



**Contribution du CNRS/IN2P3 à l'upgrade d'ATLAS.  
Proposition soumise au Conseil Scientifique de l'IN2P3  
du 21 Juin 2012**

C. Bee, F. Bombard, N. Bousson, P. Breugnon, Y. Coadou, J.-C. Clemens, F.  
Djama, L. Feligioni, D. Fougeron, T. Gastaldi, et al.

► **To cite this version:**

C. Bee, F. Bombard, N. Bousson, P. Breugnon, Y. Coadou, et al.. Contribution du CNRS/IN2P3 à l'upgrade d'ATLAS. Proposition soumise au Conseil Scientifique de l'IN2P3 du 21 Juin 2012. 2012. <in2p3-00833284>

**HAL Id: in2p3-00833284**

**<http://hal.in2p3.fr/in2p3-00833284>**

Submitted on 12 Jun 2013

**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.

15 juin 2012

## **Contribution du CNRS/IN2P3 à l'upgrade d'ATLAS**

### **Proposition soumise au Conseil Scientifique de l'IN2P3 du 21 Juin 2012**

#### **CPPM, Marseille**

C. Bee, F. Bombard, N. Bousson, P. Breugnon, Y. Coadou, J.-C. Clemens, F. Djama, L. Feligioni, D. Fougeron, T. Gastaldi, F. Gensolen, S. Godiot, G. Hallewell, M. Jevaud, F. Hubaut, E. Knoops, E. Le Guirriec, M. Mathieu, C. Meessen, M. Menouni, E. Monnier, S. Muanza, P. Pangaud, P. Pralavorio, F. Riviere, A. Rozanov, M. Talby, S. Tisserant, F. Touchard, L. Vacavant, E. Vigeolas

#### **LAL, Orsay**

C. Arnault, A. Bassalat, S. Binet, D. Breton, C. Bourdarios, J.B. De Vivie De Regie, N. Dinu, L. Duflot, M. Escalier, A. Falou, L. Fayard, D. Fournier, J.-F. Grivaz, S. Henrot-Versille, J. Hrivnac, L. Iconomidou-Fayard, M. Kado, V. Linhart, A. Lounis, N. Makovec, G. Martin-Chassard, L. Poggioli, D. Rousseau, G. Rybkin, J. Schaarschmidt, A.C. Schaffer, N. Seguin-Moreau, S. Simion, R. Tanaka, D. Thienpont, D. Zerwas, Z. Zhang

#### **LAPP, Annecy-Le-Vieux**

J. Ballansat, P. Baudin, A. Bazan, F. Bellachia, N. Berger, S. Cap, P-Y. David, P. Delebecque, M. Delmastro, L. Di Ciaccio, C. Drancourt, N. Dumont-Dayot, S. Elles, L. Fournier, R. Gaglione, N. Geoffroy, C. Goy, T. Hryn'Ova, S. Jezequel, R. Lafaye, N. Letendre, J. Leveque, N. Massol, F. Mehrez, G. Perrot, H. Przysieznik, T. Rambure, E. Sauvan, T. Yildizkaya, J. Tassan-Viol, T. Todorov, G. Vouters, I. Wingerter

#### **LPC, Clermont**

D. Boumediene, R. Bonnefoy, E. Busato, D. Calvet, S. Calvet, R. Chadelas, M. Crouau, F. Daudon, J. Donini, C. Guicheney, D. Lambert, J. Lecoq, D. Pallin, N. Pillet, F. Podlyski, C. Santoni, G. Savinel, X. Soumpholphakdy, F. Vazeille

#### **LPNHE, Paris**

T. Beau, M. Bomben, G. Calderini, J. Chauveau, F. Crescioli, S. De Cecco, F. De Matos, F. Derue, Y. Enari, J-F. Génat, M. Witold Krasny, M. Kuna, D. Lacour, B. Laforge, S. Laplace, D. Laporte, O. Le Dortz, G. Marchiori, I. Nikolic-Audit, J. Ocariz, M. Ridel, L. Roos, P. Schwemling, S. Trincaz-Duvoid, F. Vannucci

#### **LPSC, Grenoble**

S. Albrand, J. Collot, S. Crépe-Renaudin, P-A. Delsart, D. Dzahini, J. Fulachier, L. Gallin-Martel, M-H. Genest, J-H. Hostachy, F. Lambert, F. Ledroit-Guillon, A. Lleres, A. Lucotte, F. Malek, F. Rarbi, J. Stark, B. Trocmé

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Calendrier des upgrades du LHC</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Motivations scientifiques des phases I et II</b>	<b>5</b>
3.1	Physique et conditions . . . . .	5
3.2	L'upgrade du déclenchement du calorimètre . . . . .	6
3.3	L'étude du secteur de Higgs . . . . .	8
3.4	Physique électrofaible et couplages de jauge . . . . .	12
3.5	La physique du quark top . . . . .	13
3.6	La physique au-delà du Modèle Standard . . . . .	15
3.7	Etude de la diffusion des bosons de jauge $V_L V_L (V = W, Z)$ . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Phase 0 : Consolidation et améliorations</b>	<b>17</b>
4.1	Le projet "New Service Quarter Panels" . . . . .	17
4.2	Alimentation des basses tensions du calorimètre à Argon liquide . . . . .	18
4.3	Le système de thermosiphon . . . . .	18
4.4	La couche interne "Insertable B-Layer" . . . . .	19
4.5	Trigger-DAQ . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Upgrade des calorimètres pour la phase I</b>	<b>20</b>
5.1	Amélioration envisagée du système de déclenchement . . . . .	21
5.2	Développements en cours à l'IN2P3 . . . . .	22
5.3	Ressources humaines et financières . . . . .	26
<b>6</b>	<b>R&amp;D Tracking phase II</b>	<b>27</b>
6.1	Schéma global . . . . .	27
6.2	Mécanique et refroidissement pixel . . . . .	28
6.3	Capteurs pixel . . . . .	29
6.4	Électronique pixel et hybridation . . . . .	30
6.5	Services . . . . .	32
6.6	Calendrier . . . . .	33
6.7	Contribution IN2P3 humaine et financière . . . . .	34
6.8	Option de staging pixel upgrade pour la Phase I . . . . .	34
<b>7</b>	<b>Calorimètres pour la Phase II : R&amp;D et construction.</b>	<b>37</b>
7.1	Calorimètre Hadronique : TILECAL . . . . .	37
7.2	Calorimètre Argon Liquide - Phase II . . . . .	43
<b>8</b>	<b>Déclenchement, Grille de calcul, Code et Logiciels</b>	<b>44</b>
8.1	Le système de déclenchement . . . . .	44
8.2	Le calcul scientifique . . . . .	45
8.3	Développement du code d'ATLAS (Core Software) . . . . .	46
8.4	Développement, maintenance et déploiement d'applications . . . . .	47
8.5	Ressources humaines et financières . . . . .	48

<b>9 Contributions à la Phase II et conclusion</b>	<b>50</b>
9.1 Historique des contributions IN2P3 . . . . .	50
9.2 Résumé des coûts de construction pour la Phase II . . . . .	50
9.3 Personnels et Intégration au CERN . . . . .	50
9.4 Conclusions . . . . .	51

# 1 Introduction

Les données accumulées en 2010 et 2011 auprès du LHC (un peu plus de  $5 \text{ fb}^{-1}$  dans ATLAS au total) ont permis une moisson de résultats déjà exceptionnelle : plus de 150 publications et plusieurs centaines de "Notes de Conférence", ainsi que bon nombre de thèses dans les six groupes ATLAS du CNRS/IN2P3.

Ces résultats ont d'abord concerné les processus dominants (section efficace totale, multiplicités, spectres inclusifs de jets), puis la production des bosons de jauge : photons, W et Z, celle du quark top, seul ou en paires, la mesure de processus rares du modèle standard (productions de paires de bosons vecteurs, limites sur les couplages anormaux à trois bosons), et enfin la recherche de processus au-delà du modèle standard (bosons de jauge lourds, particules supersymétriques, ...).

Le point qui a retenu particulièrement l'attention, dans et hors de notre communauté, a été le pas crucial franchi dans la recherche du boson de Higgs du Modèle Standard. Alors que la limite à 114.4 GeV établie par les expériences au LEP n'avait été complétée qu'à la marge par les expériences au Tevatron (exclusion entre 156 et 177 GeV), les expériences ATLAS et CMS au LHC ont chacune séparément permis d'exclure la quasi-totalité du domaine entre 114 et 600 GeV, à l'exception d'une étroite zone autour de 125 GeV où au contraire un excès, pas encore significatif, est apparu dans chacune des deux expériences.

Confirmer ou infirmer que cet excès est la manifestation du boson de Higgs est bien sûr la première priorité d'ATLAS, qui a recommencé à prendre des données en avril 2012, à 8 TeV dans le centre de masse. Si la machine fonctionne efficacement, près de  $5 \text{ fb}^{-1}$  supplémentaires pourraient être disponibles pour ICHEP en juillet, apportant un élément décisif dans cette quête. En 2013 (et la première moitié de 2014), et pour autant que  $15 \text{ fb}^{-1}$  à  $20 \text{ fb}^{-1}$  auront pu être accumulés au cours de l'année en cours, un arrêt important aura lieu, destiné à qualifier la machine pour son énergie nominale de 14 TeV (en pratique probablement plutôt 13 TeV au redémarrage).

Le document présenté décrit brièvement les modifications à effectuer sur le détecteur ATLAS pour les dix ans suivant ce premier arrêt long, et plus en détail, le rôle des équipes du CNRS dans ces améliorations, ainsi que les besoins en personnel technique et en financement qui en découlent. Le planning de la machine est rappelé dans le chapitre 2, et les motivations scientifiques sont argumentées dans le chapitre 3. Les différents projets techniques impliquant fortement le CNRS/IN2P3 pour la préparation de la phase I (jusqu'en 2018) sont détaillés dans les chapitres 4 et 5. La R&D pour la phase II, et les premières indications des besoins financiers pour les constructions correspondantes (jusqu'en 2022), sont présentées dans les chapitres 6 et 7. Les besoins en ressources pour le calcul scientifique sont rappelés dans le chapitre 8, et le chapitre 9 contient un résumé des demandes et une brève conclusion.

## 2 Calendrier des upgrades du LHC

Si les projections effectuées à l'heure actuelle pour l'accroissement de la luminosité instantanée et de la luminosité intégrée du LHC comportent nécessairement une forte part d'incertitude, quel que soit le degré d'optimisme du scénario considéré, la luminosité instantanée devrait atteindre voire être légèrement au-dessus de la valeur de design de  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  aux alentours de 2015-2016. La conséquence sur le potentiel de découverte du LHC est que très rapidement après cette date, le temps caractéristique nécessaire pour doubler la statistique accumulée atteint plusieurs années, réduisant de fait les chances de mettre en évidence rapidement la nouvelle physique si elle ne s'est pas manifestée auparavant, et augmentant rapidement la durée nécessaire pour produire des mesures intéressantes, c'est-à-dire avec une précision significativement meilleure que l'existant. Afin de maintenir le potentiel de découverte et de mesure des expériences, il faut donc accroître la luminosité instantanée du LHC dès les prochaines années afin de reculer l'échéance de ces phénomènes de saturation statistique.

Les diverses améliorations du LHC sont prévues en trois grandes étapes, lors d'arrêts prolongés de la machine, résumés sur la figure 1 (voir la présentation de Marzio Nessi lors du workshop de Chamonix de 2012<sup>1)</sup> et [1], d'où proviennent tant la figure que l'information qu'elle contient) :

- LS 1 (Long Shutdown 1), 2013-2014 : Après la phase de prise de données actuelle, lors de laquelle l'énergie dans le centre de masse ne dépassera pas 8 TeV pour une luminosité maximum instantanée de  $6 - 7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , avec un espacement temporel entre paquets de 50 ns, le shutdown permettra d'atteindre après 2014 une énergie nominale de 14 TeV (ou au moins dépasser 13 TeV) dans le centre de masse, ainsi que la luminosité de design de  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  avec un espacement temporel de 25 ns. Cet accroissement des performances du LHC ne nécessite pas de modifications majeures de la machine. Pour ce qui est de l'accroissement de luminosité, les progrès viendront avant tout de la compréhension fine des possibilités de la machine, acquise lors de l'exploitation, ce qui permettra en particulier d'optimiser l'optique et la collimation des faisceaux. L'obtention de l'énergie de 13 ou 14 TeV dans le centre de masse implique quant à elle de vérifier et de sécuriser parfaitement le système de détection et de protection contre les quenches.
- LS 2, 2018 : Après ce shutdown, le LHC devrait gagner un facteur deux sur la luminosité instantanée, fonctionner à 13-14 TeV, et toujours avec un espacement temporel entre bunchs de 25 ns. La modification principale sur la machine sera le changement du système d'injection, dont les travaux d'installation sont d'ores et déjà entamés (LINAC4).
- LS 3, 2022 : Il est prévu lors de ce shutdown de mettre en place les améliorations permettant à la luminosité instantanée d'atteindre les  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Le mode d'exploitation de la machine sera aussi quelque peu modifié, avec la mise en place de l'égalisation de la luminosité à  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , qui permettra de maintenir la luminosité instantanée le plus proche possible de cette valeur, malgré la diminution progressive des courants en cours de fill. Cela permettra de minimiser l'empilement, et d'éviter un dépôt d'énergie temporairement trop important dans certaines parties de la machine. L'augmentation de luminosité sera obtenue par la réduction du  $\beta^*$  dans les régions d'interaction, ainsi que par l'installation de "crab cavities", qui font tourner sur eux mêmes les paquets de protons, de manière à les amener en collision frontale au point d'interaction.

### 3 Motivations scientifiques des phases I et II

#### 3.1 Physique et conditions

Le potentiel de physique du collisionneur LHC et les domaines en énergie, masse, couplages, ... etc, qui y seront explorés dans les 15 ou 20 prochaines années dépendront des conditions de son fonctionnement en terme d'énergie dans le centre de masse et de luminosité instantanée, et nécessiteront des travaux importants de mise à niveau des détecteurs, de leur électronique ainsi que du système de déclenchement et d'acquisition. Suivant le calendrier détaillé en Section 2, le programme d'upgrade du détecteur ATLAS au cours des trois phases est le suivant :

**La phase 0** La phase 0 a démarré en 2010 et s'étend jusqu'en 2017. Elle permettra d'accumuler une centaine de  $\text{fb}^{-1}$  à trois énergies différentes 7, 8 et 13 ou 14 TeV. Le détecteur ATLAS subira quelques modifications avec en particulier l'insertion en 2013-2014 d'une couche nouvelle de pixels (projet IBL) et d'un nouveau tube à vide en Beryllium de diamètre réduit ;

**La phase I** La phase I (2019-2021) est la première phase de haute luminosité. Elle vise à l'accumulation d'environ  $300 \text{ fb}^{-1}$ . Les mises à niveau du détecteur ATLAS concernent les roues de chambres à

<sup>1)</sup><https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=31,sessionId=5,resId=1,materialId=slides,confId=164089>

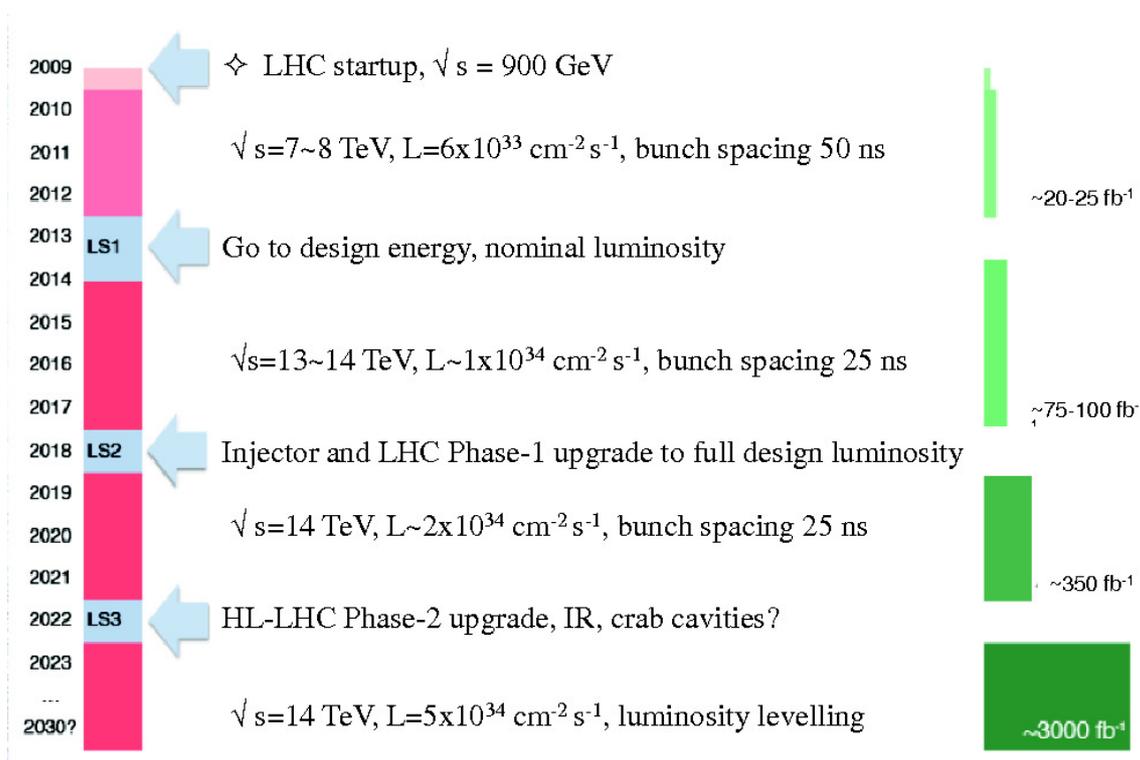


FIG. 1: Calendrier des périodes de prises de données et des phases d'amélioration du LHC.

muon et l'installation de nouvelles stations de détecteurs, pour la physique diffractive, à 210 mètres du point d'interaction. Pour la partie trigger, il est prévu la mise en place d'un trigger rapide de traces de grande impulsion au niveau 2 et d'un trigger calorimétrique de niveau 1 de très haute granularité ;

**La phase II** La phase II (2023-2030 ou HL-LHC, non encore approuvée) vise à l'accumulation de  $3000 \text{ fb}^{-1}$ . Le détecteur ATLAS devra faire face à une luminosité, à un taux d'empilement et à un taux de radiation très élevés. Les performances du détecteur interne seraient fortement dégradées, en raison du fort taux de radiation accumulé, de la limitation de la chaîne de lecture au-delà de  $2.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  et du fort taux d'occupation. A cette fin, il est prévu de construire un nouveau détecteur interne. Il est envisagé aussi d'implémenter un déclenchement de traces de niveau 1, d'utiliser une nouvelle électronique de lecture pour les calorimètres, et d'effectuer une mise à niveau du système de détection des muons. Le remplacement du calorimètre vers l'avant (FCal) ou l'installation d'un petit calorimètre devant lui, ainsi que le remplacement des amplificateurs froids pour le calorimètre hadronique LAr (HEC) sont étudiés par sécurité. Les différentes options concernant ces changements sont, à ce stade, encore assez ouvertes.

Pour la phase I, les groupes de l'IN2P3 sont particulièrement impliqués dans l'upgrade du calorimètre, en particulier sur le déclenchement électro-magnétique (EM) de niveau 1. La section ci-dessous insiste donc sur les implications en termes de physique, avec des résultats provenant de la Ref. [2].

### 3.2 L'upgrade du déclenchement du calorimètre

La détection des photons et des leptons provenant de la désintégration des bosons de jauge représente un enjeu majeur pour la phase I : on distingue notamment les études des modes de production du boson

de Higgs, dans les canaux en diphoton,  $WW$  ou  $ZZ$ , mais aussi dans le cadre de sa production associée avec un boson de jauge  $W$  ou  $Z$ ; l'étude de la diffusion  $VV$ ; la physique du quark top; et les recherches de résonances lourdes ou de cascades de désintégrations impliquant des bosons de jauge dans les manifestations de nouvelle physique.

L'extrapolation de la stratégie actuelle lors la phase I conduirait à une limitation inacceptable en terme d'efficacité ou de bande passante. En effet, lors de cette phase I, la fréquence maximale de déclenchement de niveau 1 est prévue à 75-100 kHz, avec une part de 20 kHz réservée aux objets électromagnétiques (électrons et photons). Le respect de cette contrainte nécessiterait l'utilisation de seuils en énergie deux fois plus élevés que les seuils utilisés actuellement, soit 40-45 GeV, résultant en une perte d'efficacité rédhibitoire pour la détection des bosons  $Z$  et  $W$ . Inversement, le maintien des seuils actuels conduirait à des taux de 80 kHz pour le seul déclenchement électromagnétique.

Une nouvelle stratégie du déclenchement électromagnétique (EM) a donc été développée. Elle repose sur l'accroissement de la granularité des éléments de base utilisés par le système de déclenchement, et sur l'optimisation des critères d'isolation et de forme de la gerbe associée aux objets reconstruits dans le calorimètre. Cette stratégie permettra de conserver des seuils de 25 GeV pour les objets électromagnétiques, tout en respectant le taux de déclenchement. Le critère de forme de gerbe  $R_\eta$  concerne la répartition de l'énergie dans les cellules situées autour de la direction de l'objet électromagnétique, au sein de la couche calorimétrique dans laquelle le développement de la gerbe est maximal (la 2<sup>ème</sup> couche). L'augmentation d'un facteur 4 de la granularité utilisée au niveau 1 (de  $0.1 \times 0.1$  à  $0.025 \times 0.1$  en  $\eta \times \phi$ ) permet d'accroître le rejet des jets identifiés à tort comme électron ou photon par un facteur 3 à 4 supplémentaire, pour des efficacités voisines de 95-99% pour les électrons. La Figure 2 illustre le schéma de base utilisé pour le déclenchement d'objets électromagnétiques.

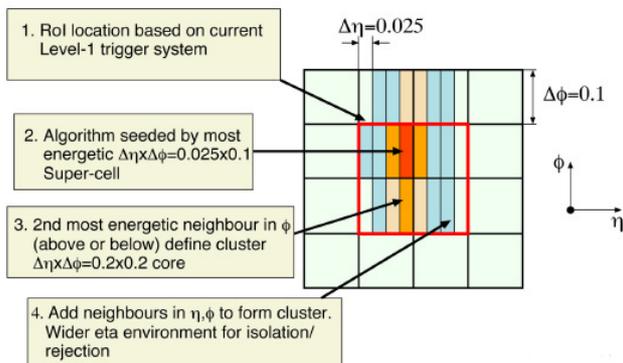


FIG. 2: Calcul de la forme de la gerbe au niveau 1, basé sur l'usage de clusters formés dans la deuxième couche du calorimètre à partir d'une granularité améliorée ( $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.025 \times 0.1$ ) de la région d'intérêt

Le critère d'isolation est défini à partir de l'énergie mesurée par le calorimètre hadronique dans le prolongement de la gerbe électromagnétique. Une meilleure résolution de l'énergie mesurée dans chaque tour de trigger, limitée aujourd'hui à 1 GeV, peut être obtenue grâce à une numérisation plus précise, avec un bit significatif (LSB) de 250 MeV. Cette configuration permet l'utilisation d'un seuil maximal plus faible  $E_{\text{core}}^{\text{had}}$  de 0.8 GeV, qui conduit à un rejet supplémentaire de déclenchement des jets hadronique de 20% comparé à l'usage du seul critère d'isolation. Les performances sont montrées en terme d'efficacité sur la Figure 4 et en terme de taux de déclenchement sur la Figure 3 pour un seuil de 25 GeV.

