

Contributions de CMS-IN2P3 aux Upgrades HL-LHC

Editeurs : Christophe Ochando, Yves Sirois et Sébastien Viret

Contributions aux articles de ce document :

Christophe Ochando, Jean-Baptiste Sauvan (HGAL), Daniel Bloch, Laurent Gross (DAQ Trajectographe), Sébastien Viret (Trajectographe), Imad Laktineh (Muons RPCs)

Liste des participants aux upgrades et auteurs de CMS-IN2P3: voir en annexe 1.

Table des matières

Les enjeux de physique	1
Le HL-LHC et les projets d'upgrades de CMS	3
Genèse et calendrier des upgrades de CMS à l'IN2P3	4
Engagements pour le projet HGAL (LLR, OMEGA)	6
<i>État de l'art</i>	6
<i>Réalisations techniques</i>	8
Engagements pour le projet Trajectographe (IPNL, IPHC)	14
<i>État de l'art</i>	14
<i>Réalisations techniques</i>	14
GRPCs pour le détecteur à Muons (IPNL)	26
<i>État de l'art</i>	26
<i>Réalisations techniques</i>	27
Ressources et Moyens	32
Conclusions	35
Annexe 1	36

Les enjeux de physique

L'exploration de la physique du boson H est un des objectifs majeurs du projet de haute luminosité du Grand Collisionneur de Hadrons (HL-LHC). La découverte du boson H à une masse de 125 GeV a bouleversé notre conception de l'Univers. Ce boson scalaire (spin 0) est d'une espèce tout à fait nouvelle : il diffère de toutes les autres particules de matière (spin 1/2) ou d'interaction (spin 1) connues. Il est associé au champ de Higgs qui interagit avec les autres champs quantiques pour permettre l'existence de particules massives observables dans notre monde physique. Il permet par ailleurs de « réguler » la théorie, le Modèle Standard, à très haute énergie ou très petite distance. La découverte du boson H ne fait pas que confirmer la prédiction du mécanisme de brisure de symétrie électrofaible de Brout, Englert et Higgs (BEH), elle nous oblige à reconsidérer le rôle des champs scalaires dans l'histoire de la matière. Nous savons désormais que la masse est entièrement et uniquement d'origine quantique relativiste. C'est en se propageant dans le vide physique où agit le champ de Higgs qu'apparaissent les particules massives. Les champs scalaires sont présumés jouer un rôle important en cosmologie et l'existence du champ de Higgs est désormais prise en compte dans certaines théories impliquant la gravité. Le boson H pourrait ouvrir une porte vers le côté sombre de l'Univers, en interagissant par exemple avec la matière noire.

La masse de 125 GeV du boson H est tout à fait singulière et change les perspectives. Parmi toutes les valeurs possibles, elle est la seule qui puisse permettre aux expériences d'étudier le couplage du boson H dans un maximum de modes de production et de désintégration. De ce point de vue, la Nature s'est montrée généreuse. A cette valeur, nous disposons pour la première fois dans l'histoire des sciences d'une théorie valable à toutes les échelles, c'est-à-dire prédictive mais dépendant de paramètres arbitraires. Mais c'est aussi une valeur de masse qui ne permet pas à la théorie de prévoir la prochaine échelle où devrait apparaître de la nouvelle physique. De ce point de vue, la Nature s'est montrée roublarde. Il faudra désormais être patients et exploiter la précision offerte par les hautes luminosités. Certaines des propriétés les plus importantes ne peuvent être étudiées qu'au HL-LHC. C'est le cas de l'auto-couplage, la façon dont le boson H se couple à lui-même jouant un rôle à l'origine même du mécanisme BEH, qui a permis l'apparition des particules massives. Le HL-LHC permettra de contraindre fortement l'auto-couplage du boson H par la mesure de la production non-résonnante de paires HH. Cette production de paires pourrait être fortement augmentée dans des voies résonnantes (e.g. en cas d'extension du secteur scalaire) et la recherche de production résonnante HH est un autre enjeu important. Les données du LHC ont déjà révélé que le boson H est le premier boson connu n'ayant pas de couplages universels aux différentes familles de fermions. La comparaison des couplages aux muons et aux leptons taus est une mesure difficile et très importante qui pourra être effectuée à très haute statistique au HL-LHC. D'une part, le signal en paires de muons est un signal rare, et d'autre part, seul le canal de production VBF permet d'accéder à une mesure précise pour le signal en paires de leptons taus. La comparaison permettra de démontrer que le champ de Higgs est bien à l'origine des familles de fermions.

Aujourd'hui, le Modèle Standard, avec son boson de Higgs, demeure une théorie réfutable. La recherche du couplage du boson H à la matière noire exploitera entre autres les modes plus rares de production H, par fusion de bosons électrofaibles (VBF), et constitue un des enjeux au HL-LHC. Des extensions au-delà du Modèle Standard sont nécessaires pour résoudre des énigmes persistantes. Parmi celles-ci, il y a l'origine de l'asymétrie matière-antimatière dans l'univers, l'origine de la hiérarchie de masse entre l'échelle électrofaible et l'échelle de Planck, la structure particulière du spectre des masses des trois familles de fermions, et l'origine exacte des masses de neutrinos, sans oublier l'éventuel lien avec une gravitation quantique. Un problème du boson H tel qu'intégré dans le Modèle Standard est qu'il obtient sa propre masse via un auto-couplage de valeur arbitraire. Cette masse n'est protégée par aucune symétrie de la théorie et est sensible à toute nouvelle échelle à très haute énergie, incluant l'inévitable échelle de Planck. Diverses théories impliquant une extension du secteur scalaire, avec des bosons de Higgs additionnels, permettent de fixer l'échelle électrofaible de façon naturelle et donc d'éviter les problèmes d'instabilité ou de hiérarchie des interactions. C'est le cas de diverses incarnations de la supersymétrie où la masse du boson de Higgs neutre le plus léger est prédite à une masse proche de la masse du boson Z, soit 90 GeV aux corrections radiatives près. La valeur de 125 GeV est donc extrêmement contraignante et le champ des possibles pour la supersymétrie s'est rétréci. Le HL-LHC permettra d'explorer en profondeur l'espace des paramètres qui a échappé aux contraintes à

ce jour. La stabilité de la théorie, et peut-être de notre Univers, requiert vraisemblablement l'existence de nouveaux bosons de la même nature que le boson H, voire d'une nouvelle matière miroir « supersymétrique » de la matière ordinaire, et qui pourrait être mise en évidence au LHC et confirmée au HL-LHC.

Le HL-LHC et les projets d'upgrades de CMS

Le LHC au laboratoire du CERN à la frontière franco-suisse a fourni depuis 2015 une première moisson de données à une énergie record des collisions proton-proton de 13 TeV. Avec ces nouvelles données, les grandes expériences ATLAS et CMS ont déjà pu obtenir pour le boson H une sensibilité comparable à celle des données de 7-8 TeV en 2011-2012. Une sensibilité qui avait amené la découverte du boson H et l'attribution du Prix Nobel de Physique 2013 à Brout, Englert et Higgs pour la prédiction théorique. Entre 20 et 30 fois plus de collisions seront enregistrées jusqu'à la fin 2023, portant la luminosité intégrée à plus de 300 fb^{-1} avec la configuration actuelle du LHC. A ce stade, certains détecteurs et aimants soumis à des doses de radiation importantes seront en fin de vie. Un programme d'adaptation du collisionneur et des détecteurs est donc nécessaire pour aller au-delà et envisager de collecter encore 10 fois plus de données de collisions. Le projet HL-LHC vise une collecte d'au moins 3000 fb^{-1} sur une période de 10 ans à partir de 2026.

L'augmentation importante de la luminosité prévue au HL-LHC aura une incidence majeure sur le fonctionnement des futurs sous-détecteurs de CMS. Un des effets les plus notables sera l'augmentation de l'empilement, c'est-à-dire du nombre moyen d'interactions survenant à chaque collision, d'environ un ordre de grandeur. Les événements seront plus complexes à analyser, mais également, et surtout, plus complexes à sélectionner. Il est donc nécessaire de construire des détecteurs adaptés à ce nouvel environnement, à la fois plus précis et permettant une analyse plus rapide des informations.

Au sein des expériences, de la R&D est nécessaire pour la préparation de « *Technical Design Reports* » (TDR) prévus en 2017-2018 pour l'adaptation des détecteurs. Les défis technologiques de la phase HL-LHC sont principalement l'atténuation des effets de la superposition de collisions secondaires et la tenue aux radiations. Il faudra savoir extraire des événements rares dans des collisions de paquets de protons se croisant toutes les 25 ns, et générant jusqu'à 200 collisions quasi-simultanées. Les détecteurs devront survivre à des doses intégrées de radiation pouvant atteindre 10^{16} neutrons/cm². L'objectif est de terminer la phase de préparation et construction des nouveaux détecteurs avant 2023 pour installation sur le site entre 2023 et 2026.

Genèse et calendrier des upgrades de CMS à l'IN2P3

Une première revue générale des projets d'Upgrades HL-LHC de CMS fut présentée en Conseil Scientifique de l'IN2P3 par Didier Contardo, responsable « Upgrades » de l'expérience CMS, en juin 2012.

L'exploitation aux luminosités maximales du LHC a été identifiée comme la plus haute priorité dans la « stratégie européenne pour la physique des particules » en 2013. Cette stratégie fut adoptée par le Conseil du CERN en juin 2013, et intégrée officiellement dans la feuille de route du Forum européen de la stratégie sur les infrastructures de recherche (« *ESFRI Roadmap* ») dès 2013. Le Conseil du CERN a adopté le financement des upgrades machine pour HL-LHC en juin 2014.

Les implications dans la R&D et intentions spécifiques des groupes français de CMS et ATLAS furent présentées de nouveau en Conseil Scientifique de l'IN2P3 par Yves Sirois et Isabelle Wingerter-Seez, respectivement responsables nationaux de CMS et ATLAS, en janvier 2014. Une revue détaillée par l'IN2P3 (avec referees externes etc.) des projets d'upgrades de CMS a été organisée sous le pilotage de Mme. U. Bassler (alors Directrice Scientifique Adjointe de l'IN2P3) en septembre et octobre 2015. Ce fut l'occasion de présentations détaillées sur nos projets trajectographe (ASIC concentrateur, déclenchement L1, mécanique, refroidissement et acquisition), calorimètres bouchons HGCAL (électronique très frontale, mécanique et déclenchement) et muons (électronique des GRPCs).

Certains aspects de R&D pertinents pour le calorimètre HGCAL de CMS ont été intégrés dans une demande de soutien via un appel d'offre du LaBeX P2IO en 2015. Ce projet HIGHTEC (« *High Granularity Hybrid Timing and Energy Calorimetry* ») en collaboration avec des groupes de ATLAS et CALICE ILC du LLR-IN2P3, du LAL-IN2P3 et de SPP et SEDI-IRFU, a donné lieu à des présentations par Yves Sirois devant un comité de sélection avec referees internationaux en juin 2016. Le projet a été accepté et est financé (pour 408k€ incluant 2 ans de post-doc pour ce qui est de HGCAL) depuis l'automne 2016. Une première audition par P2IO concernant la mise en marche du projet a eu lieu en janvier 2017. Le projet a très bien démarré dans toutes ses composantes et une prochaine revue est déjà prévue le 15 novembre 2017. Ce support s'est avéré important dans une période intense de R&D pour préserver nos responsabilités tout en amplifiant les efforts et les échanges concernant la calorimétrie haute granularité inventée à l'IN2P3, et en attendant de dégager plus de moyens directs de l'IN2P3 ou via les TGI. De façon similaire, les activités concernant le déclenchement pour le trajectographe (« *Track-Trigger* ») ont pu profiter d'un précieux soutien de l'Agence Nationale de Recherche (ANR) obtenu en collaboration avec le groupe ATLAS du LPNHE (Paris).

Suite à une saisine du Haut-Comité des Très Grandes Infrastructures de Recherches (HC-TGIR) par le ministère en juin 2016, une présentation générale des motivations de physique et des enjeux pour les upgrades de ATLAS et CMS a été effectuée le 12 septembre 2016 lors d'une première réunion avec les experts du TGIR, conjointement par Gauthier Hamel de Monchenault (CEA) et Patrice Verdier (CNRS). Une seconde présentation pour ATLAS et CMS a été effectuée le 26 septembre 2016

par Philippe Schwemling. Un document de synthèse d'une dizaine de pages a été présenté à cette occasion au HC-TGIR. Un deuxième document spécifiquement relatif aux aspects financiers a été présenté. Un avis favorable a été rendu par le HC-TGIR en novembre 2016, puis approuvé en session plénière du HC-TGIR en janvier 2017.

Toutes les contributions présentées par CMS au niveau de l'IN2P3 sont aussi des projets bien intégrés au sein de l'expérience et sujets à des revues régulières, voire des « Design Reviews » plus techniques et détaillées (c'est le cas par exemple pour la production des puces d'électronique frontale du HGAL). Un « *Technical Proposal* » (TP) de 409 pages concernant l'ensemble des Upgrades de Phase 2 (HL-LHC) de CMS a été publié par CMS en juin 2015. Des documents de « *Technical Design Review* » complets sont prévus avant le printemps 2018.

Le CNRS et le CEA sont engagés dans le programme d'upgrade du détecteur CMS avec quatre laboratoires du CNRS, **LLR et OMEGA** (Ecole Polytechnique, Palaiseau), **IPNL** (U. Claude Bernard - Lyon I) **IPHC** (U. Strasbourg + Mulhouse-Colmar), et un laboratoire du CEA, le **SPP** Saclay. Ces équipes ont participé à la construction originale du trajectographe silicium et du calorimètre électromagnétique (ECAL) homogène en cristaux de $PbWO_4$, ainsi qu'au système de calibration laser et au système de déclenchement associé. Les équipes ont aussi été fortement impliquées dans le développement de logiciels de reconstruction et d'analyse.

Des mises à niveau ou remplacements de détecteurs sont nécessaires pour faire face aux conditions de prise de données au HL-LHC. L'IPHC est impliqué pour une refonte de l'acquisition (DAQ) - Hardware, Firmware, et Software - du trajectographe. Cette refonte est nécessaire pour s'adapter à la nouvelle électronique et à l'augmentation du flux de données. L'IPNL est impliqué dans des développements de mécanique, d'électronique et d'une capacité de déclenchement du trajectographe. Pour la mécanique, il s'agit de la structure de base devant supporter l'ensemble des nouveaux modules des bouchons. Pour l'électronique, il s'agit de s'occuper du concentrateur de données. Pour le déclenchement, il s'agit de proposer une solution de recherche rapide basée sur des mémoires associatives.

