

# THÈSE

Présentée par

**Sébastien Franz**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Spécialité : Electronique, électrotechnique et automatique

## **Réalisations instrumentales pour le contrôle fonctionnel de l'infrastructure et des détecteurs de l'expérience ATLAS**

Soutenue le 16/10/2009 devant le Jury composé de :

- Madjid Boutemour – SYMME, Polytech'Savoie
- Helfried Burckhart – CERN
- Johann Collot – LPSC, UJF Grenoble (Rapporteur)
- Pierre Depasse – IPNL, Université Lyon 1 (Rapporteur)
- Jules Gascon – IPNL, Université Lyon 1
- Christian Joram – CERN
- Michelle Passard – SYMME, Polytech'Savoie





# TABLE DES MATIERES

|   |       |
|---|-------|
| TABLE DES MATIERES .....  | III   |
| LISTE DES FIGURES.....  | VIII  |
| LISTE DES TABLES.....   | XIV   |
| REMERCIEMENTS .....   | XV    |
| PRÉFACE .....   | XVI   |
| CONTRIBUTION PERSONNELLE .....  | XVIII |
| INTRODUCTION .....  | 1     |
| 1. Le CERN et le LHC .....  | 1     |
| 2. L'expérience ATLAS .....   | 2     |
| 3. Positionnement du projet de thèse .....  | 3     |
| PARTIE 1 APPLICATIONS POUR LE CONTRÔLE DE L'INFRASTRUCTURE DU DÉTECTEUR ATLAS ..... | 5     |
| I. SYSTÈME DE CONTRÔLE DU DÉTECTEUR ATLAS .....                                     | 6     |
| 1. Architecture.....  | 6     |
| 2. Electronique frontale .....  | 7     |
| 2.1. Le module ELMB.....  | 7     |
| 2.2. Modules d'alimentation pour bus CAN.....                                       | 9     |
| 3. Logiciels .....  | 11    |
| 3.1. Serveur OPC.....   | 11    |
| 3.2. PVSS.....  | 11    |
| 3.3. Couche opérationnelle .....  | 12    |
| 3.3.1. Modèle à état fini .....   | 12    |
| 3.3.2. Interface utilisateur .....  | 13    |
| 3.4. Bases de données.....  | 14    |
| 3.4.1. Base de données de configuration.....  | 15    |
| 3.4.2. Base de données de conditions.....   | 15    |
| 4. Contrôle des sous-détecteurs d'ATLAS .....                                       | 15    |
| 4.1. Contrôle des sous-détecteurs .....   | 15    |
| 4.2. Contrôle de l'infrastructure du détecteur.....                                 | 16    |
| 4.2.1. Contrôle de l'infrastructure des locaux d'électronique .....                 | 16    |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.2.2. | Contrôle de l'infrastructure de la caverne expérimentale.....             | 17 |
| 5.     | Conclusion .....  | 17 |
| II.    | Suivi actif des personnes dans la caverne expérimentale d'ATLAS .....     | 18 |
| 1.     | Introduction.....   | 18 |
| 1.1.   | Origines et objectifs du projet.....                                      | 18 |
| 1.2.   | Choix technologiques .....  | 19 |
| 2.     | Etudes et développements de l'électronique d'acquisition de données ..... | 21 |
| 2.1.   | Développement d'une interface d'acquisition de données.....               | 21 |
| 2.2.   | Premiers tests dans le détecteur ATLAS .....                              | 24 |
| 3.     | Structure logicielle.....   | 25 |
| 3.1.   | Discretisation des zones couvertes par FPIAA .....                        | 25 |
| 3.2.   | Architecture logicielle globale de FPIAA .....                            | 26 |
| 4.     | Suivi actif des personnes .....   | 28 |
| 4.1.   | Conception d'un algorithme de suivi automatisé des personnes.....         | 28 |
| 4.2.   | Configurations de l'algorithme.....                                       | 31 |
| 4.3.   | Tests en situation réelle et résultats .....                              | 31 |
| 5.     | Interfaces utilisateurs.....  | 33 |
| 5.1.   | Interface pour le monitoring online .....                                 | 34 |
| 5.2.   | Outils d'aide au développement .....                                      | 37 |
| 5.2.1. | Outils d'analyse offline .....  | 37 |
| 5.2.2. | Outil de configuration .....  | 39 |
| 5.2.3. | Outil de test automatisé des capteurs .....                               | 39 |
| 6.     | Conclusion .....  | 41 |
| III.   | Monitoring des radiations dans le détecteur ATLAS.....                    | 43 |
| 1.     | Principe de mesure de la dose et de la fluence de particules .....        | 43 |
| 1.1.   | Le capteur RadFET .....   | 43 |
| 1.2.   | Le capteur à diode PIN .....  | 44 |
| 2.     | Electronique frontale (FE) .....  | 46 |
| 2.1.   | Capteurs .....  | 46 |
| 2.2.   | Chaîne d'acquisition de données .....                                     | 47 |
| 2.2.1. | Composants.....   | 47 |
| 2.2.2. | Processus d'acquisition de données des RMSB .....                         | 48 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 3.     | Etalonnage des capteurs .....   | 50 |
| 3.1.   | Calcul des tensions de référence et des facteurs de correction en température .....                 | 50 |
| 3.2.   | Outil d'étalonnage automatisé en température .....  | 53 |
| 4.     | Logiciel.....   | 55 |
| 4.1.   | Représentation des RMSB dans PVSS .....   | 55 |
| 4.2.   | Processus d'acquisition et de traitement des données .....  | 56 |
| 5.     | Contrôle haut niveau du système de monitoring des radiations.....                                   | 57 |
| 5.1.   | Structure FSM.....  | 57 |
| 5.2.   | Interfaces utilisateur .....  | 59 |
| 6.     | Conclusions.....  | 59 |
| IV.    | Conclusions sur les applications pour le contrôle de l'infrastructure commune du détecteur ATLAS .. | 61 |
|        | PARTIE 2 ÉTUDES ET DÉVELOPPEMENTS POUR LE SOUS-DÉTECTEUR ALFA .....                                 | 63 |
| I.     | LE DÉTECTEUR ALFA .....   | 64 |
| 1.     | Introduction.....   | 64 |
| 2.     | Description du détecteur .....  | 66 |
| 2.1.   | Détection de particules .....   | 66 |
| 2.1.1. | Exigences et choix technologique .....  | 66 |
| 2.1.2. | Le détecteur principal .....  | 67 |
| 2.1.3. | Les détecteurs de la région de chevauchement « Overlap ».....                                       | 68 |
| 2.1.4. | Les compteurs de déclenchement .....  | 69 |
| 2.2.   | Conversion du signal .....  | 69 |
| 2.2.1. | Conversion photo-électrique .....   | 69 |
| 2.2.2. | Electronique frontale .....   | 70 |
| 3.     | Schéma global et services du détecteur .....  | 72 |
| 4.     | Conclusion .....  | 73 |
| II.    | Conversion photo électrique.....  | 74 |
| 1.     | Description et caractéristiques d'un photomultiplicateur.....                                       | 74 |
| 1.1.   | Emission photoélectrique – Principe de la photocathode .....  | 75 |
| 1.2.   | Acquisition et amplification du signal .....  | 75 |
| 1.3.   | Réponse du photomultiplicateur .....  | 77 |
| 2.     | Etude expérimentale d'un MAPMT.....   | 77 |
| 2.1.   | Efficacité quantique .....  | 77 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 2.2.   | Détection du photoélectron unique – Gain .....                          | 81  |
| 2.3.   | Caractéristiques du signal .....  | 84  |
| 2.4.   | Linéarité/uniformité de la réponse .....                                | 86  |
| 2.5.   | Débordement canal à canal (cross-talk).....                             | 88  |
| 3.     | Conclusions.....  | 91  |
| III.   | Détection de particules pour les compteurs de déclenchement.....        | 92  |
| 1.     | Description des compteurs de déclenchement et choix technologiques..... | 92  |
| 2.     | Test des compteurs de déclenchement sur faisceau.....                   | 94  |
| 2.1.   | Mise en place de l'expérience.....                                      | 94  |
| 2.2.   | Analyse des données .....   | 95  |
| 2.2.1. | Rendement Lumineux .....  | 95  |
| 2.2.2. | Analyse géographique de la réponse de la plaque scintillante.....       | 98  |
| 2.3.   | Résultats.....  | 101 |
| 3.     | Solution alternative pour la photo-détection des compteurs Trigger..... | 102 |
| 3.1.   | La photodiode avalanche en mode Geiger .....                            | 102 |
| 3.2.   | Test d'un compteur Trigger équipé d'une photodiode avalanche .....      | 103 |
| 3.3.   | Résultats.....  | 108 |
| 4.     | Conclusions.....  | 109 |
| IV.    | Réalisations pour le contrôle opérationnel du détecteur ALFA.....       | 110 |
| 1.     | Architecture globale du système de contrôle du détecteur.....           | 110 |
| 2.     | Configuration de l'électronique frontale .....                          | 111 |
| 2.1.   | Problématique.....  | 111 |
| 2.2.   | Description des paramètres de configuration de la puce MAROC .....      | 112 |
| 2.3.   | Remplissage du registre de configuration.....                           | 113 |
| 2.4.   | Choix technologiques et tests préliminaires.....                        | 114 |
| 2.5.   | Réalisation .....   | 115 |
| 2.5.1. | Intégration des entrées/sorties de l'ELMB sur la carte mère .....       | 115 |
| 2.5.2. | Définition d'un protocole de communication basé sur le SPI.....         | 116 |
| 2.5.3. | Schéma global de configuration des PMF.....                             | 117 |
| 2.5.4. | Structure logicielle pour la configuration des PMF.....                 | 118 |
| 2.5.5. | Interface utilisateur.....  | 120 |
| 2.6.   | Optimisation.....   | 121 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 2.6.1. | Nouveau schéma de configuration des PMF .....   | 121 |
| 2.6.2. | Performances .....  | 124 |
| 3.     | Monitoring des paramètres des Pots Romains .....  | 125 |
| 4.     | Communication avec les systèmes externes .....  | 126 |
| 4.1.   | Communication avec le système d'acquisition de données pour l'étalonnage du détecteur .....                 | 127 |
| 4.1.1. | Description de l'architecture informatique nécessaire à l'automatisation de la production de S-curves ..... | 127 |
| 4.1.2. | Réalisation logicielle de l'automatisation de la production de courbes en S .....                           | 128 |
| 4.2.   | Interfaçage avec le système de contrôle du mouvement des Pots .....   | 130 |
| 5.     | Conclusions et développements futurs.....   | 134 |
| V.     | Conclusions sur les études et développements pour le détecteur ALFA .....                                   | 135 |
|        | CONCLUSIONS de la thèse.....  | 137 |
|        | RÉFÉRENCES .....  | 139 |
|        | Liste des abreviations.....   | 143 |
|        | ANNEXES.....  | 145 |
|        | Annexe 1 : Surveillance de la température des structures aluminium de l'aimant toroïdal d'ATLAS.....        | 146 |
|        | Annexe 2 : Description détaillée de l'algorithme de suivi des personnes dans la caverne d'ATLAS.....        | 149 |

# LISTE DES FIGURES

## INTRODUCTION

Figure 0-1 : Complexe d'accélérateurs de particules du CERN.....1

Figure 0-2 : Architecture du détecteur ATLAS .....2

## PARTIE 1 : APPLICATIONS POUR LE CONTROLE DE L'INFRASTRUCTURE DU DETECTEUR ATLAS

Figure I-1 : Architecture du système de contrôle d'ATLAS.....7

Figure I-2 : Diagramme de l'ELMB .....8

Figure I-3 : Carte ELMB (vue du dessus) .....8

Figure I-4 : Haut. Dose (TID) et Bas. Flux de particules (NIEL, 1 MeV equivalent neutrons) annuels prévus pas simulation pendant l'exploitation d'ATLAS en fonction de la distance par rapport au point d'interaction du faisceau du LHC ( $R = 0$ ;  $Z = 0$ ).....9

Figure I-5 : Vue d'un panneau de contrôle d'un châssis d'alimentation adapté à l'alimentation des ELMB par bus de terrain .....10

Figure I-6 : Couches fonctionnelles d'un projet PVSS.....12

Figure I-7 : Architecture FSM .....13

Figure I-8 : Interface utilisateur dans la salle de contrôle d'ATLAS - Exemple avec une partition du calorimètre à tuiles .....14

Figure I-9 : Structure du contrôle de l'infrastructure du détecteur ATLAS .....16

Figure II-1 : Caverne expérimentale d'ATLAS (sans le détecteur) .....18

Figure II-2 : Zones du détecteur et des structures accessibles au personnel.....19

Figure II-3 : Capteur PIR - boîtier, face avant et face arrière avec un PCB secondaire équipé d'opto-coupleurs.....20

Figure II-4 : Couverture volumétrique d'un capteur Pyronix Magnum Ultra FP05802 .....21

Figure II-5 : Boîtier d'acquisition de données utilisé pour FPIAA .....22

Figure II-6 : Schéma électrique de connexion d'un capteur PIR sur une entrée digitale d'un ELMB.....23

Figure II-7 : Chaîne d'acquisition de données de FPIAA .....23

Figure II-8 : Zone de test de FPIAA dans le détecteur ATLAS .....24

Figure II-9 : Interface utilisateur développée pour le test en conditions réelles de FPIAA.....25

Figure II-10 : Représentation logicielle de la structure hiérarchique de FPIAA .....26