Au total, cette stratégie permet l'utilisation d'un seuil de 25 GeV pour les leptons isolés, assurant une efficacité de déclenchement d'environ 95-99% des leptons issus des bosons  $W$  et  $Z$  conjointement à un rejet additionnel d'un facteur 3 (pour les électrons isolés) à 9 (pour les électrons non isolés); d'un seuil de 18 GeV pour deux photons isolés, assurant une bonne efficacité de déclenchement pour un boson de Higgs se désintégrant dans le canal  $H \rightarrow \gamma\gamma$ . Il est à noter que ces modifications conduisent à une amélioration significative de la mesure de l'énergie transverse au niveau 1 [2].

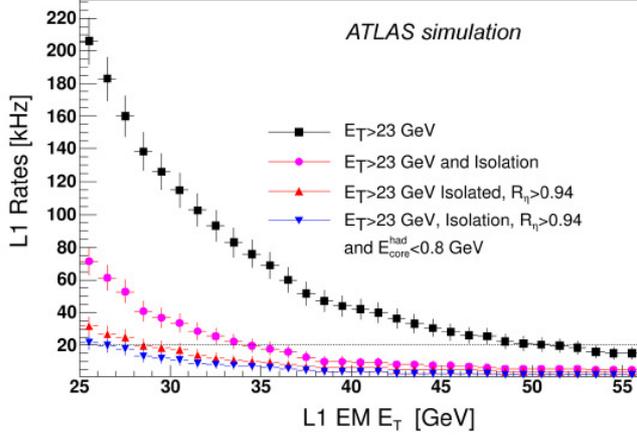


FIG. 3: Taux de déclenchement pour la phase I du nouveau déclenchement EM de niveau 1 pour différents algorithmes. Taux calculé à partir des simulations MC (marqueur carré); taux pour des objets EM isolés (déclenchement actuel - disque); taux pour les objets EM isolés en utilisant le critère de forme de la gerbe  $R_\eta$  (triangle haut); taux pour les objets EM isolés après les critères de forme et d'isolation hadronique (triangle bas). Figure réalisée pour une luminosité instantanée de  $2 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

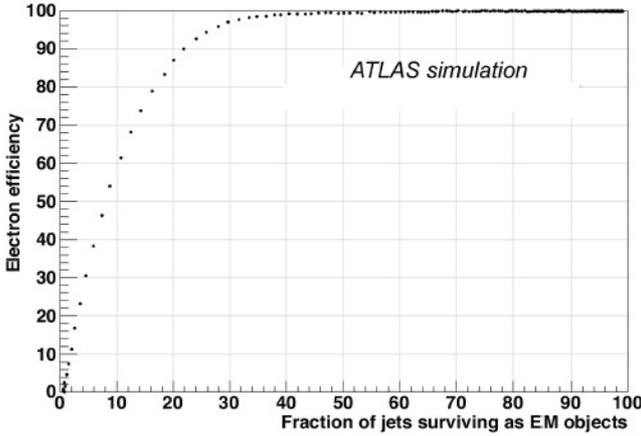


FIG. 4: Efficacité de déclenchement des électrons en fonction de la fraction (en %) de jets hadroniques sélectionnés passant le critère de forme de la gerbe, pour un seuil de déclenchement fixé à 25 GeV. Pour une efficacité de déclenchement de l'électron de 95%, le taux de rejet supplémentaire des jets hadroniques est de 4, comparé à un déclenchement n'utilisant pas ce critère.

### 3.3 L'étude du secteur de Higgs

Tandis que le Modèle Standard (MS) [3–5] des interactions électrofaible [6–11] et forte [12–16] est en excellent accord avec les mesures expérimentales, la dynamique de la brisure de la symétrie électrofaible n'est toujours pas établie à ce jour.

**Contexte théorique** Dans le MS minimal, le mécanisme de brisure de symétrie repose sur l'introduction d'un doublet de champs scalaires, dont une composante neutre développe une valeur moyenne dans le vide non nulle [17–20]. Trois des composantes de ces champs scalaires sont absorbées sous forme de degrés de liberté longitudinaux des bosons  $W$  et  $Z$ , leur conférant une masse. Le degré de liberté non utilisé pour donner leurs masses aux bosons de jauge survit sous la forme d'une particule scalaire neutre, le boson de Higgs  $H$ . Cette approche préserve la renormalisabilité [21–23] de la théorie ainsi que son unitarité [24–28]. Elle permet aussi de rendre compte des masses des quarks et des leptons chargés via

l'introduction des interactions de Yukawa avec le champ de Higgs. Dans ce cadre, l'ensemble des propriétés du boson de Higgs est déterminé, à l'exception de sa masse et de ses couplages aux fermions, qui doivent être fournis expérimentalement.

Dans les théories supersymétriques [29], le mécanisme de brisure de symétrie repose sur l'introduction d'au moins deux doublets de champs scalaires, résultant en la présence d'au moins cinq bosons de Higgs, dont trois neutres (deux scalaires et un pseudo-scalaire) et deux chargés. Leurs taux de production et de désintégration dépendent de leur masse, mais aussi du rapport  $\tan\beta$  des valeurs moyennes dans le vide des champs de Higgs introduits, ainsi que de l'angle de mélange  $\alpha$  des Higgs neutres scalaires. Dans ce cadre, les propriétés de ces particules sont définies et complètement fixées, y compris leur masse, via des relations liant la dite masse à celle des bosons de jauge. Dans tous les cas, l'ensemble de ces modèles requiert l'existence d'un boson de Higgs léger, dont la masse est bornée à 120-130 GeV [30] (dépendant des corrections quantiques dues principalement au mélange du quark top et de son partenaire supersymétrique) et dont les propriétés peuvent être similaires à celles du boson du MS, justifiant l'interprétation des recherches standard dans les cadres étendus. L'incidence d'une découverte ou de l'exclusion d'un boson de Higgs léger (i.e. de masse inférieure à 130 GeV) aura donc des répercussions considérables sur les stratégies de recherche de nouvelle physique [30].

**Production du Higgs au LHC** Au LHC le boson de Higgs neutre est produit soit par fusion de gluons, soit par fusion de bosons vecteurs (VBF), avec un taux dix fois moindre, soit en association avec un boson de jauge ou une paire de quarks top, représentant quelques pourcents de la production totale [31]. Dans les cadres du MS et de la supersymétrie, les stratégies de recherche d'un boson de Higgs neutre dépendent alors de sa masse : on distingue la gamme dite de "basse masse", correspondant à  $m_H \leq 135$  GeV, et la gamme de "haute masse" pour des masses supérieures à 135 GeV. Au LHC, la recherche d'un Higgs de basse masse est effectuée dans trois canaux principaux de production directe :  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  et  $H \rightarrow WW^* \rightarrow 2l + 2\nu$ , les canaux de production associée  $W(Z) H \rightarrow l\nu(l)b\bar{b}$  ne devenant accessibles qu'à plus haute luminosité. Dans la gamme dite de "haute masse", la recherche du Higgs par ses désintégrations  $H \rightarrow WW^{(*)}$  et  $H \rightarrow ZZ^{(*)}$  est seule pertinente, les désintégrations du Higgs en quarks top demeurant défavorisées d'environ un ordre de grandeur.

Les bosons de Higgs chargés n'apparaissent que dans les modèles supersymétriques ou standard non-minimal. La stratégie de recherche distingue une gamme de "basse masse", pour  $m_{H^\pm} \leq m_{\text{top}}$  et une gamme de haute masse, au dessus de  $m_{\text{top}}$ . Dans le premier cas, les Higgs chargés sont recherchés dans les désintégrations des quarks top produits en paires  $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow H^+bW^-b$  ou en singlet  $pp \rightarrow tH^+$ . La présence de Higgs chargés se manifeste par un excès de leptons  $\tau$  dans les états finaux, le Higgs chargé privilégiant les désintégrations dans la 3<sup>ème</sup> famille [32]. Dans le second cas, le Higgs chargé est produit par  $pp \rightarrow tH^\pm$ ,  $pp \rightarrow WH^\pm$  et  $pp \rightarrow H^+H^-$  (dans l'ordre décroissant des sections efficaces), et sa désintégration s'effectue soit en un quark top et un quark beau :  $H \rightarrow t\bar{b}$ , soit via les modes en  $\tau\nu$ , dépendant de  $\tan\beta$  et de sa masse. Il existe également des modes supersymétriques de désintégration du Higgs, dans des régions plus limitées de l'espace des phases, notamment  $H^+ \rightarrow W^+h$  et  $H^+ \rightarrow \chi^- \chi^0$  pour de faibles valeurs de  $\tan\beta$ .

**Bilan actuel de la recherche de boson(s) de Higgs** Les mesures du LHC sur l'ensemble de la statistique enregistrée à 7 TeV montrent que la présence d'un boson de Higgs standard est exclue à 95% de niveau de confiance sur la majeure partie de la gamme en masse, comprise entre 127 et 600 GeV [33,34]. Elles sont confirmés par les expériences du TeVatron [35], et complètent la campagne de recherche effectuée à LEP entre 1989 et 2000, excluant un boson de Higgs de masse inférieure à 114.4 GeV [36]. Les résultats actuels laissent ainsi deux gammes de masse pour lesquelles l'hypothèse d'un boson de Higgs standard ne peut être exclue : une gamme de "basse masse" entre  $115 < m_H < 127$  GeV et une gamme de "haute masse" pour  $m_H > 600$  GeV. Dans la première de ces régions, un excès correspondant

à une probabilité de fluctuation du fond seul à  $2.2 \sigma$  et compatible avec la présence d'un boson de Higgs standard et supersymétrique, est observé. La recherche de boson de Higgs chargé ne montre à ce jour pas de signal compatible avec un boson de Higgs chargé avec  $m_H < m_{top}$  [37]. La recherche d'un boson de Higgs chargé lourd est limitée par la faible section efficace de production à 7/8 TeV.

**Pertinence de l'upgrade pour la recherche du Higgs** Le nouveau déclenchement mis en place est crucial pour les états finaux impliquant des photons et des leptons isolés, c'est-à-dire les canaux  $H \rightarrow \gamma\gamma$  et  $W/ZH$  où le Higgs se désintègre en  $b$  ou en  $\tau$ . La meilleure granularité doit permettre de conserver des seuils de déclenchement faibles (18 GeV pour un déclenchement di-photon et 25 GeV pour les électrons), et l'optimisation de l'utilisation des critères d'isolation, qui permet d'accroître le taux de rejet des jets faussement identifiés. D'autre part, l'upgrade des détecteurs internes de la phase II est important pour l'identification des vertex secondaires et donc l'étiquetage des jets issus des quarks  $b$  et  $c$ , éléments de première importance pour l'étude des productions associées  $HW$  et  $Ht\bar{t}$ .

### 3.3.1 Prospectives : phase I

La priorité du run de 2012, qui prévoit une prise de données à une énergie de collision de 8 TeV pour une luminosité intégrée de  $20 \text{ fb}^{-1}$  fin 2012, est de conclure sur l'existence ou l'absence du boson de Higgs pour la fenêtre de masse encore accessible autour de 125 GeV. Ces conditions de prise de données doivent permettre de découvrir ou d'exclure un boson de Higgs standard sur toute la gamme de masse jusqu'à 600 GeV. En l'absence de signal, la recherche devra être poursuivie, car dans le cadre de modèles non standard, les couplages du boson de Higgs aux bosons de jauge et aux fermions peuvent être significativement réduits en fonction des paramètres  $\beta$  et  $\alpha$ . Si un signal de basse masse est confirmé, l'étape suivante est la détermination des propriétés fondamentales de cette résonance, avec comme objectif l'identification du modèle sous-jacent au secteur de Higgs.

**Masse et largeur totale du Higgs** Un des objectifs principaux est la détermination précise de la masse et de la largeur du boson de Higgs. Les canaux de désintégration  $H \rightarrow \gamma\gamma$  et  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  devraient permettre d'atteindre une précision  $\Delta m_H/m_H$  de 0.1% dans la région de basse masse. La mesure de la largeur totale est plus difficile, puisque celle-ci est dominée par les effets de résolution expérimentale pour des masses  $m_H < 200$  GeV. La largeur du Higgs ne peut être déterminée que de manière indirecte, sous certaines hypothèses théoriques [38].

**Nombre quantique de spin et parité** Le fait même de l'observation d'une résonance dans le canal  $\gamma\gamma$  est déjà la preuve que l'on est en présence d'une particule de spin 0 ou 2 (comme le graviton). Dans les autres canaux, l'étude des corrélations angulaires des produits de désintégration de la résonance doit permettre de confirmer le caractère scalaire de la particule, en reconstituant les quadri-vecteurs des particules issues de sa désintégration. Seuls les états finaux dans lesquels on peut reconstituer complètement les désintégrations de la résonance permettent de telles études, comme dans les états finaux  $ZZ$  et  $b\bar{b}$ . Ces études nécessitent cependant une luminosité intégrée supérieure à  $100 \text{ fb}^{-1}$  : dans le premier cas pour compenser le faible taux de production à basse masse, et dans le second pour optimiser la séparation des fonds au signal, dans un environnement d'empilement élevé qui ne facilite pas l'étiquetage des jets beaux.

**Couplages aux fermions et bosons** Enfin, tous les canaux de désintégration de la résonance doivent être exploités pour la détermination des couplages aux fermions et bosons. La Figure 5 montre les précisions attendues dans la mesure de plusieurs rapports de largeurs de désintégration [39]. La mesure de ces rapports permet d'éliminer en partie les incertitudes systématiques (théoriques et expérimentales)

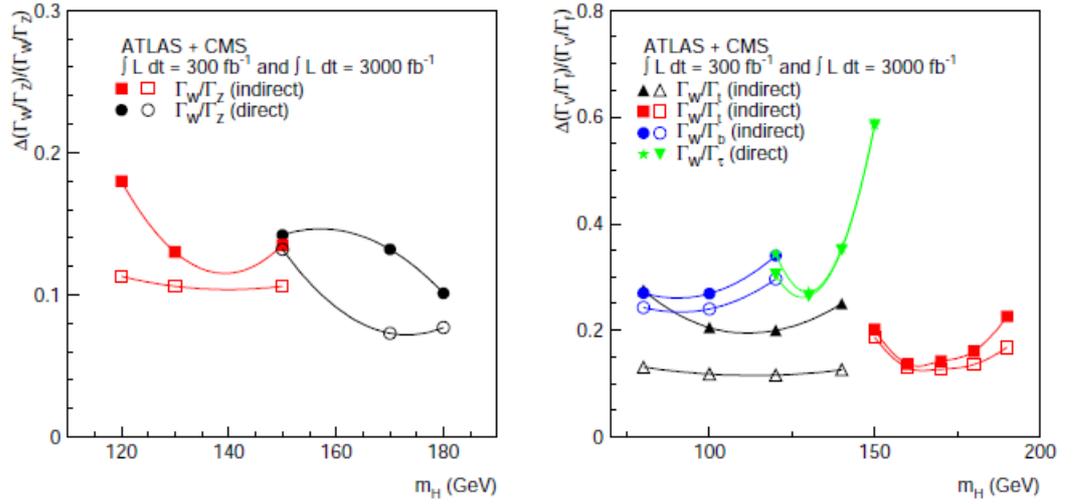


FIG. 5: Précision sur la mesure des rapports de largeurs partielles d'un Higgs en fonction de sa masse à 14 TeV pour  $300 \text{ fb}^{-1}$  et  $3000 \text{ fb}^{-1}$ . Seules les incertitudes statistiques sont indiquées

lorsque les mêmes processus de production (fusion de gluons, production associée ou VBF) sont considérés dans le rapport. Les précisions statistiques attendues sont de l'ordre de 15% à 30% à 14 TeV et pour  $200 \text{ fb}^{-1}$ . Cependant ces mesures devraient également souffrir d'incertitudes systématiques importantes selon les canaux, dans les états finaux impliquant des jets beaux ( $H \rightarrow b\bar{b}$ ), de l'énergie manquante ( $H \rightarrow WW^*$ ) ou la présence de jets vers l'avant (production VBF) par exemple.

### 3.3.2 Prospectives : phase II

La phase de haute luminosité permettra de compléter le programme d'étude du Higgs, en améliorant les précisions des mesures précédentes et en permettant l'étude de canaux limités par la statistique. Les résultats sont issus de la Ref [39]. Il est à noter que toutes ces études sont en cours de ré-actualisation au sein des expériences LHC.

**Étude des modes rares** Dans le cas d'un Higgs de basse masse, l'étude des désintégrations  $H \rightarrow Z\gamma \rightarrow l\bar{l}\gamma$  devient un canal intéressant, avec une section efficace de  $2.5 \text{ fb}$ . Une significativité de  $3.5 \sigma$  semble accessible pour  $300 \text{ fb}^{-1}$ . Un facteur 10 de luminosité conduit à un signal à  $11\sigma$  de significativité. La production directe  $gg \rightarrow H \rightarrow \mu\mu$  peut être étudiée avec des niveaux de précision de  $8 \sigma$  (resp.  $3\sigma$ ) de significativité pour un Higgs de masse  $120 \text{ GeV}$  ( $150 \text{ GeV}$ ).

**Étude des couplages aux bosons et fermions** A haute luminosité, les mesures des rapports des largeurs sont améliorées avec des précisions attendues de l'ordre de 10% pour les désintégrations en bosons de jauge  $Z$  et  $W$ , et en dessous de 15% pour les états finaux fermioniques, ainsi qu'illustré sur la Figure 5.

**Étude de l'auto-couplage du Higgs** La mesure de l'auto-couplage du boson de Higgs est obtenue à partir de la détection d'une paire de bosons de Higgs (couplage trilinéaire). La production  $HH$  provient de trois contributions  $gg \rightarrow HH$ ,  $qq \rightarrow qqV^*V^*$  suivi de  $V^*V^* \rightarrow HH$  et de la production associée  $q\bar{q} \rightarrow VHH$ . La section efficace intégrée va de 40 à 20 fb sur la gamme de 120 à 180 GeV. Pour un boson de Higgs de masse  $120 < m_H < 140 \text{ GeV}$ , le principal canal accessible au cours des phases I

et II est  $gg \rightarrow HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$  [40]. L'analyse de ce canal repose sur la reconstruction de la masse invariante formée par les deux jets beaux et les deux photons isolés. La forme comme l'amplitude du signal permettent de contraindre la valeur du couplage trilineaire  $\lambda_{HHH}$ . Les points délicats de l'analyse sont l'estimation du fond irréductible QCD  $bb\gamma\gamma$ , et les performances des outils d'étiquetage des jets beaux (notamment le taux de mauvaise identification d'un jet léger) et d'identification des photons isolés (notamment la distinction  $\gamma$ -jet), nécessaires à la sélection du signal. Avec une luminosité intégrée de  $600 \text{ fb}^{-1}$ , une première détermination grossière semble possible pour  $m_H = 120 \text{ GeV}$ , avec moins d'une dizaine d'événements attendue. Une phase II de  $6000 \text{ fb}^{-1}$  permettrait d'obtenir une première mesure à 50% près.

**Recherche de Higgs lourds neutres** Le potentiel de découverte dans le cas du MSSM montre que le LHC devrait être capable de découvrir deux ou plusieurs Higgs, dans le cas où l'on ne se trouve pas dans la limite de découplage (haute masse du Higgs pseudo-scalaire). Dans ce dernier cas, seules des désintégrations supersymétriques semblent pouvoir être utilisées.

**Recherche du Higgs chargé** Un run de haute luminosité à 13 TeV doit permettre de couvrir une large gamme de masse d'un boson de Higgs chargé s'étendant jusqu'à 800 GeV : la montée en énergie permet l'ouverture de nouveaux canaux de recherche, comme les canaux de désintégration  $H^+ \rightarrow t\bar{b}$  ou comme les canaux impliquant des particules supersymétriques comme  $H^+ \rightarrow W^+h$  et  $H^+ \rightarrow \chi^+\chi^0$ . Le canal de recherche du Higgs  $pp \rightarrow tH^+ + X \rightarrow t(b\bar{l}) + X$  devient pertinent à haute énergie et permet de couvrir la présence d'un boson de Higgs à  $5\sigma$  de significativité jusqu'à 1 TeV, pour des valeurs élevées de  $\tan\beta$ , supérieures à 20. Ces résultats complèteront le canal  $pp \rightarrow tH^+ + X \rightarrow t(\tau\nu) + X$  qui permet de couvrir la gamme de valeurs de  $\tan\beta$  intermédiaire (entre 10 et 20) et basse ( $\leq 5$ ). Les canaux impliquant une désintégration en particules supersymétriques permettront eux de couvrir la région de très bas  $\tan\beta$  [39].

### 3.4 Physique électrofaible et couplages de jauge

La physique électrofaible et la production multiple de bosons de jauge font partie des sujets de physique qui seront étudiés avec beaucoup d'attention au LHC. Elles devraient bénéficier de l'augmentation de la luminosité lors des trois phases de son fonctionnement, ce qui permettra d'accroître la précision de la plupart des paramètres électrofaibles du MS. Par ailleurs les mesures précises des sections efficaces différentielles de production des bosons de jauge  $W$  et  $Z$  en fonction de leur impulsion transverse et de leur rapidité devraient permettre de contraindre les modèles sous-jacents de la QCD, avec pour conséquence la réduction des erreurs systématiques sur des mesures importantes comme celle de la masse du boson  $W$ .

**Mesure de  $m_W$**  Une détermination précise de la masse du  $W$  revêt une importance capitale car elle permet conjointement à une mesure de la masse du quark top, de sonder les corrections quantiques d'ordres supérieurs du MS, et donc de tester sa cohérence à travers une détermination indirecte de la masse du boson de Higgs. Cette dernière pourra être confrontée à la masse mesurée après la mise en évidence éventuelle du boson de Higgs. Une mesure de la masse du  $W$  avec une précision de moins de  $10 \text{ MeV}/c^2$  et celle du quark top avec une précision meilleure que  $1 \text{ GeV}/c^2$  devraient être atteintes au cours de la phase 0 et permettront d'atteindre une précision d'environ 20% sur la détermination indirecte de la masse du boson de Higgs.

**Couplages trilineaires et quartiques** En cas d'absence de boson de Higgs, le mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible devra être mis en évidence par d'autres processus, et les études des couplages

multiples de bosons de jauge et de leur diffusion à haute énergie seront cruciales (voir section 3.7). Les études de la production par paires  $WZ$ ,  $ZZ$ ,  $WW$ ,  $W\gamma$ ,  $Z\gamma$  au LHC permettront aussi d'explorer les effets anormaux dans les couplages trilinéaires (TGC) dont les valeurs sont bien définies dans le MS. Ainsi quelques dizaines de  $\text{fb}^{-1}$  à l'énergie nominale du LHC devraient permettre des tests contraignants des prédictions du MS et permettront d'améliorer de plusieurs ordres de grandeurs les mesures réalisées au LEP et au Tevatron. On devrait aussi pouvoir distinguer les contributions des états initiaux quark-antiquark et à deux gluons et étudier de possibles interactions anormales du boson de Higgs, si celui-ci est observé dans les voies de désintégration  $WW$  et  $ZZ$ . Les couplages quartiques (QGC) entre bosons de jauge ( $ZZWW$ ,  $\gamma ZWW$ ,  $\gamma\gamma WW$ ,  $WWWW$ ) sont aussi une composante essentielle de la théorie électrofaible et leurs valeurs sont bien définies dans le MS. La mesure d'une déviation de ces couplages par rapport aux prédictions du MS, due par exemple à l'échange de nouvelles particules massives, pourrait se révéler essentielle en l'absence de boson de Higgs, en permettant de dévoiler l'origine de la brisure spontanée de la symétrie électrofaible. L'apport de la phase II est donc crucial pour ces mesures, les sections efficaces de production multiples de bosons de jauge étant très faibles.