Pour les calorimètres, le LLR et le SPP sont impliqués dans la recherche et le développement d'un nouveau calorimètre haute granularité (HGAL) destiné à remplacer les bouchons actuels vers l'avant et qui fournira des mesures d'énergie, de position et de temps. Le LLR a été parmi les initiateurs du projet dans CMS et souhaite prendre en charge la mécanique et le système de déclenchement. L'électronique frontale est prise en charge par le laboratoire OMEGA en lien avec le groupe CMS au LLR pour l'électronique arrière et le flux de données. Le SPP souhaite prendre en charge la distribution des horloges.

Le groupe de l'IPNL est par ailleurs impliqué avec OMEGA dans un projet de GRPC (« *Glass Resistive Parallel Chamber* ») en cours de discussion au sein de CMS comme option pour équiper des stations muons à grande rapidité (vers l'avant).

Engagements pour le projet HGCAL (LLR, OMEGA)

État de l'art

L'ensemble de la calorimétrie de CMS dans les bouchons, électromagnétique et hadronique, aura subi à l'horizon 2023 des dégâts irrécupérables dus aux radiations, compromettant sérieusement le programme de physique pour les années à venir. Afin de fonctionner dans l'environnement de très hautes radiations (près de 200 Mrads de dose intégrée pour une fluence neutronique de 10^{16} neutrons/cm²) et d'atténuer les effets de fort empilement de collisions secondaires (*pileup* ou PU) attendus pour HL-LHC, la collaboration CMS a donc décidé de la remplacer par un nouveau type de calorimètre de haute granularité, HGCAL (*High Granularity CALorimeter*).

Ce détecteur est un calorimètre à échantillonnage de très haute granularité, près de 6 millions de canaux devant être lus, représentant un saut de deux ordres de grandeur par rapport aux calorimètres actuels au LHC. Il permettra la reconstruction et la mesure des gerbes en 5 dimensions : énergie, position et temps. Il couvrira la zone en pseudorapidité (η) comprise entre 1.5 et 3. La structure de ce nouveau détecteur est représentée dans la **Figure 1**.

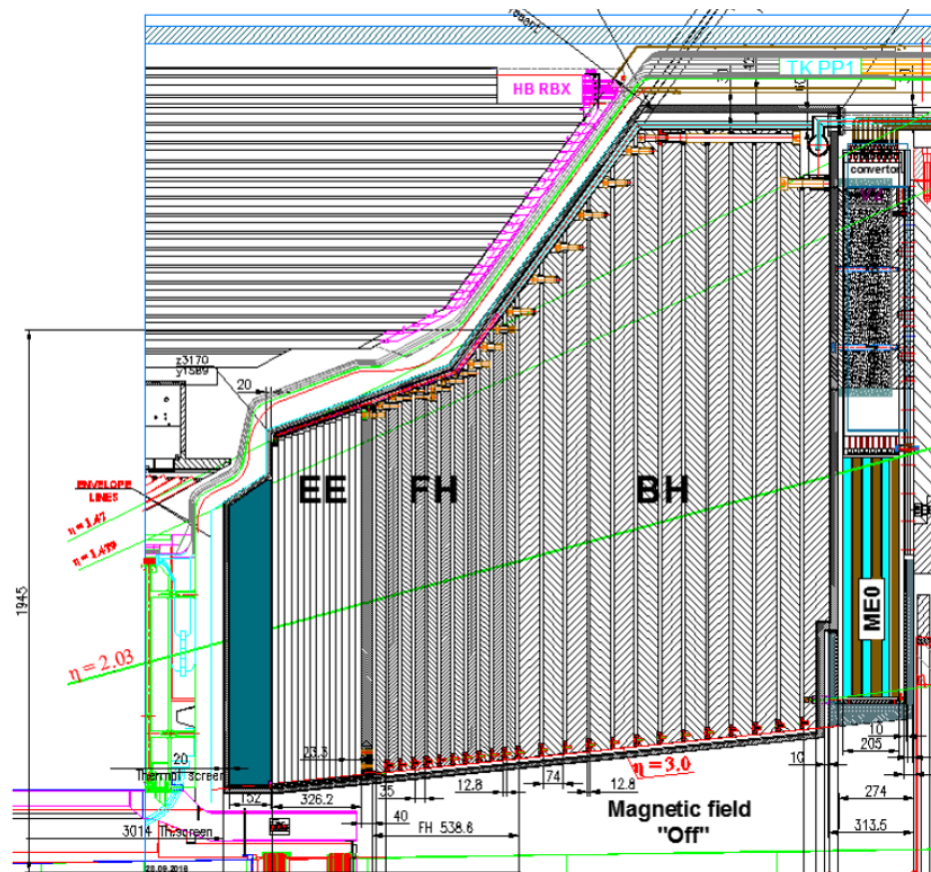


Figure 1 : Dessin technique de la structure générale de la future calorimétrie dans les bouchons de CMS.

La partie électromagnétique (EE) est composée d'une alternance de 28 couches actives de silicium (Si) et d'absorbeurs en plomb (Pb), la partie hadronique (FH) d'une alternance de 12 couches actives de Si et d'absorbeurs en acier. Le confinement complet des gerbes hadroniques est assuré par la présence d'un calorimètre classique à échantillonnage utilisant des scintillateurs plastique (BH). L'ensemble est plongé dans une enceinte hermétique maintenue à -30°C via un système de refroidissement diphasique au CO_2 .

L'élément de base de HGCal est appelé « module ». De forme hexagonale, il contient le capteur en Si (voir [Figure 2](#)), câblé par fils via des trous appropriés dans le circuit imprimé et fixé sur une référence mécanique en alliage de tungstène-cuivre, ainsi que l'électronique frontale de lecture. Les capteurs Si contiennent de 128 à 256 cellules. La [Figure 3](#) montre un module utilisé pour les tests en faisceaux effectués au Fermilab en 2016. Il y a environ 22000 modules.

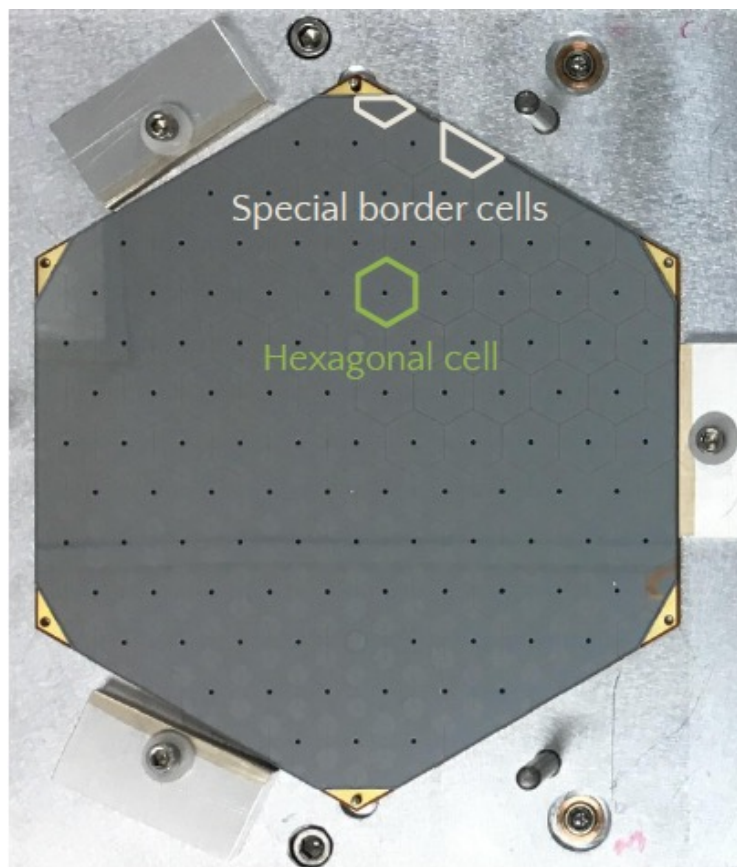


Figure 2 : Capteur en silicium de 6 pouces collé sur la plaque de support en tungstène-cuivre (en jaune) percée pour accueillir les trous de fixation sur les plaques de cuivre.

Les modules sont fixés mécaniquement sur des plaques de cuivre de 6 mm d'épaisseur, usinées pour intégrer les tubes de refroidissement, et forment alors une « cassette ». Dans l'EE, il y a en moyenne une vingtaine de modules par cassette. Celles-ci sont ensuite insérées dans la structure mécanique en acier pour la partie

hadronique ou intègrent également l'absorbeur en plomb pour le EE, avant d'être reliées et empilées.



Figure 3 : Exemple de module complet utilisé lors des tests en faisceaux au Fermilab en 2016. En noir sont visibles deux ASICs (*Application-Specific Integrated Circuits*) SKIROC2_CMS développés par OMEGA.

Ce détecteur novateur présente des défis considérables tant au niveau de l'ingénierie que de la quantité inégalée de données produites et des algorithmes avant-gardistes à inventer pour les traiter. Il formera la base des détecteurs pour les futurs collisionneurs. En outre, le principe initial de la calorimétrie de haute granularité a été inventé au sein de l'IN2P3, notamment au travers de la collaboration CALICE. Il est donc naturel et important que l'IN2P3 s'investisse fortement dans les développements et la construction de ce détecteur d'un genre nouveau alliant à la fois des aspects de calorimétrie, de trajectographie et de mesure en temps de haute précision. Le LLR et OMEGA proposent de prendre la responsabilité des aspects sur lesquels ils ont une expertise mondialement reconnue : la mécanique (pour la partie électromagnétique), le système de déclenchement et les algorithmes de reconstruction pour le LLR, l'électronique frontale intégrée pour OMEGA.

Réalisations techniques

Mécanique HGAL :

Le concept de la structure mécanique du EE est intimement lié aux cassettes, comme mentionné plus haut. Les cassettes, de forme trapézoïdale et d'ouverture angulaire 30° ou 60°, sont reliées mécaniquement en périphérie interne et externe pour former des disques (voir **Figure 4**). Ceux-ci sont alors empilés, en position

horizontale, pour constituer le EE. La tenue mécanique est assurée par un réseau de boulons d'espacement situés aux extrémités des modules. Dans sa position verticale finale, les disques reposent sur un cône interne en aluminium d'une dizaine de millimètres. A l'arrière, une plaque en acier permet d'attacher le EE à la partie frontale du FH. L'utilité d'une plaque à l'avant, reliée en périphérie à l'arrière, doit être étudiée.

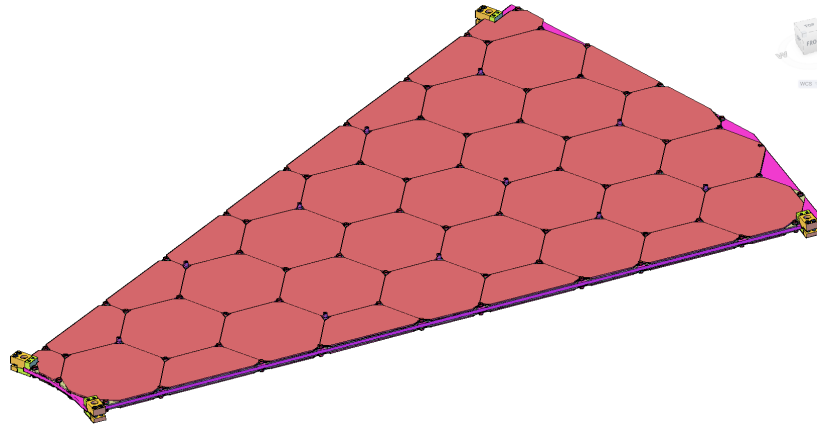


Figure 4 : Dessin technique d'une cassette de 30° pour le EE. Les modules hexagonaux sont visibles. En périphérie interne et externe, les pièces mécaniques servent à interconnecter les cassettes entre elles pour former des disques

Le LLR propose de prendre la responsabilité de la conception générale de la mécanique du EE, en étroite collaboration avec le CERN. Plus spécifiquement, le LLR entend se concentrer sur les plaques de cuivre et les éléments mécaniques associés aux cassettes, en continuant un travail poussé de conception assistée par ordinateur (CAO), des calculs de structure ainsi que du prototypage, mettant ainsi à profit l'expertise et les moyens de son Service Mécanique. L'outillage dédié à la manipulation des cassettes et au montage du détecteur devra être également développé. Le LLR suivra ensuite la production des différents éléments avant de participer à l'installation finale au CERN.

Electronique frontale :

L'électronique frontale de lecture est un des aspects les plus exigeants du projet HGICAL. Il faut développer une électronique bas bruit, basse puissance (environ 10 mW par canal), ayant une large gamme dynamique (jusqu'à 10 pC), proposant un temps de mise en forme des signaux de 20 ns ainsi qu'une résolution en temps d'environ 50 ps. En outre, l'électronique étant intégrée aux modules, elle doit être en mesure de résister aux radiations. Dans ce qui suit, la puce d'électronique frontale, capable de lire jusqu'à 64 canaux, sera appelée HGROC (« *High Granularity ReadOut Chip* »).

L'architecture conceptuelle de HGROC est présentée dans la **Figure 5**. Le signal, préalablement pré-amplifié et mis en forme, est continûment numérisé par un ADC (« *analog-to-digital converter* ») de 10 bits pour les faibles charges (en-dessous de 100 fC). Au-delà, un comparateur « *Time-Over-Threshold* » (ToT) démarre et arrête un TDC (« *time-to-digital converter* »), fournissant ainsi une numérisation mesurant

l'amplitude des signaux de plus haute intensité. En outre, comme il sera explicité plus bas, des groupements de cellules doivent être effectués pour le système de déclenchement. HGROC fournira donc aussi les sommes numériques de ces groupements.

Le laboratoire OMEGA possède une expertise mondialement reconnue en micro-électronique, notamment pour la conception de puces pour la calorimétrie en physique des hautes énergies : calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS, prototypes de calorimétrie ultra-granulaire pour la collaboration CALICE, etc. Il a naturellement pris le leadership pour la conception et les développements de HGROC et de ses différents composants depuis 2014.

