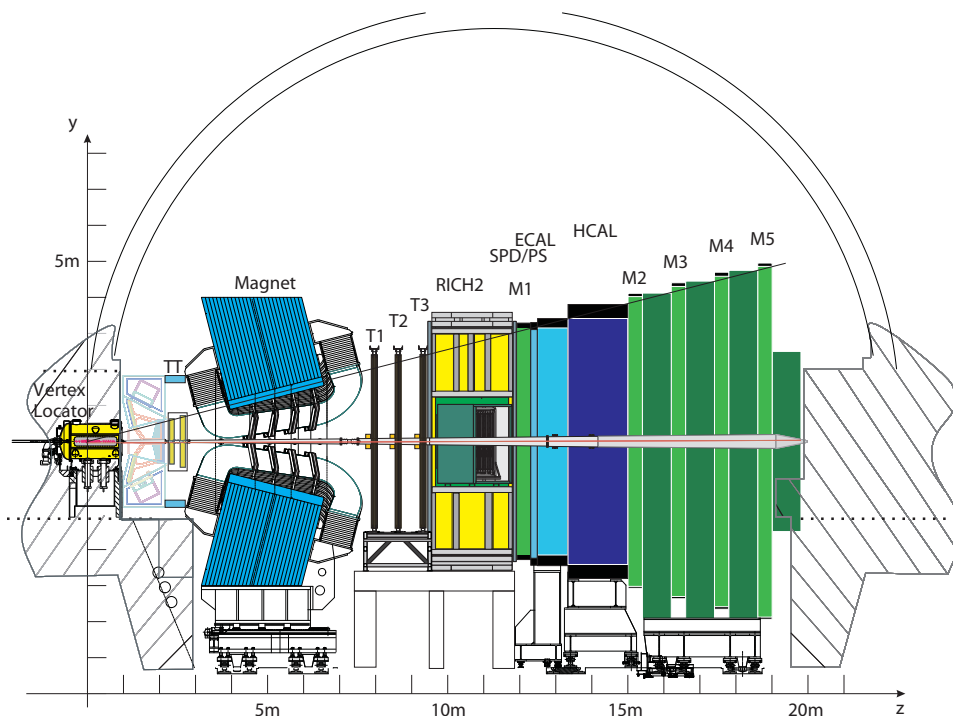


FIGURE 1 – Le détecteur LHCb.

- remplacer l'ensemble de l'électronique *front-end* actuellement limitée à une fréquence de lecture de 1.1 MHz par une nouvelle électronique qui peut être lue 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 (l'aérogel du RICH, la 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 et de développer des solutions communes à l'ensemble des sous-détecteurs.

Trajectographe

Le détecteur de traces de LHCb est au cœur de l'upgrade. Il 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 (T).

- Deux options sont à l'étude pour remplacer le VELO. La première est un détecteur silicium 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. La seconde option est d'utiliser un détecteur silicium à micro-pistes résistant aux radiations [7]. Un programme de R&D est en cours afin d'obtenir la meilleure résolution, la moindre longueur de radiation et un refroidissement efficace.

- Les stations TT actuels sont équipées de détecteurs au silicium à micro-pistes. Ils seront remplacés par une technologie similaire avec une segmentation plus fine en y et une acceptation augmentée.
- Deux options sont à l'étude pour les stations T situées après l'aimant. La première est basée sur les technologies utilisées actuellement. La partie interne, IT, est un détecteur au silicium micro-pistes et la partie externe, OT, est un détecteur de tubes à paille remplis de gaz. Le taux d'occupation sera trop élevé pour la partie de OT la plus proche des faisceaux aux luminosités envisagées. La première solution est d'étendre la surface de l'IT afin de couvrir la région la plus dense en traces et ainsi de réduire la taille des tubes de l'OT. La seconde option est basée sur un *Central Tracker* (CT). C'est un détecteur à fibres scintillantes qui remplacerait le tandem IT et OT dans la région centrale des stations. Seuls les modules OT à la périphérie seraient conservés. Le diamètre des fibres scintillantes est de $250 \mu\text{m}$. La collecte de lumière se ferait par des photo-multiplicateurs en silicium (SiPM) et toute l'électronique front-end serait placée hors détecteur, minimisant la quantité de matière dans l'acceptation du détecteur ainsi que les contraintes de résistance aux radiations.