Figure II-11 : Définition de la classe d'objet "cellule" de FPIAA .....27

Figure II-12 : Architecture logicielle de FPIAA .....27



|  |    |
|--|----|
| Figure II-13 : Génération de processus de suivi des personnes par FPIAA .....  | 28 |
| Figure II-14 : Séquence d'initialisation de FPIAA .....  | 29 |
| Figure II-15 : Diagramme du processus de suivi des personnes.....  | 30 |
| Figure II-16 : Comportement de l'algorithme pour le croisement de deux personnes .....   | 31 |
| Figure II-17 : Résultats d'analyse des alertes générées par l'algorithme de suivi actif des personnes .....                                    | 33 |
| Figure II-18 : Exemple de panneaux de visualisation de FPIAA. Haut: Structure HO coté A niveau 0. Bas: Détecteur secteur 9 partie interne..... | 34 |
| Figure II-19 : Interface de visualisation de FPIAA.....  | 34 |
| Figure II-20 : Structure FSM de FPIAA.....   | 35 |
| Figure II-21 : Exemple de panneau FSM pour la visualisation des personnes (Détecteur, secteur 7) .....   | 35 |
| Figure II-22 : Panneau FSM pour le contrôle des alimentations des capteurs PIR et le monitoring des boîtiers d'acquisition .....               | 36 |
| Figure II-23 : Panneau d'accès aux outils de configuration et aux bases de données .....   | 37 |
| Figure II-24 : Outil de récupération des données archivées par FPIAA sous forme de fichier texte .....   | 38 |
| Figure II-25 : Panneau de visualisation des données archivées par FPIAA.....   | 38 |
| Figure II-26 : Panneau de configuration des cellules.....  | 39 |
| Figure II-27 : Séquence de démarrage d'un capteur PIR après mise sous tension .....  | 40 |
| Figure II-28 : Diagramme du processus de test de fonctionnel automatisé des capteurs PIR.....  | 40 |
| Figure II-29 : Interface utilisateur pour le test automatisé des capteurs PIR.....   | 41 |
| Figure III-1 : Schéma de montage d'un MOSFET couplé à une source de courant pour la mesure de dose ionisante .....                             | 44 |
| Figure III-2 : Schéma de montage d'une diode PIN couplée à une source de courant pour la mesure de la fluence de particules.....               | 45 |
| Figure III-3 : Capteur de radiations ionisantes utilisé dans les zones externes du détecteur ATLAS.....  | 46 |
| Figure III-4 : Emplacement des RMSB dans le détecteur ATLAS .....  | 46 |
| Figure III-5 : Schéma électrique du DAC MAX525 utilisé comme source de courant pour alimenter les radFET et diodes PIN.....                    | 47 |
| Figure III-6 : gauche : boîtier d'acquisition de données pour le monitoring des radiations; droite : communication entre les composants .....  | 48 |
| Figure III-7 : Séquence d'acquisition de données d'un RMSB .....   | 49 |
| Figure III-8 : Evolution de la tension de référence du radFET d'un RMSB de la zone PP2 en fonction de la température.....                      | 51 |

|   |    |
|---|----|
| Figure III-9 : Evolution de la tension de référence de la diode PIN d'un RMSB de la zone PP2 en fonction de la température.....   | 51 |
| Figure III-10 : Tension de référence aux bornes du radFET (haut) et de la diode PIN (bas) en fonction du temps avant (rouge) et après (vert) correction en température..... | 52 |
| Figure III-11 : Interface pour l'étalonnage automatisé des RMSB en température.....   | 54 |
| Figure III-12 : Rapport d'analyse de données pour l'étalonnage en température des RMSB.....   | 55 |
| Figure III-13 : Représentation des RMSB par une classe d'objets dans PVSS.....  | 56 |
| Figure III-14 : Processus d'acquisition et de traitement des données des RMSB.....  | 57 |
| Figure III-15 : Arborescence FSM pour le monitoring des radiations.....   | 58 |
| Figure III-16 : Exemple d'interface utilisateur développée pour le monitoring des radiations dans le sous-détecteur Muon.....   | 59 |
| <br><b>PARTIE 2 : ETUDES ET DEVELOPPEMENTS POUR LE SOUS-DETECTEUR ALFA</b>  |    |
| Figure I-1 : Emplacement des stations ALFA pour la détection des protons déviés par une collision élastique.....  | 64 |
| Figure I-2 : Vue générale d'un Pot Romain.....  | 66 |
| Figure I-3 : Principe d'un détecteur à fibres scintillantes avec 4 plans en géométrie UV.....   | 67 |
| Figure I-4 : Vue en coupe d'un pot romain équipé de son détecteur (routage des fibres sur la flasque étanche omis).....   | 68 |
| Figure I-5 : Schéma de principe des Overlap avec une paire de détecteurs pour mesurer la position relative des deux Pots.....   | 69 |
| Figure I-6 : Carte active du PMF - Gauche: puce MAROC - Droite: FPGA.....   | 70 |
| Figure I-7 : Carte mère du détecteur ALFA (prototype version 3).....  | 71 |
| Figure I-8 : Schéma global du détecteur ALFA.....   | 72 |
| Figure II-1 : Schéma d'un photomultiplicateur.....  | 74 |
| Figure II-2 : MAPMT Hamamatsu R7600.....  | 75 |
| Figure II-3 : Trajet d'un électron sur les étages de dynodes d'un MAPMT.....  | 76 |
| Figure II-4 : Principe de mesure de l'efficacité quantique.....   | 77 |
| Figure II-5 : Montage expérimental pour l'évaluation de l'efficacité quantique du MAPMT.....  | 78 |
| Figure II-6 : Efficacité quantique de la photodiode en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente.....  | 78 |
| Figure II-7 : Courant mesuré entre la photocathode et la première dynode en fonction de la tension appliquée.....   | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure II-8 : Photo-courant mesuré aux bornes de la photodiode en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente .....   | 80  |
| Figure II-9 : Efficacité quantique du MAPMT en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente  | 80  |
| Figure II-10 : Montage expérimental pour l'acquisition d'un canal du MAPMT .....   | 81  |
| Figure II-11 : Vue arrière du MAPMT – Convention pour la numérotation des canaux du MAPMT (canaux sélectionnés en noir) .....  | 82  |
| Figure II-12 : Quantité de charge mesurée sur le canal 37 du MAPMT .....   | 83  |
| Figure II-13 : Quantité de charge mesurée sur le canal 64 du MAPMT .....   | 84  |
| Figure II-14 : Montage expérimental pour la mesure du temps de transit des électrons dans le MAPMT   | 85  |
| Figure II-15 : Temps de réponse mesuré à l'oscilloscope de la photodiode (A) et du MAPMT (B) à une impulsion lumineuse.....  | 85  |
| Figure II-16 : Montage expérimental pour l'acquisition des 64 canaux du MAPMT en parallèle.....  | 86  |
| Figure II-17 : Evolution du courant d'anode en fonction de l'intensité de la lumière incidente .....   | 87  |
| Figure II-18 : Uniformité de la réponse du MAPMT .....   | 88  |
| Figure II-19 : Montage expérimental pour l'étude du cross talk du MAPMT.....   | 89  |
| Figure II-20 : Cross talk pour une lumière incidente de 1PE (gauche) et 4 PE (droite) en moyenne sur le canal excité .....   | 91  |
| Figure III-1 : Compteurs Trigger du détecteur ALFA.....  | 92  |
| Figure III-2 : Différents revêtements et différents assemblages de fibres optiques.....  | 93  |
| Figure III-3 : Banc de test sur faisceau à DESY .....  | 94  |
| Figure III-4 : a) Spectre des comptages ADC et b) Rendement lumineux en nombre de photoélectrons pour la combinaison 6 .....   | 96  |
| Figure III-5 : Résumé des rendements lumineux des configurations testées .....   | 97  |
| Figure III-6 : Tension de claquage en fonction du produit pression $\times$ distance pour de l'air à 20 degrés C .....   | 97  |
| Figure III-7 : Combinaison 1: Rendement lumineux (en PE) en fonction de la position du point d'interaction des particules sur la plaque scintillante (gauche : un seul paquet de fibres connectés, droite : deux paquets de fibres connectés)..... | 98  |
| Figure III-8 : Fenêtre d'étude pour le comportement aux bords du compteur Trigger .....  | 99  |
| Figure III-9 : Rotation de la fenêtre d'étude par pas de 20 mrad (rendement lumineux en nombre moyen de photoélectrons en fonction de la position sur le plan XY.....  | 99  |
| Figure III-10 : Largeur de projection de la fenêtre d'étude en fonction de l'angle de rotation de la fenêtre .....   | 100 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure III-11 : Modélisation du comportement au bord de la plaque scintillante par la convolution d'une fonction de Heaviside et d'une gaussienne.....  | 101 |
| Figure III-12 : Principe de fonctionnement d'une photodiode à avalanche.....  | 103 |
| Figure III-13 : Montage expérimental pour le test d'un compteur Trigger couplé à une photodiode à avalanche sous particules cosmiques.....  | 104 |
| Figure III-14 : Schéma électrique du conditionneur de signaux utilisé avec la photodiode à avalanche .  | 104 |
| Figure III-15 : Evolution de la charge moyenne mesurée aux bornes de la photodiode et de la température moyenne par groupe de 250 particules au cours du temps.....   | 105 |
| Figure III-16 : Charge mesurée par la photodiode en fonction de la température par paquets de 250 événements .....  | 106 |
| Figure III-17 : Spectre de charge mesurée par la photodiode normalisé à un température de référence de 29.6 Degré C.....  | 107 |
| Figure III-18 : Réponse de la photodiode à des impulsions lumineuses de faible intensité d'une LED ....   | 107 |
| Figure III-19 : Rendement lumineux d'une plaque scintillante équipée d'une photodiode avalanche ....  | 108 |
| Figure IV-1 : Schéma global du système de contrôle du détecteur ALFA .....  | 111 |
| Figure IV-2 : Schéma d'un Pot Romain équipé de son électronique Front-End .....   | 112 |
| Figure IV-3 : A. Structure du registre à décalage de configuration de la puce MAROC. B. Zoom sur les bits de contrôle. C. Zoom sur les bits de paramétrage du seuil de déclenchement. D. Zoom sur les bits de paramétrage des gains ..... | 113 |
| Figure IV-4 : Registre STREAM du ALFA-R pour la configuration de la puce MAROC .....  | 114 |
| Figure IV-5 : Communication sur le port SPI de l'ELMB vue à l'oscilloscope (5 ms/division; 1V/division pour chip select et clock et 2V/division pour data IN) .....   | 115 |
| Figure IV-6 : Intégration des entrées sorties numériques de l'ELMB sur l'électronique front-end du détecteur ALFA .....   | 116 |
| Figure IV-7 : Structure d'un mot de 32 bits pour la communication entre l'ELMB et l'électronique FE du détecteur ALFA .....   | 116 |
| Figure IV-8 : Architecture de communication pour la configuration des puces MAROC.....  | 117 |
| Figure IV-9 : Structure du registre de contrôle du ALFA-M (16 bits).....  | 117 |
| Figure IV-10 : Définition de la classe d'objet PMF dans PVSS; Exemple avec le PMF 2-2 .....   | 118 |
| Figure IV-11 : Architecture du script de configuration des PMF sous PVSS.....   | 119 |
| Figure IV-12 : Interface utilisateur pour la configuration de l'électronique front-end du détecteur ALFA .....  | 120 |
| Figure IV-13 : Panneau secondaire de commandes SPI bas niveau .....   | 121 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure IV-14 : Détails du remplissage du registre CONFIG du ALFA-R pour le stockage local des paramètres de configuration de la puce MAROC.....  | 122 |
| Figure IV-15 : Deuxième génération d'interface utilisateur pour la configuration de l'électronique front-end du détecteur ALFA .....   | 124 |
| Figure IV-16 : Interface utilisateur pour le monitoring des paramètres locaux d'un Pot Romain .....  | 125 |
| Figure IV-17 : Schéma de communication du protocole DIM .....  | 126 |
| Figure IV-18 : Architecture informatique impliquée dans le processus de production automatisée de courbes en S.....  | 127 |
| Figure IV-19 : Structure de données pour la communication DCS – DAQ.....   | 128 |
| Figure IV-20 : Structure logicielle pour la production automatisée de S-curves.....  | 129 |
| Figure IV-21 : Panneau de configuration sous PVSS pour le processus automatisé de production de S-curves.....  | 129 |
| Figure IV-22 : Résultat du processus automatisé de courbes en S sur un PMF (64 canaux) avec 100 points de mesures – Efficacité de détection dans le bruit (sans excitation des canaux du PMF)..... | 130 |
| Figure IV-23 : Architecture du système de contrôle du mouvement des Pots Romains .....   | 131 |
| Figure IV-24 : Déclaration de variables dans PVSS associées aux services DIM publiés (vert) et souscrits (rouge) .....   | 133 |

#### **ANNEXE 1 : Surveillance de la température des structures aluminium de l'aimant toroïdal d'ATLAS**

|  |     |
|--|-----|
| Figure 0-1 : Vue des aimants toroïdaux du détecteur ATLAS (fin de leur assemblage en 2005) .....   | 146 |
| Figure 0-2 : Panneau de visualisation des températures des structures aluminium de l'aimant toroïdal d'ATLAS .....                                 | 147 |
| Figure 0-3 : Prototype de visualisation des températures de l'aimant toroïdal d'ATLAS en trois dimensions interactif (températures simulées) ..... | 148 |

#### **ANNEXE 2 : Description détaillée de l'algorithme de suivi des personnes dans la caverne d'ATLAS**

|   |     |
|---|-----|
| Figure 0-1 : Eléments de la classe d'objet "Cellule" utilisés par l'algorithme de suivi des personnes ..... | 149 |
| Figure 0-2 : Diagramme détaillé de l'algorithme de suivi des personnes de l'application FPIAA .....         | 150 |

# LISTE DES TABLES

## **PARTIE 1 : APPLICATIONS POUR LE CONTROLE DE L'INFRASTRUCTURE DU DETECTEUR ATLAS**

|   |    |
|---|----|
| Table III-1 : Valeurs brutes des tensions de référence et des courants d'activation du radFET et de la diode PIN d'un RMSB de la zone PP2 .....   | 50 |
| Table III-2 : Tensions de référence corrigées en température et courants d'activation du radFET et de la diode PIN d'un RMSB de la zone PP2 ..... | 52 |
| Table III-3 : Etats et statuts du modèle FSM du monitoring des radiations .....   | 58 |

## **PARTIE 2 : ETUDES ET DEVELOPPEMENTS POUR LE SOUS-DETECTEUR ALFA**

|   |     |
|---|-----|
| Table II-1 : Amplitude du signal (en mV) en fonction du déplacement de la fibre sur le pixel .....  | 90  |
| Table III-1 : Liste des combinaisons testées .....  | 94  |
| Table III-2 : Rendement lumineux moyen par paquet de fibres pour toutes les combinaisons testées ....   | 96  |
| Table III-3 : Résultats de la modélisation des bords pour chaque type de configuration testée.....  | 101 |
| Table IV-1 : Registres internes du FPGA ALFA-R.....   | 113 |
| Table IV-2 : Séquence de configuration d'une puce MAROC - Exemple présenté pour le PMF 2 du bus 2 .....   | 118 |
| Table IV-3 : Nouvelle attribution de registres sur le FPGA ALFA-R .....   | 122 |
| Table IV-4 : Nouvelle séquence de configuration d'une puce MAROC - Exemple présenté pour le PMF 2 du bus 2.....                                   | 123 |
| Table IV-5 : Liste des services publiés par le PXI et le serveur FESA souscrits par le DCS pour le monitoring du mouvement des Pots Romains ..... | 132 |
| Table IV-6 : Liste des services publiés par le DCS pour le contrôle du mouvement des Pots Romains ....  | 133 |

# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Helfried Burckhart et Christian Joram pour l'encadrement qu'ils m'ont fourni lors de mes travaux de recherche pendant ces trois années de préparation de thèse, ainsi que pour leur disponibilité et leur aide précieuse (accompagnée d'une bonne humeur permanente) dans le développement de mes projets. Je remercie Michelle Passard et Madjid Boutemeur pour l'encadrement et les conseils utiles qu'ils m'ont donnés pendant ces trois années. Merci également aux membres des équipes avec qui j'ai travaillé et collaboré dans le cadre du développement du sous-détecteur ALFA et du contrôle de l'infrastructure d'ATLAS, en particulier à Olivier Gutzwiller avec qui je ne pourrais plus compter le nombre d'heures passées dans le détecteur pour l'installation et les réglages des boîtiers d'électronique pour le contrôle de l'infrastructure du détecteur.