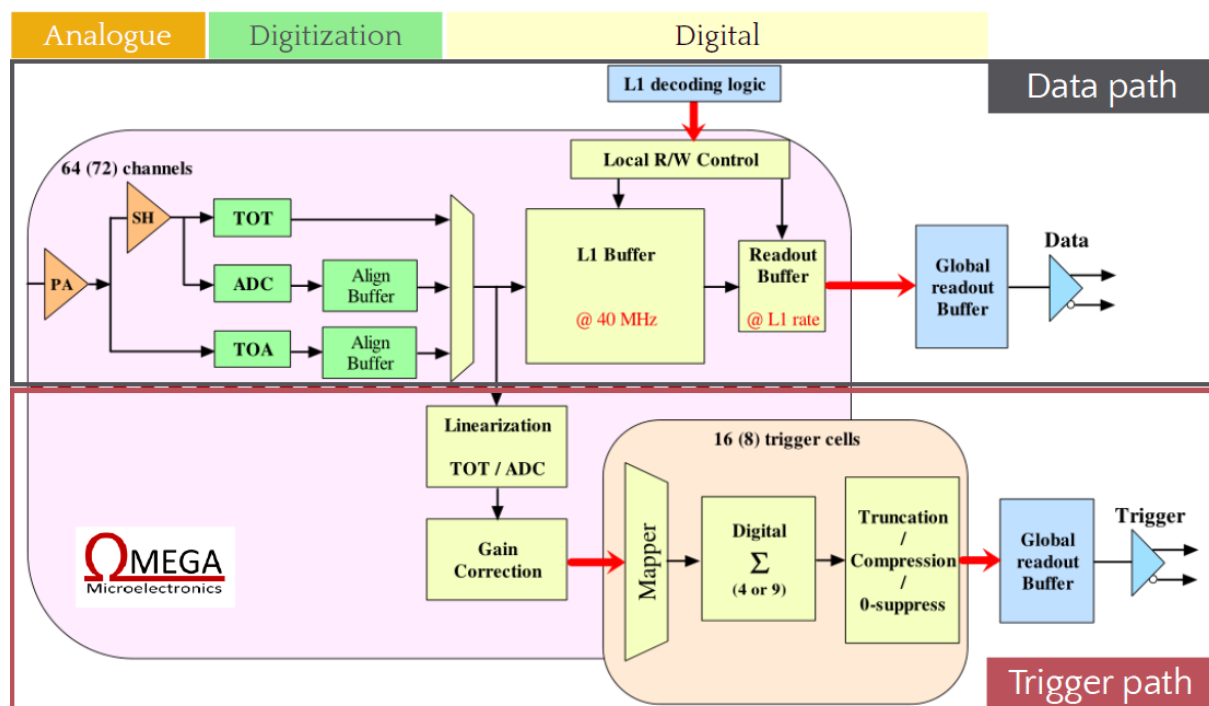


Figure 5 : Architecture conceptuelle de HGROC.

Des campagnes de « véhicules de tests » (TV) ont ainsi été menées afin de tester différentes versions des composants : préamplificateurs, discriminateurs, ADC synchrones ou asynchrones, etc. Les mesures effectuées sur ces TV vont permettre de concevoir la première version de HGROC, prévue pour la mi-2017. En parallèle, une puce, appelée SKIROC2_CMS, a été développée spécialement pour les tests en faisceaux qui auront lieu au CERN en 2017. Elle permettra de tester la précision sur l'information temporelle ainsi que les fonctionnalités de ToT.

Deux, voire trois itérations de HGROC seront nécessaires avant la production finale. Les collaborations en cours avec Imperial College (London), le CEA Saclay ou le CERN seront primordiales pour le succès de ce projet, OMEGA gardant la responsabilité de la conception générale et de l'intégration des différents composants.

Electronique dorsale et déclenchement :

Avec des collisions à 40 MHz, HGAL produirait 1 pétaoctet de données par seconde si l'ensemble des canaux étaient lus. Cette masse d'information doit être réduite par au moins un facteur 20 afin d'être transportée hors du détecteur par un nombre raisonnable de liens optiques (environ 8000 sont prévus pour la seule voie de déclenchement). Cette réduction peut se faire par plusieurs moyens : réduction de la granularité par le groupement de cellules (2x2, 4x4, ...), compression des énergies, lecture d'une couche sur deux, etc. Il faut par ailleurs réduire ensuite ces données d'un facteur semblable pour qu'elles puissent être absorbées par le système de déclenchement central de CMS. Cependant, la lutte contre le PU implique l'utilisation du maximum d'informations disponibles. Un compromis doit donc être trouvé entre réduction de données et réjection optimale du PU au niveau 1 du système de déclenchement (L1).

Dans l'architecture actuelle, le HGROC est chargé de réduire la granularité transverse pour la voie L1 en effectuant un groupement de cellules, créant alors des « cellules de déclenchement ». Il en réduit par ailleurs la résolution en énergie et élimine l'information en temps. Les cellules de déclenchement provenant de plusieurs HGROC sont envoyées et regroupées dans un ASIC appelé "Concentrateur" qui se charge d'en sélectionner une fraction seulement avant envoi hors du détecteur. Cette sélection peut se faire suivant plusieurs critères actuellement en cours d'étude : toutes les cellules de déclenchement au-delà d'un certain seuil en énergie, choix des cellules les plus énergétiques, etc. L'électronique dorsale hors-détecteur, basée sur des FPGAs (« *field-programmable gate arrays* »), est alors chargée de créer les primitives de déclenchement, briques de base des objets de déclenchement (électrons, photons, taus, jets). Au moins deux étapes sont nécessaires pour former ces primitives, tout d'abord en agrégeant les cellules pour chaque couche de HGAL (2D) puis en liant les couches entre elles (3D). Les agrégats calorimétriques ainsi formés pourront ensuite être mis en corrélation avec les traces du « Track-Trigger ». La décision finale du L1, disponible en moins de 12 μ s, combine *in fine* l'ensemble des sous-détecteurs de CMS.

Le flot total de données est progressivement réduit à la traversée des différentes couches logiques, permettant ainsi de concentrer progressivement l'ensemble des données d'un bouchon jusqu'à un unique FPGA qui a alors une vision globale de l'événement. Ceci est illustré dans la [Figure 6](#).

Le LLR entend prendre la responsabilité de la voie « déclenchement » de l'électronique frontale, tant au niveau du HGROC en lien avec OMEGA que de l'ASIC « Concentrateur » en collaboration avec le groupe CMS de FESB à Split, en Croatie. Ceci passe par l'étude des flux de données ainsi que des techniques de réduction d'information, comme les sélections opérées au sein du concentrateur, et nécessite à la fois des travaux de simulation et de développement de *firmware*. En outre, en lien étroit avec les études de reconstruction et d'identification hors-ligne des électrons, photons et taus détaillées ci-dessous, le LLR souhaite jouer un rôle majeur sur les algorithmes à implanter dans l'électronique dorsale. Il s'agit d'algorithmes d'agrégation des « cellules de déclenchement » et d'identification de ces agrégats,

ainsi que d'estimation du PU et d'atténuation de ses effets, en utilisant notamment la segmentation longitudinale de HGAL. Là encore des travaux de simulation et de développement de *firmware* seront menés en parallèle.

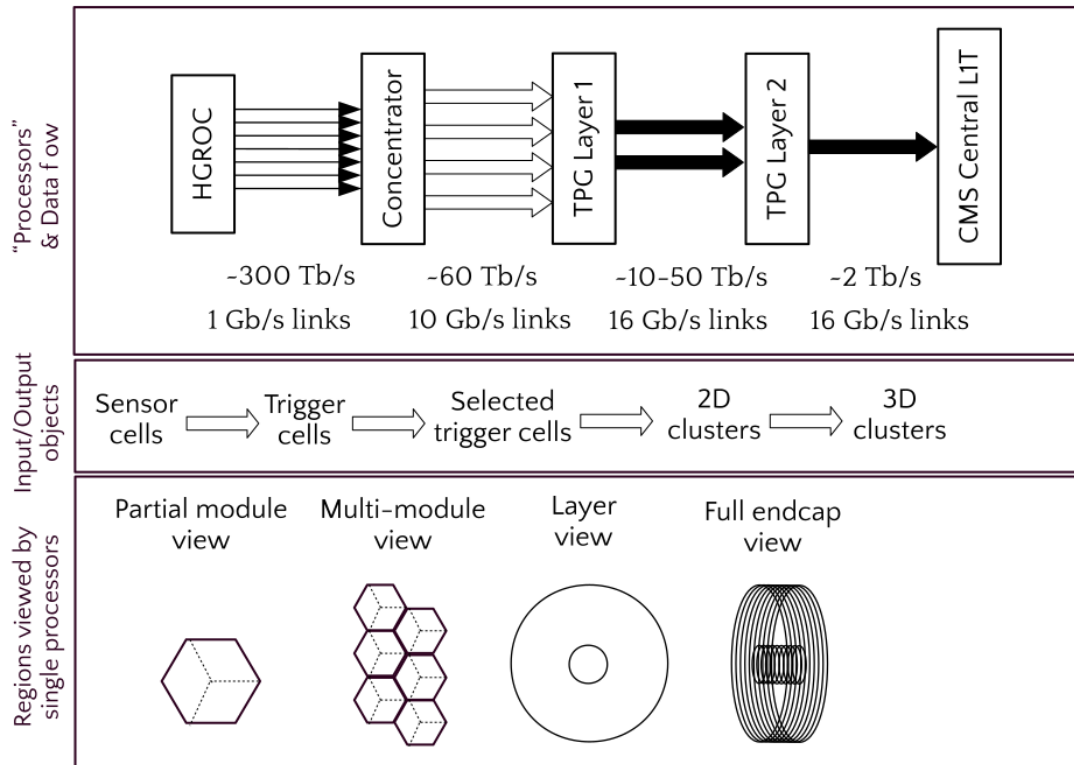


Figure 6 : Architecture conceptuelle de la chaîne de déclenchement du HGCAL. Les différents circuits logiques traversés y sont schématisés, ainsi que les objets manipulés et le flot de données correspondant.

Pour évaluer les performances des différents algorithmes, depuis la réduction de données jusqu'à l'identification d'objets de haut niveau, des outils de simulation du L1 seront développés dans l'environnement logiciel de CMS. Enfin, l'ensemble des algorithmes, tant au niveau frontal que dorsal, seront testés de manière exhaustive en environnement réaliste sur le banc test existant du LLR basé sur un châssis microTCA (« *micro Telecommunications Computing Architecture* »). Ce banc test (**Figure 7**) contient plusieurs cartes MP7 (« *Master Processor Virtex-7* ») de l'Imperial College communiquant entre elles via un panneau de brassage optique. Il servira à émuler les différentes parties du futur chemin de déclenchement.

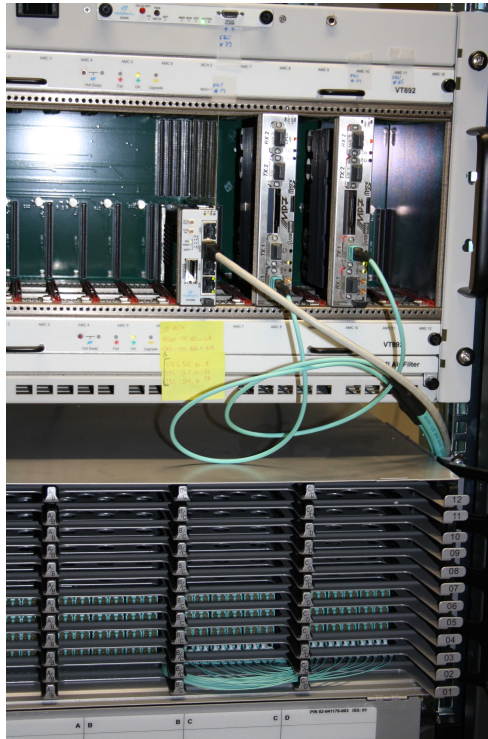
Reconstruction et Flux de Particules :

La très haute granularité, dans les directions longitudinale et transverse, couplée à l'information temporelle, offre des possibilités innovantes pour séparer les signaux d'intérêt des bruits de fond ainsi que pour lutter contre l'empilement dantesque attendu pour HL-LHC (près de 200 collisions additionnelles par croisement de faisceau). HGCAL verra les particules et mesurera leurs propriétés comme aucun

autre détecteur ne l'a fait en physique des hautes énergies. Mais si le potentiel est évident, le traitement efficace et rapide d'une telle quantité d'information, polluée par le PU, représente des défis considérables, tant sur le plan software que hardware.

Figure 7 :

Banc de tests au LLR
avec châssis microTCA
et cartes MP7



La collaboration CMS utilise actuellement la technique dite de « flux de particules » (PFLOW) afin de combiner de manière optimale l'ensemble des sous-détecteurs et d'améliorer ainsi la résolution en énergie ou impulsion des objets. La très haute granularité de HGCal est un atout essentiel pour séparer au mieux les particules dans un algorithme PFLOW.

Le LLR a conçu la reconstruction des électrons dans CMS et a joué un rôle moteur dans la reconstruction des taus et le développement du PFLOW. Cette expertise reconnue a déjà été mise à profit lors des premiers développements publiés en 2015 dans le Technical Proposal. Des premiers résultats prometteurs pour les électrons ont notamment été obtenus.

Dans les années à venir, le LLR poursuivra ses efforts, prenant en charge la reconstruction des électrons et des taus, et participera au développement du PFLOW pour HGCal. La conception d'algorithmes puissants et innovants ne saurait être suffisante. Ils ne pourront être réellement mis en œuvre que si de nouvelles techniques, de nouvelles manières de travailler sont déployées de concert : une meilleure utilisation des processeurs, l'examen de la parallélisation sur plusieurs CPUs (« *central processing units* ») ainsi que sur des GPUs (« *graphics processing units* »), voire des FPGA. Ici aussi, le LLR possède une expertise importante, déjà mise à profit avec succès pour le calcul d'intégrales dans le cadre de la technique dite des « *Éléments de Matrice* » pour mesurer les propriétés du boson de Higgs.

Engagements pour le projet Trajectographe (IPNL, IPHC)

État de l'art

Le futur trajectographe de CMS, dont la structure est représentée sur la [Figure 8](#), devra répondre aux défis complexes du HL-LHC. Pour ce faire, il sera plus précis que le détecteur actuel (meilleure granularité, moins de matière traversée), et ses données seront utilisées dès le premier niveau du système de déclenchement, à la fréquence de 40MHz.

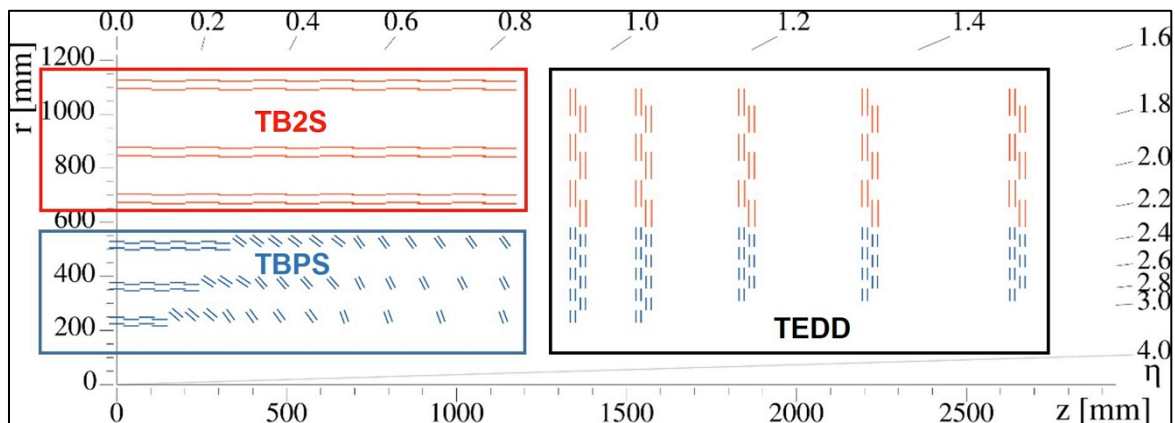


Figure 8 : Vue transversale du futur trajectographe de CMS.