Identification des particules

Les électrons, photons et muons sont identifiés respectivement par les calorimètres (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 MaPMT de Hamamatsu pouvant être lu à 40 MHz. L'anode est une matrice 8×8 pixels où chaque pixel couvre une surface de $2 \times 2 \text{ mm}^2$. La forme carrée du MaPMT permet de réduire les zones mortes. Afin d'améliorer l'identification des particules 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 réduits, avec la possibilité de remplacer les modules internes du calorimètre électromagnétique s'ils sont trop endommagés par les radiations.

Système de déclenchement

Le système de déclenchement *hardware* de premier niveau sera intégré dans la nouvelle architecture d'acquisition. Renommé LLT (Low Level Trigger), il permettra d'ajuster le taux d'événements envoyés à la ferme de processeurs de 1 à 40 MHz.

Dans les trois chapitres suivants nous résumons les transformations nécessaires pour la trajectographie, la calorimétrie ainsi que le déclenchement et le traitement des données, dans lesquels s'inscrivent les projets de contribution français.

2 Trajectographie

Les contraintes de l'upgrade imposent une refonte du trajectographe, notamment les stations situées après l'aimant. Pour cela, l'utilisation d'un détecteur à fibres scintillantes offre de nombreux avantages, car les fibres permettent le transport des signaux optiques vers une électronique frontale située en dehors du volume fiduciel et les contraintes de refroidissement pour fonctionner dans un environnement soumis à d'intenses radiations sont moindres. Ces deux éléments autorisent une réduction importante de la quantité de matière morte dans l'acceptance du spectromètre et font de cette option le choix privilégié de la collaboration.

2.1 *Central Tracker*

Le projet pour la réalisation du CT est divisé en six *work packages* :

1. Simulation

La simulation est indispensable pour définir la géométrie optimale du détecteur, déterminer les taux occupation, définir les algorithmes de *clusterisation*, de traitement des traces voisines et de reconstruction des traces. La simulation sera utilisée pour optimiser le détecteur dans son ensemble notamment le nombre de plans de détection et leur orientation. Différents types de simulations sont nécessaires :

- simulation de l'environnement à l'aide de FLUKA ;
- simulation rapide de la propagation de la lumière dans les fibres ;
- simulation de l'électronique ;
- simulation du détecteur avec GEANT.

2. Fibres optiques

La tenue aux radiations des fibres scintillantes est un des paramètres clé de ce détecteur. Différents types de fibres sont étudiés en particulier à l'aide de faisceaux tests afin de choisir la meilleure fibre à utiliser.

3. Module SciFi

Le but de ce sous-projet est de réaliser les modules de fibres scintillantes. Différents processus de construction sont évalués afin de garantir le meilleur alignement des

fibres et sa reproductibilité. Les supports, la coupe des fibres, le processus de collage sont étudiés. La mise en place de différents contrôles qualité tout au long de la chaîne de fabrication sont en cours de développement.

4. SiPM

Différents photo-détecteurs multi-canaux de type SiPM sont étudiés en étroite collaboration avec les fabricants. Leur tenue aux radiations est mesurée en faisceaux tests et pour différentes températures d'opération. Des solutions de blindage sont également proposées. L'appariement avec les fibres optiques et la forme des signaux produits par le passage des particules sont étudiés.

5. Électronique

Ce sous-projet a en charge la conception et la réalisation de l'électronique front-end à 40 MHz et de l'intégration des cartes de lecture. Environ 300 000 voies de lecture sont envisagées.