### 3.5 La physique du quark top

**Contexte théorique** Le quark top, découvert en 1995 au Tevatron par les expériences CDF et D0 [41, 42], joue un rôle extrêmement important au sein du MS, ainsi que comme sonde d'une physique au-delà du MS. C'est la particule fondamentale la plus massive découverte à ce jour. Sa grande masse, son temps de vie, environ sept fois plus court que le temps caractéristique d'hadronisation, font de lui le seul parmi les six quarks du MS qui se désintègre avant de former un état hadronique. C'est donc le seul quark dont on peut mesurer directement les propriétés intrinsèques comme la masse, le spin et la charge électrique. Son couplage au boson de Higgs, de l'ordre de l'unité, suggère aussi que le quark top peut jouer un rôle particulier dans le mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible. Au LHC le quark top est produit majoritairement par interaction forte à partir de la fusion de gluon  $gg \rightarrow t\bar{t}$  et de l'annihilation de paires  $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ . Il est aussi produit par les trois mécanismes de production électrofaibles : la voie-t via  $qb \rightarrow q't$ , qui constitue le mode dominant ; la voie-s, provenant de l'annihilation d'une paire de quarks  $q\bar{q} \rightarrow W^* \rightarrow t\bar{b}$  ; et la production associée d'un quark top et d'un boson  $W$  sur couche de masse, provenant de l'émission du quark  $b$  via  $gb \rightarrow tW$ .

**Bilan actuel** Au LHC l'échantillon de paires de quarks top et de single-top produits à la fin 2012 à une énergie au centre de masse de 8 TeV sera de l'ordre de 5 millions d'événements pour une luminosité intégrée de  $20 \text{ fb}^{-1}$ . Cette statistique devrait permettre une détermination des sections efficaces de production forte au niveau de quelques pourcents dans tous les canaux de désintégration impliquant au moins un lepton. La masse devrait être déterminée avec une précision inférieure à 1 GeV, au Tevatron et au LHC, limite au-delà de laquelle l'accumulation de données supplémentaires n'apporte plus d'amélioration évidente. Ces données permettront également de mesurer la polarisation du boson  $W$  dans la désintégration. A la fin de 2012, la production électrofaible de quark top sera établie dans les trois modes de production, avec des précisions allant de 5% pour la voie-t à 10-20% pour les modes  $tW$  et en voie-s. Ces mesures permettront une détermination directe de l'élément de matrice CKM  $|V_{tb}|$  avec une précision de quelques pourcents.

#### 3.5.1 Prospectives : phase I

Un run de haute luminosité, de  $100\text{-}300 \text{ fb}^{-1}$  permettra d'effectuer des mesures de précision des modes de production du quark top via les interactions électrofaible et forte, testant la cohérence fine du MS. Il va étendre significativement la gamme de sensibilité à de nouveaux phénomènes. En raison de sa masse élevée, le quark top constitue une sonde privilégiée dans la recherche de nouvelles particules,

soit comme source de nouveaux canaux de désintégration, soit comme produit de désintégrations de résonances plus lourdes. De plus, ce quark se désintégrant avant hadronisation, les mesures précises de ses couplages aux fermions et bosons ainsi que de leur polarisation peuvent révéler de nouveaux phénomènes.

**Recherche de fermions supplémentaires** De nouveaux fermions apparaissent dans le cadre d’extensions du MS telles que la version “top-seesaw” du modèle “top-color”, qui prévoit la participation de nouveaux fermions dans le mécanisme de bascule (“see-saw”) à l’origine de la masse du quark top [43–49]. D’autres fermions peuvent apparaître également dans le cadre de théories supersymétriques, dans lesquelles la brisure de symétrie provient du secteur de jauge [50]. Enfin, des quarks supplémentaires peuvent aussi résulter des modèles de 4<sup>ème</sup> génération. Afin de conserver la symétrie de couleur et la conservation de la charge électrique, les modèles les plus répandus considèrent en général un quark supplémentaire  $t'$ , de charge  $+2/3$ , et un nouveau quark  $b'$  de charge  $-1/3$ . Ces nouveaux fermions se manifestent soit par la modification de l’élément de matrice  $|V_{tb}|$ , qui résulte en une modification du taux de production électrofaible de quark top dans les trois modes de production, soit par la production directe par exemple dans la voie- $s$  via  $q\bar{q}' \rightarrow t\bar{b}'$ . Les limites actuelles sont de  $|V_{tb'}| < 0.63$  à 95% CL. La gamme en masse devrait être largement étendue au-delà du TeV avec  $300 \text{ fb}^{-1}$ .

**Recherche de bosons supplémentaires** De nombreux modèles postulent l’existence de groupes de jauge étendus, et ont un couplage particulier au quark top ou à la 3<sup>ème</sup> famille. En particulier, les modèles “top-color” et “top-flavor” expliquent la grande masse du quark top par une dynamique propre à la 3<sup>ème</sup> famille [51]. Ces modèles prévoient l’existence de particules de technicouleur, comme le technipion (scalaire). D’autres modèles, prévoyant un cadre étendu des symétries internes (GUT), ou d’extensions des symétries externes (dimensions supplémentaires), prévoient l’existence de bosons de jauge supplémentaires  $W'$  et  $Z'$ . Ils se manifestent soit en contribuant à la production électrofaible de quark top, en couplant ce dernier à un quark de type down (boson chargé) ou à un quark de type “up” (boson neutre). La recherche de bosons supplémentaires s’effectue alors dans la production électrofaible en voie- $s$ . Les limites pour les bosons  $W'$  gauche (droit) se désintégrant en leptons sont actuellement de 860 GeV (885 GeV) [52]. La phase I devrait permettre d’étendre cette gamme largement au-delà de 1 TeV pour une luminosité supérieure de  $100\text{-}300 \text{ fb}^{-1}$ . Ces mesures peuvent être également optimisées pour la recherche de bosons scalaires, techni-pions voire Higgs chargés dans les hautes régions de  $\tan\beta$  en complément de la recherche par paires.

**Sensibilité à de nouveaux couplages** La mesure des sections efficaces de single-top permet la mesure directe de  $|V_{tb}|$  en ne supposant que la production prévue par le MS, i.e. excluant les termes vecteur droit et tenseur droit ou gauche. En particulier, elle permet de s’affranchir des hypothèses sur le nombre de générations et de l’unitarité de la matrice CKM. Les résultats du TeVatron permettent aujourd’hui la mesure directe de  $|V_{tb}|$  avec une précision de 20%, soit  $0.77 < |V_{tb}|$  à 95% CL [53]. La présence de nouveaux couplages, vecteur droit ou tenseur droit et gauche, est également contrainte par les données actuelles. Les mesures de polarisation des bosons  $W$  et des quarks top dans l’état final doivent permettre de différencier les mécanismes de production (fusion de gluons, production résonnante...) et de désintégration de ces particules.

### 3.5.2 Prospectives : phase II

Un run de haute luminosité de plus de  $1000 \text{ fb}^{-1}$  devrait permettre de couvrir le domaine des désintégrations rares du quark top. Tandis que les taux de telles désintégrations sont hors d’atteinte dans le cadre du MS, une large classe de théories au-delà du MS prédit des courants neutres changeant

la saveur, induits par le quark top avec des fractions de  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$ . Il s'agit des désintégrations  $t \rightarrow q\gamma$ ,  $t \rightarrow qZ$  et  $t \rightarrow qg$  avec  $q = u, c$ . Les résultats obtenus avec  $6000 \text{ fb}^{-1}$ , exprimés en termes de sensibilité à un rapport d'embranchement sont de  $0.26 \times 10^{-5}$  pour le canal  $t \rightarrow q\gamma$ ,  $20 \times 10^{-5}$  pour le canal  $t \rightarrow qg$ ,  $0.1 \times 10^{-5}$  pour  $t \rightarrow qZ$ .

### 3.6 La physique au-delà du Modèle Standard

La supersymétrie représente un cadre théorique général permettant d'aborder un grand nombre de questions ouvertes par le MS. Des extensions supersymétriques du MS existent. Elles prédisent l'existence d'un partenaire supersymétrique ("sparticule") pour chacune des particules connues et nécessitent également l'extension du secteur des champs de Higgs.

Jusqu'à présent aucune de ces nouvelles particules n'a été mise en évidence : avec une luminosité intégrée de  $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$  les analyses récentes de ATLAS et de CMS posent des limites sur leurs masses dans la plupart des cas de l'ordre du TeV ou légèrement inférieures, dans le cadre des modèles supersymétriques minimaux (par exemple dans les modèles avec hypothèses d'unification des paramètres à des échelles d'énergie de grande unification). Ces résultats contribuent à contraindre de manière encore plus sévère les extensions supersymétriques du MS parmi les plus simples.

Des modèles alternatifs existent qui ont une phénoménologie plus difficile et plus longue à rechercher ; par exemple les modèles avec angles de mélange des gauginos plus faibles, et avec des spectres de masse dans lesquels la différence entre les masses des sparticules est petite (modèles appelés "avec spectre de masse comprimé"). Une luminosité plus élevée permet d'étudier ces modèles et d'explorer des régions de masse plus vastes. Par exemple, à une énergie dans le centre de masse de  $\sim 14 \text{ TeV}$  et avec une luminosité intégrée de  $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$  (correspondant à la luminosité attendue à la fin de la phase-I du LHC), la recherche de particules stop de masse inférieure à  $\sim 1 \text{ TeV}$ , test crucial de la supersymétrie, pourra être effectuée et l'étude de la production directe de sleptons devient accessible pour des masses des sleptons jusqu'à  $\sim 300 \text{ GeV}$  [2]. L'augmentation de la luminosité intégrée de quelques 100 à quelques  $1000 \text{ fb}^{-1}$  prévue par la phase-II du LHC, permet d'élargir d'environ  $500 \text{ GeV}$  la région de masse où la découverte des squark et des gluinos est possible [54].

Si la supersymétrie est découverte, la mesure et caractérisation des cascades de désintégration ("edges and thresholds") à partir des leptons et jets reconstruits, permettra, via un ajustement, de déterminer les masses des particules sans avoir recours à la théorie sous-jacente. A une énergie de  $\sim 14 \text{ TeV}$  et avec une luminosité de  $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$ , une précision de quelques pourcents peut être atteinte. Cette erreur peut être réduite au pourcent avec une luminosité intégrée de dix fois supérieure ( $\sim 3000 \text{ fb}^{-1}$ ) [38].

Pour poursuivre la recherche de la supersymétrie en phase II, il est nécessaire de pouvoir déclencher avec un lepton isolé de faible impulsion transverse ( $\sim 25 \text{ GeV}$ ) tout en gardant un taux de déclenchement raisonnable dans un environnement avec empilement élevé. En particulier, l'augmentation du seuil de déclenchement sur l'impulsion transverse du lepton isolé dégrade l'efficacité et donc la sensibilité des analyses aux modèles avec spectre de masse comprimé. L'augmentation de la granularité des calorimètres participant au trigger de niveau 1 et l'introduction d'un nouveau trigger à muons prévus dans la phase-I, sont donc cruciales. L'upgrade des détecteurs de traces lors de la phase-II servira à garder de bonnes performances d'étiquetage des quarks b, dans un environnement avec empilement élevé, fait essentiel pour la recherche des particules sbottom et stop.

La supersymétrie est l'extension du MS la plus développée, mais d'autres théories ont été proposées pour répondre aux questions laissées ouvertes par ce modèle.

Les théories de Grande Unification constituent une famille d'extensions du MS qui permettent d'unifier les trois constantes de couplage. Elles prévoient l'existence de nouveaux bosons de jauge et des nouvelles particules qui introduisent un couplage direct entre les quarks et les leptons (les leptoquarks).

Les résultats des recherches récentes au LHC excluent de nouveaux bosons de jauge dans les modèles sequentiels et dans les modèles basés sur le groupe de symétrie E6, avec des masses jusqu' à environ 2 TeV, et excluent les leptokarks avec des masses jusqu' à environ 500 GeV.

Si les théories de Grande Unification sont pertinentes, une luminosité de  $300 \text{ fb}^{-1}$  à une énergie dans le centre de masse de 13 TeV permettrait la découverte des nouveaux bosons de jauge avec des masses jusqu' à  $\sim 5$  TeV. Une luminosité d' un facteur dix plus élevée permettrait d' étendre l' intervalle de masse couvert d' environ 20% [39].

Dans la région multi TeV, l' étude des désintégrations de ces nouveaux bosons en  $W$ ,  $Z$ , Higgs et top nécessitera l' utilisation de techniques d' identification d' objets boostés [55], lesquelles pourraient profiter des méthodes de type "particle flow". L' upgrade prévu dans la phase-II devrait permettre de garder des bonnes performances de reconstruction des traces pour des taux d' occupation élevés.

En résumé, les phases de haute luminosité élargissent le potentiel de découverte de la nouvelle physique d' ATLAS. Pour exploiter ce potentiel, la mise en place de triggers leptoniques plus granulaires, l' amélioration ou le changement du calorimètre avant et le remplacement du trajectographe interne sont essentiels.

### 3.7 Etude de la diffusion des bosons de jauge $V_L V_L (V = W, Z)$

Si un Higgs "léger" est découvert au LHC, des travaux théoriques récents [56] ont mis en évidence que l' étude de la diffusion de bosons  $W$  et  $Z$  par le mécanisme de fusion de bosons vecteurs est un outil important pour comprendre la dynamique sous-jacente à la brisure spontanée de symétrie. Elle devrait permettre de répondre à la question de la nature composite ou élémentaire du boson de Higgs.

En l' absence d' un boson de Higgs, ou si sa masse est supérieure à  $\sim 1$  TeV, la dépendance de l' amplitude de diffusion des bosons  $W$  et  $Z$  en fonction de l' énergie dans le centre de masse n' est pas compatible avec la contrainte de l' unitarité. Dans ce cas la largeur du boson de Higgs devient comparable à sa masse et le boson de Higgs est alors très fortement couplé avec les paires de  $W$  et  $Z$ . Par conséquent en l' absence d' un boson de Higgs ou si sa masse est supérieure à  $\sim 1$  TeV, des résonances ou d' autres phénomènes devraient apparaître dans la diffusion de bosons  $W$  et  $Z$  pour régulariser le comportement de la section efficace ou comme résultat de la dynamique d' un Higgs interagissant fortement avec ces bosons.

Pour ces raisons, aussi bien dans le scénario où un Higgs est découvert que dans le scénario selon lequel le boson de Higgs standard est exclu au LHC dans l' intervalle de masse allant jusqu' à  $\sim 1$  TeV, l' étude à haute énergie de la diffusion de la composante de polarisation longitudinale ( $V_L$ , où  $V = W, Z$ ) des bosons de jauge sera cruciale. Dans la pratique cette étude consiste à analyser la production de dibosons par fusion de bosons vecteurs (VBF), cette dernière étant étiquetée par la présence de deux jets énergétiques à grande rapidité.

Des études préliminaires indiquent que, à une énergie dans le centre de masse de  $\sim 14$  TeV, et en l' absence de couplages quartiques anormaux, la production VBF de dibosons au LHC est accessible pour une luminosité intégrée de l' ordre de quelques  $100 \text{ fb}^{-1}$ . Une luminosité d' un facteur 10 plus élevée comme celle prévue par la phase-II, est alors nécessaire pour effectuer un programme d' investigation complète des modèles [57].

Pour des questions de déclenchement et de réduction des bruits de fond, l' un au moins des bosons de jauge devra se désintégrer leptoniquement. Pour maximiser l' efficacité pour le signal, les performances requises sont donc un étiquetage efficace avec une bonne pureté des jets vers l' avant ( $\eta > 2$ ), un veto efficace des jets centraux et un déclenchement efficace pour des événements avec un seul lepton isolé de faible impulsion transverse ( $\sim 25\text{-}30$  GeV). Le nouveau trajectographe permettra d' avoir une meilleure identification des électrons isolés (en améliorant les capacités d' association entre la trace et le dépôt calorimétrique de l' électron) et donc un taux de rejet plus important du fond QCD.

L'upgrade des détecteurs envisagée pour la phase-I et la phase-II (en particulier l'augmentation de la granularité des calorimètres participant au trigger de niveau 1, l'introduction d'un nouveau trigger muon, l'upgrade des détecteurs dans la région à 210 m du point d'interaction ainsi que l'upgrade du trajectographe) sont nécessaires pour garantir à ATLAS un potentiel élevé d'investigation de la diffusion des bosons de jauge. La sensibilité ultime à la nouvelle physique dans cette étude dépendra ensuite des progrès sur la reconstruction des jets et des leptons dans des conditions sévères d'empilement.

## 4 Phase 0 : Consolidation et améliorations

Malgré tout le soin apporté à la conception du détecteur, ainsi qu'aux multiples tests et contrôles lors de la production et de l'intégration du détecteur, il est inévitable vu la complexité et la quantité de sous-systèmes en jeu, que se manifestent un certain nombre de problèmes de jeunesse. Ils sont typiquement liés à des composants particuliers qui s'avèrent avoir un taux de défaillance inattendu. Ces problèmes n'empêchent pas la prise de données dans l'immédiat, mais doivent néanmoins être corrigés le plus rapidement possible afin de maintenir la qualité des données sur le long terme. Outre ces consolidations motivées par des défaillances inattendues sur des éléments de détecteur, il est souvent possible et intéressant d'améliorer à peu de frais les performances du détecteur, et ce sans en changer de manière importante la structure. C'est pour répondre à ces deux types de motivations qu'ATLAS a lancé plusieurs projets :

- le projet nSQP (new Service Quarter Panels), visant à améliorer la fiabilité à long terme du readout du tracker.
- le projet Thermosiphon, qui améliore les capacités de refroidissement des pixels.
- Le remplacement des alimentations basse tension pour la calorimétrie à Argon Liquide (LAr LVPS).
- L'*Insertable B-Layer* (IBL), qui améliore les performances de la reconstruction des traces chargées, et en particulier l'identification des vertex secondaires.

### 4.1 Le projet "New Service Quarter Panels"

La motivation initiale du projet nSQP est la découverte en 2008-2009 d'un taux de défaillance anormalement élevé des VCSELs, composants opto-électroniques essentiels à la communication entre les modules du détecteur et l'acquisition de données. L'extrapolation du taux de défaillance observé donnait à l'horizon 2015 un détecteur silicium dont de l'ordre de 10% de l'acceptance ne pouvait être relu, ce qui n'était évidemment pas acceptable. Il a donc été décidé de reconcevoir immédiatement les services concernés (voir par exemple la référence 6), en utilisant cette fois-ci un système de transmission électrique et non pas optique des signaux pour la fraction des services située sur le détecteur, et de déplacer les composants optiques potentiellement fragiles à un emplacement accessible, pour les remplacer si le besoin s'en faisait sentir ultérieurement. Récemment le travail initié par l'IN2P3 a prouvé que la raison principale de la mortalité prématurée des VCSELs dans les modules extérieurs (localisés dans la salle USA15) est la corrosion des VCSELs causée par l'humidité. Le danger de mortalité catastrophique des VCSELs dans le détecteur pixel est donc actuellement écarté grâce à un environnement sous azote sec. Ce fait a quelque peu réorienté le projet nSQP vers la possibilité de réparer une partie des modules pixels morts ( 4%) pendant le shutdown LS1 et d'améliorer l'accessibilité des modules optiques.

Les apports de ce projet, outre la solution du problème initial dû aux VCSELs, sont :

- Comme il faudra accéder de toute manière aux modules pixels pour en changer les services, il sera possible de profiter de l'occasion pour réparer aussi quelques modules pixels actuellement non fonctionnels.

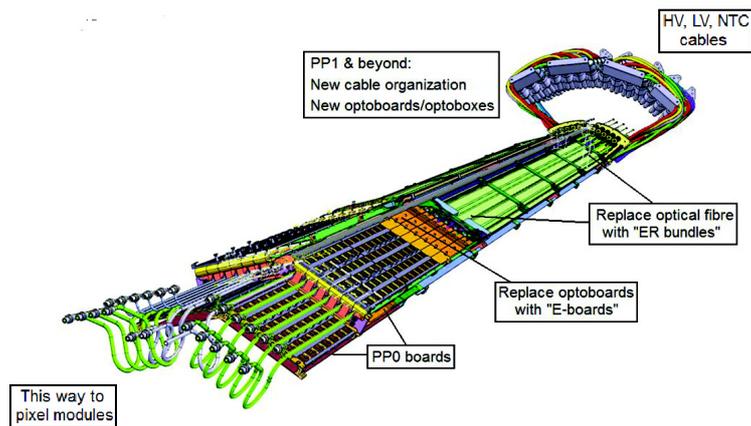


FIG. 6: Vue des services des pixels, actuels, avec les modifications prévues dans le cadre du projet nSQP.

- La quantité de matière représentée par les nouveaux services sera un peu inférieure.
- La bande passante pour le niveau 1 du système de déclenchement sera améliorée.
- Enfin, le fait de remonter en surface le détecteur pixel actuel pour y effectuer toutes ces réparations et améliorations peut potentiellement faciliter l’installation de l’IBL. Toutefois, remonter à la surface le détecteur pixel n’est pas une opération anodine et la décision à ce sujet n’est pas encore prise.

#### 4.2 Alimentation des basses tensions du calorimètre à Argon liquide

Les 58 alimentations basse tension (LVPS) pour l’électronique Front-End sont installées à l’extérieur des châssis Front-End, entre les *fingers* du calorimètre à tuiles (TILECAL). Elles convertissent les 280V DC en sept tensions pour alimenter les cartes *frontend* (FEB, calibration, controller, TBB). Les spécifications en terme de radiation, champ magnétique, volume et évacuation de chaleur sont très sévères. Les alimentations originales livrées entre 2006 et 2008 n’ont jamais été fiables et ont subi plusieurs campagnes de réparation. La collaboration LAr a donc décidé en 2008 de construire de nouvelles alimentations. Celles-ci ont été livrées en 2010 puis testées intensivement en 2011. Douze ont été installées sur le détecteur en remplacement des précédentes ayant perdu la redondance sur une ligne de tension. Les nouvelles LVPS fonctionnent actuellement sans problème. Les 46 autres LVPS seront installées sur le calorimètre début 2013.

#### 4.3 Le système de thermosiphon

Un système de thermosiphon est proposé par l’IN2P3, en complément du compresseur actuel, destiné à faire circuler le fluide de refroidissement dans le détecteur interne. L’intérêt du thermosiphon est d’assurer une redondance dans le système de circulation du fluide, puisque le déplacement est engendré simplement par la différence de densité entre les zones froides du circuit et les zones plus chaudes. En outre, comparé au système actuel, la maintenance sera réduite, ainsi que les risques de pollution du circuit, puisqu’il n’y a pas de pièces complexes en mouvement.

Une autre idée proposée par l’IN2P3 est de remplacer le liquide de refroidissement par un mélange de  $C_3F_8$  et de  $C_2F_6$ , ce qui abaisse la température de refroidissement de l’ordre de 10 degrés. Une R&D sur ce concept est en cours. Elle porte sur la mesure de la composition et du flux du mélange  $C_3F_8/C_2F_6$  par sonar acoustique.

#### 4.4 La couche interne “Insertable B-Layer”

L’*Insertable B-Layer* (IBL) est une couche de détecteur pixel supplémentaire, qui sera insérée à l’intérieur du détecteur Pixels actuel. Le tube à vide actuel sera par ailleurs remplacé par un tube à vide en Beryllium de diamètre réduit. L’IBL apportera de la redondance au système actuel de suivi des traces chargées, et améliorera la résolution sur le paramètre d’impact ainsi que sur l’impulsion transverse des traces. Il aura un impact significatif sur la capacité d’ATLAS à identifier les jets de  $b$ . L’ensemble des caractéristiques de l’IBL, son apport sur le spectre de physique d’ATLAS, ainsi que les calendriers, coûts et scénarios d’intégration et d’installation sont détaillés dans un Technical Design Report [58]

L’IBL est constitué de 14 échelles en mousse de carbone (voir figure 7) renforcées par une peau en fibre de carbone. La mousse de carbone contribue à la rigidité mécanique du détecteur tout en assurant le transfert thermique de la puissance dissipée ( $0.5 \text{ W/cm}^2$ ) par les modules de détection collés aux échelles vers un tube de refroidissement central en Titane. Il est à noter que le refroidissement sera assuré comme dans le détecteur Pixel actuel et dans le SCT par un système évaporatif, avec la particularité d’utiliser comme liquide de refroidissement du  $\text{CO}_2$  au lieu d’un fluorocarbure. Le  $\text{CO}_2$  permet d’atteindre des températures de refroidissement significativement plus basses (une dizaine de degrés en moins) que les fluorocarbures, au prix toutefois d’une pression de fonctionnement plus importante. En outre, le transfert thermique est meilleur dans le cas du  $\text{CO}_2$ , ce qui permet de réduire la quantité de matière induite par les tubes de refroidissement.