L'IPNL et l'IPHC, forts de leur expertise acquise lors de la construction du détecteur actuel, sont naturellement impliqués sur ces deux aspects, via le design des supports des bouchons (TEDD) et le développement de la chaîne d'acquisition et du système de déclenchement.

Réalisations techniques

Mécanique des bouchons du trajectographe :

Par rapport au détecteur actuel, les structures de support des modules de détection seront entièrement revues afin de minimiser la quantité de matière traversée. Cela permettra d'optimiser la résolution des paramètres des traces. Un système de refroidissement entièrement nouveau, à base de CO₂ diphasique, sera également mis en place afin de réduire la masse totale du système.

Comme on peut le voir dans la [Figure 8](#), le trajectographe se divisera en trois sous-structures : le tonneau classique (TB2S), le tonneau tilté (TBPS) et les bouchons (TEDD). C'est sur cette dernière partie que l'IPNL est engagé depuis 2013. Pour rappel, l'IPNL a largement contribué à l'élaboration des bouchons du trajectographe actuel : cette activité s'inscrit donc dans une continuité mettant à profit les compétences et l'expertise du laboratoire.

Le principal objectif de la R&D actuelle est l'élaboration des disques du futur trajectographe (Figure 9) via la réalisation des Dees (Figure 10). Chaque disque sera un assemblage de 4 « Dees » sur lesquels une centaine de modules seront installés.

Figure 9 :

Les bouchons du trajectographe de CMS.

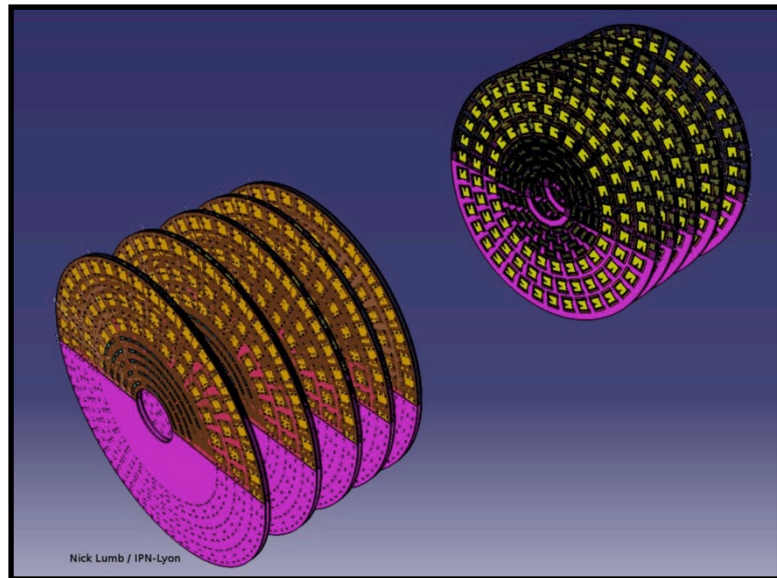
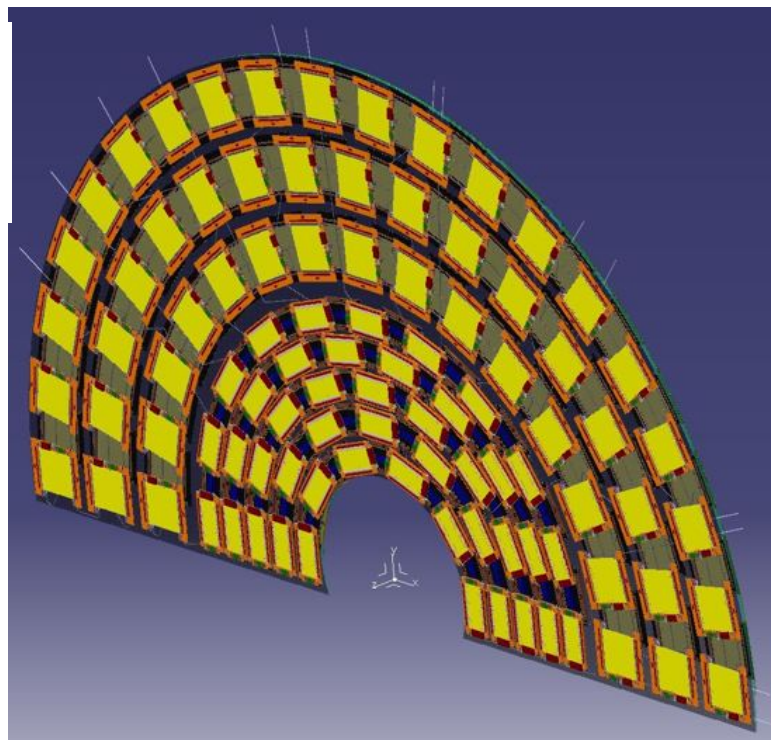


Figure 10 :

Vue d'un Dee (chaque disque est composé de 4 Dees)



Un premier prototype couvrant un septième de la surface globale d'un Dee, et incluant l'infrastructure nécessaire au refroidissement, a été réalisé en 2016 à l'IPNL. Ce prototype, visible dans la **Figure 11**, est actuellement en cours de test. Il est prévu de réaliser un prototype de Dee entier dès cette année.

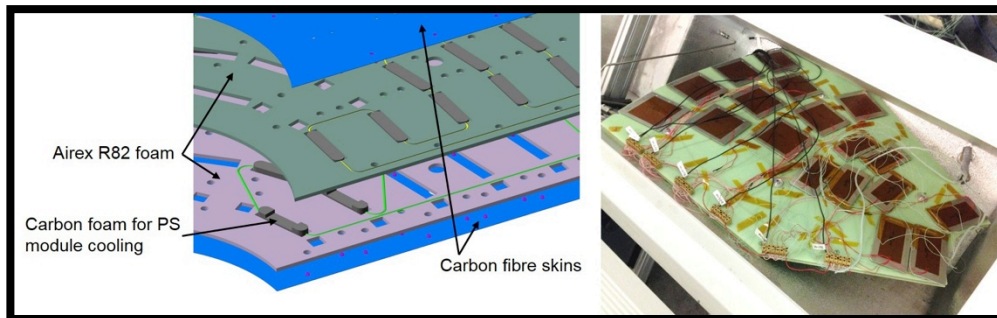


Figure 11 : Structure interne d'un Dee (vue de gauche) et premier prototype (vue de droite)

A moyen terme, l'IPNL souhaite s'engager dans l'assemblage et la qualification des Dees d'un des bouchons du futur détecteur. Une salle d'assemblage est en cours de réalisation à l'IPNL.

Concentrateurs de données :

Le trajectographe actuel de CMS n'étant inclus dans le système de déclenchement qu'à partir du niveau 2 (HLT), ses données ne sont extraites qu'à la fréquence relativement modeste de 100kHz.

Comme on peut le voir sur la **Figure 12**, le cahier des charges du futur trajectographe sera tout autre. La majeure partie du détecteur devra en effet, en plus des données de niveau 2, envoyer également les informations dès le niveau 1, c'est à dire à 40MHz. Cette nouvelle contrainte, absolument nécessaire, induit une refonte totale de la chaîne d'acquisition, mais également du fonctionnement des modules de détection.

Le futur module de détection, également nommé p_T -module, est un élément clé du système. La **Figure 13** représente un des 2 types de modules qui seront installés dans le détecteur (représentés en rouge dans la **Figure 12**) : les modules 2S (pour strips/strips). La structure de base, deux couches de détection en silicium (en jaune sur la figure) séparées de quelques mm, est un principe relativement standard dans les détecteurs de traces actuels. L'électronique de lecture, par contre, est entièrement nouvelle. En effet, comme on peut le voir dans la figure de droite, le signal des 2 couches peut être mis en coïncidence dans le module lui-même. Ce point est fondamental car il est ainsi possible de réduire significativement la quantité de signal à extraire (en pratique environ un ordre de grandeur). Cette première étape n'étant cependant pas suffisante, un second étage de compression est nécessaire pour parvenir à un niveau de données acceptable (quelques dizaines de Tb/s).

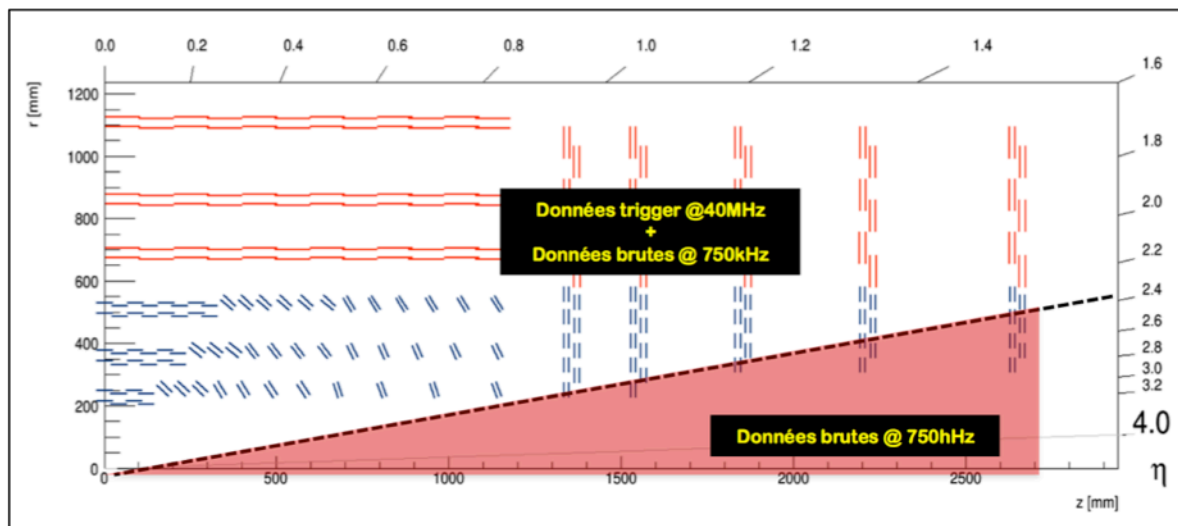


Figure 12 : Extraction des données dans le futur trajectographe.

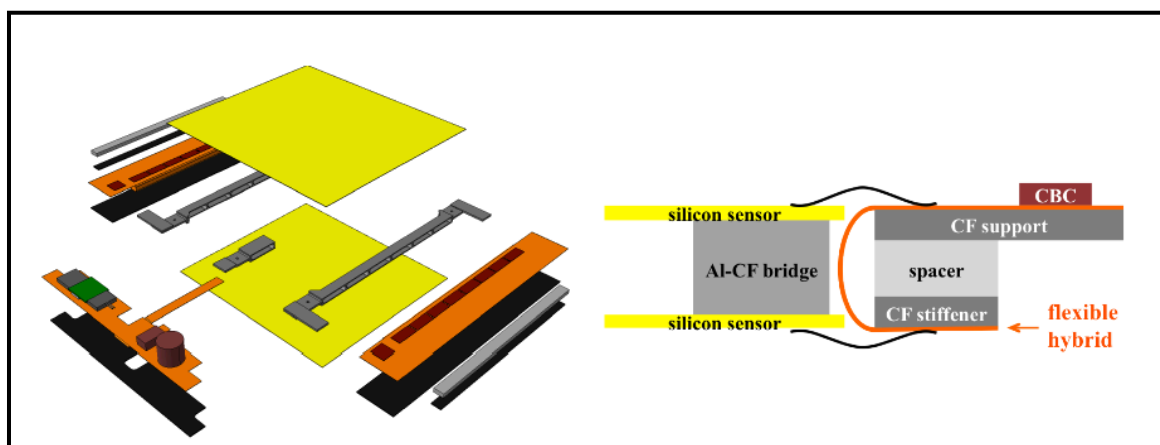


Figure 13 : Vue éclatée d'un pT module.

Ce second étage est réalisé par le circuit concentrateur (CIC). Le CIC est un ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) dont le développement est sous la responsabilité de l'IPNL depuis 2012. C'est un système complexe, qui doit être compatible avec les différents types de modules de détection (selon la position du module dans le détecteur, 2 électroniques de lecture différentes sont prévues) et résistant aux radiations. C'est également un point clé de la chaîne d'acquisition, et notre engagement est de ce fait une responsabilité très importante.

Le principe de fonctionnement du CIC est schématisé dans la **Figure 14**. Le circuit intégré reçoit les informations provenant de 8 chips identiques (CMS Binary Chip, CBC, ou Macro Pixel ASIC, MPA) dans lesquels le signal a été préalablement numérisé et traité (création de « stubs »). Il reformate ces données, les traite et les

groupe en paquets avant de les envoyer vers un autre circuit qui effectue la transmission du signal en-dehors du détecteur.

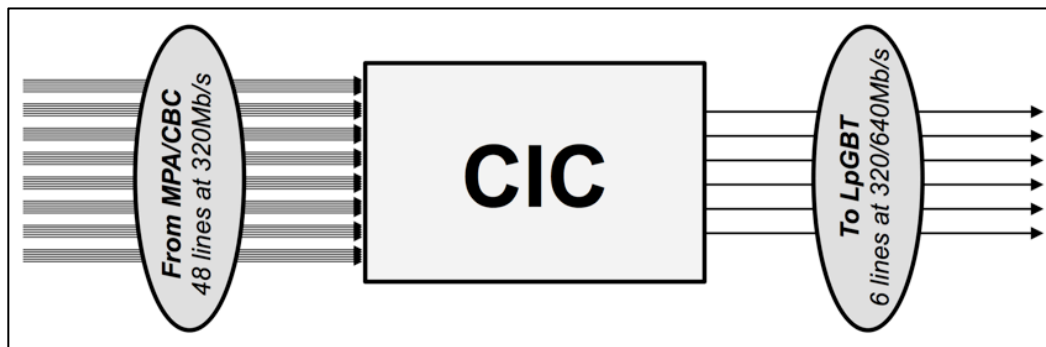


Figure 14 : Principe de fonctionnement du CIC.

Sachant que les pertes au niveau du concentrateur doivent être minimales, le taux de compression minimal requis est simple à obtenir : 8 dans le cas classique (sortie à 320MHz) et 4 pour le mode rapide (sortie à 640MHz) qui devra être utilisé dans les couches internes du détecteur. Afin de réduire la consommation en énergie du chip, celui-ci est réalisé en technologie TSMC 65nm. Il s'agit du premier chip complet réalisé dans cette technologie à l'IN2P3.

Le chip entre désormais dans sa dernière phase de développement. L'ensemble des spécifications a été défini et les différents blocs du projet ont été mis en place et testés, la structure interne du chip est désormais clairement définie, comme en atteste le diagramme-bloc représenté dans la **Figure 15**. La fonderie du premier prototype est prévue pour le début de l'année 2018. Une seconde itération est prévue dès la fin de l'année 2018, afin d'aboutir à une version de pré-production.