6. Infrastructure

La dernière tâche regroupe les besoins en infrastructure nécessaire à l'installation du CT dans la caverne de LHCb. Ceci inclut les contraintes géométriques, le design des supports des stations et l'ensemble des services.

Une estimation du coût global du détecteur CT est donnée dans la Table 2 [4] et le planning du projet détaillé dans la référence [4]. Le jalon le plus important est la soumission du *Tracker TDR*, prévu fin 2013, date à laquelle les technologies pour le trajectographe seront choisies.

Central Tracker		Cost [kCHF]
Detector		2880
	Fibres	1100
	Silicon PM	1500
	Modules	280
Electronics		4020
	Front End	1550
	Optical Links	800
	Readout Board	1270
	General Electronics	400
Infrastructure		960
	Support Structure	270
	Cooling	390
	Shielding	300
		7860

TABLE 2 – Estimation du coût du CT.

Les principaux laboratoires intéressés par le CT sont : l'Université Technique de Dortmund, l'Université de Heidelberg et l'Université de Rostock en Allemagne ; l'ICC

Barcelone en Espagne ; le LPC Clermont en France ; l'Imperial College de Londres au Royaume-Uni ; l'INR et l'ITEP Moscou ainsi que l'IHEP Protvino en Russie ; le CERN, l'EPF Lausanne et l'ETH Zurich en Suisse.

2.2 La contribution française

Le Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand (LPC) souhaite contribuer à ce projet innovant. Sa participation sera principalement liée à la conception de l'électronique front-end et aux simulations associées. Notons également qu'un physicien du LAL joue, actuellement, un rôle moteur dans les simulations et est un des principaux concepteurs de l'algorithme de reconstruction des traces chargées.

Un des éléments clés de ce projet est le circuit intégré (ASIC) permettant de traiter et de numériser la sortie des SiPMs. Notre partenaire, l'ICC Barcelone, a déjà conçu un premier prototype d'un circuit de mise en forme pour une application en imagerie médicale. Cette compétence est complémentaire de celle du LPC, dont le service de micro-électronique a développé une expertise dans les convertisseurs analogique/numérique (ADC) pour des détecteurs en physique des hautes énergies et pour des applications médicales.

La conception d'un ASIC multi-canal est nécessaire pour satisfaire les besoins du CT. Ce composant sera connecté à 64 ou 128 voies, tolérant aux radiations avec une consommation électrique inférieure à 10 mW / canal. Il effectuera la totalité du traitement du signal, de la mise en forme analogique à la suppression numérique des zéros. Des mécanismes d'auto-test seront intégrés dans ce circuit afin d'assurer une production de masse de qualité.

L'ASIC sera scindé en quatre parties pouvant être développées en parallèle :

1. Amplification et mise en forme : les entrées seront directement reliées au SiPM sans résistances externes ou condensateurs. La capacitance des entrées sera inférieure à 3,6 pC car le gain des SiPM sera de l'ordre $7,5 \times 10^5$. Un rapport signal sur bruit de 10 est nécessaire à la sortie de l'étage d'amplification afin de garantir une résolution d'environ 70 μm sur le point d'impact des particules.
2. Convertisseur analogique/numérique : cette conversion se fera avec une précision de 5 ou 6 bits pour ne pas détériorer la résolution spatiale sur le point d'impact des particules.
3. Traitement numérique : dans un premier temps les amas seront reconstruits à l'aide d'un algorithme et le centre de gravité de ces amas reconstruits sera déterminé afin de maximiser la résolution sur le point d'impact. Puis, les zéros issus des données provenant de l'ADC seront supprimés. Il est important d'effectuer ces traitements à l'intérieur de l'ASIC afin de minimiser en particulier le nombre de liens sériels vers la carte de lecture. Les algorithmes de *clusterisation* et de compression ainsi que la taille de la mémoire tampon seront déterminés à l'aide de simulations.
4. Contrôle logiciel lent : les interfaces I2C et JTAG seront utilisées pour programmer, tester et surveiller en temps réel le composant.