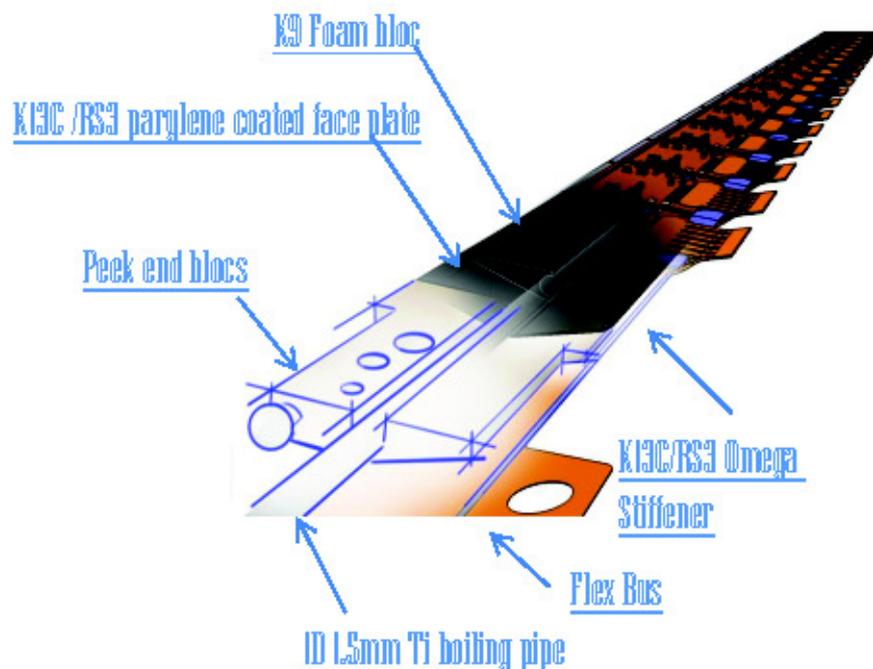


FIG. 7: Vue d’une échelle de l’IBL.

La conception de l’IBL a été très largement pilotée par le souhait de tester autant que possible les concepts et les technologies que l’on pourrait retrouver pour le tracker en phase II des upgrades. Ainsi, beaucoup de soin a été mis à la minimisation de la quantité de matière, avec succès, puisque les échelles de l’IBL ne représentent, modules de détection compris, que 1.5% de  $X_0$ , au lieu de l’ordre de 2% pour les échelles pixel actuelles. Tous les compromis nécessaires entre quantité de matière, refroidissement,

rigidité mécanique sont bien compris, et ce savoir-faire acquis par les équipes sera directement transposable quand il s'agira de rentrer dans l'optimisation détaillée du détecteur de traces pour la phase II. Pour ce qui est des technologies de détection, tant les pixels planaires que les pixels 3D sont de bons candidats pour équiper un détecteur de traces au LHC à l'horizon 2020.

L'IN2P3 a eu dans les années passées une forte participation à la conception et au prototypage de l'échelle IBL, à l'électronique de lecture, et à la conception des services (CPPM, LAL, LAPP, LPNHE, LPSC). Elle a actuellement autour des mêmes équipes une forte contribution à la production des capteurs ainsi qu'à l'intégration du détecteur.

#### 4.5 Trigger-DAQ

Pour la phase 0, le processeur central du trigger (CTP) va être entièrement revu, en particulier pour pouvoir doubler le nombre de voies d'entrées ainsi que le nombre d'éléments de déclenchement par rapport à ce qui est disponible actuellement et qui est totalement utilisé par les menus existants. Deux éléments du trigger du calorimètre le "MCM" et le "CMM" vont être reconstruits pour, d'une part en accroître la flexibilité, et d'autre part faciliter les sorties du nouveau trigger topologique de niveau 1 qui sera implémenté en 2014. Nous étudions la possibilité d'inclure les informations du spectromètre à muons dans ce trigger topologique de niveau 1. Un sélectionneur rapide de traces (FTK) analogue à celui utilisé avec succès par l'expérience CDF est actuellement à l'étude pour ATLAS. Il devrait être installé vers la fin de 2015. Le FTK va recevoir les informations directement du système de lecture du SCT et du détecteur à pixels et va effectuer à la vitesse du trigger de niveau 1 (avec une latence inférieure à 100 microsecondes) une reconstruction globale des traces avec une précision proche de celle de la reconstruction hors-ligne. Le trigger de niveau 2 (LVL2) sera alors capable de demander des informations sur des traces soit au niveau des régions d'intérêt, soit au niveau de l'ensemble du détecteur, libérant ainsi une grande partie de la puissance de calcul au profit d'algorithmes de sélection plus complexes que ceux qui sont possibles actuellement. Une évolution du système de transport des données unifiant le niveau 2, la reconstruction complète (EB) et le Filtre d'événements (EF) est en cours d'élaboration. Le nouveau système va tirer profit des évolutions du matériel (CPU et réseau) et va aussi simplifier et rationaliser la chaîne de transport et de sélection tout en augmentant de façon significative la flexibilité du dispositif.

### 5 Upgrade des calorimètres pour la phase I

Cette section décrit les modifications du système de déclenchement du calorimètre nécessaires pour préserver les seuils de déclenchement des objets électromagnétiques (électrons, photons) au cours de la phase I du LHC. Ces modifications sont encore activement discutées au sein des trois groupes "LAR", "Tuiles" et "L1Calo" de ATLAS. Ce qui est présenté ici est ce qui se dessine. La décision concernant l'architecture devrait être prise en juin 2012. Un Technical Proposal sera ensuite rédigé pour le début de l'année 2013 puis un TDR, accompagné d'un MoU, pour l'année 2014.

Les groupes de l'IN2P3 envisagent de prendre une part déterminante dans ce programme en participant à la conception de nouveaux fonds de panier de châssis électroniques (5.2.1), à la conception et la fabrication de la nouvelle carte dénommée *LTDB* (5.2.2), d'un numériseur performant utilisé pour cette carte (5.2.3), ainsi que des cartes de lecture *backend* appelées *DPS* (5.2.4). Il est prévu que cet engagement s'étende sur l'intégralité de la période 2013-2018, couvrant quatre phases distinctes : après la fin de la phase de conception, il est prévu la mise en place d'un système démonstrateur en 2014, consistant en l'installation d'une chaîne complète depuis l'électronique frontale jusqu'à l'électronique de comptage, pour une fraction limitée du détecteur (typiquement  $1/32^{ème}$  de tonneau électromagnétique). L'observation du comportement de ce système en présence de collisions en 2015-2016 permettra une validation définitive du principe avant le lancement final de la production.

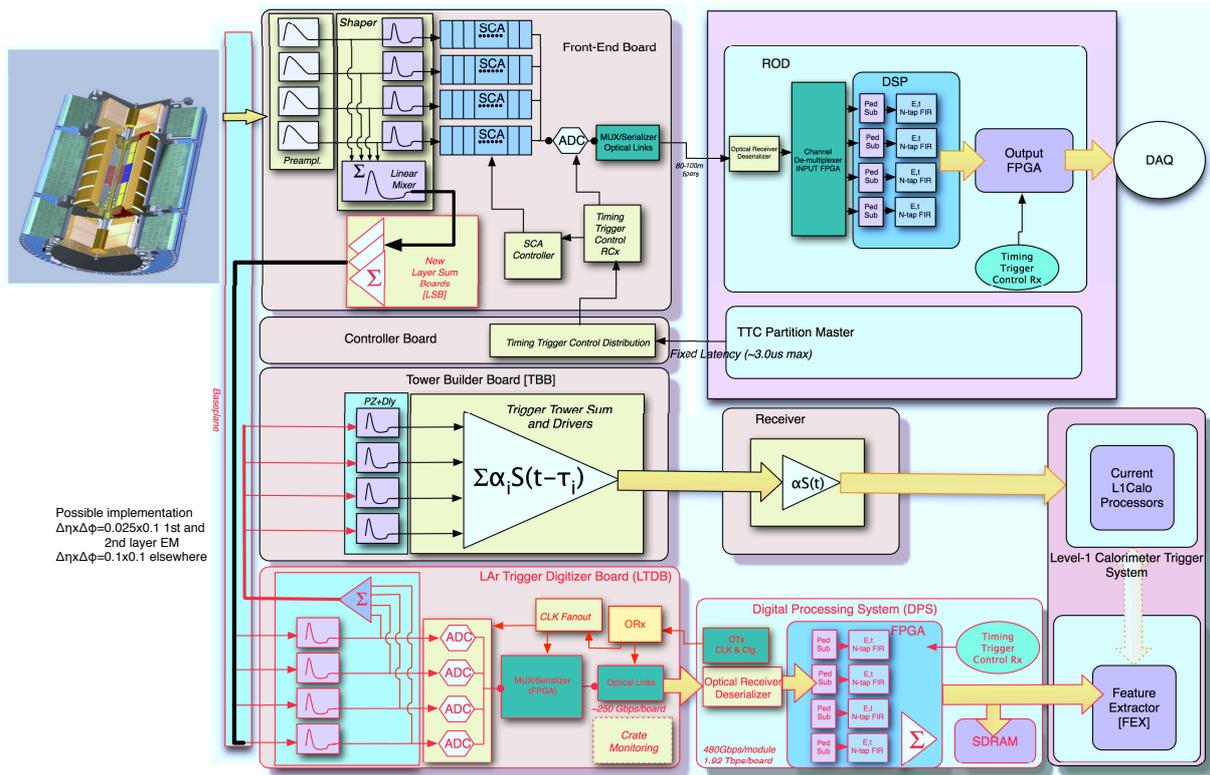


FIG. 8: Schéma de principe du système de lecture du calorimètre à argon liquide pour la phase I.

### 5.1 Amélioration envisagée du système de déclenchement

Le schéma actuel de lecture du calorimètre est dual avec deux chaînes presque indépendantes :

- une chaîne de lecture analogique des 3400 tours calorimétriques projectives à une fréquence de 40MHz afin de concourir à la décision de déclenchement de niveau 1 ; la taille typique de ces tours est de  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ .
- Une chaîne de lecture numérique de l'ensemble des 182468 cellules à une fréquence de 75 kHz (au maximum) afin de procéder à la décision de déclenchement de plus haut niveau, et à l'acquisition de données.

Afin de préserver les capacités de déclenchement à partir de la phase I du LHC, il est proposé une amélioration de la chaîne concourant à la décision de niveau 1, comme détaillé au paragraphe 3.1. Il est ainsi prévu d'extraire l'information pour chacune des quatre couches du calorimètre électromagnétique et d'améliorer la granularité de l'information des couches 1 et 2, où est confinée la majorité des gerbes électromagnétiques ; ces informations seront extraites par voie numérique.

Par ailleurs, il est prévu de mettre en place ce nouveau système tout en préservant la chaîne de lecture analogique des tours afin de parer à tout problème ponctuel du nouveau système. La figure 8 présente une proposition de schéma de principe, les éléments entourés en rouge correspondant aux nouveaux éléments (ou appelés à remplacer les anciens).

Dans la configuration actuelle, la sommation analogique des cellules pour former des tours calorimétriques est effectuée à trois niveaux successifs :

1. au niveau du premier composant de préamplification/mise en forme localisé sur la carte de lecture frontale (*Front-End Board - FEB*). 1532 cartes FEBs équipent le calorimètre ;
2. au niveau des cartes passives mezzanine (*Layer Sum Board - LSB*) localisées sur ces mêmes cartes

de lecture en combinant les premiers éléments pour former des sommes de taille  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$  dans une couche du calorimètre. Chaque FEB est équipée de deux LSBs.

3. au niveau de la carte de sommation dédiée (*Tower Builder Board - TBB*) pour combiner les sommes provenant de différentes couches. Le calorimètre est équipé de 120 cartes TBB.

Si la première étape peut être préservée, le souhait de raffiner la granularité dans les couches 1 et 2 du calorimètre impose un remplacement intégral des 3000 cartes passives mezzanine. Ce remplacement ne devrait pas poser de problèmes technologiques majeurs. La conséquence de cette granularité améliorée est évidemment un nombre de signaux transitant depuis les cartes FEB vers les cartes de sommation TBB qui sera multiplié par un facteur supérieur à 2 ; cette transmission est actuellement réalisée via les fonds de panier des châssis abritant les cartes électroniques. Elle le demeurera au prix d'un remplacement de l'intégralité de ces fonds de panier.

Dans le schéma futur, ces signaux seront d'abord acheminés vers une nouvelle carte à concevoir (*LAr Trigger Digitizer Board (LTDB)*), qui prendra en charge la conversion analogique/numérique des signaux de granularité affinée à une fréquence de 40 MHz avant transmission par lien optique vers le système de lecture situé dans les salles de comptage (*backend*). Cette nouvelle carte aura également pour fonction d'opérer une nouvelle sommation -aujourd'hui réalisée dans les anciennes cartes *LSB* à l'étape 2-, rétablissant ainsi des signaux de granularité  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ , qui seront renvoyés via le fond de panier vers la carte TBB inchangée. Cette dérivation des signaux analogiques de granularité affinée permet, par des modifications limitées, de proposer une nouvelle chaîne de lecture améliorée, tout en préservant intégralement le schéma actuel. Il convient de noter que le niveau de radiations auquel cette nouvelle électronique frontale devra résister (10kGy en dose intégrée pour les deux phases I et II) sera largement supérieur à celui requis lors du développement de l'électronique actuelle (3kGy).

Dans la salle de comptage, la réception des données numériques produites à haute fréquence nécessite la conception d'un système de lecture dédiée (*Digital Processing System - DPS*). S'inspirant de l'expérience concluante du système ROD utilisé actuellement pour le traitement des données numériques, un traitement en ligne (soustraction de piédestaux, filtrage optimal) dans des composants FPGA est envisagé. Le flot de données par carte sera cependant incomparable avec ce qui est traité aujourd'hui.

## 5.2 Développements en cours à l'IN2P3

Pour chacun des quatre sujets développés dans cette sous-section, l'état des lieux et les problématiques techniques sont développés, suivis par la position des groupes IN2P3 au sein de la collaboration et le calendrier.

### 5.2.1 Conception des fonds de panier des châssis d'électronique

Afin d'acheminer les signaux entre les différentes cartes, les fonds de panier des châssis d'électronique frontale doivent être intégralement repensés et remplacés. Le groupe du LAL a déjà contribué à cette réflexion, notamment sur le plan conceptuel, en proposant un agencement des nouvelles cartes dans les châssis afin d'optimiser le routage. Ce groupe entend poursuivre cette réflexion jusqu'à la validation du choix technique final, sans préjuger d'une éventuelle implication dans la production.

### 5.2.2 Conception de la carte *LTDB*

La carte *LTDB* est un nouvel élément du système de lecture frontal des signaux du calorimètre qui va permettre de numériser à une fréquence de 40 MHz les signaux de granularité fine par couche (*Super-Cells*), qui seront envoyés vers le système *DPS* décrit dans la section 5.2.4. Elle répond aux spécifications suivantes, illustrées ici pour la partie tonneau (EMB) :

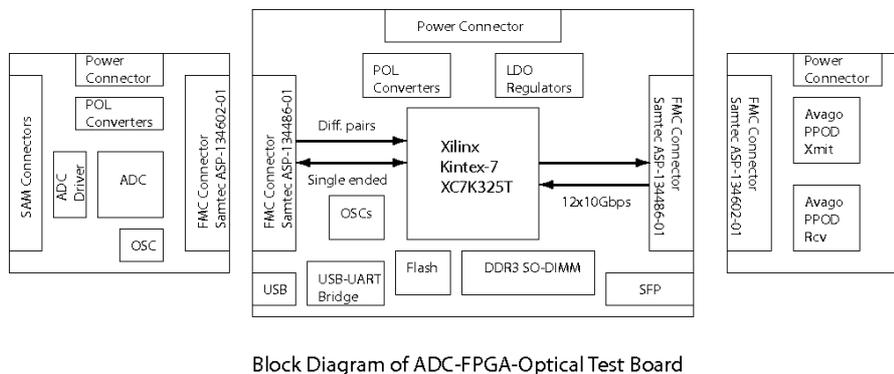


FIG. 9: Schéma de principe d'une carte de test des fonctions élémentaires de la future carte *LTDB* du calorimètre à argon liquide.

- Réception de 284 signaux analogiques des sommes par couche (*Super-Cells*) générés par les cartes FEBs.
- Somme analogique des signaux par couche pour envoi via les nouveaux fonds de panier vers les cartes *TBB* actuelles, dont les fonctionnalités seront inchangées.
- Passage en différentiel des 284 signaux pour envoi vers les composants ADC pour numérisation à 40 MHz.
- Multiplexage des données en sortie des ADC pour envoi vers le sérialiseur avant transmission optique vers le système *backend*. Le flot de données sera de l'ordre de 250 Gbits/s envoyé via 50(25) fibres optiques avec un débit de 5(10) Gbits/s.

La figure 9 présente une vue schématique d'une carte de test des fonctions élémentaires de la carte. Ce concept de nouvelle carte purement numérique en complément de l'ancienne chaîne analogique ne s'est en fait imposé que très récemment, quand l'idée originale d'un remplacement intégral des anciennes cartes *TBB* par des cartes mixtes (analogique-digital) s'est avérée trop compliquée et risquée. Le groupe du LAL ayant contribué à cette réorientation conceptuelle est décidé à poursuivre le travail de recherche et développement en la matière. Une collaboration avec le groupe de l'IRFU, déjà engagé dans cette réflexion, est envisagée.

### 5.2.3 Développement d'un convertisseur analogique-digital

La nouvelle carte de traitement digital *LTDB* évoquée au paragraphe précédent nécessite un convertisseur analogique-digital aux spécifications bien précises :

- rapidité de traitement permettant d'extraire en continu les données à 40 MHz vers les processeurs de déclenchement de niveau 1 ;
- latence de traitement inférieure à 70 ns ;
- gamme dynamique étendue de 12 bits ;
- tenue aux radiations pour résister au flux de particules très élevé au sein du détecteur ;
- consommation électrique réduite dans un environnement très confiné et dense en électronique de lecture.

Au printemps 2012, trois solutions principales demeurent à l'étude au sein de la collaboration : l'utilisation de composants commerciaux, la conception d'un convertisseur dédié de type *pipeline-SAR*, et la

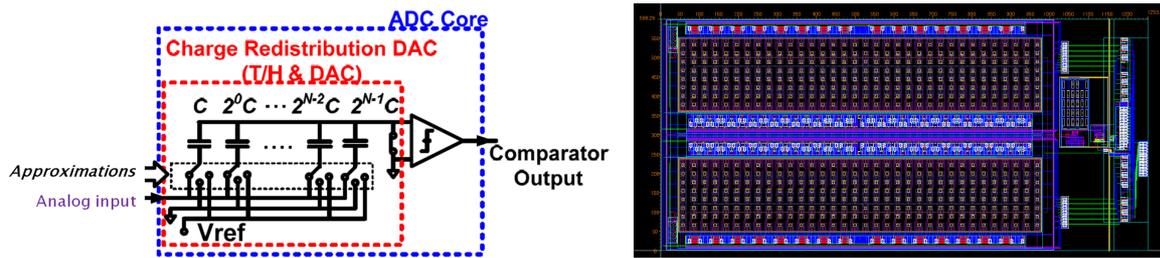


FIG. 10: A gauche : schéma de principe d'un convertisseur de type SAR. A droite : dessin de la première version du convertisseur conçu au LPSC.

conception d'un convertisseur dédié de type SAR (pour Successive Approximation Register).

Identifier un composant commercial répondant à ces spécifications présente des avantages certains, en terme de fiabilité éprouvée et de coût. Cela ne peut être cependant décidé qu'au terme d'une longue campagne de validation de tenue aux radiations. Si les tests réalisés jusqu'ici ont permis d'identifier 2 composants encore fonctionnels après une irradiation équivalente à celle du LHC-phase II, il n'a pas été possible d'identifier un composant qui soit également résistant aux *single event upsets*. Par ailleurs, si de prime abord, le choix d'un composant du commerce peut sembler plus aisé, à terme, l'intégration dans la carte *LTDB* peut s'avérer plus compliquée, notamment en terme d'alimentation.

Parallèlement à cela, un autre axe de recherche a été mené par le laboratoire de Columbia University pour concevoir un convertisseur de type hybride *pipeline-SAR*, où un premier bloc de type *pipeline* réalise la conversion sur une gamme de 4 bits, avant qu'un second bloc de type SAR ne prenne en charge les bits restants. A ce jour, un prototype comprenant uniquement le premier bloc de type *pipeline* a été conçu et testé.

Il est intéressant de souligner que cette idée de type hybride a été originellement proposée par les électroniciens du LPSC de Grenoble, avant d'être reprise par l'équipe de Columbia. En raison des difficultés de génération des tensions de référence nécessaires au type *pipeline* bien identifiées et quantifiées dans des études passées pour la collaboration ILC, ces électroniciens avaient alors privilégié un premier bloc de type *FLASH*. Cependant à l'issue d'études préliminaires, la faisabilité d'un convertisseur purement SAR répondant aux spécifications originelles a été envisagée. C'est le troisième axe de recherche mené par le LPSC.

Ce nouvel axe a en fait été rendu possible par l'adoption du standard "IBM-130nm" préconisé par le CERN pour tous les développements futurs en électronique. D'emblée, ce choix présente de multiples avantages : tenue aux radiations éprouvée, uniformisation des composants permettant d'homogénéiser les tensions d'alimentation et d'intégrer différents composants si besoin. Dans le cas spécifique du convertisseur de type SAR, la capacité du standard IBM à faire fonctionner les différents blocs (comparateur et convertisseur digital-analogique principalement) à très haute fréquence est un avantage crucial. Le convertisseur de type SAR est en effet réputé pour sa simplicité de conception (voir schéma 10) mais est relativement lent, un seul bit étant converti par coup d'horloge. En l'occurrence, les composants devront traiter les données à une fréquence de  $12 \times 40 \text{ MHz} = 480 \text{ MHz}$  pour remplir les spécifications en terme de vitesse et de dynamique, une latence de 25 ns étant quant à elle assurée par le concept même du SAR. Les premières simulations en technologie "IBM-130nm" semblent indiquer que cela est réalisable, sans perdre à l'esprit cependant la nécessité de garder sous contrôle la consommation électrique. Des développements innovants menés au LPSC proposent des pistes prometteuses pour résoudre ce problème. Les dernières simulations indiquent ainsi une très faible consommation, inférieure à 10mW par canal. Une première version de ce convertisseur novateur de type SAR sera ainsi soumise à la production au début du mois d'août 2012. Le premier prototype devrait ainsi être disponible à la fin de l'année pour les tests. Le choix final de la collaboration devrait intervenir au cours de l'année 2013.