Je remercie Johann Collot et Pierre Depasse pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Leur lecture attentive de ce document et les commentaires qu'ils ont fournis m'ont permis d'améliorer sensiblement la qualité de ma thèse, tant du point de vue du contenu scientifique que de la forme. Je remercie également les autres membres du jury de ma soutenance de thèse déjà cités ainsi que Jules Gascon.

Je tiens également à remercier mes parents pour leur soutien sans faille tout au long de mes études et encore maintenant. Et je remercie ma femme pour son soutien, sa compréhension lors de la longue période d'écriture pendant laquelle j'étais peu présent et enfin pour son aide à la mise en forme de ce document.

# PRÉFACE

La physique des particules est une discipline « jeune » dont les bases ont été établies au début du XX<sup>ème</sup> siècle. L'étude des processus d'interaction de la matière a abouti à une unification des phénomènes observés pour définir quatre forces fondamentales qui permettent de rendre compte des interactions à petite et à grande échelle : la force nucléaire forte, la force nucléaire faible, la force électromagnétique et la force de gravitation.

La force nucléaire forte agit à l'échelle du noyau atomique et est portée par des gluons qui affectent les quarks et les antiquarks pour former les baryons (par exemple protons ou neutrons) et les mésons (par exemple pions ou kaons). Elle permet la cohésion des nucléons au sein du noyau de l'atome. La force nucléaire faible est portée par les bosons  $W$  ( $W^+$  et  $W^-$ ) et  $Z$  ( $Z^0$ ) et est à l'origine de la désintégration  $\beta$  ( $\beta^+$  pour l'émission d'un positron et  $\beta^-$  pour l'émission d'un électron). L'interaction faible agit à l'échelle nucléaire en permettant aux leptons et aux quarks d'échanger de la masse, de l'énergie et de la charge pour changer de famille et de « saveur ». Par exemple, un neutron peut être converti en proton au sein d'un noyau par transformation de l'un des deux quarks « down » dont il est composé en quark « up » accompagné d'un boson  $W^-$  qui se désintègre en un électron ( $\beta^-$ ) et un antineutrino. La force électromagnétique est composée de l'ensemble des interactions électriques et magnétiques et elle est portée par le photon. Cette force agit au sein de l'atome dans le cadre de l'électrodynamique quantique et elle a un champ infini qui est donc observable à l'échelle macroscopique, ceci étant dû à la masse nulle du photon. La force faible n'a en revanche qu'un effet à courte portée de l'ordre de  $10^{-18}$  mètre en raison de la masse importante des bosons qui la portent (environ 80 GeV pour les  $W^{+/-}$  et environ 90 GeV pour le  $Z^0$ ). Cependant l'intensité de la force faible croît rapidement avec l'énergie à laquelle on la considère alors que la force électromagnétique croît lentement. Ainsi, à une énergie d'une centaine de GeV, ces deux forces sont du même ordre de grandeur et les deux théories qui les prédisent sont unifiées à cette échelle d'énergie par le modèle électrofaible. Les forces faible, forte, et électromagnétique sont décrites par le modèle standard de la physique des particules qui a été validé dans les plages d'énergie explorables par les expériences de physique des particules qui ont été menées au cours du XX<sup>ème</sup> siècle et jusqu'à aujourd'hui. La force gravitationnelle est la quatrième force fondamentale connue. Elle est à l'origine de l'attraction des corps pourvus d'une masse à l'échelle macroscopique. Cette force est décrite à part du modèle standard, par la relativité générale. Les théories du modèle standard et de la relativité générale ne peuvent être unifiées dans l'état actuel des connaissances en raison d'une incompatibilité majeure dans la représentation de leur espace-temps. Alors que l'espace-temps du modèle standard est plat et rigide, celui de la relativité générale est souple et dynamique.

Un certain nombre de questions subsiste et donne lieu à des théories, qui restent à prouver expérimentalement, sur les mécanismes qui régissent les interactions nucléaires et sur les modèles de la composition et de l'expansion de l'Univers. Ainsi, une première question se pose sur l'origine de la masse inertielle des particules. Les principes de symétrie sur lesquels s'appuie le modèle standard posent en effet un problème majeur : ils impliquent que les particules qui sont à l'origine des



interactions ne doivent pas opposer de résistance au mouvement et donc doivent être de masse nulle. C'est effectivement le cas du photon pour l'interaction électromagnétique, mais ce principe ne s'applique pas aux bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  pour l'interaction nucléaire faible. Une théorie a été avancée pour tenter d'expliquer cette contradiction en introduisant de nouveaux champs appelés champs de Higgs [1]. Ces champs interagiraient avec les bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  avec pour conséquence d'opposer une résistance à l'accélération et donc de leur conférer l'apparence de particules de masse non nulle. L'excitation aléatoire de ces champs, appelée boson de Higgs, pourrait être observée au LHC. Cela expliquerait « l'apparence massique » des bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  à l'origine de la faible portée de l'interaction nucléaire faible, et par extension, l'origine de la masse de la matière, qui dépendrait de son degré d'interaction avec le boson de Higgs. Une seconde question n'a pas encore trouvé de réponse : pourquoi la matière domine-t-elle l'antimatière dans l'Univers alors qu'elles devaient être présentes en quantité similaire au début de l'univers et que leurs propriétés sont symétriques? Cette question pourrait trouver une réponse par le fait que certaines particules n'ont pas tout à fait le même comportement que leurs antiparticules. Ce phénomène, appelé violation de la symétrie CP a déjà été observé [2], mais sa corrélation avec la domination de la matière sur l'antimatière dans l'Univers reste à prouver. Enfin, plusieurs théories tentent d'expliquer d'une part la présence de « matière noire » dans les galaxies, qui laisse supposer que les objets visibles dans l'Univers ne représentent qu'une petite fraction de la matière, et d'autre part l'accélération de l'expansion de l'Univers, qui indique qu'une énergie opposée à la gravitation régit la dynamique de l'Univers aux grandes échelles.

Le nouvel accélérateur de particules du CERN, le LHC, a été pensé et conçu pour vérifier expérimentalement et confirmer ou infirmer les théories qui ont été émises ces dernières années pour tenter d'expliquer les phénomènes physiques qui ne rentrent pas dans les modèles existants. Ainsi les données issues des détecteurs de particules du LHC vont permettre la recherche du boson de Higgs dans les plages d'énergie prévues par la théorie, les phénomènes de violation CP ainsi que de nouvelles dimensions de l'espace. Des réponses devraient être apportées et de nouvelles questions posées qui pourraient fournir des informations nécessaires à l'élaboration d'une théorie capable de rendre compte à la fois du modèle standard et de la relativité générale, telle que la « théorie des supercordes ».

# CONTRIBUTION PERSONNELLE

Lors de mes travaux de thèse effectués pendant trois années au CERN, j'ai travaillé au sein de l'équipe centrale pour le contrôle du détecteur ATLAS (PH/ATI/DC) dirigée par Dr Helfried Burckhart et, en collaboration avec le groupe en charge des technologies de détection (PH/DT), sous la direction de Dr Christian Joram.

J'ai consacré environ la moitié de mon temps au développement d'applications pour le Contrôle de l'Infrastructure Commune (CIC) du détecteur ATLAS. J'ai développé des interfaces d'acquisition de données en me basant sur une électronique développée au CERN et j'ai dirigé une équipe de techniciens et participé activement à l'installation et à la mise en route de l'électronique frontale dans la caverne expérimentale du détecteur ATLAS. J'ai mis au point et effectué les premiers tests du système de détection des personnes dans le détecteur et j'ai coordonné et participé aux tests et à la validation des 828 capteurs infrarouges qui ont été installés dans la caverne expérimentale. J'ai développé un prototype de logiciel pour le suivi des personnes et j'ai implémenté la version finale avec l'aide d'un étudiant que j'ai dirigé pendant l'exécution de ce projet. J'ai ensuite coordonné une série de tests de l'algorithme de suivi actif des personnes dans la caverne, et j'ai procédé à l'analyse des données et à l'optimisation de l'algorithme jusqu'à sa version finale. J'ai coordonné l'installation de 48 capteurs de radiations et de l'électronique d'acquisition de données associée dans le détecteur ATLAS. J'ai ensuite mis au point une procédure d'acquisition de données et j'ai procédé à une série de mesures sur site. J'ai analysé les données obtenues afin de procéder à l'étalonnage des capteurs. J'ai ensuite développé la structure logicielle finale d'acquisition des données et les interfaces utilisateur.

La seconde moitié de mon travail était consacrée au détecteur ALFA (Absolute Luminosity For ATLAS). J'ai participé activement à trois tests sur faisceaux (deux tests visant à évaluer les performances du détecteur et un pour évaluer les performances des compteurs de déclenchement du détecteur). J'ai travaillé sur l'analyse des données de ces trois tests faisceaux et sur l'interprétation des résultats. J'ai effectué une série de tests en laboratoire pour évaluer les performances du matériel de photo-détection utilisé pour le détecteur ALFA ainsi qu'une expérience sous rayons cosmiques pour explorer une alternative de matériel de photo-détection pour les compteurs de déclenchements du détecteur ALFA. Enfin, j'étais responsable du système de contrôle du détecteur ALFA. J'ai étudié les besoins du détecteur et j'ai effectué plusieurs développements logiciels adaptés aux besoins des phases de test en laboratoire.

# INTRODUCTION

## 1. Le CERN et le LHC

L'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire ou CERN est le plus grand laboratoire de recherche en physique des particules au monde. Il est situé sur la frontière entre la France et la Suisse, près de Genève, et regroupe une collaboration scientifique internationale dans un complexe de recherche en Physique fondamentale et appliquée. Les outils principaux du CERN pour la recherche expérimentale sont les accélérateurs de particules. Le dernier et le plus grand est le LHC (Large Hadron Collider) [3]. C'est un collisionneur de hadrons de 27 kilomètres de circonférence qui a été mis en service en septembre 2008 pour fournir des collisions de protons à une énergie jamais atteinte en laboratoire de 14 TeV. Comme le montre la Figure 0-1, le LHC est le dernier étage d'un réseau d'accélérateurs de particules composé d'injecteurs linéaires (LINAC), du PSB (Proton Synchrotron Booster) du PS (Proton Synchrotron) et du SPS (Super Proton Synchrotron). Le complexe d'accélérateurs peut utiliser des protons ou des ions lourds. Dans le cas des ions lourds, un élément supplémentaire, le LEIR (Low Energy Ions Ring) entre en jeu. Une installation annexe appelée AD (Antiprotons Decelerator) permet également d'étudier les antiprotons.

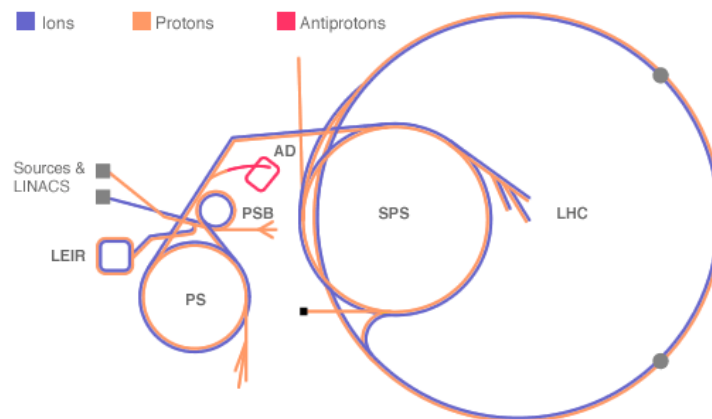


Figure 0-1 : Complexe d'accélérateurs de particules du CERN

Le PS et le SPS accélèrent des paquets de particules (protons ou ions) qui sont ensuite injectés dans le LHC pour y subir une accélération finale. Ils entrent ensuite en collision aux Points d'Interaction (IP) des quatre détecteurs principaux installés sur l'anneau :

- ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [4] a été construit pour étudier des collisions d'ions lourds qui devraient permettre la formation d'un nouvel état de la matière à très haute densité où se forme un plasma quark-gluon.
- LHCb (Large Hadron Collider Beauty) [5] va tenter de conforter les théories qui définissent les premiers instants de l'Univers après le Big Bang pour explorer et essayer de comprendre le processus à l'origine de la domination de la matière sur l'antimatière.

- CMS (Compact Muon Solenoid) [6] et ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) [7] sont les deux détecteurs polyvalents du LHC. Avec des technologies de détection différentes, ils vont tous deux permettre la recherche du boson de Higgs, l'étude d'autres dimensions et la quête de particules pouvant constituer la matière noire ainsi que d'autres champs de recherche qui dépendront des découvertes faites par les physiciens.
- TOTEM (TOTal Elastic and diffractive cross-section Measurement) [8] va mesurer la section efficace totale et la luminosité absolue du faisceau du LHC au point d'interaction de CMS.
- LHCf (Large Hadron Collider forward) [9] va utiliser les particules créées dans la direction du faisceau pour simuler en laboratoire le comportement des rayons cosmiques et ainsi fournir des données utiles aux expériences utilisant les rayons cosmiques à grande échelle.

## 2. L'expérience ATLAS

Le détecteur de particules ATLAS est un cylindre de 46 mètres de long et 25 mètres de diamètre et pesant environ 7000 tonnes. Les paquets de protons circulant dans le LHC dans le sens horaire et le sens anti horaire collisionnent au centre du détecteur. Les collisions engendrent des émissions de particules secondaires qui sont détectées dans les différentes couches concentriques de détection.

Une collaboration de 2500 scientifiques issus de 169 instituts provenant de 37 pays travaillant sur l'expérience ATLAS a participé au développement du détecteur et de ses éléments de détection. Comme le montre la Figure 0-2, ATLAS est constitué, du centre vers l'extérieur, d'un trajectographe interne qui « photographie » les collisions au plus près du point d'interaction à l'aide de détecteurs silicium (Pixel et SCT [10]) et d'un détecteur à gaz (TRT) [11], des calorimètres qui mesurent l'énergie des particules et enfin d'un spectromètre à muons qui identifie et trace la trajectoire des muons issus des collisions. Enfin un système d'aimants supraconducteurs (solénoïde au centre et toroïdal dans les chambres à muons) dévie les particules chargées pour la mesure de leur quantité de mouvement.

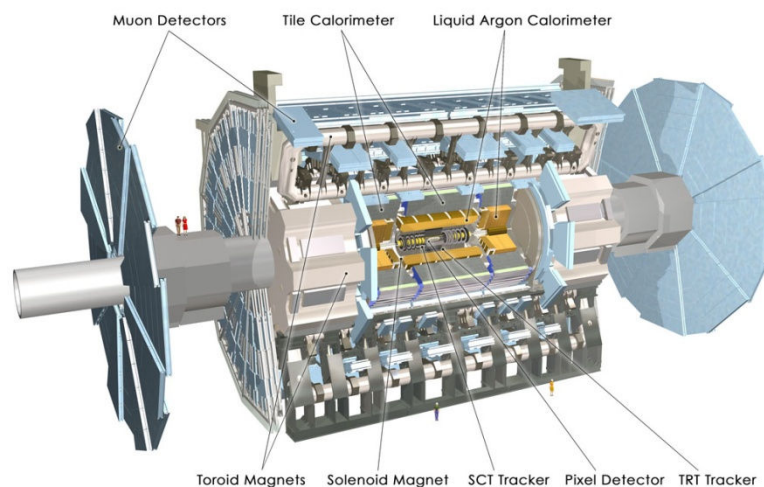


Figure 0-2 : Architecture du détecteur ATLAS

Un système de déclenchement à trois niveaux permet de sélectionner les événements « intéressants » (environ 200 par seconde). Ils sont ensuite enregistrés par un système d'acquisition de données (DAQ) centralisé qui coordonne la prise de données de tous les sous-détecteurs de l'expérience. Les données sont stockées sur des serveurs dédiés au CERN et dans les laboratoires de la collaboration pour une reconstruction et une analyse des événements.