Une carte électronique front-end sera conçue pour recevoir l'ASIC, le GigaBit Transceiver (GBT) [8], les interfaces pour le contrôle lent et les alimentations.

Les simulations sont nécessaires pour concevoir l'électronique front-end du CT. Elles permettront par exemple d'estimer la bande passante nécessaire entre l'ASIC et le GBT en prenant en compte la variation du taux d'occupation du détecteur en fonction de la distance au faisceau. À cet effet, un modèle réaliste du détecteur et de sa réponse sera développé.

Une intense campagne de tests sera menée tout au long du processus de développement de l'électronique. Ceci comprend des essais autonomes en laboratoire, des tests de tenue aux radiations et des tests fonctionnels en faisceau avec l'ensemble du détecteur.

Le coût de la contribution française s'élève à un montant de 1550 kCHF : fabrication des ASICs 1 MCHF et réalisation des cartes front-end 550 kCHF. Un budget de R&D de l'ordre de 220 k€ est aussi nécessaire. Il permettra la réalisation des prototypes de l'ASIC nécessitant un minimum de trois fonderies et des tests correspondants. Une première fonderie permettra de tester les blocs individuels, une seconde une chaîne de traitement complète alors que la troisième contiendra les 64 ou 128 voies et devrait être le design final. En parallèle les prototypes de la carte hôte seront conçus et testés.

3 Calorimétrie

La principale évolution des calorimètres est de remplacer l'électronique afin qu'elle envoie les données à la fréquence de 40 MHz². Les calorimètres électromagnétique (ECAL) et hadronique (HCAL) restent pour l'essentiel inchangés. Seule la partie centrale du ECAL, dont la résolution aura été, d'ici là, dégradée par le flux intégré de particules, devrait être remplacée en utilisant des modules supplémentaires qui ont déjà été produits pour le détecteur actuel. Enfin, les *scintillating pad detector* (SPD) et *preshower* (PS) seront très probablement supprimés.

3.1 Upgrade des calorimètres

Les différents aspects du projet d'upgrade des calorimètres concernent l'électronique, les modules et les études portant sur les performances pour l'upgrade.

3.1.1 Électronique

Il s'agit de développer une nouvelle électronique front-end fournissant l'ensemble des données à la ferme de calcul à 40 MHz et des informations simplifiées pour le LLT :

1. La nouvelle électronique analogique aura un gain 5 fois supérieur au gain actuel afin de réduire d'autant celui des photomultiplicateurs qui seront conservés pour l'upgrade. Cette contrainte sur le gain ne doit pas avoir d'impact sur les performances de l'électronique et notamment sur le bruit qui devrait être comparable au bruit

2. Les électroniques des ECAL et HCAL sont identiques.

actuel. Deux solutions basées sur un ASIC [9] et sur des composants discrets, sont développées en parallèle par l'Université de Barcelone (UB) et La Salle - Université Ramon Llull (Barcelone) et semblent avoir des performances satisfaisantes et comparables.

2. L'électronique front-end numérique enverra des données à 40 MHz vers la carte de lecture. Elle est basée sur un ADC de 12 bits et un FPGA tolérant aux radiations. L'émission des données se fera via un composant GBT. Chaque carte front-end traitera 32 voies et utilisera 4 liens optiques en sortie.
3. Le LLT nécessite l'envoi d'informations simplifiées afin de filtrer les événements avant la ferme de calcul en identifiant des leptons ou des hadrons de grande impulsion transverse. La partie déclenchement de premier niveau, intégrée dans l'électronique front-end, fournit déjà ces informations simplifiées à un taux de 40 MHz et peut donc être recopiée pour l'upgrade. Cela signifie essentiellement intégrer un FPGA identique à celui présent sur nos cartes actuelles et conserver les cartes *Trigger Validation Board* (TVB) dans les châssis ECAL.
4. Une nouvelle carte de contrôle des châssis doit être conçue. Elle recevra les signaux d'horloge, de commande, de contrôle et de configuration d'un châssis complet par un lien optique bidirectionnel GBT et les propagera sur le fond de panier.
5. Il est prévu de conserver une part importante de l'électronique présente : les cartes TVB et les châssis ont été mentionnés, mais cela concerne également les hautes-tensions des PMT et leur contrôle, certaines alimentations, le système d'étalonnage à LED. Le contrôle de l'électronique front-end sera assuré via le protocole GBT en remplacement du SPECS [10], utilisé jusqu'en 2018. La transition du SPECS vers le GBT nécessite également l'adaptation du contrôle de l'électronique pour les sous-systèmes conservés pour l'upgrade mentionnés plus haut et requiert notamment le développement d'une nouvelle carte mezzanine.