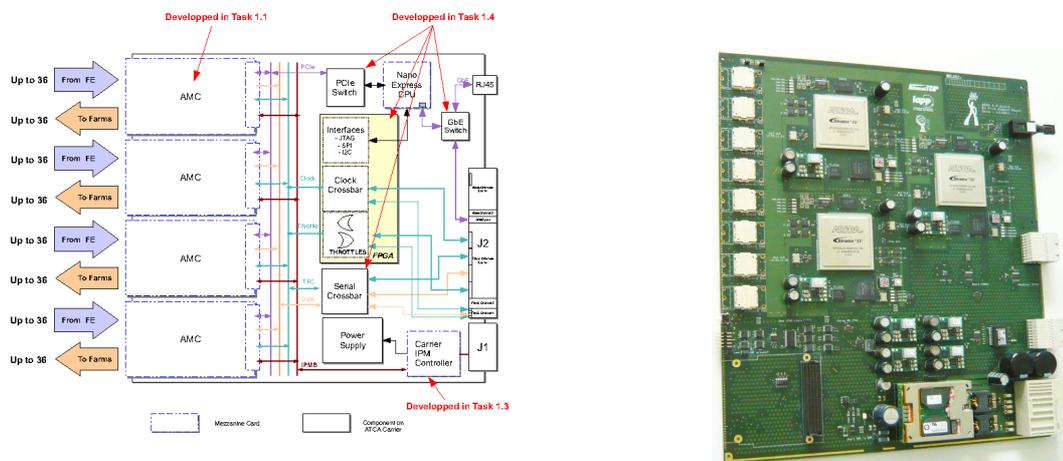


FIG. 11: A gauche : schéma d'une carte DPS générique. A droite : photo de la carte *ROD evaluator* en fabrication au LAPP.

#### 5.2.4 Développement des cartes *DPS*

ATLAS programme le remplacement des cartes de lecture *backend* (*ROD*) à l'horizon des années 2020 (Phase II). Les développements en cours pour ces nouvelles cartes *sROD* pourraient cependant trouver une application dès la phase I dans le système de lecture *DPS* (pour "Digital Processing System") des nouvelles cartes *LTDB*. En effet, le flux de données en sortie des cartes *LTDB* pour la phase I et des futures cartes *sFEB* pour la phase II sont identiques aussi bien en qualité (optique et digital) qu'en quantité (1.4-1.9 Tbits/s à 40 MHz).

Plus qu'un simple pont entre l'électronique frontale et le système de déclenchement de premier niveau (L1CALO), ce système *DPS* permet d'intégrer un traitement des données au sein du châssis afin de les préparer en amont du traitement final par le système L1CALO (Feature Extractor ou FEX). Il est ainsi envisagé de calculer l'énergie par super-cell pour le FEX. En outre, en exploitant la haute connectivité au sein des châssis ATCA (e.g. *full mesh*) il serait possible de construire les tours de déclenchement au sein même du système *DPS*. La structure des cartes *DPS* est présentée sur la Fig. 11.

Les développements en vue de la fabrication d'une future carte *sROD* ont démarré au LAPP en 2009-2010 avec plusieurs étapes déjà franchies :

- Choix de la technologie ATCA
- Fabrication d'une carte contrôleur IPMI en 2010-2011. Une nouvelle version de cette carte est en cours de conception pour répondre aux demandes de l'expérience LHCb (via le CPPM).
- Fabrication d'une carte de tests ATCA 2010-2011
- Fabrication d'une carte *ROD evaluator* en 2012 (cf Fig. 11) pour tester les transferts rapides en entrée et sur la carte.
- Conception et fabrication d'une carte *DPS* pouvant servir dans le système démonstrateur, qui sera installé au cours de l'arrêt prolongé LS1 pour validation en présence de collisions entre 2014 et 2017.

Un dossier ANR-blanc a été déposé en janvier 2012 sous l'acronyme GIPSY par les deux laboratoires CPPM et LAPP pour les deux expériences ATLAS et LHCb. Ce projet propose de développer un ensemble de blocs élémentaires et génériques en électronique/logiciel embarqué et logiciel de haut niveau ainsi que des cartes d'électronique complètes. Ceci a pour but d'accélérer le développement de

Objet	Référence	Equipe			
Fond de panier / Carte LTDB	5.2.2	LAL	Dominique Breton	IR-E	15%
			Embauche en cours (2012)	IR-E	100%
			Embauche future (2013)	IE-E	80%
Numériseur	5.2.3	LPSC	Daniel Dzahini	IR-E	50%
			Laurent Gallin Martel	IE-E	15%
			Fatah Rarbi	IR-E	70%
			Benjamin Trocmé	CR	
Système DPS	5.2.4	LAPP	Alain Bazan	IE-I	100% (retraite 2013)
			Fatih Bellachia	IE-I	100%
			Sébastien Cap	AI-E	65%
			Nicolas Dumont-Dayot	IE-E	90%
			Laurent Fournier	IE-I	100%
			Nicolas Letendre	IR-E	30%
			Guy Perrot	IR-E	90% (retraite 2014)
			Isabelle Wingerter-Seez	DR	
	CPPM	Emmanuel Monnier	DR		

TAB. 1: Organisation des équipes par statut et spécialité (E :électronique / I :informatique) pour l'upgrade phase I du calorimètre à argon liquide.

systèmes d'envergure pour la lecture et le déclenchement, dans le cadre des deux expériences.

### 5.3 Ressources humaines et financières

Le tableau 1 présente la composition des équipes ayant déjà contribué effectivement aux différents projets en cours, ou ayant exprimé un intérêt fort pour y contribuer à court terme. Le tableau 2 résume quant à lui l'ensemble des demandes budgétaires en terme de matériel et de personnel temporaire pour la période 2013-2018 comparées avec l'ensemble des coûts budgétisés pour la phase I s'élevant à 27.2M€<sup>2)</sup>. Il convient d'ailleurs de souligner que ce coût total pourrait éventuellement subir une augmentation modérée de l'ordre de l'ordre de 2.8 M€ pour diverses améliorations reliées aux système de détection des muons, d'acquisition et de déclenchement.

Il a été fait le choix d'apporter un poids relativement équivalent aux activités d'électronique frontale (fond de panier, carte *LTDB* et numériseur) et d'électronique en salle de comptage (système *DPS*). Ce choix est cohérent avec la taille des équipes impliquées et la contribution historique des laboratoires français au calorimètre à argon liquide. L'exacte ventilation des crédits (particulièrement pour l'électronique frontale) sera affinée dans le courant de l'année 2013, quand les choix technologiques auront été arrêtés et que le *MOU* sera en cours de rédaction.

<sup>2)</sup>Les estimations de coût pour l'intégralité du calorimètre et ATLAS ont été dérivés de la Letter Of Intent en appliquant un taux de conversion : 1.2CHF = 1€.

Objet	k€	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Fond de panier / LTDB / Numériseur	<b>650</b>	50	0	50	350	150	50
Système DPS	<b>800</b>	50	50	-	300	350	50
<b>Total</b>	<b>1450</b>						
Total calorimétrie argon liquide (2012-2018)	<b>6650</b>	650	108	783	3380	1570	0
Total ATLAS (2012-2018)	<b>27180</b>	4000	3360	4210	7360	4010	3110
<b>ETP (CDD)</b>							
Numériseur	<b>2</b>	0	0	1	1	0	0
Carte LTDB	<b>3</b>	0	0	0	1	1	1
Système DPS	<b>3</b>	0	0	0	1	1	1
<b>Total</b>	<b>8</b>	0	0	1	3	2	2

TAB. 2: Demande financière *CORE* pour la phase I à l'IN2P3, comparée au budget présenté pour la phase I du calorimètre à argon liquide et de ATLAS dans son ensemble. La partie inférieure du tableau donne une estimation des besoins en personnel temporaire à l'IN2P3 pour la phase I du calorimètre à argon liquide.

## 6 R&D Tracking phase II

Le détecteur interne d'ATLAS a une durée de vie limitée par plusieurs effets. Le détecteur gazeux TRT (Transition Radiation Tracker) ne peut pas fonctionner à la haute luminosité de  $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  à cause du très haut taux d'occupation dans les pailles TRT. La partie basée sur les détecteurs silicium (pixel et micro-pistes) est limitée par la dose d'irradiation totale des capteurs Si car les zones endommagées du détecteur Si piègent les charges et réduisent le signal. La réduction de la zone désertée dans les capteurs Si réduit le signal à tension de polarisation fixe. De plus, l'effet des radiations augmente le courant de fuite et le bruit, et provoque finalement la surchauffe des détecteurs.

Les dommages à l'électronique frontale des pixels, micro-pistes, aux diodes lasers de transmission optique des signaux réduisent leurs performances avec la dose totale. L'augmentation des taux d'occupation avec la luminosité  $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  sature les circuits de lecture et les mémoires tampons actuelles de l'électronique, entraînant ainsi un temps mort important. Ces considérations sont à la base de la décision d'ATLAS de changer complètement le détecteur interne et de baser le nouveau détecteur interne sur les technologies Silicium les plus avancées. Celui-ci doit être complètement opérationnel pendant la Phase II à partir de 2023 pour accumuler une luminosité intégrée de  $3000 \text{fb}^{-1}$ .

### 6.1 Schéma global

Le schéma global du nouveau trajectographe prévoit au moins 4 couches concentriques de pixel tonneaux avec plusieurs disques en avant. Tout le détecteur pixel doit être remplaçable lors d'un accès de longue durée (plus d'une année). Les deux couches pixel les plus internes doivent être remplaçables pendant un accès court (moins de 6 mois) sans la perte de vide dans le tube à faisceaux du LHC. Cette condition oblige à l'installation *in situ* en deux demi-coquilles (clamshell) autour du tube à vide.

Les laboratoires de l'IN2P3 se concentrent sur le programme de R&D des détecteurs pixel dont les détails seront exposés dans les sections suivantes.

La partie externe du trajectographe sera composée de 5 double couches de micro-pistes Si à petit angle stéréo et de plusieurs disques. Des micro-pistes courtes de 2,4 cm seront utilisées pour les deux couches internes pour réduire le taux d'occupation. Les trois double couches extérieures utiliseront la technique classique des micro-pistes de 4,8 cm. De nouveaux capteurs Si planaires avec des implants

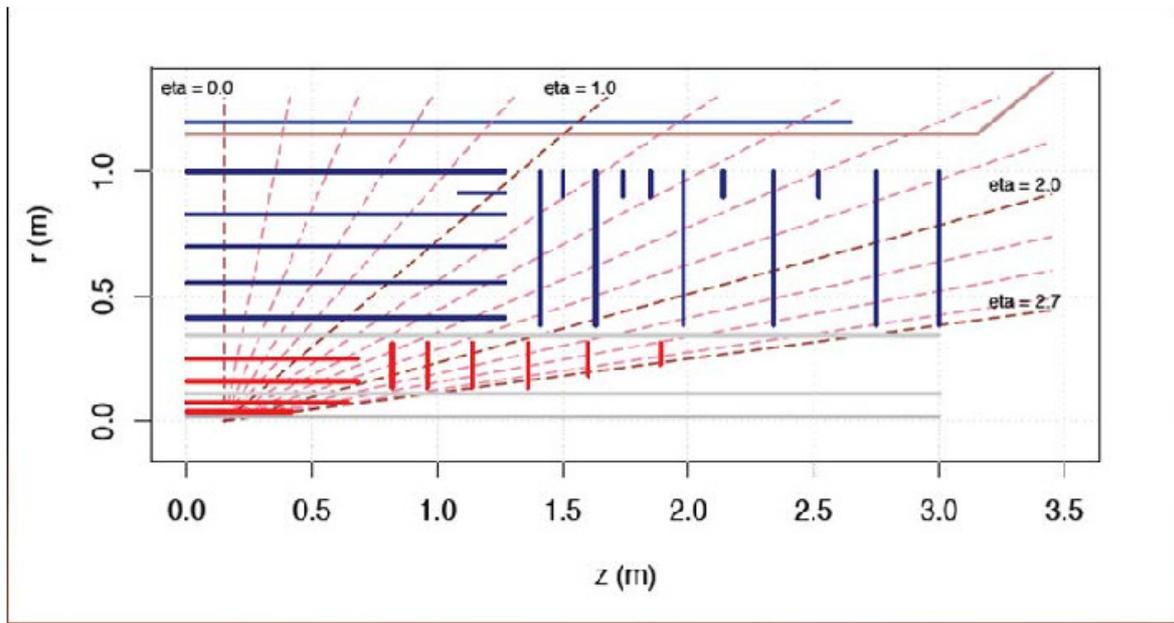


FIG. 12: Schéma global du trajectographe interne ATLAS pour la Phase II (Cartigny layout).

de type n sur les wafers de type p, équipés d'électronique frontale CMOS 130 nm, seront capables de conserver leur performance jusqu'à une luminosité intégrée de  $3000 \text{ fb}^{-1}$ .

Le dernier schéma global du trajectographe (Cartigny layout) est présenté dans la Figure 12. Les plans d'ingénierie et la simulation complète de ce schéma avec GEANT4 ainsi que la reconstruction dans ATHENA sont encore en cours. Les résultats de ces études seront présentés dans le document "Letter of Intent (LoI) de la Phase II d'Upgrade ATLAS" prévu pour début 2013.

## 6.2 Mécanique et refroidissement pixel

Plusieurs variantes du schéma général, alternative du schéma "Cartigny", seront étudiées pour la LoI Phase II. En particulier :

1. Les échelles pixel internes de type IBL développées par l'IN2P3
2. Les échelles pixel Alpines avec recouvrement en z de type tuiles développées par l'IN2P3
3. Les échelles pixel internes de type I-beam développées par Berkeley
4. Les échelles pixel externes coniques développées par Berkeley

La mécanique des échelles sera basée sur l'utilisation des mousses carbonées ultra-légères avec les câbles intégrés dans les supports mécaniques. Le but est d'arriver à une épaisseur effective de 1 % de  $X_0$  par couche pixel. Le refroidissement sera réalisé par évaporation de  $\text{CO}_2$  dans des tubes en titane, capables de refroidir les capteurs jusqu'à  $-10^\circ \text{ C}$  pour une puissance de  $450 \text{ mW/cm}^2$ . Une option de refroidissement fluocarbonate évaporative avec un mélange  $\text{C}_3\text{F}_8/\text{C}_2\text{F}_6$  est aussi étudiée comme solution de secours.

### 6.2.1 Option avec l'échelle Alpine

La géométrie idéale pour une couche de détection de traces dans un champ solénoïdal auprès d'un collisionneur hadronique est un cylindre composé de petits éléments orientés vers le point d'interaction (fig. 13).

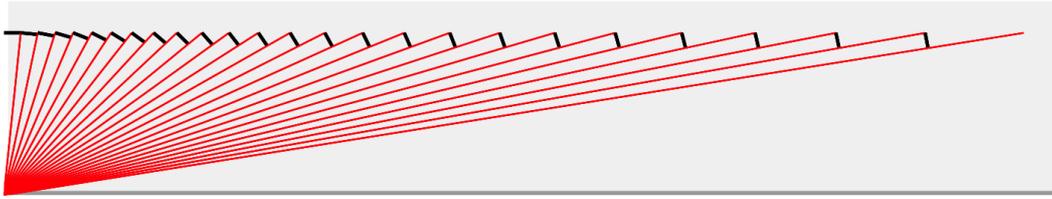


FIG. 13: Configuration idéale en 2D dans le plan  $Z - R$

Dans le cas d'un détecteur pixel composé de modules rectangulaires avec recouvrement on peut se rapprocher de la configuration idéale. Cette configuration peut être réalisée mécaniquement sous la forme d'une "échelle" de modules, avec une partie centrale où les modules sont parallèles au faisceau, et une partie "endcap", où les modules sont inclinés pour être quasi-perpendiculaires aux traces provenant de la zone de collisions (fig. 14).

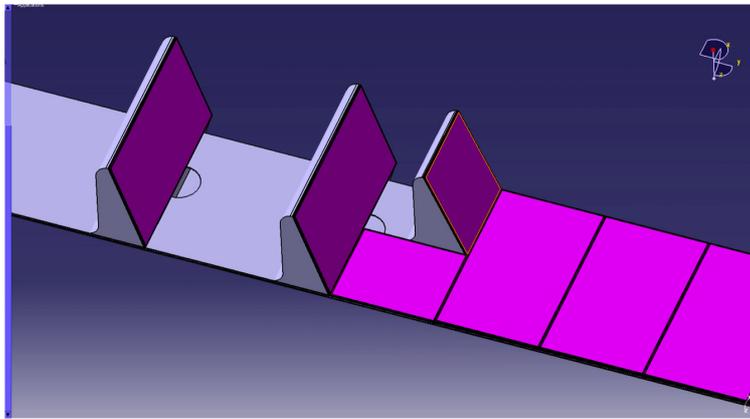


FIG. 14: L'échelle Alpine. La zone de transition entre "plaines" et "montagnes" est nécessaire pour éviter les conflits entre échelles voisines

L'échelle Alpine est un concept prometteur, mais pour passer à l'approbation de cette option il faut que tous les développements associés aboutissent, notamment

- La réalisation de prototypes d'échelle mécanique et leur qualification en termes de rigidité et de performances thermiques (fig. 15).
- La simulation détaillée de la reconstruction de traces avec un détecteur pixel "Alpin", et la quantification des gains en performances.
- La conception et la réalisation des bus électriques et de la connectique associée pour servir les modules.
- La conception et le prototypage de la structure mécanique globale qui tient les échelles ensemble.
- La conception d'un détecteur Pixel complet, avec scénario d'installation et de réparation, des services, des zones de connexion, etc. L'environnement très radioactif impose des temps de connexion, de déconnexion et d'insertion très courts, ce qui pose des contraintes sur la conception de l'ensemble.

### 6.3 Capteurs pixel

Trois types de capteurs sont en cours de R&D dans ATLAS pour les couches internes des pixels :

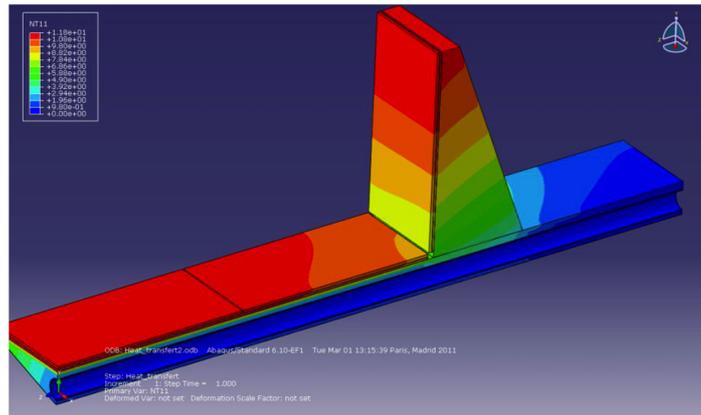


FIG. 15: Distribution de températures.

1. Silicium planaire n-sur-p (ou n-sur-n) aminci à  $150 \mu\text{m}$  avec ou sans bords actifs.
2. Si 3D avec des parois actives.
3. Diamants mono ou polycristallin.

Les études menées pour l'amélioration des capteurs pixel pour le projet IBL (en particulier au LAL et LPNHE) se sont focalisées sur deux aspects importants : la réduction des zones inefficaces au bord du capteur par la réduction des anneaux de garde, l'amincissement du capteur ainsi que l'amélioration de sa fiabilité pour supporter des tensions de désertion requises pour un fonctionnement optimal à très haute dose (jusqu'à  $1000 \text{ V}$ ). Pour la phase II du LHC, deux technologies principales de substrat seront exploitées : le pixel de substrat n-sur-n et n-sur-p. La granularité du détecteur interne sera plus élevée, on se fixera donc comme objectif la réduction de la taille de pixel à des dimensions inférieures à  $50 \mu\text{m}$  en phi, à  $150 \mu\text{m}$  en z et la mise au point d'un système de pixels "aboutables".

De nouvelles conceptions prometteuses de pixels basées sur des capteurs CMOS désertés (HV-CMOS) seront aussi explorées (CPPM). Les R&D préliminaires sont en cours pour des solutions avec des pixels monolithiques où l'électronique front-end est intégrée avec des capteurs ultra-fins ( $15\text{-}30 \mu\text{m}$ ) dans le même wafer Si en utilisant les technologies standard HV CMOS. Un travail de recherche et développement conséquent sera mené à bien pour les amener à maturité.

## 6.4 Électronique pixel et hybridation

Le circuit FEI4, conçu en collaboration avec plusieurs instituts (Bonn, CPPM, Gênes, LBNL, Nikhef) traite plus de 26000 pixels de  $50 \times 250 \mu\text{m}$  sur un circuit d'environ  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  en technologie IBM 130 nm. Les dimensions de cet "énorme" circuit, qui va équiper l'IBL, l'année prochaine, ont été voulues dans le but de diminuer les coûts de bump-bonding lors de sa réutilisation pour les couches externes du prochain trajectographe à pixel. Le circuit a été également pensé avec de nombreuses options d'alimentation ("Serial powering", DC-DC) destinées à réduire les accumulations de matière dans les futurs services. La version B de ce circuit, dont la résistance aux SEUs est actuellement testée sous faisceau au CERN par le CPPM, fonctionne de façon nominale et le rendement de production est excellent (de l'ordre de  $70 \%$ ) pour un circuit de cette taille. La R&D sur la future version FE-I4-C sera orientée vers la lecture des pixels compatible avec les taux de trigger Level-0 de  $500 \text{ kHz}$  avec une latence de  $5 \mu\text{s}$  et Level-1 de  $200 \text{ kHz}$  avec une latence de  $20 \mu\text{s}$ . Ce chip sera compatible avec le "track trigger" [59]. FE-I4-C aura les versions finales d'alimentations, mémoires durcies aux SEU, ADC haute résolution, capteur de température durci aux radiations etc.

La R&D, en ce qui concerne la partie "circuit de lecture" pour les upgrades (hors IBL), se focalise naturellement sur la manière de réaliser les circuits des couches les plus internes dans lesquelles le taux d'événements ne pourra pas être géré par le circuit FEI4B actuel. Cette R&D se concentre essentiellement sur 2 axes : le 65 nm et l'électronique 3D. La connexion de cette électronique au monde extérieur (les traditionnels wire-bond) fait aussi l'objet de nombreuses recherches (3D post-process) toujours dans le but de diminuer la matière. Enfin, à la limite entre détecteur et électronique de lecture, les capteurs HVCmos ou HRCmos, qui comportent une amplification dans le capteur lui-même pourraient révolutionner la conception des futurs trajectographes.

### **Le 65 nm :**

Gardant la même approche que lors des évolutions précédentes, la réduction des dimensions des pixels et le traitement de plus en plus sophistiqué de l'information dans le circuit peuvent être obtenus en changeant de noeud technologique. Le 65 nm est aujourd'hui la technologie retenue par une grande partie de la communauté HEP pour cette évolution. Cependant, diminuer encore la densité se fait généralement au détriment des performances analogiques, dégradation qui ne pourrait peut-être pas être entièrement compensée par un traitement numérique postérieur du signal.

Dans le but de s'assurer des performances analogiques, une petite matrice de pixels (16 \* 32) uniquement analogique (avec un système de lecture rudimentaire) a été soumise en technologie TSMC 65 nm (design LBNL) et est actuellement en test au CPPM. Les résultats préliminaires sont très encourageants avec un bruit de moins de 100 e rms.

La résistance aux SEU des registres de ce circuit prototype est également en cours d'évaluation sur les faisceaux du CERN. Un grand nombre de labos de l'IN2P3 (CPPM, LAL, LAPP, LPNHE, LPSC) a manifesté son intention de participer au travers du projet européen AIDA à l'élaboration de blocs réutilisables (mémoires, ADC, PLL, etc) dans cette technologie et commence à s'impliquer dans les développements.

### **Le 3D :**

Une approche radicalement distincte a été initiée avec l'apparition des technologies 3D, dans lesquelles l'électronique du pixel peut être séparée en 2 étages superposés. Dans une première approche, un de ces étages pourrait contenir la partie analogique et l'autre la partie numérique du pixel. Les 2 étages sont ensuite connectés entre eux par un réseau serré de points de contact mécaniques et électriques et, après amincissement d'un des côtés, le circuit résultant a l'aspect d'un circuit habituel.