Acquisition :

La structuration et les contraintes techniques associées au système d'acquisition de données (DAQ) qui sera dédié au futur trajectographe de CMS dépendent fortement des choix qui sont faits tant pour la conception intrinsèque de ce détecteur que de l'électronique frontale qui y sera implantée. De même, l'architecture de la future acquisition de données devra prendre en compte le concept de reconstruction de traces en temps réel, car ce système de déclenchement sera alimenté directement par les données issues de la DAQ. Le futur système d'acquisition de données devra donc être capable de prendre en compte aussi bien les contraintes issues directement du détecteur (contraintes amont) pour la lecture des données brutes sur le détecteur que les contraintes inhérentes au système de déclenchement (contraintes aval) qu'il faudra alimenter de façon compatible avec les besoins de ce sous-système.

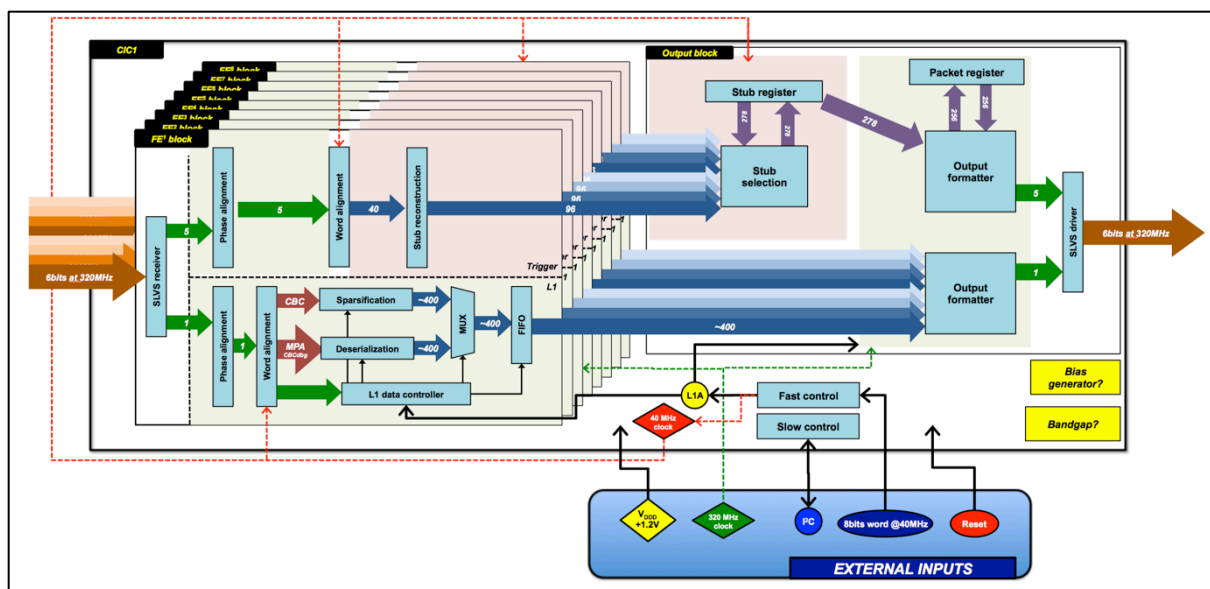


Figure 15 : Diagramme bloc du concentrateur.

Comme nous l'avons vu plus haut, la lecture de l'ensemble des données du trajectographe à 40 MHz exigerait une bande passante trop élevée, alors que seules les traces d'impulsion transverse au-delà de quelques GeV sont utiles pour le système de déclenchement. Afin de sélectionner les impacts associés à ces traces, nous avons vu qu'une électronique de lecture entièrement nouvelle devait être mise en œuvre.

Selon leur position dans le détecteur, les signaux seront reconstruits par deux types de circuits différents : CBC pour les couches externes et MPA pour les couches internes. Le CIC sera le dénominateur commun de ces 2 circuits, car il procédera à une première mise en forme partielle des données. Le jeu de données résultant devra être lu par le système d'acquisition, pour chaque module, à travers un lien optique haut débit (4.8 Gb/s) piloté du côté des modules par un composant dédié, le « *low-power GigaBit Transceiver* » (LpGBT).

Du fait de la bande passante requise par cette architecture et du volume de traitements à effectuer de façon synchrone avec l'ensemble du détecteur (40 MHz), le choix technologique pour les composants matériels d'acquisition de données s'est porté sur une électronique ATCA. Les cartes électroniques composant ce système de DAQ sont désignées dans la collaboration par l'acronyme « cartes DTC » (Data Trigger Control, **Figure 16**).

La conception de ces cartes DTC (routage et pré-production) sera assurée par le CERN, avec une mise à disposition des premiers prototypes aux équipes engagées dans la conception du firmware et du software du système de DAQ final. Ce schéma de collaboration a déjà été utilisé avec succès depuis 2009 entre l'IPHC et le CERN, pour la conception d'un démonstrateur à base de cartes « *Gigabit Link Interface Board* » GLIB (avec micro-TCA, Virtex6) dans un premier temps, puis pour la conception de bancs de test à base de cartes FC7 (micro-TCA Virtex7, **Figure 17**)

dans un second temps. Ces développements ont permis, sur la période 2009-2016, de caractériser les premiers prototypes de Pt-modules, aussi bien en laboratoire qu'au cours de nombreux faisceaux test, et de valider les choix d'architecture envisagés (CBC, concentrateur CIC, liens optiques rapides, électronique xTCA), mais ont également permis à l'IPHC d'acquérir un statut d'expert dans la conception de ce type de systèmes.

Sur la période 2009-2016, l'IPHC a été le seul intervenant dans la conception des prototypes et bancs de test relatifs au futur système d'acquisition de données. Début 2017, une nouvelle structuration s'est mise en place au sein de la collaboration. Deux branches d'activité bien différenciées vont être parcourues en parallèle.

En premier lieu, un groupe de travail a été constitué pour continuer à étendre les développements déjà effectués sur cartes FC7, mais avec cette fois-ci plusieurs groupes intervenant dans la conception du firmware et du software nécessaire à l'exploitation de ce type de systèmes. Ces plates-formes auront vocation à être utilisées, hors mise en production sur site, pour toutes les futures activités liées à la conception du trajectographe (test et validation de futurs composants de front end dans leurs différentes versions, test et validation de modules silicium lors de leur réception, utilisation sur sites de production et d'intégration de modules, utilisation en faisceaux test, phases de mise à l'échelle du système d'acquisition de données, tests d'intégration d'une chaîne complète intégrant CIC, LpGBT, Track-Trigger, etc...). L'IPHC est positionné en tant qu'acteur principal dans cette branche d'activité (Figure 18), en ayant récupéré lors de la redistribution des rôles qui a eu lieu début 2017 la responsabilité du développement des principaux blocs firmware qui seront nécessaires à l'exploitation de ces plates-formes micro-TCA sur la période 2017 – 2024.

En second lieu, une autre tâche non encore démarrée va consister à développer l'équivalent de ce qui aura été réalisé pour les cartes FC7 en termes de fonctionnalités software et firmware, mais cette fois-ci pour les plates-formes de production (cartes ATCA DTC). Ces cartes, dont la production incombe au CERN, ne sont pas encore disponibles, même sous forme de prototype, mais l'IPHC est engagé dans le groupe de travail qui participe à la définition fonctionnelle de cette future carte et a déjà exprimé son intérêt pour prendre la maîtrise d'œuvre des développements firmware et software qui y seront associés. Cette tâche couvrira l'intégralité du cycle de vie du système d'acquisition de données allant de l'expression des besoins, qui se traduit dans les faits par la future carte DTC, jusqu'à la mise en production du détecteur et à son exploitation grâce au système d'acquisition de données dans la conception duquel l'IPHC projette de prendre un rôle majeur.

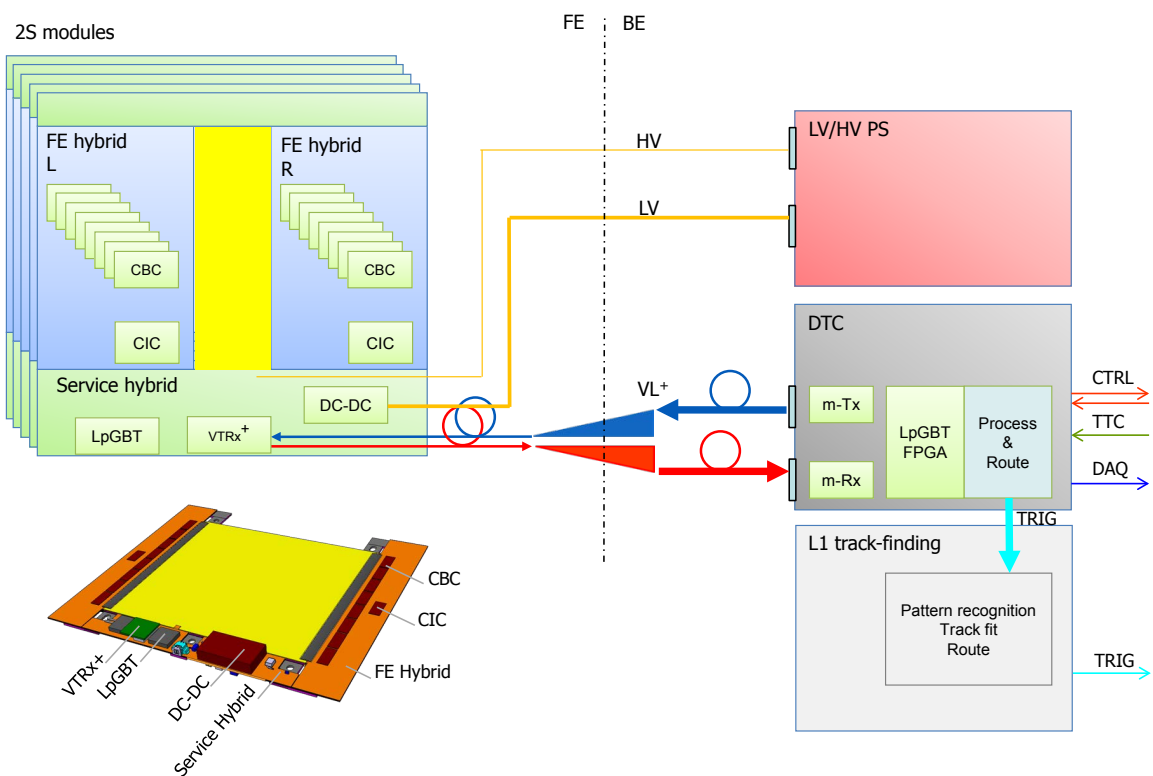


Figure 16 : Vue synthétique de l'architecture globale envisagée à la fois pour l'acquisition de données et le contrôle commande (Data Trigger Control) et la gestion du déclenchement (L1 Tk-Finding) du futur Trajectographe de CMS.

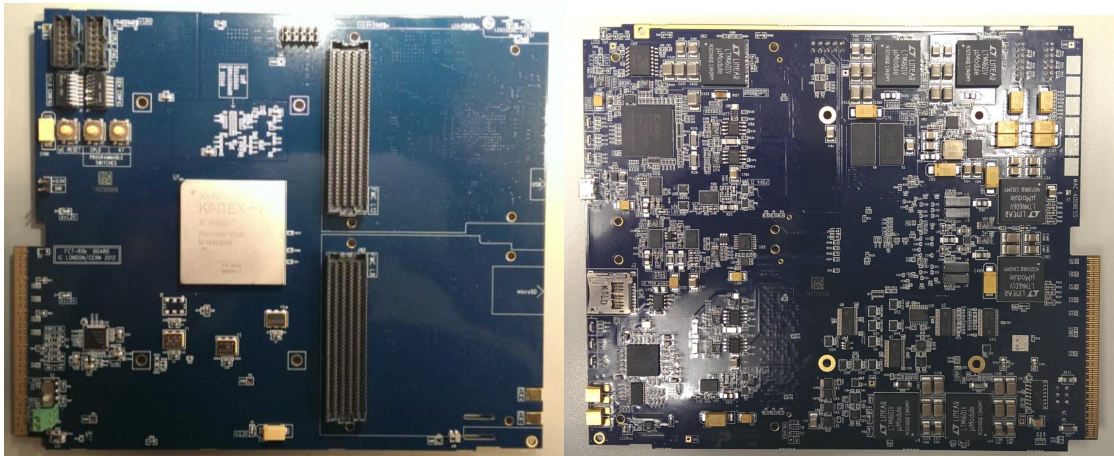


Figure 17 : Carte xTCA FC7, utilisation prévue comme DTC pour tous les bancs de test d'intégration des modules. Forte expertise disponible à l'IPHC sur cette carte suite à son utilisation comme plate-forme de production DAQ dans le cadre de la Phase 1 de CMS.

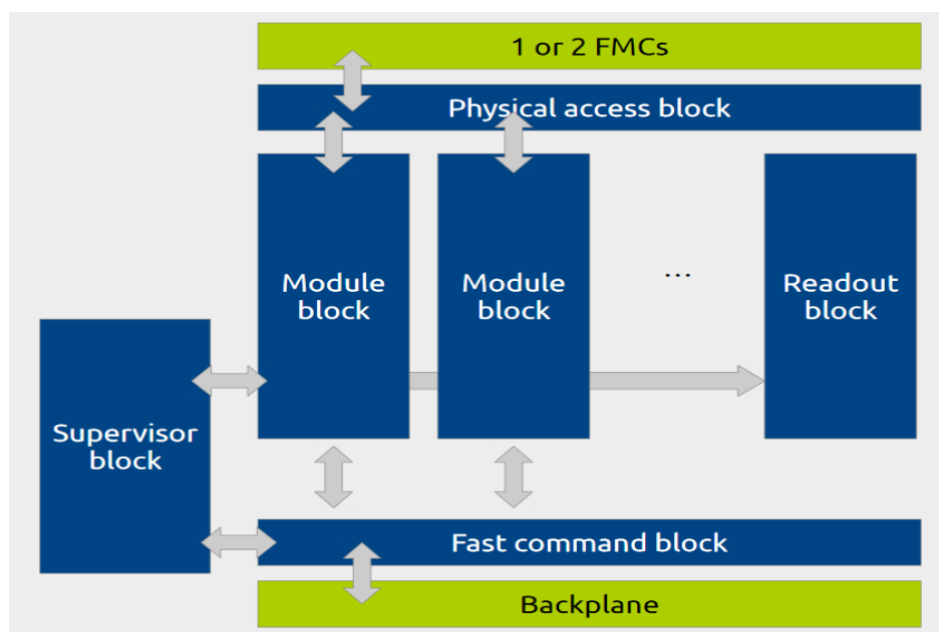


Figure 18 : Vue conceptuelle du partage des développements firmware tel qu'établi au sein de la collaboration. L'IPHC s'est vu attribuer la maîtrise d'œuvre des blocs « Module » et « Readout ».