Finalement, pour garantir la qualité des données et exploiter le détecteur, tous les sous-détecteurs et les services d'ATLAS (systèmes cryogéniques et de refroidissement, alimentations électriques, conditions environnementales) sont monitorés par un système de contrôle distribué ou DCS (Detector Control System) [12].

### 3. Positionnement du projet de thèse

L'expérience ATLAS est un ensemble cohérent de sous-détecteurs destinés à l'acquisition de données issues des collisions de protons à son point d'interaction. La qualité des données issues du détecteur ATLAS dépend de facteurs intrinsèques aux sous-détecteurs tels que le choix et la qualité de construction et d'assemblage des éléments de détection, l'efficacité du système d'acquisition de données en terme de synchronisation et de sélection d'événements ou encore la cohérence du système de contrôle du détecteur. La maîtrise de ces paramètres n'est cependant pas suffisante pour garantir une exploitation sûre et optimale du détecteur. Un certain nombre de paramètres externes aux éléments de détection doivent également être pris en compte tels que les conditions environnementales, les caractéristiques du faisceau ainsi que d'autres aspects tels que la sécurité des personnes lors des interventions de maintenance du détecteur.

Ce document présente des réalisations instrumentales effectuées pour l'expérience ATLAS dans le cadre de deux projets ayant pour but la maîtrise des paramètres externes du détecteur.

La première partie porte sur le Contrôle de l'Infrastructure Commune (CIC) du détecteur. Le CIC fait partie du DCS d'ATLAS qui va être décrit dans le premier chapitre. Le CIC regroupe toutes les applications qui sont dédiées à des services communs à tous les sous-détecteurs d'ATLAS dans la cave expérimentale et dans les locaux d'électronique. Les chapitres II et III développent deux applications dédiées à l'infrastructure de la cave expérimentale d'ATLAS. Le chapitre II présente un système de détection et de suivi actif des personnes dans la cave expérimentale et à l'intérieur du détecteur nommé FPIAA (Finding Persons Inside ATLAS Areas) qui est utilisé lors des périodes de maintenance du détecteur comme un outil aidant à la sécurité du personnel travaillant dans la zone expérimentale. Le chapitre III présente une application permettant de mesurer le taux de radiations ionisantes accumulées par les éléments du détecteur ATLAS lors de son exploitation afin de confirmer les modélisations et d'effectuer des études de corrélation entre le vieillissement des matériaux et la quantité de radiations ionisantes accumulées.

La deuxième partie de ce document porte sur un autre type de service au détecteur ayant pour but la caractérisation du faisceau de particules du LHC. Il s'agit ici du sous-détecteur ALFA (Absolute

Luminosity For ATLAS) qui est construit pour mesurer la luminosité absolue du faisceau du LHC au point d'interaction d'ATLAS. Ce détecteur à fibres scintillantes est d'abord décrit dans sa globalité dans le chapitre I. Une étude du matériel de conversion photo-électrique choisi est présentée dans le chapitre II avec pour but de démontrer qu'il remplit le cahier des charges du détecteur. Une étude détaillée des compteurs de déclenchement est ensuite développée dans le chapitre III. Les résultats d'un test faisceau visant à affiner le choix technologique du matériel de détection des compteurs de déclenchement sont d'abord présentés, puis une solution alternative de conversion photo-électrique à celle choisie pour les compteurs de déclenchement est étudiée. Finalement, le chapitre IV présente les développements préliminaires qui ont été effectués sur le système de contrôle du détecteur ALFA afin de fournir les premiers éléments nécessaires aux phases de test et d'étalonnage du détecteur et en vue de son intégration finale dans l'expérience ATLAS.

PARTIE 1  
APPLICATIONS POUR LE CONTRÔLE  
DE L'INFRASTRUCTURE  
DU DÉTECTEUR ATLAS

# I. SYSTÈME DE CONTRÔLE DU DÉTECTEUR ATLAS

Le détecteur ATLAS est composé de plusieurs couches distinctes de détection nommées sous-détecteurs. Sa complexité et sa taille (environ 100 millions de canaux d'acquisition de données) nécessitent un Système de Contrôle du Détecteur (DCS) [12] architecturé et cohérent pour garantir une exploitation sûre des sous-détecteurs et de l'infrastructure du détecteur. Le DCS doit pouvoir contrôler tous les éléments du détecteur et surveiller et archiver les paramètres opérationnels. Il doit fournir à l'utilisateur une interface qui permet de détecter toute situation anormale et d'y réagir manuellement ou par des actions automatisées prédéfinies.

Ce chapitre décrit l'architecture du DCS d'ATLAS, les outils qui y sont utilisés et les applications qui ont été développées.

## 1. Architecture

Pour la conception du DCS, des produits provenant de l'industrie ont été employés. Ainsi, dans le cadre d'une surveillance du marché faite sur les solutions logicielles SCADA (Supervisory Controls And Data Acquisition), le logiciel « Prozess Visualisierungs and Steuerungs System » (PVSS II) [13] de la compagnie ETM a été sélectionné pour être la base logicielle du DCS. C'est un logiciel de contrôle et de monitoring qui peut être utilisé en application distribuée et qui est adapté aux systèmes d'exploitation Windows et Linux. La Figure I-1 montre l'architecture du DCS. Une partie frontale ou Front-End (FE) est constituée des équipements qui doivent être contrôlés et la partie arrière ou Back-End (BE) est constituée des couches logicielles du système de contrôle. L'échange d'information entre l'électronique FE et le BE se fait majoritairement par bus de terrain pour lesquels la technologie CAN [14] a été retenue.

Les équipements FE du détecteur ATLAS sont l'électronique nécessaire au fonctionnement des sous-détecteurs et les services qui leur sont associés tels que les alimentations électriques ou les systèmes de refroidissement. Pour les cas où les paramètres à monitorer ne sont pas inclus dans des systèmes d'acquisition locaux, une carte électronique d'acquisition de données polyvalente et facilement intégrable dans tout système FE appelée ELMB (Embedded Local Monitoring Board) [15] a été développée. Ayant été qualifiée sous champ magnétique et sous radiations ionisantes, l'ELMB peut en outre être utilisé dans le détecteur.

Le BE est organisé en trois couches :

- Les LCS (Local Control Station) sont l'interface avec le FE. Ces machines font l'acquisition de données des paramètres opérationnels et le contrôle de l'électronique qui y est connectée.



- Les SCS (Subdetector Control Station) sont la première couche fonctionnelle de contrôle des sous-détecteurs. Elles permettent d'exploiter un sous-détecteur via le système de contrôle global ou en stand-alone,
- les GCS (Global Control Stations) gèrent tous les services centraux du système de contrôle d'ATLAS. Elles fournissent les interfaces utilisateurs dans la salle de contrôle, les publications d'informations vers le monde extérieur (pages WEB, logiciels de visualisation de données) et sont connectées aux systèmes externes propres au LHC ou les autres systèmes nécessaires au fonctionnement d'ATLAS tels que le contrôle des aimants ou DSS (Detector Safety System) [16].

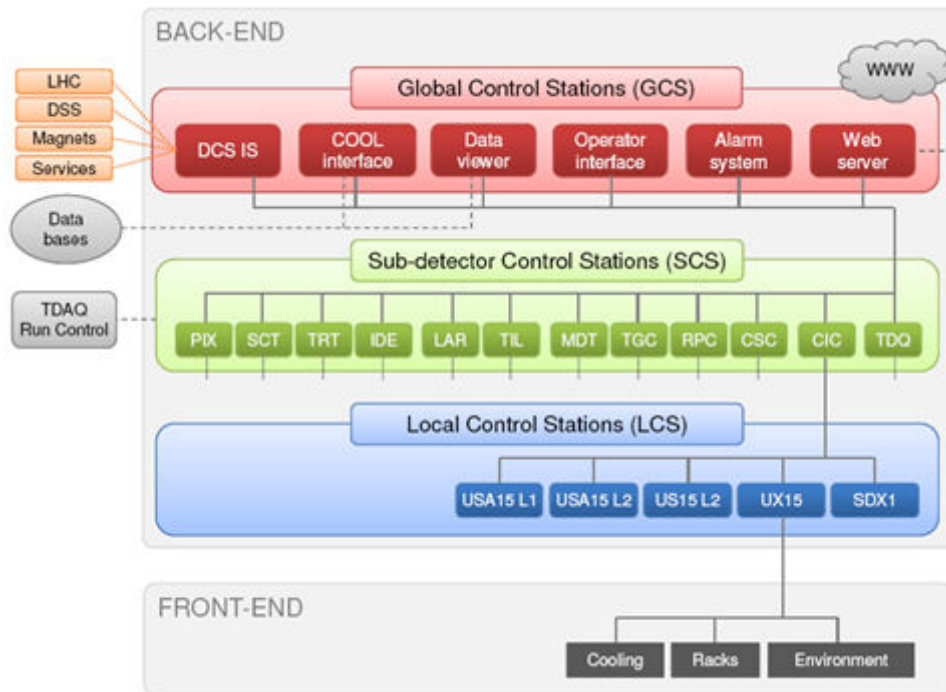


Figure I-1 : Architecture du système de contrôle d'ATLAS

## 2. Electronique frontale

### 2.1. Le module ELMB

L'ELMB est une carte électronique fournissant une interface d'entrées / sorties qui répond aux besoins spécifiques des expériences du LHC pour le monitoring local de paramètres. Comme le montre la Figure I-2, l'ELMB est composé de trois blocs distincts qui sont interconnectés entre eux et optocouplés. L'ELMB est piloté par un microcontrôleur ATmega128 de ATMEL [17] (8 bits, cadencé à 4 MHz). Il est équipé d'un contrôleur CAN qui assure la communication sur bus CAN par protocole CANOpen avec la LCS.

L'ELMB fournit 24 entrées/ sorties digitales et 64 canaux analogiques échantillonnés sur 16 bits. L'ADC (Analog To Digital Converter) peut être paramétré sur 6 pleines échelles (25mV, 50 mV, 100 mV, 1V,

2.5V, 5V) en mode unipolaire ou bipolaire. Il dispose également d'un port SPI (Serial Peripheral Interface) qui est utilisé en interne pour la communication avec l'ADC, et qui permet de piloter des périphériques externes. Le protocole logiciel de l'ELMB prévoit notamment le pilotage de sorties analogiques par l'intermédiaires de DAC (Digital to Analog Converter) externes contrôlés par SPI.

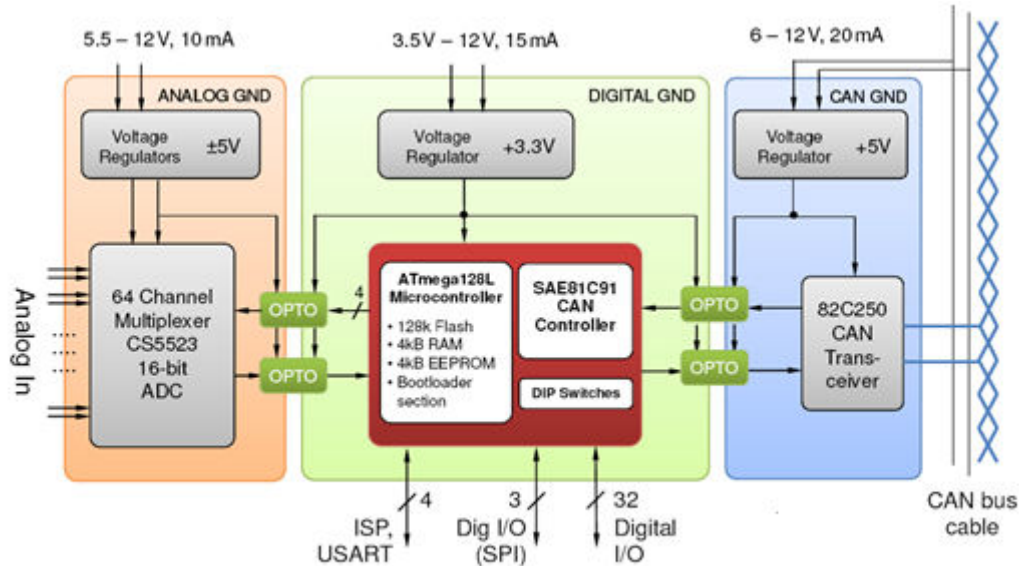


Figure I-2 : Diagramme de l'ELMB

L'ELMB (Figure I-3) peut être intégré sur une carte mère développée par l'utilisateur ou être utilisé sur une carte mère standard qui fournit la connectivité nécessaire à l'utilisation des entrées /sorties de l'ELMB, et sur laquelle des adaptateurs peuvent être connectés pour la lecture de tensions ou de sondes de températures.

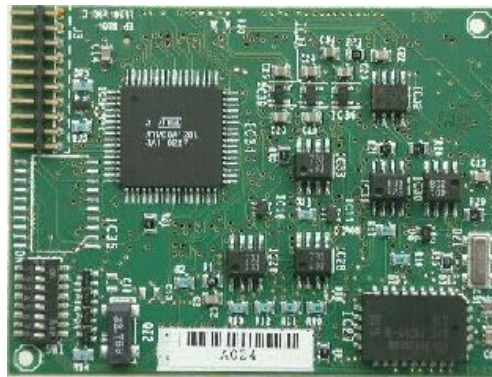


Figure I-3 : Carte ELMB (vue du dessus)

Une série de tests sous radiations a été effectuée sur l'ELMB [15], il a été qualifié pour fonctionner avec un niveau de radiations n'excédant pas 1 Gray de dose absorbée par an et une fluence de particules de  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>. La Figure I-4 montre les simulations de dose et de flux de particules annuels pendant l'exploitation du détecteur ATLAS, les ELMB sont utilisés à l'extérieur du calorimètre ( $R > 2,7$  m).