A terme, cette approche pourrait permettre de profiter de la technologie la mieux adaptée pour remplir chaque fonction en levant du même coup la nécessité du compromis entre taille et performances. Le coût d'une telle approche peut même s'avérer compétitif par rapport à une technologie classique.

Une partie importante de la communauté scientifique internationale s'est associée dans un consortium pour concevoir les premières matrices pixel dans cette technologie. Au sein de l'IN2P3, le CPPM, le LAL, le LPNHE et l'IPHC se sont associés à cet effort et les premiers circuits ont été soumis en 2009. Malheureusement, à ce jour, suite à des problèmes divers de production, aucun circuit n'a pu être complètement testé en configuration 3D même si la partie analogique d'un circuit type FETC4, amincie à 10  $\mu\text{m}$ , a montré qu'elle fonctionnait avec les mêmes performances que dans son épaisseur habituelle.

### **Les capteurs HV et HRCMOS :**

Suivant une approche désormais classique de certains circuits MAPS (qui intègrent un ampli de charge dans chaque pixel), certaines technologies (AMS 0,35 et 0,18  $\mu\text{m}$  par exemple dans leur option HV ou IBM 90 nm pour le HR) permettent de déserrer partiellement le substrat et ainsi d'obtenir des

temps de collection de charges compatibles avec les expériences LHC. Remplacer les capteurs actuels des pixels par ce type de capteur ouvrirait la voie à plusieurs types d'évolutions profondes des détecteurs pixels :

- En permettant de simplifier la partie analogique, maintenant reportée sur le capteur, la taille finale des pixels peut être réduite.
- En ayant un signal capteur déjà amplifié on peut envisager un couplage capacitif vers l'électronique numérique en remplaçant les billes de bump-bonding par une simple couche isolante de faible épaisseur.
- Enfin, en combinant cette approche à une approche 3D, on peut penser à une intégration vraiment monolithique de l'ensemble électronique-capteur.

Pour évaluer ces différents points à moindre coût, un capteur de ce type (avec des pixels de  $33 \times 125 \mu\text{m}$ ) a été soumis début 2012. Ce capteur sera hybridé par bump-bonding et couplage capacitif à l'étage d'entrée de l'actuel FEI4 (dont les paramètres analogiques seront ajustés en conséquence). Ces réalisations font l'objet d'une collaboration (Bonn, CPPM, Heidelberg, LBNL)

### **L'interconnexion et les technologies 3D post-process :**

Depuis quelques années déjà, le souhait de réduire la quantité de matière inactive a conduit les expériences à rechercher de nouvelles solutions pour diminuer les zones mortes en périphérie des circuits et notamment au niveau des fils de connexion. Dans ce but, le report des plots de wire-bond de l'autre côté du circuit de lecture par des technologies Through Silicon Vias (TSV) est une voie actuellement explorée par plusieurs groupes (Bonn, CPPM, LAL, Munich). Les industriels capables d'assurer ce type de report sont d'ores et déjà identifiés (IZM, LETI) et quelques prototypes ont déjà été réalisés.

Sans avoir l'ambition d'un vrai 3D au sens dont il a été question auparavant, cette approche permet d'envisager des concepts radicalement innovants pour les modules et leurs supports mécaniques et possède l'avantage d'être moins sensible au choix de la technologie électronique de départ.

Les nouvelles avancées issues de l'industrie de la microélectronique moderne seront fortement exploitées. En plus des techniques d'interconnexions verticales en 3D, les connexions en inter-diffusion solide-liquide (SLID) et autres micro-bumps seront étudiés. Ces activités de recherche et développement repousseront les limites de nos connaissances dans le domaine de la conception d'imageurs, lesquels pourront sans doute être valorisés dans des applications pluridisciplinaires.

## **6.5 Services**

Les performances du tracker sont déterminées en large partie par la quantité et la distribution de matière qu'il contient, et une large partie de cette matière est contenue dans les "Services", i.e. les cables, tubes de refroidissement, fibres optiques, leurs supports, et les zones de connexion.

La phase II de l'upgrade impose des contraintes supplémentaires en fiabilité et temps d'intervention, notamment pour les connexions/déconnexions, dues à l'environnement très radioactif.

Le groupe de travail "Services" d'ATLAS, en étroite collaboration avec le groupe "Intégration", gère les services de façon coordonnée entre les différentes parties du tracker. L'IN2P3 est impliqué dans ce travail, sur plusieurs fronts.

### **6.5.1 PP1**

Le groupe du LAPP a proposé une solution innovante pour la zone de connexion du tracker complet (Patch panel 1, ou "PP1"), qui consiste à concentrer les connexions des "échelles" dans la zone PP1 sur des cartes PCB. Ces cartes concentrent les connexions d'un grand nombre d'échelles et réorganisent les connexions électriques "par famille" (séparant la puissance, les hautes tensions et les signaux de

contrôle), sur un minimum de connecteurs haute densité qui se trouvent du côté extérieur des cartes. Le nombre de connecteurs est ainsi réduit d'un facteur 10, ce qui permet d'utiliser des connecteurs robustes, facilement manipulables en caverne.

La carte PCB joue aussi le rôle de barrière d'étanchéité. Les connexions des parties centrales du tracker sont prévues sur des cartes mobiles, montés sur charnières. L'ouverture de ces cartes permet d'extraire les endcaps sans déconnexion du côté interne (vers les échelles).

Les connecteurs vers les échelles sont hautement optimisés, combinant tous les services d'une échelle (sauf les données) sur un seul connecteur d'environ 2 grammes de poids. Ce connecteur "hybride" a été développé par la société Axon spécifiquement pour l'upgrade d'ATLAS, et le premier prototype est en cours de test. Ce développement était géré par l'IN2P3, et financé par le CERN.

Un prototype complet d'une partie de PP1 est en cours de réalisation. Il consiste en une carte dessinée pour le nombre réel de connexions attendu, un "vrai" harnais muni des prototypes du connecteur hybride "interne" plus 70 harnais factices avec des dimensions et des propriétés mécaniques identiques, et des connecteurs "externes" de taille réelle (mais avec un nombre réduit de broches présentes), le tout dans un volume étanche qui correspond à un quart du tracker en  $\phi$ . Ce prototype devrait valider le concept, et permettre d'évaluer la qualité électrique des connexions.

### 6.5.2 Raccords fluides

L'IN2P3 développe un raccord pour les connexions des tube de refroidissement des échelles (applicable aux pixels et aux strips). Ce raccord doit satisfaire à un cahier de charges très exigeant, qui exclut les solutions commerciales :

- réalisation en titane
- quantité de matière hautement optimisée
- tenue aux radiations dépassant 10 MGy
- fiabilité extrême
- compatibilité avec le refroidissement par CO<sub>2</sub> bi-phasique

Une première version de ce raccord est en cours de validation pour l'IBL, où il fait partie du circuit de refroidissement fourni par les laboratoires de l'IN2P3. Mais la principale motivation pour ce développement reste l'upgrade du tracker complet en phase II. Le LAPP a soumis un dossier de valorisation pour ce raccord, et travaille avec un partenaire industriel local pour la réalisation en série.

### 6.5.3 Services pour le pixel Alpin

Les compétences acquises dans le domaine des services sont pleinement exploitées dans le concept du pixel Alpin (voir section 6.2). Le groupe du LAPP est en train d'étudier une carte qui permettrait de concentrer les bus de plusieurs échelles Alpines, de regrouper les services "par famille", de réduire le nombre de connecteurs d'un facteur 5, et d'effectuer des connexions/déconnexions rapides et robustes du détecteur pixel complet en caverne. Dans ce cas la carte doit gérer aussi le multiplexage des données. Il s'agit donc d'une carte active qui doit gérer un très grand flux de données.

## 6.6 Calendrier

L'installation du nouveau trajectographe ATLAS est prévue pendant le long shutdown de 2022. Le trajectographe doit être opérationnel pour la prise de données de 3000 fb<sup>-1</sup> à partir de 2023. L'installation en 2022 nécessite que le détecteur complet ait été au préalable assemblé et testé en surface.

## 6.7 Contribution IN2P3 humaine et financière

L'organisation des équipes IN2P3 dans les différents projets R&D est présentée dans le tableau 3. Les besoins de financement R&D pixel pour la période 2013-2018 sont présentés dans le tableau 4. L'estimation du coût total du trajectographe ATLAS est en cours et doit être présentée dans la LoI Phase II au début 2013, donc les estimations actuelles du coût total de 150 MCHF dans le tableau 5 sont très préliminaires. Les estimations des contributions IN2P3 au trajectographe ATLAS Phase II en financement et personnel sont dans le tableau 6.

## 6.8 Option de staging pixel upgrade pour la Phase I

Le nouvel Insertable B-Layer (IBL) [58] a été étudié pour fonctionner correctement jusqu'à la luminosité intégrée de  $550 \text{ fb}^{-1}$  et avoir une bonne efficacité de lecture jusqu'à la luminosité instantanée de  $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . L'IBL doit être fonctionnel jusqu'à la fin de la prise des données de la Phase I [60].

Par contre, le design du système pixel actuel d'ATLAS est prévu pour une dose totale de  $0.5 \text{ MGy}$  ( $10^{15}$  1 MeV neutron équivalent par  $\text{cm}^2$ ) et pour une luminosité instantanée de  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . En prenant en compte les incertitudes actuelles de manière conservatrice, une telle dose d'irradiation sera délivrée au b-layer actuel ( $R=5.05 \text{ cm}$ ) pour une luminosité intégrée de  $200 \text{ fb}^{-1}$ . Cela signifie que les dommages à la couche-1 de pixels dans les années 2016-2017 seront importants. En plus, les résultats du workshop de Chamonix-2012 ont démontré qu'il existe une forte probabilité que la luminosité instantanée du LHC en 2016-2017 puisse approcher  $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  plus rapidement que prévu initialement. Dans ce cas, on attend des réductions d'efficacité dans la couche-1. Une autre inquiétude vient de la mortalité des modules pixels qui a atteint 4% après 2 ans d'exploitation. Si le programme de réparation en 2013-2014 avec le changement des nouveaux Services Quarter Panels (nSQP) n'est pas approuvé ou rencontre des difficultés inattendues, on devra considérer l'accélération de la construction et de l'installation du détecteur pixel vers 2018 pour assurer des données pixel de grande qualité pour la période 2019-2021.

Une telle accélération est possible grâce au succès du développement du chip FE-I4-B, aux nouveaux développements des capteurs planaires et 3D pour l'IBL et au développement des échelles avec les mousses carbone avec des câbles intégrés. Le programme IBL sera le premier déploiement de ces technologies. Les premières simulations ont démontré que le remplacement des trois couches pixel à l'extérieur de l'IBL en 2018 peut améliorer la réjection de jets légers par étiquetage de quarks b de 25-50% [60]. La collaboration pixel ATLAS devra ré-examiner la question de l'avancement de la construction des détecteurs pixel vers la phase I en 2013. Pour préparer cette décision, la situation du détecteur actuel sera étudiée en profondeur. Les améliorations obtenues grâce au changement éventuel des nSQP seront mieux évaluées, les perspectives d'augmentation de luminosité seront plus sûres et des R&D seront faites pour l'amélioration du budget matière, les capteurs Si, les chips front-end, les interconnexions et les schémas d'alimentations. Cette R&D est partie intégrale de la R&D pour la Phase II. Les premières idées sur le layout du détecteur pixel pour la phase I sont montrées dans la Figure 16. Même si pour l'instant il n'y a pas de décision de déploiement du nouveau détecteur pixel au cours de la Phase I, en 2018, les besoins de performances de physique peuvent requérir cette option, ce qui demande un important travail de préparation.

Thème	Équipe			
Mécanique et refroidissement	CPPM	E.Vigeolas	IR	80%
		G.Hallewell	IR	90%
		F.Riviere	AI	50%
	LPNHE	T.Gastaldi	AI	50% (jusque 01/13)
		D.Laporte	IR	80%
		T. Beau	MC	10%
		P.Schwemling	PR	
		P.Dematos	IR	50%
	LAL	A.Fallou	IR	
	LAPP	T.Todorov	DR	
		P.Delbecque	IR	75%
		J.Ballansat	IR	87%
		N.Geffroy	IR	40%
Capteurs Si planaires	LPNHE	G.Galderini	DR	
		G.Marchiori	CR	
		J.Chauveau	PR	
		M.Bomben	CDD	100% (jusque 04/15)
	LAL	A.Lounis	MC	
		N.Dinu	IR	
		V.Linhart	PostDOC	
A.Bassalat	PhD			
Electronique pixel FE et capteur CMOS	CPPM	J.C.Clemens	IR	40%
		P.Breugnon	IR	80%
		M.Menouni	IR	90%
		P.Pangaud	IR	90%
		S.Godiot	IR	90%
		D.Fougeron	IR	90%
		F.Gensolen	IR	50%
		M.Jevaud	IR	33%
		F.Bombard	IR-CDD	100% (jusque 01/13)
	LAL	A.Rozanov	DR	
		G.Martin-Chassard	IR	
		D.Thienpont	IR	
	LPNHE	J.Tongbong	CDD	
		J.F.Genat	IR	25%
		O.Le Dortz	IR	25%
	LAPP	F.Crescioli	IR	50%
		R.Gaglione	IR	50%
G.Vouters		IR	30%	
F.Mehrez		PhD	100%	
Services ID, simulation	LAPP	N.Massol	IR	90%
		P.David	AI	90%
		J.Tassan	AI	20%
		T.Yildiszkaya	AI	70%
		T.Rambure	AI	93%
		S.Elles	IR	60%
	CPPM	F.Djama	IR	50%

TAB. 3: Organisation des équipes pour les R&D.

Objet	k€	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Mécanique/cooling	<b>716</b>	113	123	120	120	120	120
Capteurs planaires	<b>250</b>	45	50	45	40	35	35
Electronique FE, capteurs CMOS	<b>1660</b>	265	265	275	285	285	285
<b>Total</b>	<b>2626</b>	423	438	440	445	440	440
<b>ETP</b>							
Pixel R&D		23	27	30	30	26	26

TAB. 4: Demande financière R&D et estimation des besoins en personnel technique.

Objet	M CHF	M€	IN2P3 M€
Pixel	<b>25</b>	21	5.2
Strips	<b>105</b>	88	0.0
Infrastructure	<b>25</b>	21	4.8
<b>Total</b>	<b>150</b>	125	10

TAB. 5: Estimation financière *CORE* du trajectographe Phase II et contribution IN2P3 demandée (chiffres préliminaires).

Objet	M€	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Pixel-Infrastructure IN2P3	<b>10</b>	0.5 M	1.5 M	3 M	3M	1.5 M	0.5 M
<b>Total</b>	<b>10</b>						
<b>ETP</b>							
Pixel IN2P3 (CDI)		26	26	30	30	25	25
Ingénieurs et techniciens CDD		3	3	3	4	3	2

TAB. 6: Calendrier des demandes financières *CORE* et estimation des besoins en personnel technique.

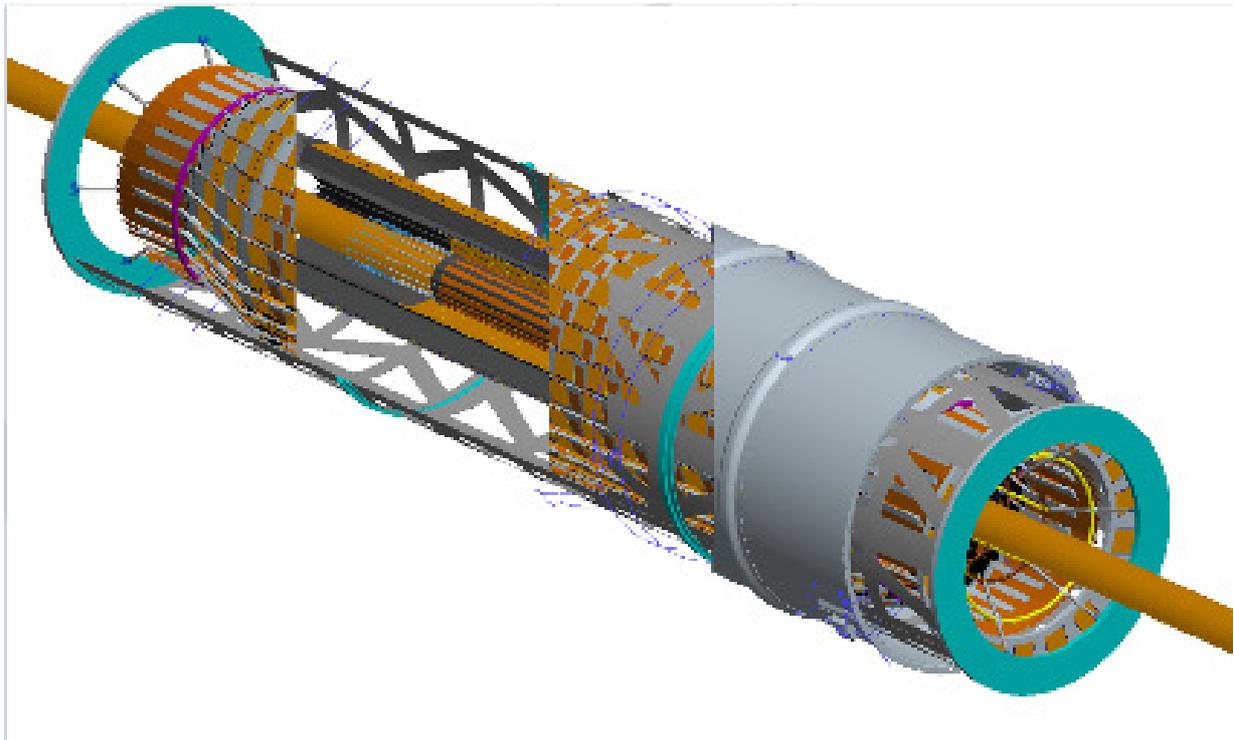


FIG. 16: Modèle 3-D du détecteur pixel phase II à l'intérieur du tube support pixel existant, compatible avec l'installation pendant la Phase I.

## 7 Calorimètres pour la Phase II : R&D et construction.

### 7.1 Calorimètre Hadronique : TILECAL

#### 7.1.1 Contexte général du TILECAL

Dans le schéma actuel (Figure 19a ), l'électronique de lecture VFE (Very Front End) placée directement derrière les PMTs(Photomultiplicateurs) et FE (Front End) pour la conversion numérique et le déclenchement, est logée dans des tiroirs amovibles situés sur le détecteur [2] (Figure 17). Les tiroirs accueillent également les systèmes de régulation des tensions individuelles appliquées à chaque PMT. Les cartes dites "3en1" de l'électronique VFE orientent les signaux dans trois directions FE :

- la sommation analogique des tours projectives de déclenchement,
- la numérisation des signaux physiques stockés dans des " pipelines"
- la numérisation des courants induits sur une durée de 10 ms environ par une source de Césium 137 ou par les événements à biais minimum, en vue des étalonnages.

L'objectif visé par le TILECAL (et aussi par la calorimétrie LAr) est d'avoir une électronique " free running " sur le détecteur (Figure 19b) avec numérisation à la fréquence du LHC et transfert par des fibres optiques à haut débit GBT vers la salle d'électronique USA15 dans laquelle se fera la sélection des signaux retenus. Dans ce schéma, il n'y a donc plus de voie " déclenchement ". Mais il est possible d'aller plus loin encore en effectuant directement les étalonnages via l'addition numérique des signaux de calibration convertis à la fréquence du LHC : il n'y a donc plus qu'un seul mode de lecture (Figure 19c). Trois options sont concurrentes pour la partie VFE/FE :

- Une solution en éléments discrets (Chicago), qui améliore l'électronique " 3en1 " actuelle et conserve la numérisation sur les tiroirs.

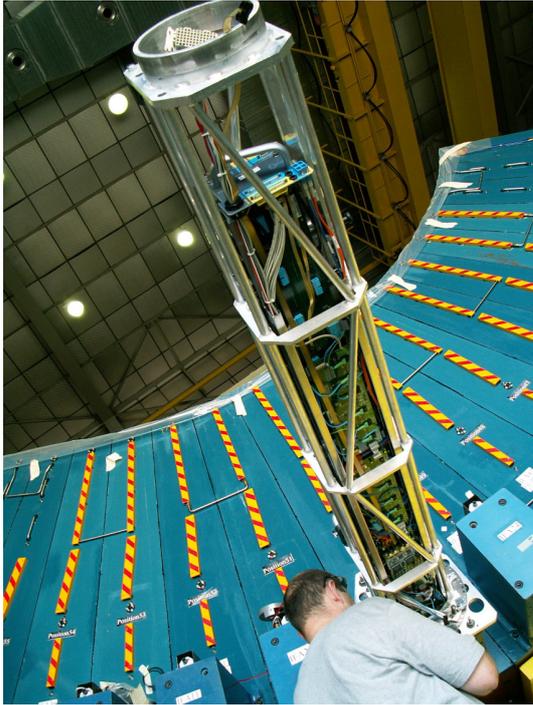


FIG. 17: tiroirs amovibles situés sur le détecteur contenant l'électronique du calorimètre Hadronique



FIG. 18: Tests de mini-tiroirs dans le hall 175 du CERN.

- Une solution consistant à concevoir un nouvel ASIC (LPC), utilisant la technologie IBM 130 nm, et contenant le maximum de fonctions, y compris les ADC et la sommation numérique pour les étalonnages (Figure 19c).

- Une solution utilisant un ASIC déjà existant (Argonne) dont la fonction QIE effectue des compressions couvrant la dynamique explorée, avec des tables de conversion.

L'électronique placée en aval est compatible avec les trois options envisagées. Elle est développée principalement par Chicago / Stockholm pour la conversion électro-optique et le transfert des données, et par Valence pour l'électronique backend (pré-ROD et ROD) dans la salle USA15. La construction d'un " démonstrateur " permettra une première comparaison des options sur des modules TILECAL en surface (bâtiment 175 du CERN) puis sur des modules ATLAS lors de la reprise en 2014.

### 7.1.2 Développements en cours à l'IN2P3

Quatre R&D sont menées au LPC depuis l'année 2008 et concernent des travaux de mécanique, d'électronique et de microélectronique, travaux qui convergent dans la conception et la construction du démonstrateur.

**Mini-tiroirs et services** Les tiroirs actuels sont des objets encombrants et lourds, dont la manutention est délicate. De plus, ils sont appariés en super-tiroirs, ce qui rend la certification et la maintenance de l'électronique délicate pour le fonctionnement de chaque paire. Pour résoudre ces difficultés, la collaboration a proposé d'étudier la faisabilité de mini-tiroirs, de longueur moitié et complètement indépendants du point de vue électronique. Un super-tiroir serait donc remplacé par un train de 4 mini-tiroirs. De plus,

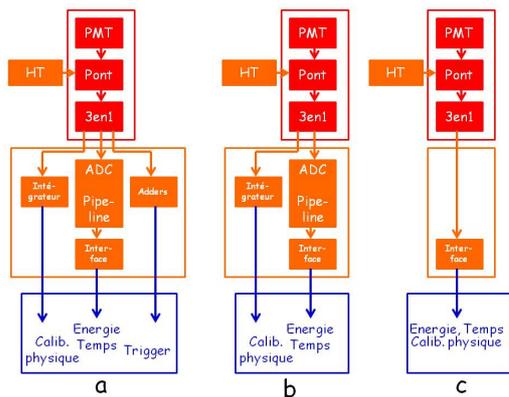


FIG. 19: Schéma simplifié de l'électronique du TILECAL actuelle (1a) et nouvelle (1b et 1c)

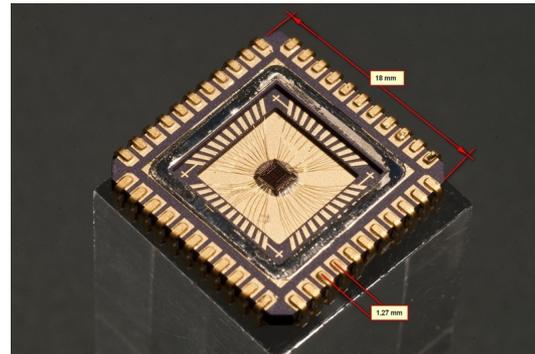


FIG. 20: Vue de l'ASIC FATALIC3

avec de nouveaux tiroirs, la campagne de remplacement des tiroirs pourrait être anticipée avant le shut down LS3, en pré-équipant une partie des mini-tiroirs.