Déclenchement :

Une fois extraites, les données sont transmises au système de reconstruction de traces rapides. Le défi à relever est le suivant : comment traiter ~50Tb de données en moins de 5 microsecondes. Ce défi peut se diviser en 2 parties relativement distinctes : distribution de données et reconstruction des traces.

Concernant la distribution des données, il est en effet tout à fait inenvisageable d'acheminer un tel flux de données dans une seule carte de traitement. On divise donc l'information en temps et en espace (multiplexage). Le système final est ainsi composé d'un certain nombre de cartes qui traitent chacune les informations d'une partie du détecteur (diminution de la quantité de données à traiter) pour une partie des collisions (augmentation du temps disponible pour le traitement).

Une fois cette étape effectuée, les traces contenues dans l'échantillon de données sont reconstruites par un système dédié. C'est sur ce domaine que la contribution de l'IPNL se concentre.

La reconstruction de traces est un processus en 2 étapes : identification des candidats traces (pattern recognition) et calcul des paramètres des traces (fit). Parmi ces 2 étapes, la première est la plus complexe à réaliser dans une latence très courte. Les méthodes conventionnelles étant en effet très sensibles à l'empilement, il est nécessaire de privilégier les méthodes dont le temps de calcul évolue linéairement avec le nombre de stubs. La méthode retenue par l'IPNL se base sur

l'utilisation de mémoires associatives. Le principe de fonctionnement de cette technique est schématisé dans la **Figure 19**.

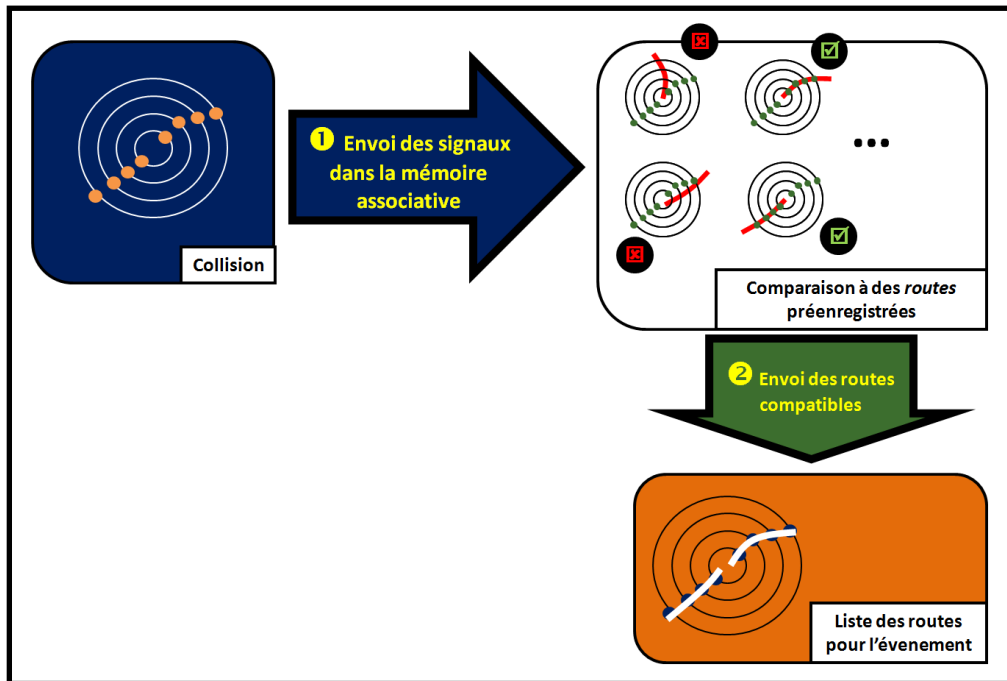


Figure 19 : Principe de fonctionnement des mémoires associatives

Les signaux sont comparés à une banque de traces préenregistrées dans un chip dédié. Lorsqu'une trace est entièrement activée, le chip envoie l'information vers le système effectuant le calcul des paramètres de la trace.

Cette technique, qui a déjà été utilisée dans d'autres détecteurs, présente de nombreux avantages : elle est rapide, peu sensible à l'empilement et très flexible (le chip contenant les candidats traces peut être reconfiguré à tout moment).

L'activité du groupe s'est d'abord concentrée sur l'estimation des performances de cette méthode dans le contexte du HL-LHC. Une simulation complète, incluant une émulation bit-à-bit des chips AM, a été développée et intégrée à l'environnement de simulation officiel de CMS.

De nombreuses optimisations ont été (et sont encore) effectuées grâce à cet environnement de simulation. Un algorithme spécifique de post-traitement (TC builder) a également été développé, afin d'optimiser la pureté des données transmises au fit. La **Figure 20** montre le déroulement de cette procédure sur un événement type au HL-LHC (paire de tops et empilement de 200). La puissance du filtrage des mémoires associatives est clairement mise en évidence : 90% du bruit est éliminé.

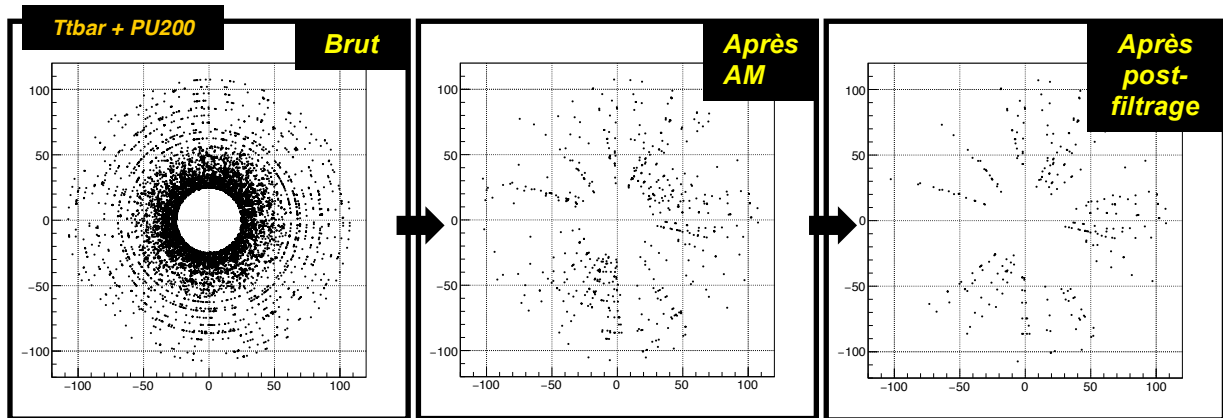


Figure 20 : Fonctionnement des mémoires associatives sur un événement HL-LHC typique

Afin de poursuivre le développement de cette approche de manière plus concrète, et en particulier la mise au point d'une nouvelle génération de chips adaptés au HL-LHC, le groupe CMS de l'IPNL, conjointement avec le groupe ATLAS du LPNHE, a obtenu en 2014 un financement ANR¹. Grâce à ce financement, un premier démonstrateur a pu être développé à l'IPNL. Ce dispositif est représenté dans la **Figure 21**.

Ce système se compose d'une carte d'évaluation (*Xilinx KCU105*) et d'une mezzanine, embarquant un chip AM actuel, réalisée à l'IPNL. Un firmware permettant d'envoyer des stubs et de récupérer des proto-traces (après le post filtrage) a été développé et testé, également à l'IPNL.

Ce banc de test est totalement opérationnel depuis la fin de l'année 2016. L'accord entre notre simulation et le banc de test est parfait, ce qui permet ainsi de valider toutes les estimations de performances effectuées jusqu'à présent. La latence totale mesurée est également en accord avec nos estimations. Ce système, qui comporte un chip AM non optimal, permet déjà de traiter des événements typiques du HL-LHC en moins de 10 microsecondes.

La prochaine étape du projet sera l'étude des performances du premier chip de nouvelle génération, prévue à l'automne 2017. Ce nouvel ASIC permettra d'atteindre les performances de latence requises.

¹ <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-13-BS05-0011>

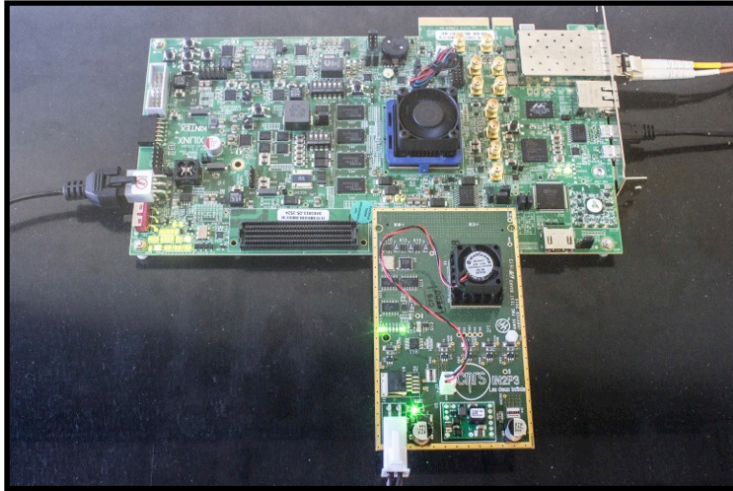


Figure 21 : Banc de test pour l'étude de la reconstruction de traces en temps réel développé à l'IPNL.

GRPCs pour le détecteur à Muons (IPNL)

État de l'art

Les détecteurs appelés Resistive Plate Chambers (RPC) sont utilisés dans les stations à Muons dans l'expérience CMS. Ils contribuent au système de déclenchement de Muon grâce à leur réponse rapide. Cette caractéristique permet également d'associer les muons détectés au bon croisement des paquets de protons. Les RPCs viennent en complément des autres détecteurs à Muons qui sont les Tubes à Dérives (DT) dans le tonneau et les Chambres à Strips de Carbone (CSC) dans les bouchons, en jouant un rôle de redondance extrêmement utile lorsqu'on prend en compte le temps de vie des détecteurs installés dans les années 90s.

Les RPCs sont présents dans toutes les stations à Muons sauf dans celles à grand η . Dans ces stations, le taux de particules peut atteindre quelques centaines de Hz/cm^2 . Ce taux est la limite que les RPCs utilisés dans CMS peuvent supporter. Cette absence priverait le détecteur CMS d'un outil important lors de la phase de HL-LHC. En effet, le taux de particules dans les stations à grand η sera sensiblement augmenté, introduisant des ambiguïtés dans la construction des muons par les CSCs. Les RPCs seraient d'autant plus utiles que la mesure du temps qu'ils fournissent permet de réduire la contribution du bruit en utilisant la coïncidence temporelle des impacts (« hits ») enregistrés dans les différentes stations. Cela permettrait de réduire la quantité des données et par conséquent, d'améliorer les performances du système de déclenchement à Muons.

Des avancées technologiques récentes ont permis d'augmenter l'efficacité de détection des RPC à fort taux de particules. Elles concernent la mise en œuvre de nouveaux matériaux comme électrodes, possédant des résistivités électriques dans la gamme $10^9 - 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$, la réduction du volume gazeux entre électrodes ainsi que la diminution de leur épaisseur. Dans ce cadre, un développement mené par le groupe de Lyon a permis de réaliser des détecteurs capables de détecter plusieurs milliers de particules par cm^2 . Fort de ces résultats, le groupe de Lyon, en collaboration avec d'autres groupes internationaux, a proposé d'équiper les stations à grand η avec cette nouvelle génération de détecteurs.

Afin d'exploiter d'une manière optimale l'excellente résolution temporelle que les RPCs fournissent, une nouvelle électronique est nécessaire. Partant d'une expérience commune acquise dans le cadre de la lecture des RPCs du calorimètre Semi Digital Hadronic CALorimeter (SDHCAL), le groupe de Lyon en collaboration avec le groupe OMEGA a entamé le développement d'une électronique de lecture à bas bruit offrant la possibilité d'une mesure temporelle très précise. Les RPCs équipés de cette électronique permettront de fournir un outil puissant pour améliorer les performances du système de déclenchement à Muons et pour enrichir la recherche des particules de type « Heavy Scalar Charged Particles » (HSCP) prévues dans plusieurs modèles au-delà du Modèle Standard.

Réalisations techniques

Les détecteurs :

Le groupe lyonnais a développé depuis quelques années un détecteur de type RPC à grand taux de détection en utilisant des plaques de verre dopé par des composants métalliques. Ce verre, élaboré par les collaborateurs de l'université de Tsinghua en Chine, possède une résistivité électrique trois ordres de grandeur plus faible que le verre standard tout en ayant les mêmes qualités de surface que ce dernier.

Plusieurs détecteurs d'une taille de 30 cm X 30 cm de type « single gap » (Figure 22) ont été fabriqués et testés à l'aide de l'électronique de lecture développée pour le projet SDHCAL d'ILC sur des faisceaux intenses d'électrons (DESY) et de muons (CERN-SPS). Des efficacités supérieures à 80% ont été observées à des taux de particules de quelques milliers de Hz/cm² (Figure 23).

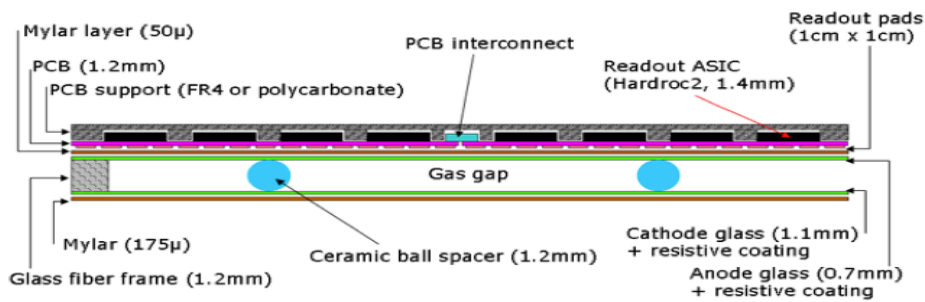


Figure 22 : Structure d'une chambre RPC de type « single gap ».

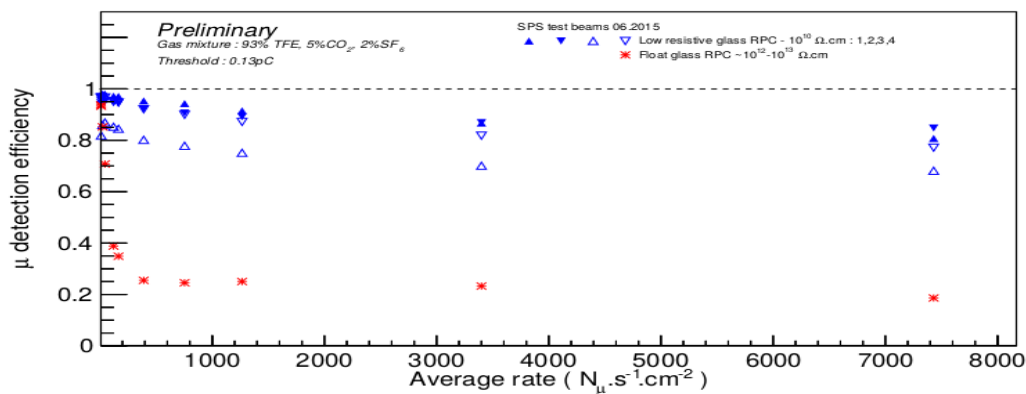


Figure 23 : Efficacité des chambres RPCs de type single gap en fonction du taux de particules. Les points en rouge représentent l'efficacité d'une chambre faite avec des électrodes en verre standard. Les autres chambres sont réalisées avec un verre dopé.