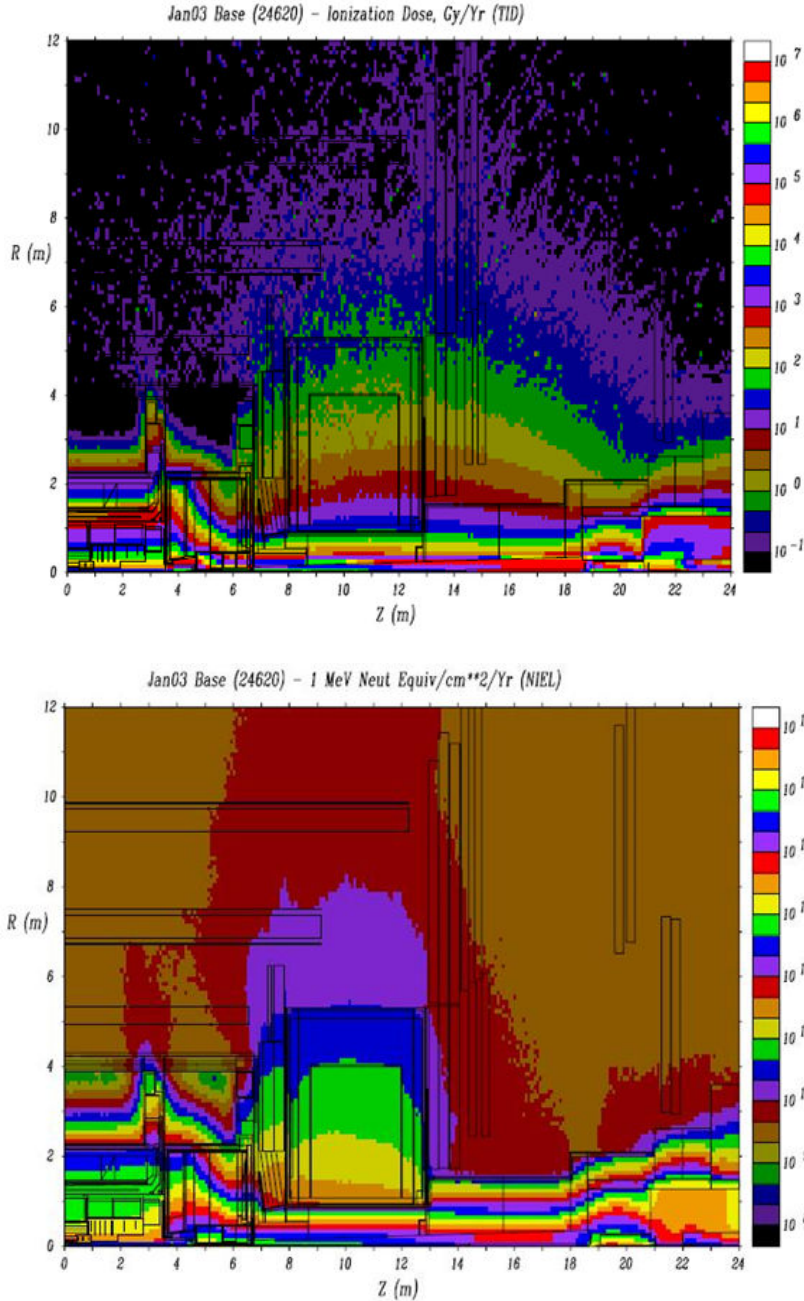


Figure I-4 : Haut. Dose (TID) et Bas. Flux de particules (NIEL, 1 MeV equivalent neutrons) annuels prévus pas simulation pendant l'exploitation d'ATLAS en fonction de la distance par rapport au point d'interaction du faisceau du LHC (R = 0; Z = 0)

## 2.2. Modules d'alimentation pour bus CAN

Plusieurs milliers d'ELMB sont utilisés dans les expériences du LHC et ils sont souvent intégrés dans l'électronique front-end des détecteurs où l'apport d'une alimentation locale est délicate à cause du manque d'espace, des niveaux de radiations et des champs magnétiques. Pour résoudre cette problématique, des modules d'alimentation (PSU : Power Supply Unit) adaptés à l'alimentation des ELMB par le bus CAN ont été développés au CERN pour l'ensemble des expériences du LHC. Elles prennent la forme d'un châssis de type Europe d'une hauteur de 6U (1 U = 4,445 centimètres) adapté

aux racks d'électroniques standards (19 pouces). Ces châssis peuvent accueillir jusqu'à huit modules d'alimentation interchangeables et chaque module est équipé de deux unités d'alimentation. Une unité d'alimentation est composée de deux convertisseurs de tension 230 V<sub>AC</sub> / 12 V<sub>DC</sub> qui permettent d'alimenter séparément le contrôleur CAN d'une part et le microcontrôleur et l'ADC d'autre part des ELMB connectés à un bus CAN. L'utilisation de modules interchangeables permet d'utiliser ces châssis pour l'alimentation de capteurs actifs ou d'autres types d'électroniques en remplaçant éventuellement les convertisseurs pour travailler sur d'autres plages de tension (15 V, 24 V,...)

La face arrière de la PSU est équipée de seize connecteurs Burndy 19 contacts (un par unité d'alimentation) sur lesquels viennent se connecter les câbles des bus CAN, les ELMB présents sur le bus étant alors alimentés par ce câble. Les câbles CAN contiennent également deux fils utilisés pour transmettre les signaux CAN sur le bus (CAN High et CAN Low). Ces fils de transmission CAN de chaque bus sont mis à disposition sur deux connecteurs D-Sub 9 (un en face avant et un en face arrière de la PSU).

Chaque PSU est équipée d'un ELMB qui permet de la contrôler à distance. 16 sorties digitales sont utilisées pour commander un relais par unité d'alimentation qui ouvre ou ferme les deux sorties 12 V vers le bus CAN. Les 64 entrées analogiques sont utilisées pour l'acquisition des paramètres d'alimentations afin de monitorer la tension fournie et le courant délivré par chaque convertisseur, comme le montre la Figure I-5 qui représente un panneau de contrôle d'une PSU.

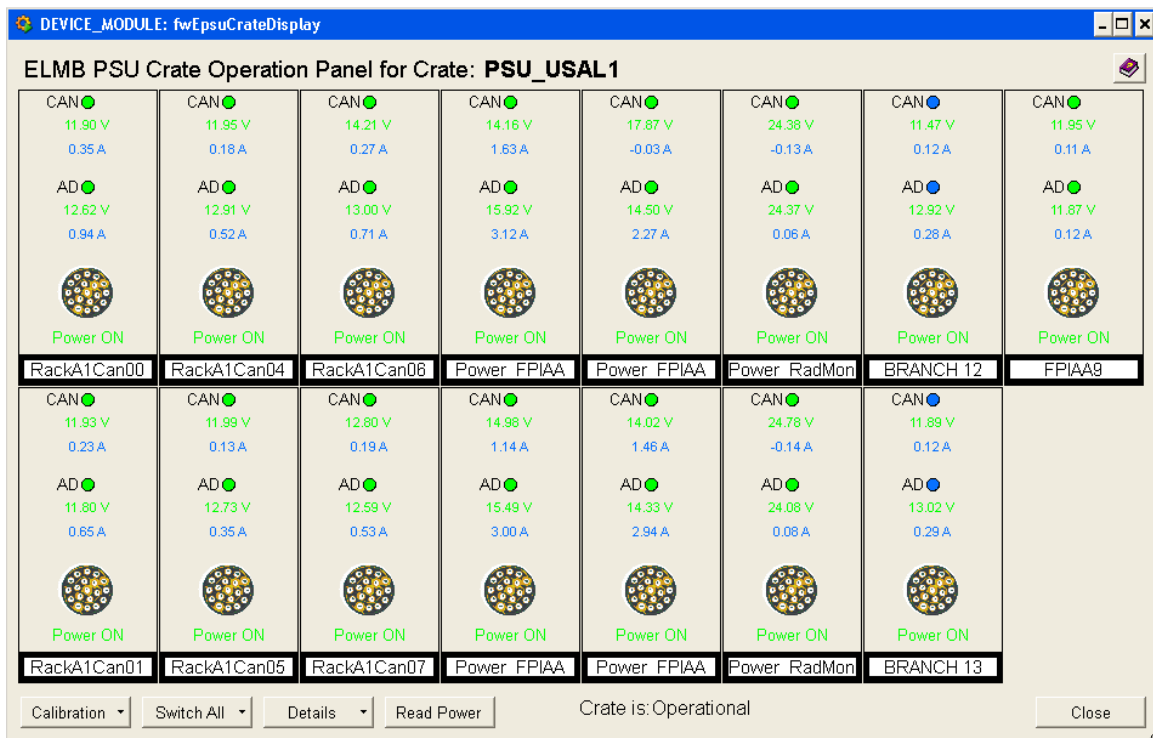


Figure I-5 : Vue d'un panneau de contrôle d'un châssis d'alimentation adapté à l'alimentation des ELMB par bus de terrain

Dans cet exemple, neuf bus CAN sont alimentés par le châssis et deux modules 15 V ont été installés pour l'alimentation de capteurs infrarouges pour la détection des personnes (voir chapitre II) ainsi qu'un module 24 V pour alimenter des DAC utilisés pour le monitoring des radiations (voir chapitre III).

## 3. Logiciels

### 3.1. Serveur OPC

Le serveur OPC [18] est utilisé pour contrôler les échanges de données sur bus CAN depuis les LCS. Les LCS sont équipés de trois cartes PCI/CAN de la société Kvaser [19] qui permettent chacune de se connecter sur quatre bus de terrains. Le serveur OPC installé sur une LCS peut ainsi échanger des données avec l'électronique FE connectée au bus de terrain avec un protocole de communication CANopen. Ce protocole permet la lecture ou l'écriture de données synchronisées (le serveur envoie des requêtes à l'électronique FE) ou asynchrones : l'électronique FE renvoie les données au serveur sur une condition prédéfinie (seuil pour des entrées analogiques, changement d'état pour des entrées digitales). Le serveur OPC rend les valeurs des données échangées disponibles à ses clients, ici PVSS.

### 3.2. PVSS

Les applications de contrôle des expériences du LHC utilisent PVSS comme composant logiciel principal. Le monitoring du détecteur ATLAS représente plus de 200000 paramètres mesurables qui doivent être lus et analysés en parallèle. Cela implique l'utilisation d'un grand nombre de stations de contrôle (environ 200) qui doivent chacune exécuter des applications spécifiques et être intégrées dans un système distribué cohérent permettant un échange de données vertical et transversal. PVSS a été choisi car il permet ce type d'exploitation grâce à quatre concepts majeurs :

- Un « projet » PVSS est exécuté sur chaque station de contrôle. Il contient plusieurs processus appelés « managers » ayant chacun une tâche particulière.
- Chaque projet PVSS utilise une base de données gérée centralement pour archiver les valeurs des paramètres monitorés sous la forme d'objets appelés « datapoints ». Ces objets sont accessibles par tous les managers du projet.
- Les projets PVSS peuvent être connectés entre eux par Ethernet pour former un système distribué. Cela permet d'une part à chaque projet de pouvoir accéder aux datapoints des autres projets et d'autre part de former un système de contrôle cohérent à l'échelle du détecteur ATLAS avec environ 200 stations de contrôle interconnectées.
- PVSS fournit une interface de programmation permettant le développement d'applications et l'ajout de composants logiciels spécifiques à chaque projet.

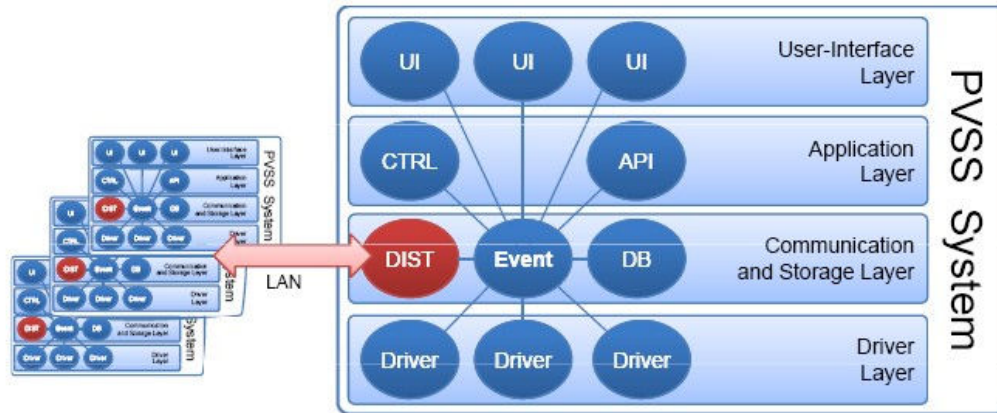


Figure I-6 : Couches fonctionnelles d'un projet PVSS

La Figure I-6 présente l'organisation fonctionnelle d'un projet PVSS :

- Une première couche fonctionnelle (« Driver Layer ») permet un interfaçage de PVSS avec l'électronique FE à l'aide de pilotes utilisant des protocoles standards de l'industrie tel que CANopen pour la communication sur bus CAN ou Modbus pour la communication avec des PLC (Programmable Logic Controller).
- Une deuxième couche (« Communication and Storage layer ») établit la communication interne et externe au projet. Un processus central (« Event») distribue les données aux autres managers du projet. Cette couche contient également un manager qui établit la communication avec les bases de données (« DB ») et un autre qui sert de passerelle pour l'interconnexion du projet par Ethernet sur le système distribué (« DIST »).
- Une couche applicative contient tous les processus de contrôle qui assurent le traitement de données et permettent l'intégration de mécanismes automatisés.
- Enfin une dernière couche génère les interfaces de programmation et fournit les panneaux utilisés par les opérateurs pour interagir avec le système de contrôle du détecteur.

### 3.3. Couche opérationnelle

#### 3.3.1. Modèle à états finis

Les éléments du système de contrôle du détecteur sont représentés par un modèle à états finis ou FSM (Finite State Machine) [12] qui fournit une implémentation orientée objet interfacée avec PVSS.

Le FSM permet de définir des classes d'objets appelés « Device Unit » (DU) représentant les éléments du système de contrôle du détecteur et de leur assigner un état (« READY », « NOT READY », « UNKNOWN ») et un statut (« OK », « WARNING », « ERROR », « FATAL ») qui reflètent l'état opérationnel des éléments matériels qu'ils représentent.

Le détecteur est représenté par une structure hiérarchique où les DU sont liés à une arborescence composée d'objets logiques appelés « Control Units » (CU) qui représentent chaque système / sous-système.