3.1.2 Les modules du ECAL

Le problème de la dégradation des modules par le flux de particules fait l'objet d'études. Plusieurs irradiations ont été effectuées dans des faisceaux à Protvino et au CERN (SPS). De plus, deux modules du ECAL ont été disposés dans le tunnel du LHC en 2009 afin de réaliser une *irradiation accélérée*, dans des conditions proches de celles de la caverne de LHCb. Ces modules ont été mesurés pendant l'arrêt 2011-2012 sans effet visible sur la résolution, puis disposés à nouveau dans le tunnel.

Nous estimons que les modules du centre du ECAL seront probablement trop endommagés par le flux de particules pour être conservés après 2018. Il est envisagé d'utiliser les modules de rechange actuels afin d'en remplacer 32. Le remplacement des modules se ferait pendant l'arrêt prévu en 2018.

3.1.3 Simulation et analyse

Outre les travaux sur le détecteur cités plus haut, des activités davantage tournées vers l'analyse, portent sur la suppression des SPD et PS et sur l'effet de l'empilement à haute luminosité. Des échantillons Monte-Carlo pour lesquels la géométrie du calorimètre est modifiée et où seuls restent les ECAL et HCAL, ont été produits et sont actuellement en cours d'étude. L'empilement des événements aura un effet négatif sur la résolution du calorimètre. Cela a été quantifié à la fois par des échantillons de simulations à haute luminosité et $\sqrt{s} = 14$ TeV et en empilant *artificiellement* de vrais événements³. Des méthodes de reconstruction susceptibles de réduire l'effet de l'empilement sont envisagées, sans pour autant dégrader, de manière appréciable, cette reconstruction. Il s'agirait notamment de travailler avec des agrégats électromagnétiques de 2×2 cellules et non plus 3×3 cellules. Il faut préciser, que dans les conditions de faisceau de 2011 et 2012, l'empilement correspond approximativement à ce qu'on peut imaginer obtenir avec une luminosité de $8 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ dans les conditions de l'upgrade. Passer de 3×3 cellules à 2×2 réduit mécaniquement l'empilement par un facteur supérieur à deux.

3.1.4 Coût et partenaires

Calorimeter	Cost [kCHF]
Electronics	1905
Front End	690
Optical Links	410
Readout Board	660
Controls Board	65
ECS Mezzanine	50
Crates	30
1905	

TABLE 3 – Estimation du coût de l'upgrade des calorimètres.

Une estimation du coût global de l'upgrade des calorimètres est donnée dans la Table 3 [4] et le planning du projet est détaillé dans la référence [4]. Le premier jalon est la soumission du *Calorimeters TDR*, prévu fin 2013.

Les principaux laboratoires intéressés par ce projet sont : Université de Barcelone, La Salle - Université Ramon Llull (Barcelone); LAL, LAPP en France; Université de Bologne, INFN-Bologna en Italie; ITEP Moscou, IHEP Protvino en Russie.

3. Ici, bien sûr, l'effet dû à l'augmentation de l'énergie n'est pas pris en compte.

3.2 La contribution française

Les groupes français ont beaucoup contribué aux calorimètres actuels, dans le cadre de la conception et de la réalisation du détecteur, notamment de son électronique. Les activités continuent maintenant avec le suivi du fonctionnement du détecteur et par le travail d'amélioration de son étalonnage. Nous voulons poursuivre notre contribution dans l'upgrade pour lequel les laboratoires français se sont très tôt impliqués. Le projet d'upgrade du calorimètre de LHCb a débuté dès 2009 notamment avec une collaboration entre les groupes du LAL et de Barcelone concernant l'électronique front-end.