En raison de la taille limitée des plaques de verre développées par l'université de Tsinghua et afin de construire de grandes chambres (longueur de 1.7 m et largeur maximale de 1.2 m) comme celles prévues dans les stations RE3/2 et RE4/1 (« R »

comme Ring, « E » comme End-Cap, avec les numéros de station croissant avec la distance au point d'interaction), le groupe de Lyon a développé une technique d'assemblage mécanique permettant de construire un détecteur RPC possédant deux étages (gap) séparés par une carte « *Printed Circuit Board* » (PCB) à pistes comme celle utilisée dans les chambres RPCs actuelles de CMS. Les pistes lues par l'électronique de CMS ont été exposées à un taux d'irradiation très élevé représentant plus de 2 kHz/cm² sur toute la surface. Pour mesurer simultanément son efficacité en présence de tel environnement, un faisceau de muons a été utilisé. Les résultats présentés dans la **Figure 24** montrent qu'une efficacité de plus de 80% est obtenue pour des taux de 3000 Hz/cm². Il est important de noter ici que l'électronique actuelle de CMS est limitée en ce qui concerne le seuil. Un taux de bruit élevé est constaté en réduisant le seuil pour pouvoir lire les nouveaux détecteurs associés à des charges d'avalanche beaucoup plus faibles que celles produites dans les chambres RPC actuelles de CMS.

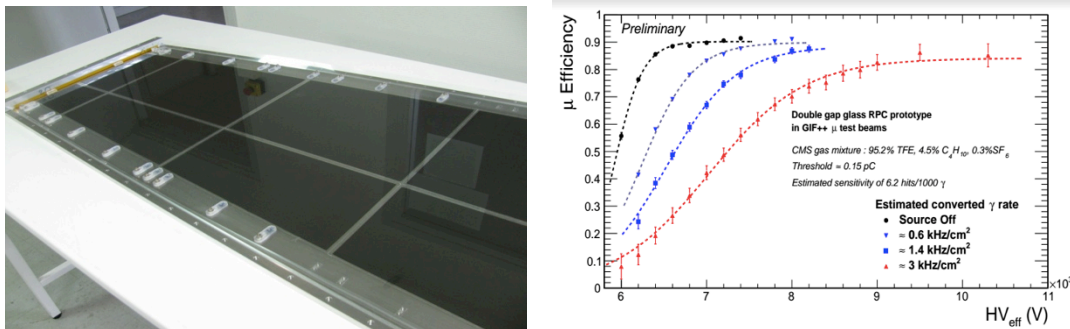


Figure 24 : Gauche : une chambre de type « 2 gaps » réalisée en assemblant mécaniquement les plaques de verre dopé. Droite : l'efficacité de la chambre exposée à différents taux d'irradiation au GIF++.

Compte tenu de la réévaluation du taux de particules dans les deux stations RE3/1 et RE4/1 montrant un taux de particules de 600 Hz/cm² et compte tenu du fait que les chambres RPC à deux gaps avec des électrodes à Bakélite peuvent atteindre ce taux en réduisant le volume du gaz et en rendant moins épaisses les plaques, le groupe RPC de CMS a opté pour les RPCs à Bakélite comme détecteur de base tout en mettant comme solution alternative des RPCs de type multi-gap utilisant le verre dopé. Cette alternative offre plus de compacité et surtout une mesure temporelle beaucoup plus précise. Le groupe de Lyon continue une collaboration étroite avec le groupe chinois de Tsinghua pour compléter le développement et la réalisation d'un détecteur multi-gap de grande taille.

Développement de l'électronique de lecture :

L'exploitation de la résolution temporelle dans les stations à Muons du système actuel de CMS est loin d'être optimale. Le groupe de Lyon a proposé d'équiper les nouvelles chambres RPC avec une électronique à bas bruit mais fournissant une mesure temporelle extrêmement précise. Une utilisation optimale du timing permet

certainement d'améliorer les performances du système de déclenchement à Muons et celui des HSCP mais elle permet également, quelle que soit la technologie 2-gap ou multi-gap des chambres RPC adoptée, de fournir une information à deux dimensions des impacts des particules chargées traversant le détecteur. En effet, en remplaçant la segmentation des pistes en η telle qu'elle est actuellement utilisée dans les chambres RPC de CMS par des pistes courant tout au long des chambres (Figure 25, gauche) avec les deux extrémités de chaque piste lues par deux voies électroniques différentes, la mesure du temps d'arrivée du signal dans les deux voies permet de déterminer la position en η avec une précision de l'ordre du centimètre. Cela constitue une amélioration considérable sur la localisation tout en réduisant le nombre de canaux électroniques par un facteur 5/2. Cette amélioration permet aussi de réduire les possibles ambiguïtés dont souffrent les chambres CSC lorsque plusieurs particules traversent la même chambre.

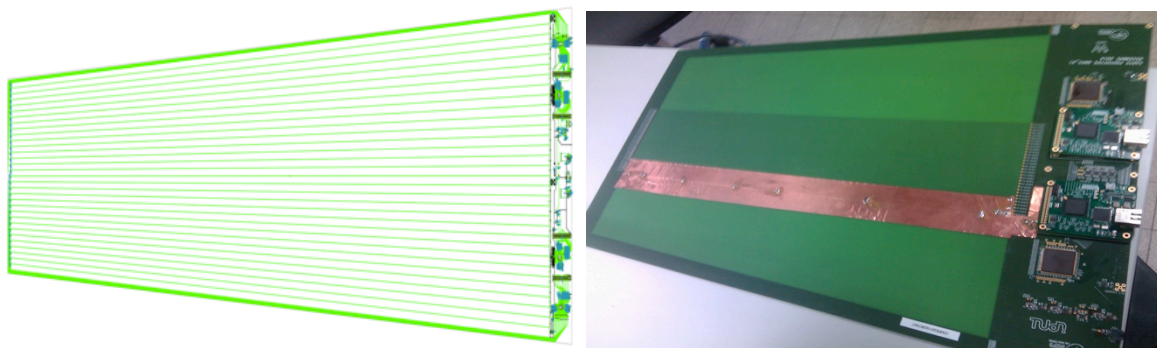


Figure 25 : Gauche : schéma d'une carte à strips permettant la lecture des deux bouts des strips à l'aide des ASICs PETIROC et des TDC sur FPGA. Droite : la carte réalisée.

Pour exploiter cette caractéristique remarquable des chambres RPC, le groupe de Lyon a développé une carte électronique à pistes (largeur de 4 mm) lue des deux côtés grâce à un ASIC à 32 voies, développée par le groupe OMEGA, utilisant la technologie SiGe 350 nm. L'ASIC, appelé PETIROC, est doté d'un préamplificateur permettant une résolution temporelle de quelques dizaines de ps. Sur la carte à pistes, des TDC sur FPGA développés par le groupe de Tsinghua sont associés aux ASICs pour mesurer avec une précision de 10 ps le temps d'arrivée du signal. La carte (Figure 25, droit) a été testée en l'insérant dans deux gaps RPC. Une résolution spatiale de 2 cm a été obtenue grâce à la mesure de différence de temps d'arrivée d'un signal produit par le passage d'un cosmique et dont la résolution temporelle est meilleure que 200 ps (Figure 26). Ce premier résultat sera grandement amélioré prochainement en optimisant le dispositif expérimental.

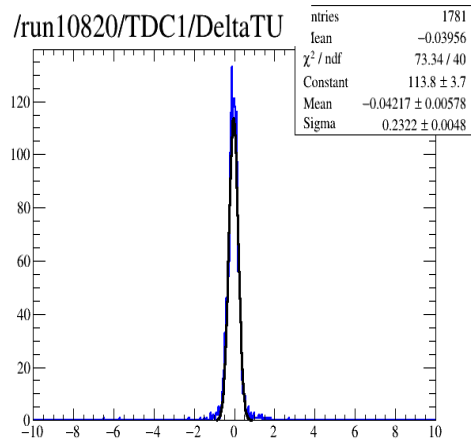
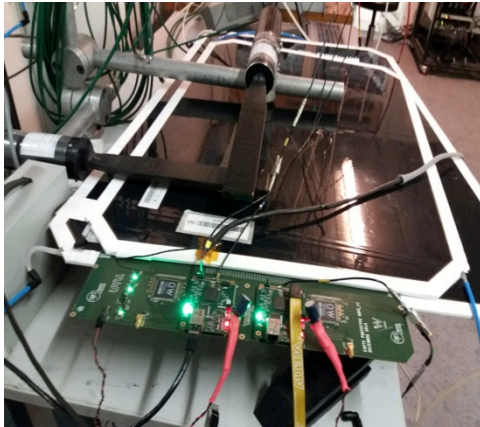


Figure 26 : Gauche : la carte testée entre deux gaps. Droite : la résolution temporelle sur la différence $T_2 - T_1$, correspondant à une résolution spatiale meilleure que 2 cm.

Avec la validation de ce principe, adopté comme système de lecture de base des nouvelles chambres RPC par la collaboration CMS, les groupes français ont commencé une deuxième phase d'activités R&D. Tout d'abord, une carte aussi grande que les détecteurs RPCs est en train d'être développée tout en tenant compte des contraintes industrielles de fabrication. En parallèle, les deux groupes, IPNL et OMEGA, travaillent sur le développement d'un nouvel ASIC à 64 voies utilisant une technologie de type TSMC 130 nm résistante aux irradiations. Dans le nouvel ASIC, chaque voie sera équipée d'un nouveau type de TDC possédant une meilleure résolution temporelle avec une consommation réduite. Ce développement fera l'objet d'une thèse instrumentale au sein du groupe lyonnais.

Ainsi la carte électronique proposée par les groupes français pour lire les détecteurs RPCs des quatre stations Muons à grand η ($1.6 < \eta < 2.4$) sera composée d'une partie simple faite d'un PCB placé entre les deux « gaps » du détecteur. Ce PCB portera 192 pistes identiques. Ces pistes seront connectées aux ASICs grâce à des câbles coaxiaux de même impédance que celle des pistes. Ces câbles transmettront le signal aux six ASICs à travers des petits circuits garantissant une adaptation de leur impédance à celle des voies d'entrée de chaque canal. Ces circuits ainsi que les ASICs seront placés sur une mezzanine qui sera positionnée sur la cassette. La mezzanine accueillera également un FPGA qui aura pour tâche de collecter les données et de les transmettre à l'aide d'un protocole de type LpGBT vers les cartes d'acquisition.

Le groupe de l'IPNL, en collaboration avec les autres groupes RPC de CMS, a également commencé à concevoir des cartes d'acquisition avec comme objectif la mise en forme de l'information des RPC et plus particulièrement l'information temporelle, afin de la transmettre au système de déclenchement. Pour ce faire, une carte permettant d'accueillir les données venant des quatre stations (les stations RE31 et RE4/1 de chaque bouchon) sera développée. Cette carte permettra de déterminer la position spatiale des impacts des particules (« hits ») et leur temps d'arrivée par rapport au croisement des faisceaux. Elle sélectionnera les hits à transmettre au système de déclenchement selon des critères basés sur des coïncidences spatiales

et temporelles. Un schéma global du système de lecture des RPCs et de l'électronique d'acquisition qui lui est associée est montré dans la **Figure 27**.

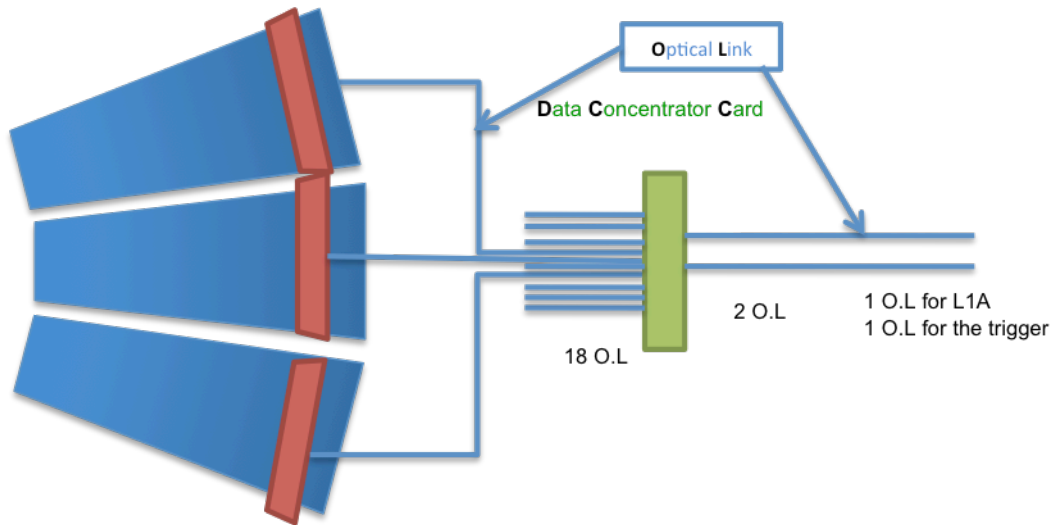


Figure 27 : Schéma du système d'acquisition des chambres RPCs des stations RE31 et RE41.

Pour finir, l'intérêt du groupe lyonnais ne s'arrête pas aux aspects techniques : une étude sur les perspectives au HL-LHC de la recherche des HSCP sera menée par un étudiant en thèse recruté cette année dans le cadre du contrat d'attractivité de l'université Lyon1 réservé aux meilleurs dossiers de candidats étrangers.

Ressources et Moyens

La proposition de financement de la contribution CNRS à la mise à niveau du détecteur CMS pour le HL-LHC, la Phase 2 au CERN, a été présentée au Haut Conseil des Très Grandes Infrastructures de Recherche (HC-TGIR) à l'automne 2016. Un avis favorable écrit a été rendu par le HC-TGIR en novembre 2016 avec les conclusions suivantes : « *En premier lieu, le Haut Conseil considère globalement le programme Haute Luminosité comme entièrement justifié à la fois du point de vue scientifique et du point de vue technique et l'approuve donc sans réserve. Les équipes françaises ont des compétences dans le domaine des détecteurs très reconnues au plan international et les contributions qu'elles proposent sont essentielles au programme de jeunesse des détecteurs. Les demandes de financement formulées sont clairement justifiées. Elles permettront à la France de jouer un rôle international très visible dans le projet.* » La description des besoins en ressources humaines et financières présentée ici est conforme au projet tel que présenté au HC-TIGR. Cela représente en argent courant pour CMS-IN2P3 pour la période 2017-2026 une demande totale pour la Phase 2 de 17 300 k€ comprenant les contributions de construction « core » (10 300 k€), « non-core » (3 500 k€), des postes en CDD (2 800 k€) et des aléas (700 k€). Après consolidation pour tenir compte de l'inflation sur une période de 10 ans selon le modèle de la Direction de la stratégie financière et de l'immobilier (DSFIM) du CNRS, cela correspond à une demande totale de 19 876 k€.