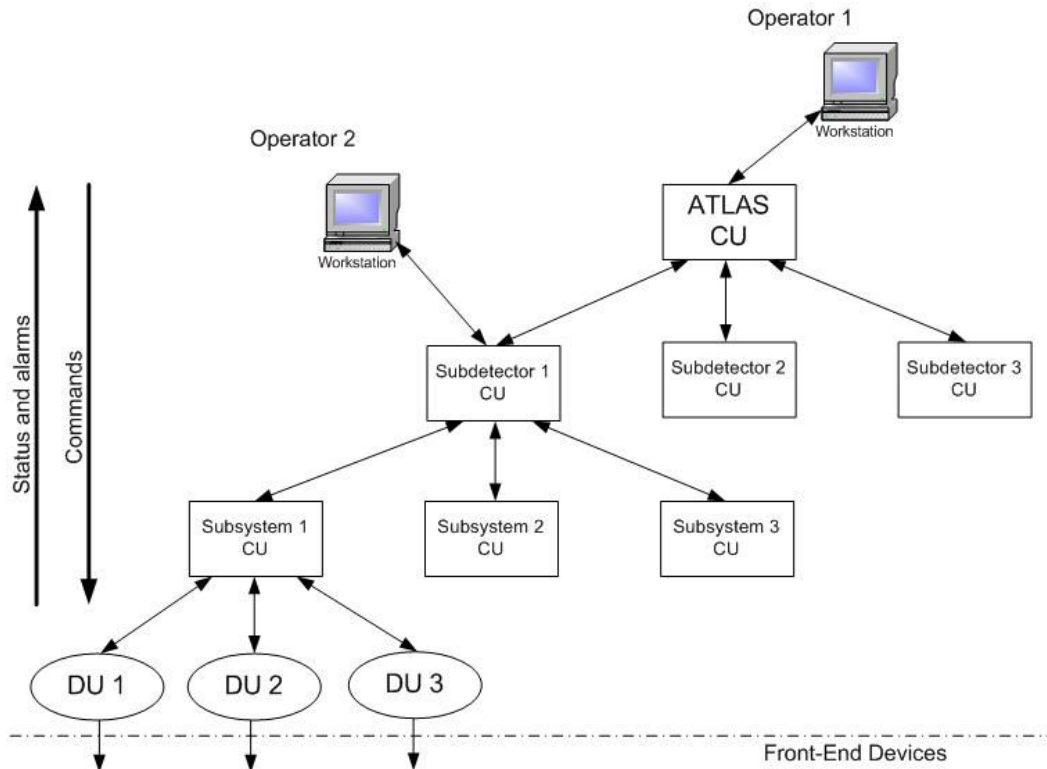


Figure I-7 : Architecture FSM

La Figure I-7 représente le concept de l'architecture FSM : l'électronique FE est liée à des DU qui sont eux-mêmes groupés dans un sous-système représenté par une CU. Les CU sont organisés en plusieurs couches, formant une arborescence logique qui partitionne le détecteur ATLAS en plusieurs domaines. Les opérateurs peuvent prendre le contrôle de tout ou partie du détecteur, ici l'opérateur 1 prend le contrôle d'ATLAS et l'opérateur 2 prend le contrôle du sous-détecteur 1. Le contrôle peut être partagé ou exclusif, dans ce dernier cas la branche du sous-détecteur 1 est détachée de l'arborescence et l'opérateur 1 perd le contrôle de cette branche. Un système de droits d'accès est implémenté sur le FSM afin de permettre uniquement aux utilisateurs autorisés de prendre le contrôle des branches qui correspondent au sous-détecteur sur lequel ils travaillent. Plusieurs catégories y sont définies telles que observateur, utilisateur ou encore expert, chacune d'entre elles donnant un certain nombre de privilèges qui filtrent les actions autorisées à l'opérateur.

### 3.3.2. Interface utilisateur

Le détecteur ATLAS est monitoré depuis sa salle de contrôle. Une interface représentant l'intégralité de la structure FSM d'ATLAS est à la disposition de l'opérateur pour contrôler le détecteur.

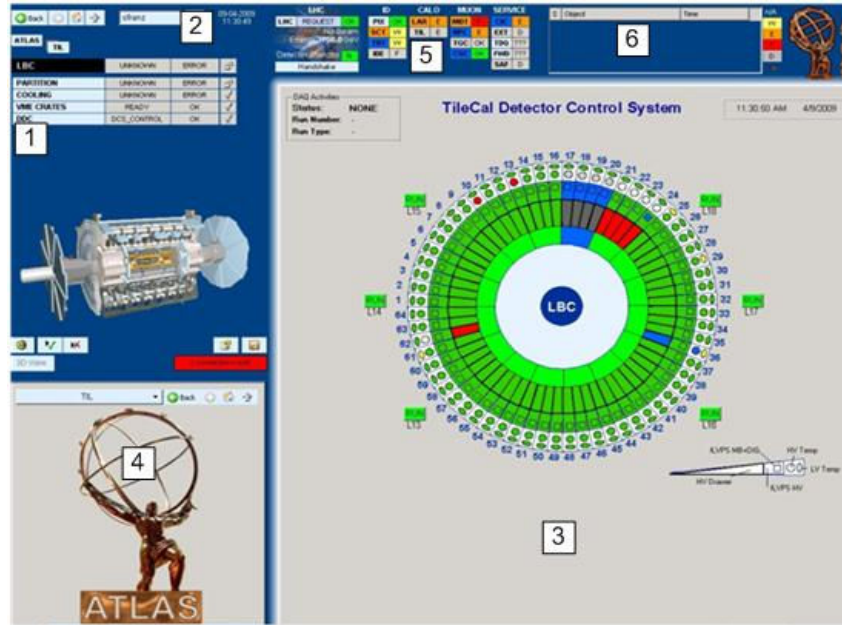


Figure I-8 : Interface utilisateur dans la salle de contrôle d'ATLAS - Exemple avec une partition du calorimètre à tuiles

La Figure I-8 montre l'interface utilisateur qui permet de naviguer à travers les éléments du détecteur ATLAS, ici une partition du calorimètre à tuiles. Les modules présents sur cette interface sont :

- 1 - Module FSM : il montre l'objet FSM actif et ses sous-éléments. Il permet de naviguer dans le détecteur, d'envoyer des commandes aux éléments affichés et de voir leur état et leur statut.
- 2 – Module de contrôle d'accès : il permet à l'utilisateur de s'identifier. Les actions possibles sont restreintes aux privilèges relatifs à chaque utilisateur.
- 3 – Module principal : il affiche le panneau associé à l'objet FSM actif. Les éléments affichés dans ce panneau peuvent être interactifs et ainsi permettre la navigation dans les couches inférieures.
- 4 – Module secondaire : il permet d'afficher un panneau simplifié relatif à un autre élément du détecteur.
- 5 - Vue générale du détecteur : ce module donne une vue globale des états et statut de tous les sous-systèmes d'ATLAS.
- 6 – Table d'alertes : ce module fournit la liste des alertes relatives à tous les objets FSM. Des filtres peuvent être appliqués pour classifier les alertes.

### 3.4. Bases de données

Compte tenu de la grande quantité de données générées et utilisées par le DCS, des bases de données ont été implémentées pour faciliter les configurations de masse des systèmes FE du détecteur et pour faciliter l'accès aux paramètres opérationnels pour l'analyse de données hors ligne. La technologie Oracle est utilisée.



### **3.4.1. Base de données de configuration**

La base de données de configuration du DCS [12] a été implémentée pour faciliter les paramétrages de masse du détecteur. Elle est basée sur des bases de données Oracle [20] où les paramètres de l'électronique FE sont sauvegardés. Chaque sous-détecteur peut créer des listes de configurations qui contiennent des valeurs prédéfinies correspondant à un mode de fonctionnement particulier du détecteur pour chaque paramètre. Ces listes de configurations permettent de reconfigurer l'ensemble d'un sous-détecteur avec une seule commande.

### **3.4.2. Base de données de conditions**

Les données d'entrées / sorties du système de contrôle sont archivées en ligne mais cet archivage n'est pas accessible en dehors de l'environnement du DCS. C'est pourquoi une base de données de conditions [12] a été implémentée pour permettre un accès hors ligne des données du DCS utile aux processus d'étalonnage, à la reconstruction des données et à leur analyse. Par ce biais, les paramètres du DCS jugés nécessaires à la compréhension de l'état du détecteur pour l'analyse des données physiques sont rendus accessibles aux sites de traitement de données au CERN (Tier-0) et dans les laboratoires de la collaboration (Tier-1).

Les données enregistrées sur la base de données de conditions sont également utilisées par un outil servant à l'évaluation de la qualité des données du détecteur ATLAS [21]. Cet outil joint un certain nombre d'indicateurs sur l'état des sous-détecteurs au moment de la prise de données à chaque fichier de données physiques.

## **4. Contrôle des sous-détecteurs d'ATLAS**

Chaque sous-détecteur possède une SCS (Subdetector Control Station) qui a un rôle central pour sa supervision. Le SCS représente le nœud principal de la structure hiérarchique de chaque sous-détecteur et il permet de contrôler ses sous-systèmes éventuellement indépendamment du reste du détecteur. C'est également ce nœud qui vient se connecter à la couche de contrôle globale d'ATLAS. Les sous-systèmes d'ATLAS sont scindés en deux sous-catégories : le contrôle des sous-détecteurs et le contrôle de l'infrastructure d'ATLAS.

### **4.1. Contrôle des sous-détecteurs**

Chaque sous-détecteur possède une structure hiérarchique de contrôle qui permet de monitorer son électronique front-end (FE) et de garantir une exploitation stable afin de pouvoir l'inclure dans le système d'acquisition de données centralisé d'ATLAS. Le sous-détecteur peut être organisé en structures fonctionnelles (haute tension, basse tension, gaz...) ou en structures géographiques en fonction de la position de ses éléments de détection dans ATLAS.

Le système de contrôle des sous-détecteurs permet de contrôler à distance les alimentations (haute tension, basse tension) nécessaires au fonctionnement de l'électronique FE et de faire l'acquisition de données des paramètres opérationnels tels que tensions, courants, températures... Le système de

contrôle permet d'effectuer les actions nécessaires au fonctionnement du détecteur ou à son arrêt total ou partiel par des actions manuelles ou séquencées et automatisées.

## 4.2. Contrôle de l'infrastructure du détecteur

Les services communs du détecteur ATLAS sont regroupés dans un sous-système appelé CIC (Common Infrastructure Control). Comme le montre la Figure I-9, ce sous-système est composé de deux parties : Le contrôle des services du détecteur (Information Server) et le contrôle de l'environnement de la caverne expérimentale et des locaux d'électronique (LCS pour l'infrastructure).

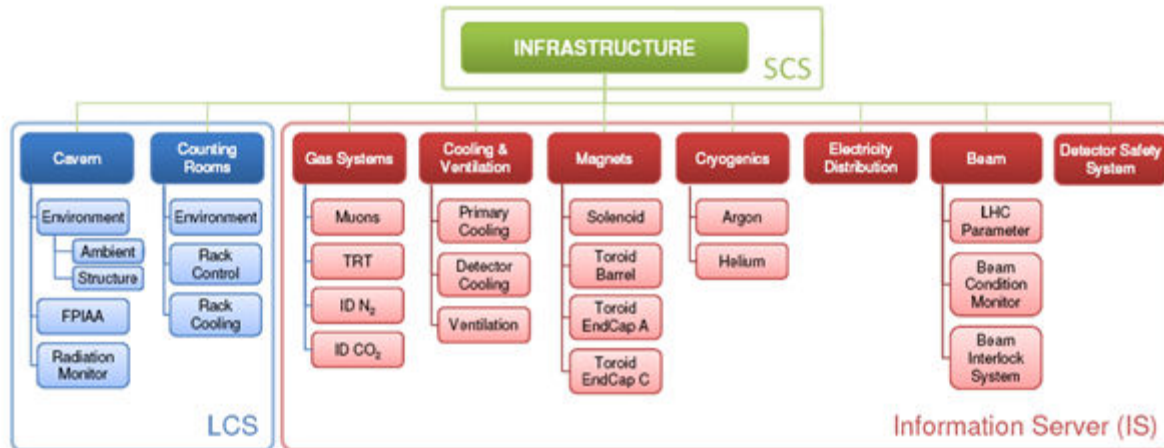


Figure I-9 : Structure du contrôle de l'infrastructure du détecteur ATLAS

Les services du détecteur tels que la distribution des gaz (Hélium, Argon...), les systèmes de refroidissement et de climatisation, les aimants, la cryogénie, la distribution électrique, la communication avec le système de contrôle du LHC ainsi que le système de sécurité du détecteur, sont tous gérés par des systèmes de contrôle spécifiques et autonomes. Ils communiquent avec le DCS d'ATLAS par l'intermédiaire d'un serveur d'informations (IS : Information Server) afin d'intégrer leur monitoring dans le système global tout en conservant un système de contrôle indépendant de la structure de contrôle d'ATLAS.

Le contrôle de l'environnement de la caverne expérimentale et des locaux d'électronique est quant à lui totalement intégré dans le système de contrôle du détecteur (voir Figure I-1). Six LCS sont dédiés au contrôle de l'infrastructure de l'expérience et font l'acquisition de données de plusieurs centaines d'ELMB connectés en réseau sur plusieurs dizaines de bus de terrain.

### 4.2.1. Contrôle de l'infrastructure des locaux d'électronique

Quatre LCS assurent le monitoring des locaux d'électronique où sont regroupés les racks d'équipement front-end des sous-détecteurs d'ATLAS. Les paramètres environnementaux tels que température, humidité ou pression atmosphérique et les températures des circuits de refroidissement par eau des châssis d'électronique sont monitorés.

Une grande partie des châssis d'électronique possèdent un système de refroidissement à air. Ils sont équipés pour cela d'une turbine forçant la circulation de l'air verticalement dans le rack à travers les équipements et des échangeurs de chaleur. Ces turbines sont équipées d'un ELMB qui permet de monitorer les paramètres de chaque châssis tels que température, taux d'humidité ou courant d'alimentation des moteurs de la turbine.

#### *4.2.2. Contrôle de l'infrastructure de la caverne expérimentale*

Le contrôle de l'infrastructure de la caverne expérimentale est scindé en deux parties, chacune implémentée sur une LCS. La première partie regroupe le contrôle des racks d'électronique installés sur les structures métalliques adjacentes au détecteur. Comme les racks situés dans les locaux d'électronique (voir paragraphe 4.2.1), la majorité de ces racks sont équipés d'un système de refroidissement par air couplé à un monitoring des paramètres locaux. La seconde partie est dédiée au monitoring de l'infrastructure de la caverne expérimentale d'ATLAS. Outre le contrôle des paramètres environnementaux dans le détecteur et sur les structures adjacentes (température, humidité ambiante, température de l'eau de refroidissement de l'électronique), deux projets présentés en détails dans les chapitres II et III y ont été développés :

- Finding Persons Inside ATLAS Areas (FPIAA) pour suivre activement les déplacements du personnel à l'intérieur et à l'extérieur du détecteur.
- le monitoring des radiations dans le détecteur.

## 5. Conclusion

L'expérience ATLAS possède un système de contrôle basé sur l'utilisation de matériel et logiciels commerciaux ou développés centralement au CERN afin de faciliter sa maintenance à grande échelle et sur une période de fonctionnement de 15 à 20 ans.

Le système de contrôle hautement distribué a pour but d'assurer le fonctionnement de ses sous-détecteurs et de contrôler les paramètres environnementaux de l'expérience. Une bonne connaissance de l'environnement est primordiale notamment afin de pouvoir évaluer (et éventuellement minimiser et / ou corriger) son impact sur le fonctionnement de l'électronique (température, radiations) et de maximiser la sécurité des personnes travaillant sur l'installation. Les deux applications qui vont être présentées dans les chapitres II et III illustrent ces deux aspects.