Le LAL travaille sur la partie numérique de l'électronique front-end et prendra en charge la réalisation des cartes front-end. Le LAPP adaptera les cartes TVB pour le LLT et l'acquisition des données via les cartes de lecture.

Des outillages spécifiques seront peut-être nécessaires pour le remplacement des modules internes du ECAL. La contribution du LAPP à l'outillage dans le cadre de cette opération est envisagée ; ce laboratoire a participé, à l'origine, à l'installation des modules et de la structure des calorimètres et nous souhaiterions bénéficier de cette expérience.

Le coût de la contribution française s'élève à un montant total de 1135 kCHF : 69% de l'électronique front-end numérique 475 kCHF, carte de lecture 660 kCHF. Un budget de R&D de l'ordre de 160 k€ est aussi nécessaire.

4 Déclenchement et traitement des données

Le *data processing* comprend le système d'acquisition, le système de déclenchement et le *computing*. Il prend en charge les données de l'électronique front-end jusqu'à leur reconstruction.

L'upgrade de LHCb est basé sur un système de déclenchement software fonctionnant à 40 MHz. Cette approche, très flexible, nécessite une modification en profondeur du système d'acquisition des données. Les deux composantes essentielles sont la carte de lecture à 40 MHz et le réseau online qui relie les cartes de lecture à la ferme de calcul.

La carte de lecture interface l'électronique front-end avec le réseau online. Elle reçoit des fragments d'événements à 40 MHz, les assemble et forme des trames qui sont envoyées vers la ferme de calcul. Le protocole d'entrée est le GBT et celui de sortie l'Ethernet à 10 gigabit. Le réseau online connectera environ 4000 entrées à 10 gigabits par seconde à 5000 nœuds de calcul.

La R&D menée au CPPM depuis 2009 a permis de proposer une solution innovante pour la carte de lecture. Avec une même carte il sera possible de satisfaire les besoins de l'acquisition, de la distribution des informations temporelles et du contrôle lent. Cette carte générique est à la pointe de la technologie en électronique car elle connectera jusqu'à 144 liaisons optiques à 10 gigabits par seconde en entrée et en sortie. Elle pourra recevoir et émettre jusqu'à 1,4 terabits par seconde avec une grande capacité de traitement organisé autour de quatre macro FPGAs de la famille Stratix-V de Altera. Cette carte sera réalisée au standard ATCA.

Dans sa configuration actuelle le système de déclenchement hardware de premier niveau réduit le taux de 40 à 1 MHz. Il sera conservé et adapté à la nouvelle architecture, afin de réguler le flux à l'entrée de la ferme de calcul de 1 à 40 MHz.

Le taux de sortie envisagé pour le système de déclenchement software est de l'ordre de 20 kHz avec une taille des événements de l'ordre de 100 kilo-octets. Le computing devra aussi évoluer pour reconstruire et analyser l'ensemble des données, notamment à travers un système de gestion de la charge capable de traiter un grand flux de données, l'utilisation de services en nuage, la parallélisation des applications et l'utilisation efficace des processeurs multi-cœurs.

4.1 La contribution française

La contribution française s'organise autour de trois axes : prise en charge de la carte de lecture à 40 MHz, prise en charge de la migration du système de déclenchement de premier niveau et contribution au computing.

La carte de lecture à 40 MHz est un objet très complexe dans sa réalisation et dans la programmation des différents micro codes. La conception et la production des ~ 170 cartes sera prise en charge par le CPPM. La coordination du développement des micro codes et l'ingénierie logicielle sera sous la responsabilité du LAPP. Il faudra fédérer une quinzaine de développeurs répartis dans la collaboration car chaque système développera ses micro codes spécifiques.