Afin de lever l'obstacle rédhibitoire que ces trains de 4 objets se bloquent dans les modules lors des opérations insertion/extraction, des mini-tiroirs ont été fabriqués au LPC en améliorant divers aspects et testés dans le hall 175. (Figure 18), Le concept a été validé : les efforts sont divisés par deux et, surtout, il n'y a pas de blocage (note ATLAS en cours). Les études se poursuivent sur les liens mécaniques qui associent les mini-tiroirs, sur le routage des services, et sur des outillages de manutention nouveaux, plus simples que ceux utilisés pour les super-tiroirs.

**Ponts diviseurs** Les couples PMT/ponts diviseurs actuels n'ont pas été optimisés pour les conditions d'illumination du HL-LHC. S'agissant de diviseurs passifs, les forts courants induits par les événements à biais minimum modifieront la répartition des tensions inter-dynodes, en particulier sur les derniers étages d'amplification des PMTs et donc affecteront les gains, donc la linéarité et, par ricochet, la résolution dans la mesure des jets (où le terme constant est dominant au dessus de 300 GeV). La R&D a consisté à concevoir des ponts diviseurs " actifs " dans lesquels des transistors, placés sur les 3 derniers étages, encaissent des courants élevés sans que cela n'affecte les tensions. Des tests systématiques ont montré que dans les conditions du LHC, les ponts diviseurs passifs actuels permettent d'obtenir une non-linéarité maximale de 2% pour un courant de  $2 \mu A$ , mais elle va dépasser 4% pour un courant 5 fois plus fort dans les conditions du HL-LHC. Avec les ponts actifs, elle reste bien en-dessous de 0,1 %, avec une marge de sécurité pouvant aller jusqu'à des courants de  $100 \mu A$  (note ATLAS en cours). La dernière étude à réaliser concerne les effets des radiations, puisque les nouveaux ponts contiennent des composants actifs.

**Système de régulations des Hautes Tensions HT** Le système actuel comporte une régulation individuelle des HT effectuée dans les super-tiroirs. Cependant, il n'a pas été conçu pour l'augmentation des radiations au HL-LHC. La R&D a été menée sur 6 options possibles, trois options toujours embarquées dans les tiroirs et trois autres avec un système déporté dans la salle USA15. Aucune décision n'a encore été prise, mais les cartes actuelles sont incompatibles avec les mini-tiroirs.

**Electronique VFE et FE de lecture** La R&D vise à réaliser le schéma électronique idéal de la Figure 19c avec un ASIC contenant toutes les fonctions usuelles des cartes 3en1, plus la numérisation via des ADC 12 bits fonctionnement à 40 MHz : signal physique (énergie et timing), calibration physique (Césium 137) et calibration électronique (CIS : injection de charges). L'intérêt de la technologie IBM

130 nm a déjà été souligné dans la section 5.2.3 : intégration facilitée de l'électronique, faible consommation, faible coût, tenue aux radiations. Le schéma de base choisi au LPC repose sur le principe du "super-convoyeur de courant" qui est le mieux adapté aux signaux de PMT. La R&D en cours vers le circuit final est ponctuée d'étapes intermédiaires concrètes : Les chips FATALIC1 et FATALIC2 ont permis de se familiariser avec cette technologie, de valider le concept de convoyeur de courant en effectuant des tests au LPC, puis au CERN avec des cosmiques dans un module TILECAL au bâtiment 175. Le chip FATALIC3 (Figure 20), qui contient les améliorations tirées des chips précédents est en cours de test au LPC. D'autres tests sont programmés au CERN avec des cosmiques et la source de Césium 137 (note en préparation).

Pour des raisons pratiques et de coût, l'étude de l'ADC est dans un premier temps réalisée dans un ASIC dédié dans la même technologie, lequel, après validation, sera intégré dans FATALIC. La fonderie de l'ADC est prévue pour l'été 2012. La réalisation de l'ASIC complet tiendra compte de tous les progrès précédents, en y incluant l'ADC. Des travaux d'électronique plus standards accompagnent l'implantation du chip sur la carte 3en1 ainsi que le routage sur les Mother-Boards (MB) contenant les interfaces électro-optiques.

### **7.1.3 Le démonstrateur**

Dans le planning actuel, la nouvelle électronique se situe dans la Phase-II. Il n'en est pas de même pour la comparaison des 3 options sur des démonstrateurs, puisque les tests comparatifs en hall test au CERN sont programmés sur une période allant du dernier trimestre 2012 à la fin de l'année 2013, avant l'implémentation d'un ou plusieurs de ceux-ci pour la reprise du LHC en 2014. Le but, selon le planning actuellement envisagé, est de faire un choix final de l'électronique le plus tôt possible afin d'avoir suffisamment de temps pour pré-instrumenter et tester des tiroirs avant le remplacement des 512 tiroirs électroniques actuels, mais aussi de pouvoir faire face à un éventuel changement anticipé de l'électronique.

Ces démonstrateurs auront des parties communes, telles que la Daughter Board DB (Chicago / Stockholm) placée en mezzanine sur la MB de chaque option et accueillant FPGA et conversions électro-optiques déjà citées, et des éléments fournis par le LPC (ponts diviseurs actifs, bus de distribution des HT, mini-tiroirs et outillages) et par d'autres laboratoires. Les 3/4 des Instituts du TILECAL participeront à l'équipement et aux tests dans le hall 175 et dans ATLAS.

### **7.1.4 Echéances, ressources humaines et financières pour le LPC**

Les Tableaux 7, 8, 9 et 10 résument les informations incluant les R&D, le démonstrateur puis la production. Pour la phase II, le LPC assurerait la production de l'électronique FATALIC et des cartes associées, ainsi que celle des ponts diviseurs. D'autres laboratoires devraient produire les mini-tiroirs et le système des HT, d'après les études du LPC (les coûts CORE sont donnés pour indication).

Objet	k€	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Mécanique tiroir et outils d'insertion	<b>25</b>	10	15	-	-	-	-
FE complet (ASIC+Mother-Board)	<b>65</b>	25	20	20	-	-	-
Ponts Diviseurs	<b>8</b>	5	3	-	-	-	-
HV distribution	<b>10</b>	10	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>108</b>	50	38	20	-	-	-
ETP							
Mécanique tiroir et outils d'insertion		1	1	-	-	-	-
FE complet (ASIC+Mother-Board)		3	3	3	3	2	2
Ponts Diviseurs		0,25	0,25	-	-	-	-
HV distribution		1	1	-	-	-	-

TAB. 7: TILECAL upgrade : demande financière R&D pour la phase II et estimation des besoins en personnel technique.

Objet	k€	IN2P3 k€
TILECAL	<b>5200</b>	<b>520</b>

TAB. 8: TILECAL upgrade : Estimation financière CORE pour la phase II( coût total et part IN2P3)

Objet	k€	2018	2019	2020	2021
TILECAL Upgrade	<b>520</b>	150	250	70	50
ETP-CDD					
TILECAL Upgrade	<b>3</b>		1	1	1

TAB. 9: TILECAL upgrade : Calendrier des demandes financières CORE et estimation des besoins en personnel technique pour la phase II

Thème	Echéances	Référence	Equipe	% 2012
Mini-tiroirs (Mécanique et services)	Automne 2012 : 4 mini-tiroirs au LPC (8 autres en 2013 par d'autres laboratoires)	7.1.2	F. Daudon I-M	15
		7.1.3	G. Savinel I-M	50
			P. Verdier T-M	50
			R. Bonnefoy I-E	30
			E. Sahuc T-E	10
			F. Podlyski MC F. Vazeille DR	
Ponts diviseurs actifs	Tests de radiation	7.1.2	R. Bonnefoy I-E	10
		7.1.3	M. Crouau I-E F. Vazeille DR	10
Hautes Tensions	Cartes démonstrateur pour automne 2012	7.1.2	R. Chadelas I-E	5
		7.1.3	D. Lambert I-E	5
			M. L. Mercier I-E	10
			E. Sahuc T-E	10
			R. Bonnefoy I-E	5
			P. Lafarguette I-I F. Vazeille DR	10
VFE et FE	- FATALIC3 au 175 : juin 2012 - TACTIC1(ADC) : fonderie août 2012 - FE : simplification de MB2 de 2012 à 2014 - FATALIC4 : 2013	7.1.2	J. Lecoq I- $\mu$ E	20
		7.1.3	N. Pillet I- $\mu$ E	100
			X. Soumpholphakdy I- $\mu$ E	30
			R. Bonnefoy I-E	45
			D. Pallin DR F. Podlyski MC F. Vazeille DR	

TAB. 10: Echéances, ressources humaines au LPC pour les 4 R&D et le démonstrateur. Seuls les principaux intervenants sont cités (I=Ingénieur, T=Technicien ; M=Mécanique, E=Electronique, I=Informatique).

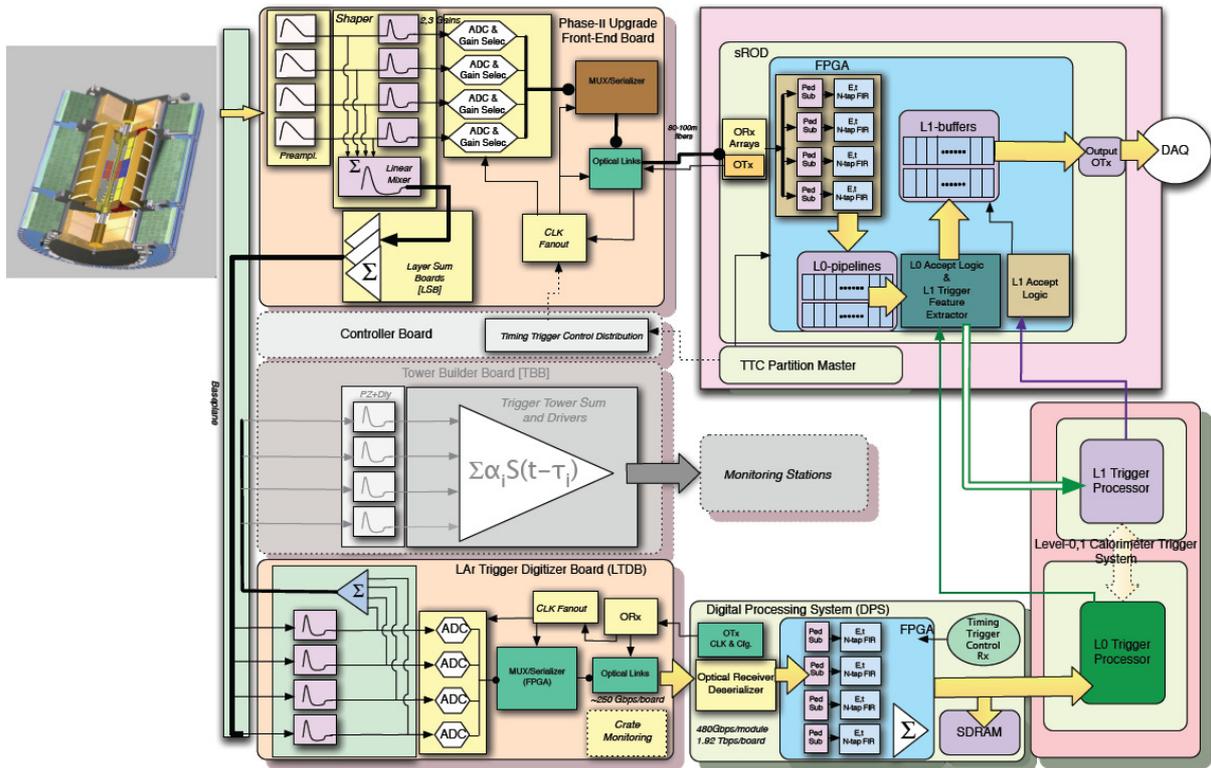


FIG. 21: Chaîne de lecture du calorimètre LAr pour la phase II HL-LHC.

## 7.2 Calorimètre Argon Liquide - Phase II

A l'horizon des années 2020, l'électronique frontale du calorimètre LAr aura plus de quinze ans et aura intégré une dose totale sans doute équivalente à  $300fb^{-1}$ . L'électronique a été qualifiée pour  $700fb^{-1}$ . Bien que la procédure incluait des facteurs de sécurité, l'électronique ne pourra fonctionner jusqu'au bout de la phase II, au cours de laquelle il est prévu d'accumuler  $3000fb^{-1}$ . De plus, les performances attendues en terme de fibres optiques et numériseurs permettent d'envisager une lecture à  $40 MHz$  des signaux, qui permettrait un traitement des données dans la latence du trigger de niveau 1. Le remplacement des cartes de lecture frontale (FEB) implique le remplacement des cartes ROD situées dans la salle de comptage. La carte LTDB décrite pour la phase I permettra d'établir un niveau zéro de déclenchement intégrant probablement le déclenchement sur les traces au niveau 1. Cette nouvelle chaîne de lecture est présentée en Fig. 7.2.

Sur de nombreux aspects, le principe de la nouvelle chaîne de lecture du calorimètre bénéficiera des développements réalisés dans le contexte de la phase I, et notamment de la conception d'un convertisseur analogique-digital performant (grande gamme dynamique et faible latence) et d'un système de traitement rapide du signal pour extraire l'énergie des cellules. L'effort de la phase I est donc appelé à se poursuivre naturellement au-delà de 2018. Une implication plus large, en terme de projet et d'équipes de recherche, est même d'ores et déjà envisagée. Les quatre laboratoires de l'IN2P3 ont ainsi exprimé un intérêt pour les projets de conception -au sens large- suivants :

- Nouvelles cartes de lecture frontale (*sFEB*) : LAL, LPSC
- Nouvelles cartes de calibration : LAL, LAPP, LPSC
- Nouvelles cartes de traitement du signal *sROD* : CPPM, LAPP

Le tableau 11 donne une estimation de la demande financière des groupes de l'IN2P3 pour l'accom-

<b>Total R &amp; D</b>	2013	2014	2015	2016	2017
<b>190k€</b>	30	30	30	50	50
<b>Total production</b>	2018	2019	2020	2021	2022
<b>2500k€</b>	600	800	800	200	100
<b>ETP - CDD</b>					
<b>9</b>	0	0	3	3	3

TAB. 11: Demande financière pour les phases de R&D (2013-2017) et de production (2018-2022) pour la phase II du calorimètre LAr. La partie inférieure du tableau donne une estimation des besoins en personnel temporaire pour la production et l’installation sur l’expérience entre 2018 et 2022.

plissement de ces objectifs. Sur la période 2013-2017, l’effort porte principalement sur la recherche et développement avec des coûts relativement limités en raison de la forte complémentarité avec les investissements relatifs à la phase I. Entre 2018 et 2022, sont en revanche concentrés les investissements relatifs à la production ; si ceux ci sont plus élevés, la proportion de l’investissement total de la calorimétrie à argon liquide, estimé à 27M€, demeure dans des proportions historiquement habituelles.

## 8 Déclenchement, Grille de calcul, Code et Logiciels

### 8.1 Le système de déclenchement

Le projet Trigger DAQ (TDAQ) d’ATLAS envisage une série d’améliorations pour prendre en compte la luminosité accrue (jusqu’à  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) et les empilements d’événements (jusqu’à 200 par croisement) de la phase 2 du LHC.

Pour la Phase-1, trois principaux domaines de travail sont entrepris. De nouvelles chambres fournissant une information pour le trigger vont être installées dans les ”petites roues” du spectromètre à muons. Ceci permettra de réduire le taux de muons isolés de 20 GeV par un facteur 3 grâce à une réduction drastique du taux de trigger de ” faux ” muons dans les bouchons. Pour incorporer ce nouveau détecteur dans le trigger, il va falloir revoir complètement l’interface avec le Processeur Central du Trigger de Muons (MUCTPI). Une granularité plus fine des données du calorimètre à argon liquide dans la Phase-1 permettra une réduction substantielle des taux de trigger électromagnétiques dans le niveau 1 (voir Chapitre 5), permettant ainsi à ATLAS de continuer à déclencher sur des objets électromagnétiques avec des seuils autour de 20 GeV et avec des taux de sortie de l’ordre de 20 kHz. Pour cela, de nouveaux processeurs de sélection pour les électrons et les jets seront étudiés pour le trigger du calorimètre. De plus, des améliorations de la ferme de sélection de haut niveau (HLT), et peut-être du système de lecture, sont à l’étude.

Pour la Phase-2, des améliorations considérables des systèmes de déclenchement et d’acquisition sont prévus, en plus et en sus de ceux installés pour la Phase-1. La possibilité de disposer d’un trigger de niveau 0 fonctionnant à 500 kHz sur la base du système de la Phase-1 est envisagée. L’accès à toute la granularité du calorimètre au niveau du trigger ainsi que la lecture des données du nouveau trajectographe pour effectuer une sélection basée sur ces trajectoires permettra au niveau 1 de travailler à un taux de l’ordre de 200 kHz. Le système de lecture du détecteur et la ferme de calcul du HLT vont également être ré-implémentés pour prendre en compte le nouveau niveau de déclenchement et les conditions d’empilement du LHC.

## 8.2 Le calcul scientifique

Le calcul LHC s'appuie sur la grille W-LCG (Worldwide LHC Computing and Grid) qui est un ensemble de 200 centres de calcul répartis dans le monde entier, organisés en réseau. La grille W-LCG est hiérarchisée en quatre niveaux, ou rangs, appelés "TierN" (ou TN),  $N = (0, 1, 2, 3)$ . L'appartenance à un rang donné fixe la nature et la qualité des services qu'un centre de calcul doit fournir. La quantité de ressources à fournir est à la discrétion des agences de financement selon un protocole d'accord re-discuté chaque année (W-LCG MoU). Un T1 d'ATLAS a pour responsabilité, entre autres, de collecter immédiatement les données brutes en redondance du CERN et de les conserver pour toute la durée de l'expérience. En seconde priorité, il fournit des ressources pour la simulation ou l'analyse. Le rôle des centres T2 s'est élargi dans les dernières années pour couvrir de la simulation des données à la reconstruction des données en passant par l'analyse.

Pour traiter l'ensemble des données enregistrées par les expériences du LHC, les besoins en capacité de calcul atteints en 2011 sont de plus de 250 kCPU cores et plus de 150 Po de disque correspondant à environ 1 million de tâches par jour. Le transfert des données entre les sites dépasse en permanence le taux nominal de 1,3 Go/sec.

La France héberge au centre de calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3), situé à Villeurbanne, l'un des 11 centres T1 de W-LCG. La France dispose également de plusieurs sites T2 et T3. L'expérience ATLAS est présente au T1 et dans l'ensemble des 6 laboratoires français d'ATLAS, Fig 22.

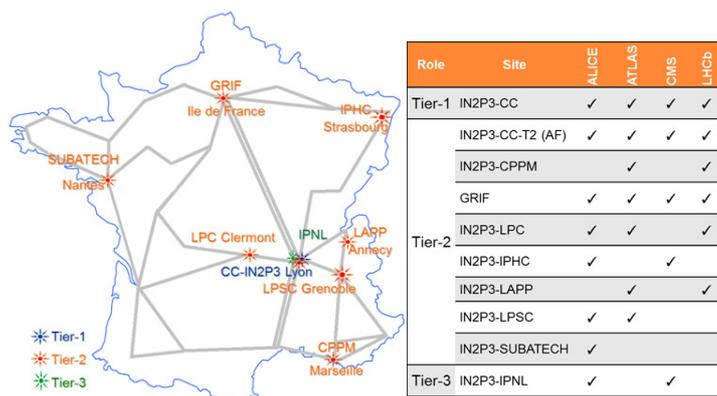


FIG. 22: Répartition géographique et thématique des centres de calcul LCG en France en 2012.

Le T1 et le centre d'analyse (AF) au CC-IN2P3 mettent d'ores et déjà à disposition de W-LCG une capacité de calcul CPU de l'ordre de 80 kCPU cores, une capacité de stockage de l'ordre de 15 Po et l'ensemble de services pour exploiter ces moyens pour les expériences LHC. La part de l'expérience ATLAS dans le total des ressources françaises, dans tous les sites, est montrée en Fig 23 pour les années allant de 2009 à 2012. On constate qu'ATLAS occupe plus de la moitié du disque et de la bande disponibles et environ 40% du CPU total. En 2013, sont représentées, les demandes des quatre expériences (LHC-FR) ainsi que la quantité de ressources (CPU, disque et Tape) prévues par les sites appelés "pledges". Les investissements réels pour ATLAS (Monde et France) ne seront connus qu'en octobre 2012.

Pour 2013, le CRRB (Computing Resource Review Board du CERN) du 24 avril 2012 a montré que les expériences, malgré les difficultés financières des sites W-LCG, demandent des ressources en croissance de plus de 10%. Cette croissance s'explique par la volonté de prendre des données en 2012 avec des taux de déclenchement supérieurs à ceux réalisés jusqu'ici afin de donner une chance à certains canaux de physique d'être analysés (physique du B par exemple). Ces lots d'événements supplémentaires sont "parkés" (stockés) en 2012 et attendront 2013 pour être reconstruits et analysés. De plus, chacune

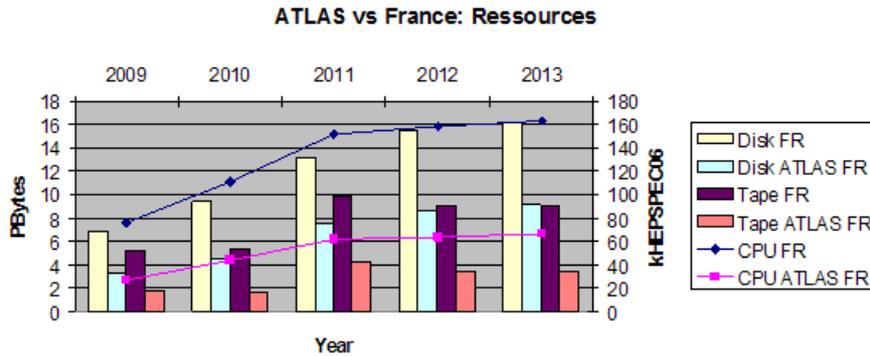


FIG. 23: Ressources disponibles en France dans tous les sites LCG-France et la part d'ATLAS de 2009 à 2012. Le point 2013 représente la demande des expériences et non pas l'investissement réel.

des 4 expériences souhaiterait faire une reconstruction globale de toutes les données acquises de 2010 à 2012 ainsi que des simulations spéciales pour préparer la prise de données de 2014 qui s'annonce avec une énergie de 13 à 14TeV. Cependant, pour 2013, les sites prévoient une reconduction des ressources 2012, sans croissance donc.

A partir de 2014, le LHC va redémarrer avec plus d'intensité et d'énergie. Les expériences LHC ne sont pas en mesure de montrer leurs prévisions et besoins en ressources à une année près. Les demandes 2014 sont en cours d'affinement et ne seront annoncées qu'au prochain CRRB d'Octobre 2012. On peut penser, même si la loi de Moore n'est pas tout à fait correcte et si on considère que le budget 2014-2018 reste constant, qu'une croissance de 30% par an en termes de ressources CPU et disque est à prévoir. L'année 2018, pour les mêmes raisons que pour 2013 (arrêt machine, pas de nouvelles données), doit se contenter du report des ressources 2017. Ce scénario est celui du centre de calcul du CERN (T0) et de W-LCG.