## II. Suivi actif des personnes dans la caverne expérimentale d'ATLAS

### 1. Introduction

#### 1.1. Origines et objectifs du projet

Le détecteur ATLAS est l'expérience la plus volumineuse du LHC avec une caverne de 55 mètres de long et 35 mètres de haut et de large contenant un détecteur de 45 mètres de long et 25 mètres de diamètre qui a la particularité d'être accessible aux personnes pendant les périodes de maintenance.

Comme le montre la Figure II-1, un réseau de structures métalliques couvre les murs de la caverne et le détecteur afin de permettre au personnel d'accéder à ce dernier et aux services qui lui sont associés. Ces structures couvrent 8 étages sur les murs parallèles à l'axe du faisceau (structures HS) et 12 étages sur les murs perpendiculaires à l'axe du faisceau (structures HO) et totalisent plus d'un kilomètre de couloirs.

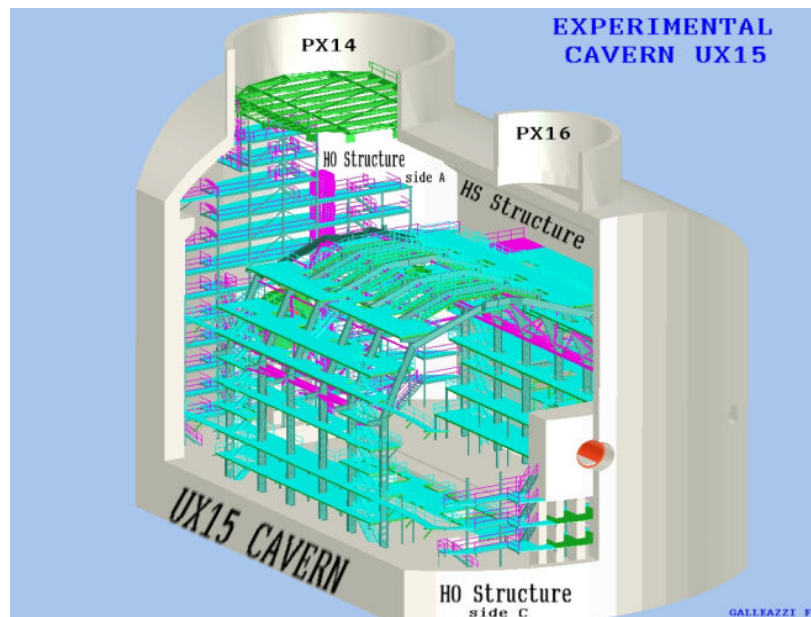


Figure II-1 : Caverne expérimentale d'ATLAS (sans le détecteur)

Depuis ces structures, il est possible d'accéder à l'intérieur du détecteur pour des interventions de maintenance. Outre les structures latérales citées plus haut, la Figure II-2 montre les zones accessibles du détecteur. Sa partie extérieure est partitionnée en secteurs qui sont délimités par les aimants toroïdaux. Chaque secteur est accessible aux personnes et se présente sous la forme de couloirs ou d'alcôves isolés et parallèles au faisceau sur un ou plusieurs niveaux. Six points d'accès au détecteur sont prévus depuis les structures et le personnel peut ensuite se déplacer à l'intérieur, d'un secteur à un autre, en empruntant un réseau d'échafaudages fixes reliés entre eux par des échelles.

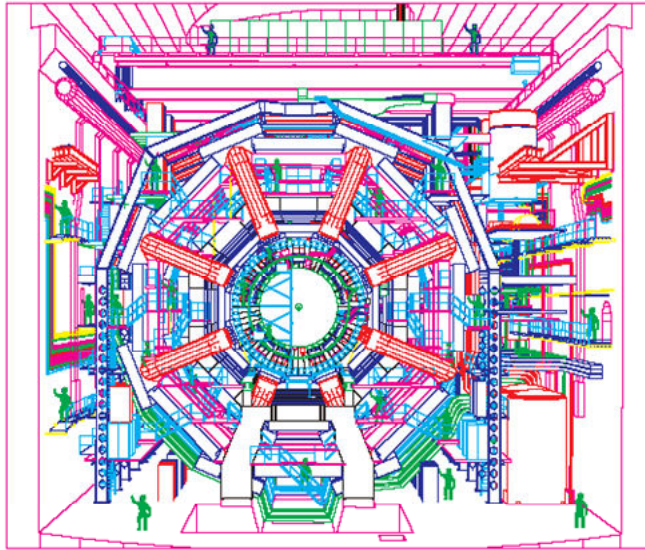


Figure II-2 : Zones du détecteur et des structures accessibles au personnel

La caverne est une zone de travail à risques. Les services présents dans la caverne comme la haute tension, la cryogénie ou encore les réseaux d'argon et d'hélium sont des sources de danger potentiel auxquelles s'ajoute le confinement des personnes, en particulier dans le détecteur. La recherche d'une personne dans la caverne par les services de secours peut s'avérer dangereusement longue, il faut en effet plusieurs heures pour inspecter la totalité de la caverne. Afin de faciliter de telles interventions et pour connaître les positions du personnel dans la caverne, un système de localisation et de suivi actif des personnes a été développé et implémenté : FPIAA (Finding Persons Inside ATLAS Areas). FPIAA doit pouvoir détecter les personnes dans toutes les zones accessibles de la caverne d'ATLAS et fournir une interface logicielle permettant leur localisation par l'opérateur en charge de la sécurité dans la salle de contrôle. Le système doit fournir également une méthode de suivi automatisé du personnel afin de pouvoir détecter la disparition d'une personne dans la caverne, typiquement une personne isolée victime d'un accident qui serait inconsciente.

## 1.2. Choix technologiques

Le matériel de détection employé pour FPIAA doit pouvoir fonctionner dans les conditions environnementales d'une expérience de physique des particules, les exigences principales du cahier des charges sont les suivantes :

- le système doit fonctionner dans un environnement contenant des masses métalliques importantes et qui absorbe donc fortement les ondes électromagnétiques, ce qui exclut les systèmes actifs utilisant des transmissions sans fils sur de longues distances,
- le système doit fonctionner dans le champ magnétique de deux Teslas généré par les aimants supraconducteurs d'ATLAS,
- le système doit résister aux faibles niveaux de radiations ionisantes, à l'extérieur des calorimètres d'ATLAS, induites par les collisions de particules à haute énergie,

- s’agissant d’un système de sécurité, la capacité de FPIAA à détecter une personne ne doit pas reposer sur un transmetteur que la personne doit porter et qui pourrait donc être oublié ou perdu.

Partant de ce cahier des charges, une étude préliminaire a été effectuée pour sélectionner une technologie de détection appropriée [22]. Le premier et le dernier point du cahier des charges écartant les systèmes de type récepteur / transmetteur, l’étude a été portée sur deux technologies : les capteurs à infrarouge ou PIR (Passive InfraRed) et les capteurs à ondes ultrasoniques (US).

Des tests de fonctionnement sous champ magnétique et sous radiations ont été effectués pour ces deux types de capteurs [22] avec les exigences environnementales correspondant aux zones les plus critiques du détecteur (Figure I-4) :

- une fluence de particules à haute énergie (>1 MeV) de  $1,4 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$
- une dose accumulée de 60 Gy
- un champ magnétique pouvant atteindre 2 T

Les capteurs PIR et US utilisent des relais électromagnétiques pour fournir la transition d’état du signal de sortie lorsqu’une personne est détectée. Etant donné que ces relais ne peuvent pas fonctionner sous champ magnétique, ils ont été remplacés par des opto-coupleurs identiques à ceux utilisés sur la carte ELMB (cf. chapitre I) car leur fonctionnement sous radiations a été validé. Après cette modification, les deux types de capteurs ont été testés avec succès sous un champ magnétique de 1,5 T. En revanche les capteurs US n’ont pas résisté aux tests d’irradiation alors que les capteurs PIR fonctionnaient toujours après avoir accumulé  $5,6 \times 10^{12}$  neutrons/cm<sup>2</sup> (haute énergie) et une dose de 67 Gy.

Des capteurs PIR de la société Pyronix [23] ont donc été sélectionnés et les capteurs qui ont été installés pour couvrir toutes les zones accessibles de la caverne expérimentale d’ATLAS sont des modèles commerciaux qui ont été modifiés comme le montre la Figure II-3. Deux opto-coupleurs ont été installés sur un PCB auxiliaire, fournissant un signal de sortie digital pour la détection de personnes et pour l’état d’alimentation du capteur.



Figure II-3 : Capteur PIR - boîtier, face avant et face arrière avec un PCB secondaire équipé d'opto-coupleurs

Ces capteurs PIR utilisent deux éléments pyroélectriques (une variation de température induit une variation de tension) qui sont couplés à une lentille de Fresnel. Comme le montre la Figure II-4, la lentille de Fresnel utilisée permet de créer en tout 34 franges de détection sur trois plans, afin de fournir une zone active de détection volumétrique sur une distance maximale de 15 mètres et un angle horizontal de 90 degrés. Ces capteurs détectent le mouvement d'un corps chaud (ici un humain) lorsqu'il passe d'une zone couverte (dans une frange de détection) à une zone non couverte (entre deux franges) en mesurant la variation du rayonnement infrarouge. Le capteur s'active alors pendant une période fixe de 2,5 secondes.

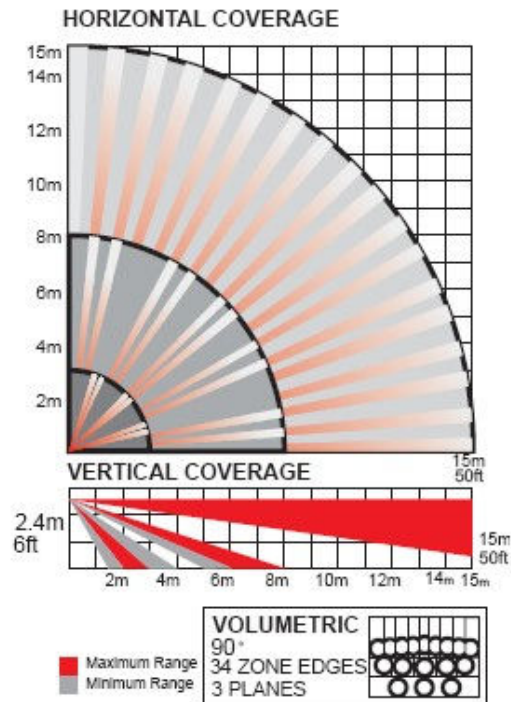


Figure II-4 : Couverture volumétrique d'un capteur Pyronix Magnum Ultra FP05802

## 2. Etudes et développements de l'électronique d'acquisition de données

### 2.1. Développement d'une interface d'acquisition de données

Une interface d'acquisition de données a dû être développée pour répondre aux besoins spécifiques de FPIAA, avec les exigences suivantes :

- Fournir une acquisition de données digitales pour les capteurs PIR et analogiques pour le monitoring des paramètres du système (tensions, température).
- Pouvoir transmettre les données sur bus de terrain à chaque changement d'état des capteurs PIR pour garantir un traitement des données quasi-temps réel.
- L'électronique de mesure doit être montée dans un boîtier robuste et suffisamment compact pour pouvoir être installé dans les zones les plus exiguës du détecteur.

- Les matériaux utilisés doivent respecter les exigences de sécurité contre les incendies (sans halogènes) et ne doivent pas perturber le champ magnétique du détecteur (sans matériaux ferromagnétiques).

L'ELMB (cf. chapitre I, paragraphe 2.1) a été naturellement choisi pour l'acquisition des données car il possède 16 entrées digitales, 64 entrées analogiques et un contrôleur CAN (protocole CANOpen) lui permettant d'être interfacé sur un bus de terrain. Un réglage approprié du logiciel embarqué sur son microcontrôleur permet en outre une transmission des valeurs de ses entrées digitales sur le bus de terrain à chaque changement d'état de l'une d'entre elles, ce qui permet une approche quasi-temps réel du traitement des données.

Comme le montre la Figure II-5, l'ELMB a été intégré dans un boîtier aluminium de 30×20×12 cm qui fournit la connectique nécessaire aux câbles du bus de terrain et un passage de câbles étanche pour entrer les câbles des capteurs et les câbles d'alimentation. Une série de borniers permet de fournir la connectivité nécessaire aux capteurs sur les entrées digitales de l'ELMB, à une alimentation 15 V extérieure et à une alimentation 5 V issue d'un régulateur interne alimenté en 15 V (Les régulateurs n'ont pas été testés sous radiations mais ils sont tous déportés à l'extérieur du détecteur). L'alimentation 15 V fournit la puissance nécessaire à l'électronique des capteurs PIR et l'alimentation 5 V est fournie aux bornes des opto-coupleurs des capteurs PIR pour donner la tension de référence d'activation du capteur.

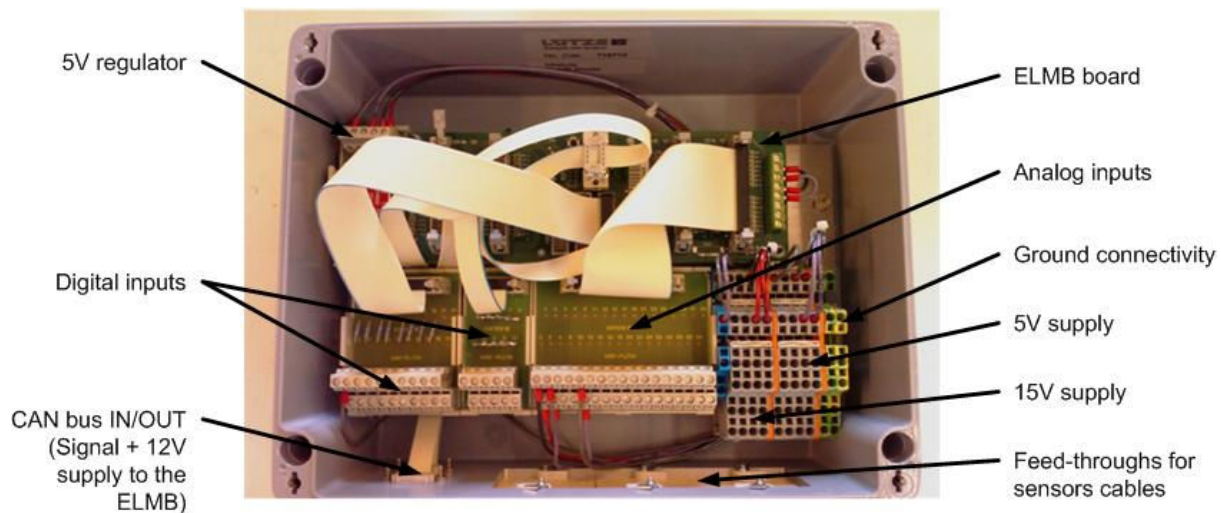


Figure II-5 : Boîtier d'acquisition de données utilisé pour FPIAA

Cependant les entrées digitales de l'ELMB fonctionnent normalement avec une tension de référence de 3,3 V, une résistance de 22 k $\Omega$  a donc été installée aux bornes des entrées digitales de l'ELMB pour créer un pont diviseur avec la résistance de 10 k $\Omega$  montée en série sur la sortie digitale des capteurs PIR (Figure II-6). La tension nominale de 3,3 V aux bornes des entrées digitales de l'ELMB est ainsi maintenue malgré la tension de 5 V appliquée aux opto-coupleurs des capteurs PIR



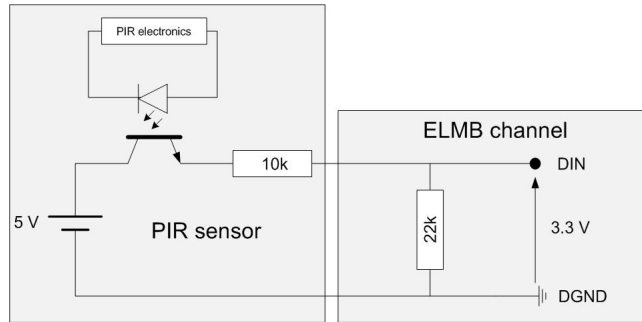


Figure II-6 : Schéma électrique de connexion d'un capteur PIR sur une entrée digitale d'un ELMB

Un bornier supplémentaire a été installé pour fournir la connectivité à 16 des 64 entrées analogiques de l'ELMB. Trois d'entre elles sont utilisées pour monitorer les tensions d'alimentation des capteurs connectés au boîtier (15 V et 5 V) ainsi que la température dans le boîtier. Les autres sont utilisées ou conservées pour d'autres applications, comme le monitoring de la température des structures aluminium de l'aimant toroïdal du détecteur présenté en **Annexe 1**.