Le système de déclenchement de premier niveau a été réalisé notamment par le CPPM, le LAL, le LAPP et le LPC. Ces instituts assureront la migration du trigger calorimétrique (LAL, LAPP), muonique (CPPM) et de l'unité de décision (LPC) en s'appuyant sur la carte de lecture développée au CPPM.

Nous contribuons aussi au computing de LHCb à travers DIRAC qui est un progiciel de production et d'analyse de données dans un environnement distribué. Cet effort au niveau de deux FTEs par an devra être maintenu dans l'avenir. Par ailleurs, l'IN2P3 contribuera au financement de la grille de calcul via WLCG.

Les coûts envisagés pour la contribution française au data processing sont résumés dans la Table 4 [4]. Le coût total pour réaliser les cartes de lecture est estimé à 6 MCHF. L'IN2P3 prendra en charge la R&D et la production de la présérie pour la carte de lecture. Chaque détecteur financera les cartes dont il aura besoin. La présérie, d'une trentaine de cartes, permettra d'équiper deux châssis ATCA nécessaires dans la phase de validation des détecteurs et du système d'acquisition.

Le premier prototype de la carte générique est en cours de fabrication. Il sera validé à la fin 2012. La réalisation de la présérie est envisagé début 2014, la production de la série se terminera fin 2015. Les développements pour la migration du trigger de premier niveau sont prévus en 2016 et 2017.

Trigger & Readout System	Cost [kCHF]
Readout System	1495
Low Level Trigger	345
	1840

TABLE 4 – Coût estimé pour la présérie de la carte de lecture à 40 MHz et la migration du LLT.

5 Estimation des ressources ITA et physiciens pour le projet d'Upgrade LHCb France

Le Framework TDR pour l'upgrade de LHCb, comme le projet de contribution française qui s'y réfère, suppose que les laboratoires participants disposent des compétences et de l'essentiel des moyens en personnel. Compte tenu de la durée des projets nous souhaitons insister sur le besoin de pouvoir compter sur le remplacement des départs des collaborateurs présents en informatique et en électronique. Les besoins en ressources humaines seront précisés mi-2013 au moment de la préparation des *Technical Design Reports* et des *Memorandum of Understanding* associés.

CPPM

Le CPPM aura la responsabilité du projet des cartes de lecture à 40 MHz et assumera la responsabilité du trigger LLT à muons dans la continuité de ces responsabilité sur le trigger de premier niveau. Ces deux projets nécessitent une équipe de trois ingénieurs électroniciens, un ingénieur en informatique temps réel et deux responsables scientifiques. Les ingénieurs seront mobilisés jusqu'à la fin de la période LS2 et les physiciens du groupe apporteront leur soutien dans la phase d'intégration.

LAL

Le LAL aura la responsabilité de l'électronique de lecture des calorimètres et assumera la responsabilité du trigger LLT calorimétrique dans la continuité de ces responsabilité sur le trigger de premier niveau. Ces deux projets imbriqués nécessitent une équipe de deux ingénieurs et deux responsables scientifiques. Les ingénieurs seront sollicités jusqu'à la fin de la période LS2 et les physiciens du groupe apporteront leur soutien dans le développement des interfaces de contrôle, les phases de test et d'intégration.

LAPP

Le LAPP aura la responsabilité du développement des micro-codes pour les cartes de lecture à 40 MHz et contribuera à la migration du trigger calorimétrique de premier niveau au LLT. Ces projets nécessitent une équipe de trois ou quatre ingénieurs électroniciens, un

informaticiens et au moins un responsable scientifique. Une équipe de mécaniciens contribuera au développement des outillages spécifiques pour extraire les modules du calorimètres si cette option est retenue. Les ingénieurs seront sollicités jusqu'à la fin de la période LS2 et les physiciens du groupe apporteront leur soutien dans la phase d'intégration.