Une répartition par sous-projets est donnée dans le **Tableau 1**. A cela s'ajoute une demande de 850 k€ pour compléter les activités de R&D de CMS en vue de la publication de « Technical Design Reports » avant le printemps 2018. Cette somme est mentionnée dans le tableau ci-dessous.

2017-2026	Sous-détecteur	Core (M€)	Non-core (M€)	CDD (M€)	Aléas (M€)	Total (M€)
CMS	Calorimètre HGAL	4,729	1,760	0,770	0,330	7,588
	Trajectographe	5,169	1,925	1,870	0,330	9,293
	Muons RPC	0,550	0,165	0,440	0,110	1,265
	Fonds Communs	0,880	0,000	0,000	0,000	0,880
	Total CMS=	11,328	3,849	3,079	0,770	19,026
R&D phase 2 (2017-2018)						0,850
Grand Total						19,876

Tableau 1 : Demande de financement pour la contribution du CNRS à la mise à niveau du détecteur CMS pour le HL-LHC sur la période 2017-2026.

Les laboratoires CMS du CNRS/IN2P3² font partie des précurseurs pour les travaux d'Upgrade CMS dits de Phase 2. Des programmes de R&D très en amont existent ainsi à l'IN2P3 depuis 2009. A partir de 2013, les investissements sont devenus

² Le Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR), Ecole Polytechnique ; l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL), Université Claude Bernard – Lyon 1 ; l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC), Université de Strasbourg.

particulièrement conséquents et l'IN2P3 a ainsi assuré la quasi-intégralité des efforts de R&D en France sur la période 2013-2016. Pour la Phase 2, les demandes reposent donc sur un savoir-faire et une expertise développée depuis plusieurs années. Les physiciens et ingénieurs de l'IN2P3 sont à l'origine de nombreuses propositions technologiques sur des détecteurs qui ont un impact majeur sur la physique au HL-LHC : on citera notamment pour CMS l'électronique et la mécanique du trajectographe et du calorimètre à l'avant HGAL. Le passage de la phase de R&D à la phase de construction en 2019-2020 s'appuie sur un réseau d'entreprises, notamment françaises, avec lesquelles nous travaillons depuis 2013.

Au cours des prochaines années, une part des ressources CMS françaises doit rester mobilisée pour les prises de données et analyses de Phase 1. Néanmoins, les groupes CMS de l'IN2P3 ont su dégager des ressources au sein de groupes actuels et développer l'expertise nécessaire pour la R&D et les projets de réalisation pour la Phase 2 à HL-LHC. Il sera important pour l'IN2P3 de maintenir ce niveau de ressources dédiées aux upgrades en prévoyant les recrutements lorsque nécessaire.

Par ailleurs, le projet présenté pour financement via le HC-TGIR comprend des moyens en ressources humaines sur CDD essentiels pour la réussite des projets et l'impact des groupes français.

Pour HGAL, cela comprend 5 années de physiciens post-doctorants et 6 années d'ingénieurs en CDD pour HGAL sur la période 2017-2026, dont à très court terme, pour l'électronique dorsale de déclenchement, un(e) ingénieur(e) électronicien(ne) en CDD au LLR qui se verra confier la réalisation de blocs fonctionnels algorithmiques en électronique numérique pouvant être intégrés dans des circuits intégrés spécifiques (ASIC) ou programmables (FPGA). Ces blocs décrits en langage HDL (Hardware Description Language), simulés et synthétisables, correspondent à des algorithmes de reconstruction à concevoir en collaboration avec des physiciens.

Pour le trajectographe cela comprend, sur la période 2017-2026, 10 années de physiciens post-doctorants répartis entre les activités Trajectographe, Track-Trigger (IPNL) et DAQ (IPHC), ainsi que 16 années d'ingénieurs en CDD.

Pour la partie DAQ, des post-doctorant(es) travailleront entre autres à la caractérisation de la réponse des futurs modules du trajectographe Phase 2, à la validation du système d'acquisition aussi bien à l'IPHC que sur divers faisceaux-tests, puis pour les pré-productions, à la production et l'installation du nouveau trajectographe. Côté ingénieur, un besoin à très court terme pour l'IPHC concerne un CDD ingénieur(e) (BAP-C) pour l'étude et la conception de systèmes de contrôle et d'acquisition, faisant intervenir de l'électronique numérique rapide et des composants programmables (FPGA), ainsi que l'élaboration des architectures complexes au sein de FPGA de génération assez récente (Xilinx Virtex 6 et Kintex 7) et le développement du firmware associé (VHDL). Suivra la participation au montage de bancs de test et la participation au suivi de la réalisation externalisée de prototypes et de séries de cartes, à leur réception et à leurs tests.

Pour la partie Trajectographe et Track-Trigger, des CDD Techniciens seront requis sur 4 ans pour le contrôle et le suivi de la production des chips concentrateurs, ainsi que pour 6 ans pour l'assemblage et test des « dees » à l'IPNL, puis l'assemblage du

bouchon complet au CERN. Des CDD ingénieurs interviendront 2 ans sur la mise en place du système de contrôle des chips, et 2 ans sur le développement et la mise en place du système de test des « dees ». Un CDD Chercheur (3 ans) prendra part aux activités du groupe de l'IPNL liées au Track-Trigger de niveau 1.

Enfin, un CDD Chercheur (3 ans) travaillera sur la simulation des RPCs et mettra en place des algorithmes d'optimisation de construction de traces dans les stations de Muons à grand η en partant des coïncidences spatiale et temporelle dans les chambres RPC afin d'améliorer les performances du système de déclenchement de CMS. Il effectuera également des tests sur faisceaux pour valider une partie de ces algorithmes. Selon les arbitrages avec les activités pour le trajectographe, il est espéré un CDD ingénieur (3 ans) pour participer au développement de l'électronique numérique du projet CMS-RPC et plus particulièrement au développement d'une carte de concentration de données issues des détecteurs RPC en vue d'exploiter le timing et la résolution spatiale des nouvelles stations RPC dans le système de déclenchement de Muons.

Conclusions

Le projet HL-LHC a été présenté en 2013 lors d'une session spéciale à la commission européenne et désigné comme la plus haute priorité européenne³. Cette stratégie a été adoptée par le conseil du CERN. Aux Etats-Unis, le plan stratégique pour la physique des particules dans un contexte global⁴ a placé l' « usage du boson de Higgs comme un outil de découverte » au premier rang des priorités. Après plusieurs années d'engagement pour des projets de R&D en vue du HL-LHC avec les ressources existantes et une analyse détaillée des options disponibles, les groupes français de CMS ont présenté à l'automne 2016 une demande détaillée de soutien via le Haut Conseil des Très Grandes Infrastructures de Recherche (HC-TGIR). Cette demande a reçu un accueil favorable.

Nous sommes convaincus que les recherches auprès du LHC puis du HL-LHC offrent des opportunités uniques, profitant largement des installations existantes, pour explorer le nouveau secteur scalaire de la physique, conséquence de la découverte du boson de Higgs, ainsi que les diverses extensions possibles du Modèle Standard.

Nous souhaitons le soutien de l'IN2P3 pour que la France, en tant que pays d'accueil d'un des plus grands instruments de science fondamentale au monde, et contributeur majeur à la découverte du boson de Higgs, s'implique dans ce projet pour les expériences auprès du HL-LHC.

³ <http://council.web.cern.ch/council/en/EuropeanStrategy/esc-e-106.pdf>

⁴ P5 Panel report : http://science.energy.gov/~media/hep/hepap/pdf/May-2014/FINAL_P5_Report_053014.pdf

Annexe 1

Les groupes de CMS à l'IN2P3 comprennent actuellement 69 auteurs-signataires des publications de la collaboration dont un au Centre de Calcul et les autres répartis entre trois principaux laboratoires de physique, l'IPNL (26), le LLR (26), et l'IPHC (15). Ce nombre d'auteurs signataires est à peu près constant depuis quelques années. Il y a actuellement 15 thèses de doctorats actuellement en cours en cette année 2017. La communauté CMS de l'IN2P3 comprend aussi des ingénieurs qui ont une implication plus ou moins forte dans le projet. En incluant les différents ingénieurs qui ont eu des interventions significatives au cours des dernières années, la communauté (actuellement inscrite dans les bases de données de CMS) comprend environ 110 « scientifiques ». Tous et toutes sont concernés directement ou indirectement par la place de la France et l'implication des groupes français dans les Upgrades de Phase 2 de CMS.

Les physicien(ne)s actuellement auteurs-signataires de publications CMS pour les trois principaux laboratoires de physique de l'IN2P3 sont :

Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS-IN2P3, Institut de Physique Nucléaire de Lyon, Villeurbanne, France

S. Beauceron, C. Bernet, G. Boudoul, C.A. Carrillo Montoya, R. Chierici, D. Contardo, B. Courbon, P. Depasse, H. El Mamouni, J. Fay, L. Finco, S. Gascon, M. Gouzevitch, G. Grenier, B. Ille, F. Lagarde, I.B. Laktineh, M. Lethuillier, L. Mirabito, A.L. Pequegnot, S. Perries, A. Popov, V. Sordini, M. Vander Donckt, P. Verdier, S. Viret

Laboratoire Leprince-Ringuet, Ecole polytechnique, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

A. Abdulsalam, I. Antropov, S. Baffioni, F. Beaudette, P. Busson, L. Cadamuro, E. Chapon, C. Charlot, O. Davignon, R. Granier de Cassagnac, M. Jo, S. Lisniak, A. Lobanov, M. Nguyen, C. Ochando, G. Ortona, P. Paganini, P. Pigard, S. Regnard, R. Salerno, Y. Sirois, A.G. Stahl Leiton, T. Strebler, Y. Yilmaz, A. Zabi, A. Zghiche

Université de Strasbourg, CNRS, IPHC UMR 7178, F-67000 Strasbourg, France

J.-L. Agram¹³, J. Andrea, D. Bloch, J.-M. Brom, M. Buttignol, E.C. Chabert, N. Chanon, C. Collard, E. Conte, X. Coubez, J.-C. Fontaine, D. Gelé, U. Goerlach, A.-C. Le Bihan, P. Van Hove

Parmi ceux-ci, certains ont des implications très fortes dans les Upgrades de Phase 2 au niveau international. C'est le cas par exemple de Didier Contardo (IPN Lyon) qui est responsable au plus haut niveau (L1) de CMS de l'ensemble du programme d'Upgrade de Phases 1 et 2 de CMS.

CMS-IN2P3 a su dégager des ressources humaines au sein des laboratoires de l'IN2P3 pour participer aux activités d'Upgrade de Phase 2 de CMS, et ce malgré les lourdes charges que représentent le fonctionnement de l'expérience, les prises de données de Phase1, et les analyses de physique en cours actuellement. Les personnes participants spécifiquement et actuellement aux activités d'Upgrade de Phase 2 dans les quatre laboratoires de l'IN2P3 (l'IPN Lyon, le LLR Palaiseau, OMEGA Palaiseau, et IPHC Strasbourg) sont les suivantes.

IPNL Lyon – Université Lyon 1 :

Physiciens permanents responsables:

Didier **Contardo** (Responsable Upgrade CMS), Imad **Laktineh** (Muons), Sebastien **Viret** (Trajectographe)

Autres physiciens permanents participants à divers degrés:

Laurent **Mirabito** (Muons), Maxime **Gouzevitch** (Muons), Gérald **Grenier** (Muons)

Doctorants :

François **Lagarde** (Muons), Amina **Annagrebah** (Muons, co-tutelle CNRS/IN2P3/MIND)

Ingénieurs participants pour environ 10 FTE équivalents :

1.5 FTE pour la mécanique (bureau d'études conception trajectographe, prototypage des dees, mécanique chambres à muons) ;

5.5 FTE en électronique (concentrateur trajectographe, chaîne d'acquisition de données muons) ;

2.0 FTE en informatique (système de déclenchement du trajectographe, DAQ muons) ;

1.0 FTE pour l'instrumentation (trajectographe)

LLR Palaiseau – École polytechnique (X) :

Physiciens permanents responsables:

Florian **Beaudette** (Reconstruction HGAL et Flux de Particules), Christophe **Ochando** (HGAL mécanique + général), Jean-Baptiste **Sauvan** (HGAL Electronique DAQ et déclenchement), Yves **Sirois** (HGAL Général)

Autres physiciens permanents participants à divers degrés:

Stéphanie **Baffioni** (Déclenchement HGAL), Claude **Charlot** (Reconstruction HGAL et perspectives de physique), Philippe **Busson** (Déclenchement HGAL), Roberto **Salerno** (Reconstruction HGAL et perspectives de physique), Alexandre **Zabi** (Déclenchement HGAL et Tests en Faisceaux), Matthew **Nguyen** (Reconstruction HGAL et Flux de Particules)

Post-doctorants :

Artur **Lobanov** (HGAL Test d'électronique FE, Performances et tests en faisceaux), Giacomo **Ortona** (HGAL Reconstruction et Trigger)

Doctorants :

Jonas **Rembser** (HGICAL déclenchement et primitives de déclenchement), Toni **Sculac** (HGICAL Test d'électronique FE) et Marina **Prvan** (HGICAL Trigger) - Co-tutelles X/FESB Split

Ingénieurs participants pour environ 4 FTE équivalents :

1.5 FTE pour la mécanique sur la durée du projet ;
1.5 FTE en électronique sur la durée du projet ;
1.0 FTE en informatique [calcul parallèle et trigger]

OMEGA Palaiseau – École polytechnique :

6 Ingénieurs participants pour environ 4 FTE équivalents :

Stéphane **Callier**, Christophe **De la Taille**, Pierrick **Dinaucourt**, Frederic **Dulucq**, Ludovic **Raux**, Damien **Thienpont**

IPHC Strasbourg – Université de Strasbourg :

Physiciens permanents responsables :

Nicolas **Chanon** (personne de contact avec le CERN, DAQ électronique, faisceaux tests), Jérémy **Andrea** (faisceaux tests), Daniel **Bloch** (coordinateur IPHC)

Autres physiciens permanents participants à divers degrés:

Jean-Laurent **Agram** (bancs de test), Eric **Chabert** (expertise software)

Post-doctorants :

Vladimir **Cherepanov** (bancs de tests de la DAQ électronique, faisceaux tests)

4 ingénieurs permanents pour environ 3 FTE équivalents :

Christian **Bonnin**, Laurent **Charles**, Laurent **Gross**, Jérôme **Hosselet**, pour la conception, développement et tests du firmware de la DAQ du Trajectographe Phase 2, sur la durée du projet