En France, pour ATLAS, et dans les mêmes conditions que le scénario de W-LCG, on doit prévoir un budget d'environ 0,9 M€ pour le T1-AF du CC-IN2P3 pour pouvoir à la fois renouveler le matériel ancien de plus de 5 ans et intégrer une croissance de 30%. Pour l'ensemble des six autres laboratoires de l'IN2P3, le besoin s'élève à environ 300 K€/an pour la part ATLAS. Pour faire face à la prochaine phase de calcul au LHC à partir de 2014 et ce jusqu'à 2018, il est donc nécessaire de sécuriser environ 1,2 M€/an hors frais de fonctionnements et de personnel. La demande budgétaire pour la période 2013-2018 pour ATLAS est de 7,2 M€, voir Table 13

Concernant le personnel, il est à peu près stable depuis 3 ans et représente environ 37 ETP dont 3 ETP du CEA. Ce personnel est mutualisé dans les sites en faveur des 4 expériences LHC. La part ATLAS-France représente environ 20 ETP tous sites confondus.

### 8.3 Développement du code d'ATLAS (Core Software)

La croissance des ressources de calcul est limitée alors que la demande des expériences est croissante : plus d'événements de données, traitement des événements plus long (d'un facteur supérieur à deux) en raison du taux d'empilement, besoin en simulation accru en raison de l'augmentation du nombre d'analyses et de la statistique accumulée, demandant une réduction des erreurs systématiques.

Parallèlement, depuis le début des années 2000 la fréquence des processeurs n'augmente plus (elle tend même à diminuer pour des raisons de consommation) ; la loi de Moore continue de se vérifier, mais par une augmentation du nombre de coeurs par processeur. En atteignant maintenant la cinquantaine de coeurs par processeur (machines les plus récentes disponibles actuellement), et en attendant les pro-

cesseurs à plusieurs centaines de coeurs promis avant la fin de la décennie, une évolution majeure de la conception de nos logiciels devient nécessaire. La mémoire par coeur devient limitée, elle doit être partagée entre processeurs, si bien qu'il n'est plus possible de considérer un coeur comme un processeur indépendant. De plus, pour les tâches d'analyse où le temps de calcul proprement dit est court, la gestion du flux de données à l'intérieur même du processeur devient dominant. Finalement, il est très probable qu'à terme tous les coeurs ne seront pas identiques, certains étant plus performants pour certaines tâches, comme les co-processeurs graphiques actuels.

Pour pouvoir utiliser efficacement les ressources, le paradigme émergent est un système de batch qui affecte une tâche entière à un processeur entier (comme la reconstruction de tout un run). Le logiciel (par exemple de reconstruction) devant utiliser au mieux le processeur en partageant le processing (algorithme par algorithme) de manière optimale entre les coeurs, de telle sorte que à chaque coeur soit affectée la tâche pour lequel il est le plus efficace, la mémoire et le flux de données entre coeurs étant gérés pour éviter tout goulot d'étranglement. Si rien n'est fait, une partie des processeurs sera sous-utilisée. Une difficulté supplémentaire est que le logiciel des expériences est écrit par de nombreux physiciens (près de 300 dans ATLAS, en se limitant à l'année 2011) à qui il n'est pas réaliste de demander d'écrire du code "thread-safe" ni pour processeur graphique. Il faut donc qu'une grande partie de la complexité soit gérée de manière transparente par le framework de calcul de l'expérience pour l'ordonnancement des tâches, et la fourniture de briques logicielles adaptées. Mais une adaptation des algorithmes actuels sera inévitable.

Dans ATLAS, une première étape dans cette direction est **athenaMP**, qui permet au framework de distribuer les événements à plusieurs coeurs tout en partageant une partie de la mémoire, chaque coeur traitant entièrement un événement, donc sans possibilité de paralléliser les algorithmes à l'intérieur de l'événement. Cela a également été fait dans CMS et LHCb. Un groupe de travail conduit par Pere Mato (CERN), avec des personnes de chaque expérience, commence à prototyper différentes approches pour l'étape suivante. Etant donné l'impact de cette évolution dans les prochaines années sur toutes les activités logicielles, et sur l'utilisation des ressources, il semble indispensable que l'IN2P3, qui a une contribution importante au software d'ATLAS, contribue à cette nouvelle activité. Le recrutement d'un post-doc permettrait d'avoir une visibilité accrue, et de faire la liaison avec les physiciens.

Depuis 2001, l'intégralité du software d'ATLAS est géré par CMT (Configuration Management Tool). CMT a fait l'objet d'un MoU entre ATLAS et le LAL/IN2P3. Après une revue conduite en 2010, une refonte complète de cet outil est nécessaire. D'un coté, la technologie de CMT est obsolète et plusieurs outils open source ont fait leur apparition. D'autre part, en plus de l'augmentation considérable du nombre de packages (près de 2000 actuellement) des exigences nouvelles sont apparues : rapidité de compilation sur machine multi coeurs, intégration de nombreuses tâches bien au delà de la simple compilation (génération de code, qualité software,...), gestion de "mini release" pour l'analyse (un outil ad-hoc "RootCore" a été écrit pour pallier ce manque). Un petit groupe de travail a commencé à préfigurer ce que serait "CMT2", qui intégrerait toutes les nouvelles exigences, et qui serait bâti sur un outil open source. Le choix de cet outil est sur le point d'être validé par ATLAS. Il devra ensuite être développé, pour une migration des software d'ATLAS au cours du shutdown 2013-2014. Le recrutement d'un post-doc pour contribuer significativement à cette tâche et honorer le MoU paraît indispensable.

## 8.4 Développement, maintenance et déploiement d'applications

Outre sa participation au "core software" d'ATLAS, l'IN2P3 fournit des ressources humaines et en matériel pour l'infrastructure de la gestion logicielle et de l'analyse de données dans l'expérience. Depuis 2000, une équipe du service informatique du LPSC de Grenoble développe deux applications. Ces deux applications sont déployées au CC-IN2P3 depuis 2008. Il est à noter que, bien qu'il ne s'agisse pas d'un cas unique, le déploiement à l'extérieur du CERN d'un service essentiel reste une exception.

**Tag Collector** est une application qui permet le contrôle de la préparation des "builds"(processus qui

convertissent les fichiers du code source en un logiciel indépendant qui peut faire tourner le code) du core software d'ATLAS. Les développeurs d'un package du logiciel désignent la version de leur package qui doit être inclus dans un des builds dans Tag Collector. Cette application évolue en proche collaboration avec les autres applications de gestion du code, sous la coordination de "ATLAS Software Infrastructure Team" [61].

**AMI** (ATLAS Metadata Interface) est une application qui fournit la possibilité de trouver les datasets officiels d'ATLAS et leurs paramètres logiques. Pour cela AMI contient des catalogues de datasets construits par l'agrégation d'informations venant de diverses sources, en particulier le Tier0, et le système de production (données simulées et reprocessing) ainsi que des listes des différentes configurations utilisées pour le traitement de ces données. AMI contient également plusieurs autres petits catalogues de référence, par exemple la liste des différents types d'objets dans les fichiers d'événements. AMI fait partie des applications coordonnées par le groupe Data Preparation.

Il a été possible pour une équipe relativement réduite de développer deux applications car AMI et Tag Collector partagent beaucoup de code. A présent il y a environ 1730 utilisateurs, dont 580 ont au moins un rôle dans Tag Collector (package développeur ou manager).

Parmi les perspectives pour les quelques années à venir, mentionnons l'extension des catalogues AMI pour inclure des datasets produits pendant l'analyse (user datasets), la refonte des interfaces de recherche de datasets pour prendre en compte l'évolution des besoins des physiciens, et pour intégrer de nouvelles technologies, la refonte des interfaces de Tag Collector en vue de l'évolution de gestion des releases depuis l'établissement du cahier de charge, éventuellement la migration de Tag Collector vers la base de données ORACLE, l'extension de fonctionnalités AMI dont plusieurs sont en discussion.

Afin de continuer le support de l'IN2P3 pour ces deux applications il est important de ne pas baisser les ressources actuellement allouées. Il faudrait donc prévoir la continuation des achats réguliers de serveurs, pour remplacer ceux qui sont en fin de vie, voire étendre le cluster afin d'améliorer la performance des applications. *Si la durée de vie des serveurs au CC est de 4 ans, on devrait prévoir cette année le remplacement des deux serveurs achetés en 2008, le coût serait d'environ 3000 €*; Il faudra aussi maintenir le service ORACLE pour AMI, et éventuellement MySQL pour Tag Collector au CC-IN2P3. L'équipe de développeurs devrait rester au même niveau qu'actuellement. Cela implique d'anticiper un départ à la retraite prévu fin 2014.

## **8.5 Ressources humaines et financières**

Les ressources humaines et financières sont résumées dans les tableaux 12 et 13.

Objet	Référence	Equipe		ETP	
TDAQ	8.1	CPPM	C. Bee	IR	0,1
			C. Meessen	IR	1
Calcul scientifique T1 et T2	8.2	T1-AF T2-T3		IR-CH	10
				IR-CH	10
Développements logiciels	8.3	LAL	C. Arnault	IR	0,3
			G. Rybkine	IR	1
			S Binet	IR	1
			D. Rousseau	DR	0,1
			Embauche future (2013)	IR	1
AMI et TagCollector	8.4	LPSC	S. Albrand	IPP	0,8
			J. Fulachier	IR	0,8
			F. Lambert	IE	0,8
		CC-IN2P3	O. Aidel	IR	0,1

TAB. 12: Organisation des équipes pour chaque activité.

Objet	M€	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Site T1-AF au CC-IN2P3	<b>5,4</b>	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
6 Sites T2-T3 hors CC-IN2P3	<b>1,8</b>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Total (2013-2018)</b>	<b>7,2</b>						
<b>moy ETP/an</b>							
Tous sites LCG	<b>20</b>	20	20	20	20	20	20
développements logiciels	<b>2</b>	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5
AMI et TagCollector	<b>2,5</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
TDAQ	<b>2</b>	2	2	2	2	2	2

TAB. 13: Demande financière de tous les sites LCG (part ATLAS uniquement) et besoins en personnel.

## 9 Contributions à la Phase II et conclusion

### 9.1 Historique des contributions IN2P3

Les groupes IN2P3 ont tous participé aux R&D antérieurs à la création de l'expérience ATLAS, et ont pesé dans le choix du schéma global de l'expérience, de la calorimétrie électromagnétique et hadronique, du système pixel, et du trigger/DAQ de haut niveau. La contribution à la préparation des analyses de physique et au "Core software" a également été déterminante.

Au moment de la construction, étalée entre 1996 et 2006, les groupes ont été fortement soutenus par le CNRS/IN2P3, et par les laboratoires, ce qui a permis un apport d'éléments de détecteurs, et une contribution aux "projets communs" estimés globalement à 8% du coût total de l'expérience (465 MCHF). Ce même niveau de participation a été maintenu lorsqu'il a fallu faire face à différents surcoûts de construction s'élevant en tout à 65 MCHF. Le coût des R&D -y compris la participation aux faisceaux tests- a représenté environ 10% du coût de construction des éléments de détecteurs. Au pic de la construction, plus de 100 ingénieurs et techniciens, complétés par des "CDD construction" participaient à ATLAS au sein du CNRS/IN2P3.

Au moment de la réception et de la mise en route d'éléments de détecteurs au CERN (entre 2002 et 2008), un contingent de physiciens, d'ingénieurs et de techniciens a travaillé sur place, coordonné par les responsables de l'intégration des détecteurs. Une partie de ces personnes, ou des plus jeunes formés par eux, se retrouve maintenant dans les équipes de R&D citées dans les chapitres précédents. Les contacts ainsi établis de longue date assurent une grande fluidité dans l'échange d'informations, et la possibilité d'un réel travail en commun avec d'autres équipes, aussi bien pour le design et les tests de l'électronique (chip FE-I4 en particulier), que pour les capteurs,...

### 9.2 Résumé des coûts de construction pour la Phase II

La table 14 ci-dessous rassemble les estimations de coût des détecteurs et des infrastructures, telles que présentées par ATLAS au "Resource Review Board" en Avril 2012. De façon conservatrice, certains coûts considérés comme optionnels au niveau de cette présentation ont été regroupés avec les coûts principaux.

Objet	M CHF	M€	IN2P3 M€
Tracking	<b>150</b>	125	10.0
Calorimétrie	<b>38.3</b>	32.2	3.0
Autres Détecteurs	<b>32.1</b>	26.7	
Infrastructure et TDAQ	<b>70.3</b>	58.5	1.5
<b>Total</b>	<b>290.7</b>	242.4	14.5

TAB. 14: Estimation des coûts pour la Phase II, au niveau ATLAS, et contribution IN2P3 demandée

Les participations demandées au CNRS/IN2P3 pour le tracking et la calorimétrie ont été détaillées dans les chapitres précédents, et sont rappelées dans la table 14. Il est de plus à prévoir, comme ce fut le cas dans la construction initiale de l'expérience, une participation à l'infrastructure, chiffrée de façon préliminaire dans la table à 1.5 M€.

### 9.3 Personnels et Intégration au CERN

Comme mentionné plus haut, l'intégration au CERN des éléments de détecteurs construits en totalité ou en partie dans les groupes demande du personnel sur place. Ceci est déjà le cas, de façon encore

modeste, pour ce qui concerne l'IBL. Il faudra prévoir un contingent approprié pour la phase I (trigger calorimètre) dans la période 2016-2018, et certainement nettement plus de monde pour la phase II (2020-2023). Ces opérations requièrent un budget mission important.

## 9.4 Conclusions

Le but du programme d'upgrade est qu'ATLAS soit constamment en situation d'exploiter au mieux le potentiel de physique délivré par le LHC, depuis les conditions présentes jusqu'à la luminosité ultime de  $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , permettant à terme d'intégrer jusqu'à  $3000 \text{fb}^{-1}$ .

Ce programme est divisé en deux phases principales, dans lesquelles les groupes IN2P3 espèrent jouer un rôle en rapport avec leur technicité, leur implication passée dans l'expérience, et la volonté d'exploiter au mieux une physique couvrant la partie la plus avancée de la "frontière" vers les phénomènes nouveaux, aux énergies les plus élevées.

Les besoins de financement pour la R&D et la construction qui en résultent, sont présentés dans le tableau 15. La partie correspondant à la part d'ATLAS dans le calcul n'est pas considérée dans ce tableau (voir les détails dans le chapitre précédent, et voir en particulier la Table 13).

Element (phase)	k€	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Calo Construction (I)	1450	100	50	50	650	500	100				
Calo R&D (II)	298	80	68	50	50	50					
Calo Construction (II)	3020						750	1050	870	250	100
Tracker-pixel R&D (II)	2620	420	440	440	440	440	440				
Tracker Constr. (II)	10000					500	1500	3000	3000	1500	500
Projets Communs(II) et TDAQ	1500					500				500	500
<b>Total</b>	<b>18888</b>	<b>600</b>	<b>558</b>	<b>540</b>	<b>1140</b>	<b>1990</b>	<b>2790</b>	<b>4050</b>	<b>3870</b>	<b>2250</b>	<b>1100</b>
<b>ETP-CDD</b>											
<b>construction</b>											
				1	3	5	5	4	8	7	5

TAB. 15: Résumé des demandes financières et estimation des besoins en personnel technique "CDD" pour construction et tests. Les phases I et II sont définies dans le texte.

Le tableau contient également une estimation des besoins en personnel CDD pour les tâches de montage et de tests. Alors que les besoins jusqu'en 2017 inclus, couvrant la phase I et la R&D pour la phase II sont connus assez précisément, il convient de souligner que pour 2018 et au-delà, les demandes sont préliminaires. Elles seront déjà affinées en 2013, après la présentation de la LoI Phase II au LHCC.

A la date de remise de ce document, la plupart des physiciens sont concentrés sur la prise et l'analyse des données. Un petit nombre d'entre eux s'implique cependant de façon stable et durable dans les R&D. Il n'y a pas de doute que ce nombre augmentera au fur et à mesure que les projets de construction vont s'affiner, offrant ainsi la possibilité à une jeune génération qui se sera formée par l'analyse de diversifier ses connaissances. Le soutien du CNRS/IN2P3 au programme présenté ici passera aussi naturellement par un recrutement de jeunes destiné au minimum à renouveler les générations, et si possible à accroître le potentiel des groupes ATLAS du CNRS, dans une compétition mondiale.

## Références

- [1] Heuer, R.D, *The future of the Large Hadron Collider and CERN*, Phil. Trans. R. Soc. A **370** (2012) 986–994,  
<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/370/1961/986.full.pdf+html>.
- [2] ATLAS Collaboration, *ATLAS Letter of Intent Phase-I Upgrade*, CERN-LHCC-2011 **012** (2011).
- [3] S. Glashow Nucl. Phys. **19** (1967) 1264.
- [4] S. Weinberg Phys. Rev. Lett **19** (1967) 1264.
- [5] A. Salam Elementary Particle theory **19** (1969) 367.
- [6] P. Dirac Proc. Roy. Soc. Lond. **A114** (1927) 243.
- [7] P. Jordan and W. Pauli Z. Phys. **47** (1928) 151.
- [8] W. Heisenberg and W. Pauli Z. Phys. **56** (1929) 1.
- [9] S. Tomonaga Progr. Theor. Phys. **1** (1946) 27.
- [10] J. Schwinger Phys. Rev. **73** (1948) 416.
- [11] R. Feynman Phys. Rev. **76** (1949) 749.
- [12] M. Gell-Mann Phys. Lett. **8** (1964) 214.
- [13] G. Zweig CERN-Report **8182/TH 401** (1964).
- [14] H. Fritzsch, M. Gell-Mann, and H. Leutwyler Phys. Lett **B46** (1973) 365.
- [15] D. Gross and F. Wilczek Phys. Rev. Lett. **30** (1973) 1343.
- [16] H. Politzer Phys. Rev. Lett. **30** (1973) 1346.
- [17] Englert, F and Brout, R, *Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons*, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 321.
- [18] P. Higgs, *Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons*, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 508.
- [19] P. Higgs, *Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons*, Phys. Rev. **145** (1966) 1156.
- [20] G. Guralnik, C. Hagen, and T. Kibble, *Global Conservation Laws and Massless Particles*, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 585.
- [21] G.T’Hooft, *Renormalization of Massless Yang-Mills Fields*, Nucl. Phys. **B33** (1971) 173.
- [22] G.T’Hooft, *Renormalizable Lagrangians for Massive Yang-Mills Fields*, Nucl. Phys. **B35** (1971) 167.
- [23] G. T’Hooft and M. Veltman, *Regularization and Renormalization of Gauge Fields*, Nucl. Phys. **B44** (1972) 189.
- [24] C. Llewellyn Smith Phys. Lett. **B46** (1973) 233.
- [25] J. Bell Nucl. Phys. **B60** (1973) 417.
- [26] J. Cornwall, M. Levin, and G. Tiktopoulos Phys. Rev. Lett. **30** (1973) 1268.
- [27] J. Cornwall, M. Levin, and G. Tiktopoulos Phys. Rev. **D10** (1974) 1145.
- [28] B. Lee, C. Quigg, and H. Thacker Phys. Rev. **D16** (1977) 1519.
- [29] P. Fayet and J. Illiopulos Phys.Lett **B51** (1974) 461.
- [30] A. Arbey, M. Battaglia, and A. Djouadi, *Implications of a 125 GeV Higgs for supersymmetric models*, Phys. Lett. **B708** (2012) 162–169.

- [31] S. Dittmaier and et al., *Handbook of LHC Higgs cross-sections. Inclusive observables*, CERN-(2011) 002, arXiv :1101.0593v3 [hep-ph].
- [32] J. F. Gunion, H. E. Haber, G. Kane, and S. Dawson, *The Higgs Hunter's guide*, Frontiers in Physics, Westview (1990).
- [33] ATLAS Collaboration, *Combined search for the Standard Model Higgs boson using up to 4.9 fb<sup>-1</sup> of pp collision data at 7 TeV with the ATLAS detector at the LHC*, Phys. Lett. **B710** (2012) 49–66.
- [34] CMS Collaboration, *Combined results of searches for the standard model Higgs boson in pp collisions at sqrt(s) = 7 TeV*, submitted to Phys. Lett. **B** (2012), arXiv :1202.1488v1 [hep-ex].
- [35] CDF and Dzero Collaboration, *Combined CDF and D0 Upper Limits on Standard-Model Higgs-Boson Production*, FERMILAB-CONF- **11** (2012) 354–E, arXiv :1107.5518 [hep-ex].
- [36] Aleph, Delphi, L3 and Opal Collaboration, *Search for the Standard Model Higgs Boson at LEP*, Phys. Lett. **B565** (2003) 61–75, arXiv :0306033v1 [hep-ex].
- [37] ATLAS Collaboration, *Search for charged Higgs bosons decaying via H<sup>+</sup> to tau nu in top quark pair events using pp collision data at sqrt(s) = 7 TeV with the ATLAS detector*, CERN-PH-EP **083** (2012), arXiv :1204.2760v1 [hep-ex].
- [38] Florian Beaudette et al., *Journée prospectives IN2P3-CEA 2012 - Groupe 2 (BSM)*, <http://journeesprospective.in2p3-irfu.fr/thematiques.html>.
- [39] Gianotti, Fabiola and Mangano, Michele and Virdee, Jim Eur. Phys.J. **C39** (2005) 293–333, arXiv :0204087v1.
- [40] U. Baur, T. Plehn, and D. Rainwater, *Probing the Higgs self-coupling at hadron colliders using rare decays*, Phys. Rev. **D69** (2004) 053004.
- [41] CDF collaboration Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 2626.
- [42] Dzero collaboration Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 2632.
- [43] T.M.P Tait, C.P. Yuan, *Single-top quark production as a window to physics beyond Standard Model*, Phys. Rev. **D63** (2000) 014018, arXiv :0007298.
- [44] C. Hill Phys. Lett. **B345** (1995) 483.
- [45] B. Dobrescu and C. Hill Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 2634.
- [46] R. Chivukula and C. T. Hill Phys. Rev. **D59** (1999) 075003.
- [47] M. Popovic and E. Simmons Phys. Rev. **D62** (2000) 035002.
- [48] H. Collins, A. Grant, and H. Georgi Phys. Rev. **D61** (2000) 055002.
- [49] H. He, T. Tait, and C. Yuan Phys. Rev **D62** (2000) 011702.
- [50] C. Kolda Nucl. Phys. Proc. Suppl. **62** (1998) 266.
- [51] H. He and C. Yuan Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 28.
- [52] Dzero and CDF Coll. Phys. Lett. B. **699** (2011) 145.
- [53] Dzero and CDF Coll. Phys. Rev. **D84** (2011) 112011.
- [54] S. Abdullin et al., *Physics potential and experimental challenges of the LHC luminosity upgrade*, CERN-TH/2002-078 (2002), hep-ph/0204087.
- [55] Papucci, M, *Physics opportunity and challenges with 3000 fb<sup>-1</sup>*, ATLAS Upgrade week (2012).
- [56] Contino et al., *On the effect of resonances in composite Higgs phenomenology*, CERN-PH-TH/2009-036 arXiv : **1109.15706** (2011).

- [57] Falkowski et al., *If no Higgs then what ?*, CERN-PH-TH/2011-185 **arXiv : 1108.1183** (2011) .
- [58] ATLAS Collaboration, *ATLAS Insertable B-Layer Technical Design Report*, CERN-LHCC-2010-013, ATLAS TDR 19 (2010) .
- [59] Schoenig,A and Schmitt, S, *A Self Seeding First Level Track Trigger for ATLAS*, *WITT2012 Workshop on Intelligent Trackers*, Conference Pisa, Italy Conference (3-5 May) (2012) .
- [60] ATLAS Collaboration, *ATLAS Letter of Intent Phase-I Upgrade*, CERN-LHCC-2011-012, LHCC-I-020 (2011) .
- [61] E. Obreshkov, *Organization and Management of ATLAS Software Releases*, NIM in Physics Research A (2008) 224.