LPC

Le LPC aura la responsabilité de l'électronique de lecture du CT et continuera d'assumer la responsabilité de l'unité de décision au sein du trigger LLT. Ces projets nécessitent une équipe de trois ingénieurs électroniciens, dont deux micro-électroniciens pour le développement de l'ASIC, et deux responsables scientifiques. Ces ingénieurs seront sollicités jusqu'à la fin de la période LS2. Un ingénieur électronicien et un informaticien seront aussi nécessaires, pour une période de 6 à 12 mois, afin de porter l'unité de décision et ses interfaces dans le LLT. Les physiciens du groupe apporteront leur soutien dans les phases de test et d'intégration.

Computing LHCb France

La contribution au computing de LHCb s'inscrira dans la continuité de l'effectif présent, à savoir deux ingénieurs.

6 Conclusions

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) et 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 k€ dont 320 k€ 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, progiciel 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.

Les groupes français souhaitent poursuivre leur forte participation à l'expérience en contribuant à son upgrade. 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 et de l'électronique front-end du détecteur de traces à fibres scintillantes, la conception et la réalisation de la carte de lecture

générique à 40 MHz, la migration du système de déclenchement de premier niveau dans la nouvelle architecture, l'optimisation des algorithmes de tracking et une contribution au computing.

Le coût de l'upgrade LHCb est estimé à 57 MCHF [4] incluant une réserve de 3.5 MCHF pour la modification éventuelle des détecteurs d'identification existants, en vue d'un fonctionnement à $\mathcal{L} = 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Le coût de la contribution française à la construction de l'upgrade LHCb est estimé à 6425 kCHF (5.14 M€ le 25 mai 2012) et détaillé dans la Table 5. La somme de 1900 kCHF correspond à la contribution aux projets communs, sorte de *common fund*, à hauteur de 12%, l'équivalent PhD de la France dans LHCb. Le budget nécessaire pour la R&D est estimé à 500 k€.

	Coût [kCHF]
Central tracker Electronics	1550
Calorimeter Electronics	1135
Readout System	1495
Low Level Trigger	345
Common fund	1900
	6425

TABLE 5 – Coût estimé de la contribution française à l'upgrade de LHCb.

Le calendrier est organisé autour de six phases : R&D et choix technologiques (2011-2012), TDRs et validation des prototypes (2013), production (2014-2015), contrôle qualité et tests (2016-2017), installation et mise au point (2018), prise de données à partir de 2019.

Références

- [1] LHCb Collaboration, R. Aaij et al., *the LHCb Upgrade Letter of Intent*, [CERN-LHCC-2011-001](#)
- [2] Minutes of LHCC 105th meeting, March 2011, [CERN-LHCC-2011-004](#)
- [3] Minutes of LHCC 106th meeting, June 2011, [CERN-LHCC-2011-008](#)
- [4] LHCb Collaboration, R. Aaij et al., *Framework TDR for the LHCb upgrade*, [CERN-LHCC-2012-007](#)
- [5] 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](#)].
- [6] F. Mahmoudi, S. Neshatpour and J. Orloff, [arXiv :1205.1845](#), F. Mahmoudi, [arXiv :1205.3099](#), D. M. Straub, [arXiv :1205.6094](#)
- [7] P. Collins et al., *The LHCb VELO upgrade* Nucl. Instr. and Meth. A 636 (2011) S185.

- [8] P. Moreira *et al.*, *The GBT project*, in [Proceedings of the Topical Workshop on Electronics for Particle Physics 2009 \(TWEPP-09\)](#), CERN-2009-006 pp. 342-346
- [9] E. Picatoste *et al.*, *Low noise front end ICECAL ASIC for the upgrade of the LHCb calorimeter*, in [Proceedings of the Topical Workshop on Electronics for Particle Physics 2011 \(TWEPP-11\)](#), [JINST 7 \(2012\) C01080](#)
- [10] D. Breton and D. Charlet, *SPECS : the Serial Protocol for the Experiment Control System of LHCb*, [LHCb-2003-004](#)