Un prototype de ce boîtier d'acquisition de données a été construit au CERN pour ensuite être produit en série par une industrie. Au total 87 boîtiers de ce type ont été installés dans la caverne d'ATLAS, à l'intérieur et à l'extérieur du détecteur, sur 11 bus de terrains permettant de couvrir l'intégralité de la caverne.

La Figure II-7 montre la chaîne d'acquisition dans son ensemble. Un rack situé dans une salle d'électronique à 100 mètres de la caverne expérimentale contient la LCS dédiée au contrôle de l'infrastructure de la caverne (ATLCICUXDET). Les 11 bus CAN provenant de la caverne sont connectés à une unité d'alimentation (Power Supply Unit – PSU, voir Chapitre I, paragraphe 2.2) équipée de modules 12V et 15V qui fournit les tensions d'alimentation des ELMB et des capteurs PIR et qui fait la connexion des signaux CAN vers les ports des cartes Kvaser de la LCS.

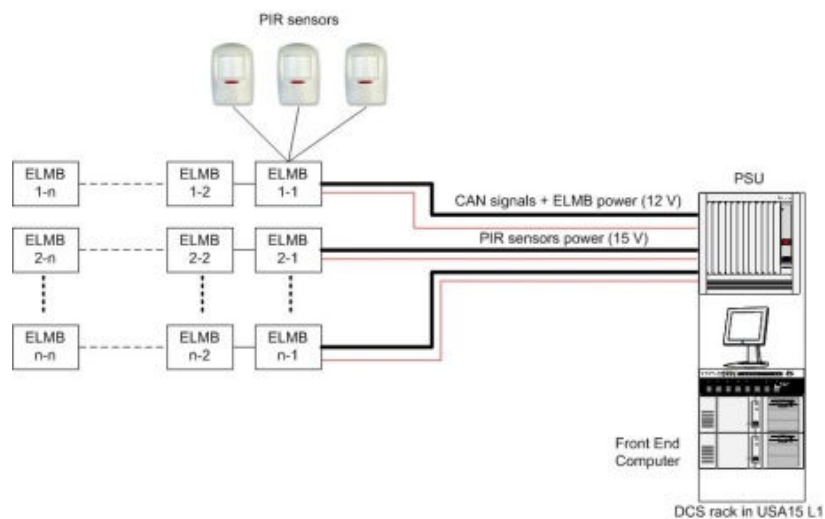


Figure II-7 : Chaîne d'acquisition de données de FPIAA

## 2.2. Premiers tests dans le détecteur ATLAS

Le principe de fonctionnement de FPIAA a été testé et validé sur site [24] afin de confirmer la capacité de détection des capteurs dans le détecteur et afin de vérifier le bon fonctionnement du modèle d'acquisition de données. Pour cela des capteurs PIR et deux boîtiers d'acquisition ont été installés dans le secteur 13 du détecteur, comme indiqué sur la Figure II-8.

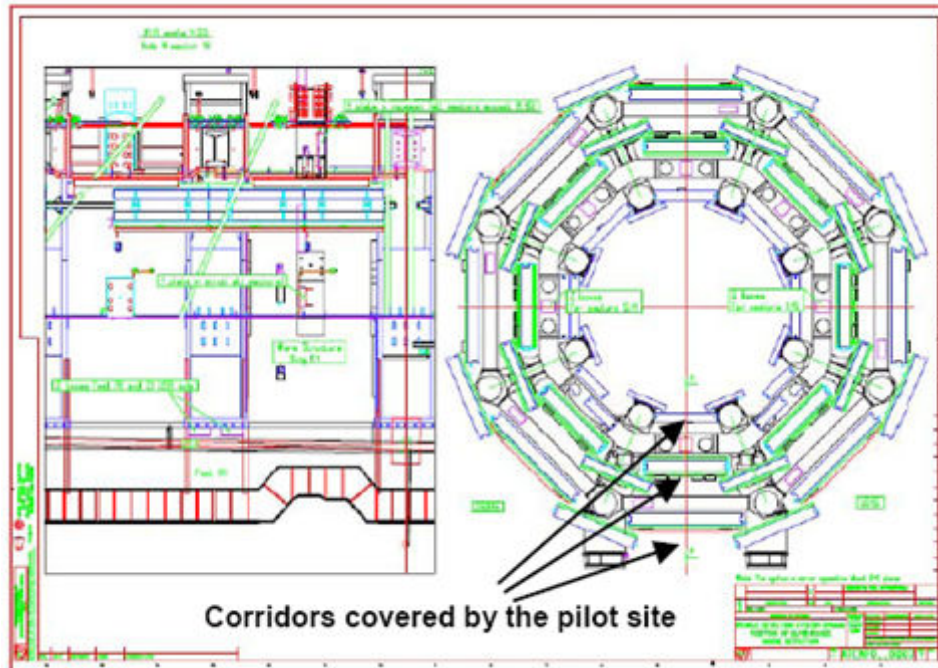


Figure II-8 : Zone de test de FPIAA dans le détecteur ATLAS

Huit capteurs ont été installés, répartis sur les niveaux 0 et 2 du secteur 13. Ils ont été connectés aux ELMB, utilisant chacun deux entrées digitales (une pour la détection de personnes et l'autre pour l'état d'alimentation du capteur). Les ELMB ont été paramétrés pour renvoyer à la LCS l'état de leurs entrées numériques à chaque changement d'état de l'une d'entre elles. Enfin un prototype d'application a été développé sous PVSS pour afficher en temps réel la détection des personnes sur une interface utilisateur en fonction de l'activation des entrées digitales des ELMB. La Figure II-9 montre cette interface où chaque cellule rectangulaire représente une zone couverte par un capteur PIR. Chaque zone change de couleur lorsqu'une personne y est détectée, ce qui permet de suivre une personne se déplaçant dans ce secteur en quasi-temps réel. Le temps de réponse d'un ELMB au changement d'état d'une de ses entrées digitales est en effet connu et reproductible (environ 100 millisecondes, mais une incertitude subsiste quant au temps de traitement de l'information par la LCS et du taux d'occupation du serveur OPC qui y est installé. La capacité de détection des capteurs a en outre été validée par ce test dans les zones confinées du détecteur.

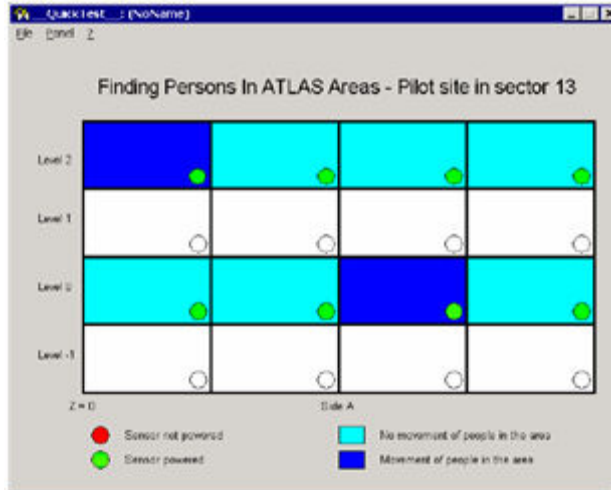


Figure II-9 : Interface utilisateur développée pour le test en conditions réelles de FPIAA

L'interface de test affiche également l'état d'alimentation des capteurs par un indicateur en bas à droite de chaque cellule, cependant cette fonctionnalité ne sera pas conservée. En effet, au moment de ce test, en 2006, une estimation du nombre de capteurs nécessaires pour couvrir toutes les zones accessibles de la caverne avait été faite sur plan et un nombre de 400 capteurs avait été établi. Il était cependant difficile d'évaluer la complexité des zones à couvrir car le détecteur était en cours de construction. Il s'est avéré ensuite que dans un grand nombre de cas, plusieurs angles de vues sont nécessaires à la couverture des zones, en particulier dans le détecteur. Cette multiplication du nombre de capteurs, 828 au total, a rendu nécessaire l'abandon de la deuxième entrée digitale assignée à chaque capteur pour l'évaluation de son état d'alimentation afin de ne pas devoir également multiplier le nombre de boîtiers d'acquisition de données. Une méthode de test des capteurs s'appuyant sur leur séquence d'initialisation a été développée pour remplacer la sortie d'état d'alimentation (voir paragraphe 5.2.3).

Après la validation de la chaîne de mesure de FPIAA par ce test, les 828 capteurs ont été installés dans la caverne d'ATLAS et ont été connectés aux 87 boîtiers d'acquisition de données disséminés dans la caverne. La structure logicielle de FPIAA a ensuite été implémentée.

### 3. Structure logicielle

#### 3.1. Discrétisation des zones couvertes par FPIAA

Le logiciel de traitement des données de FPIAA est basé sur une structure hiérarchiquement organisée de la caverne expérimentale d'ATLAS. La caverne est d'abord divisée en sept grandes zones définies de la façon suivante :

- Les structures internes du détecteur.
- Les arches couvrant le détecteur.

- Les structures couvrant les quatre murs de la caverne (4 zones distinctes : HO coté A, HO coté C, HS coté USA et HS coté US)
- Les deux grandes roues du détecteur à Muons situées de part et d’autre du détecteur.

Comme le montre la Figure II-10, une structure logique divise ces zones en sous-zones (secteurs du détecteur, étages des structures latérales...) qui sont elles-mêmes divisées en cellules. Les cellules représentent le niveau de granularité le plus fin du système et le ou les capteurs(s) qui leur sont attribué(s) y sont connectés de telle sorte que lorsque l’entrée digitale de l’ELMB correspondant change d’état, la cellule correspondante change également d’état. Le volume couvert par une cellule est très variable, allant de 1 m<sup>3</sup> à plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>.

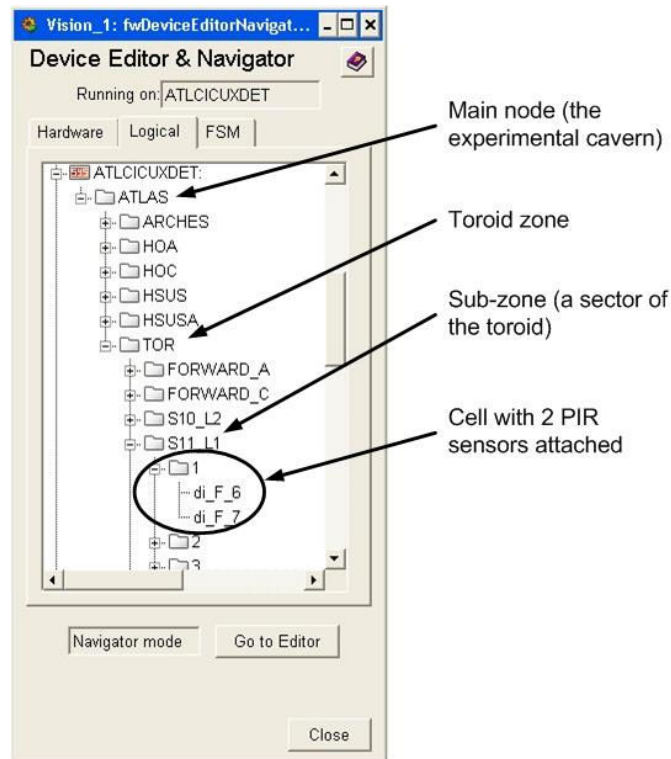


Figure II-10 : Représentation logicielle de la structure hiérarchique de FPIAA

Au total, les 828 capteurs ont été connectés à environ 500 cellules. Cette assignation des capteurs aux cellules dans PVSS est un point critique du système car elle a été faite manuellement. C’est pourquoi une campagne de tests méticuleuse a été conduite dans la caverne afin de vérifier d’une part le bon fonctionnement des capteurs et d’autre part l’assignation des capteurs à leurs cellules logicielles.

### 3.2. Architecture logicielle globale de FPIAA

Une classe d’objets a été définie dans PVSS pour représenter les cellules. Comme le montre la Figure II-11, chaque cellule est définie par un certain nombre d’attributs qui sont utilisés par les quatre processus actifs de FPIAA :

- Un algorithme de mise à jour des cellules en temps réel qui vérifie en continu l'état des capteurs et met à jour l'état des cellules.
- Un algorithme de suivi actif des personnes (cf. paragraphe 4. Suivi actif des personnes).
- Un processus permettant de « revoir » les mouvements des personnes dans la caverne en utilisant les données archivées.
- Un processus qui gère les configurations du système pour l'algorithme de suivi automatisé.

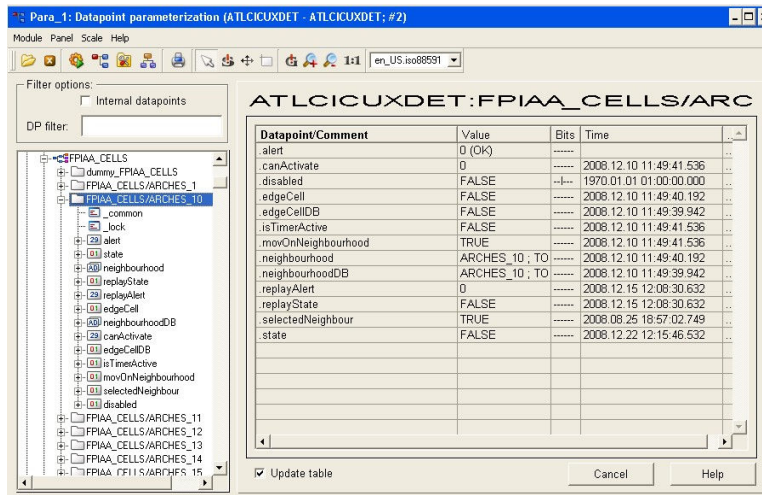


Figure II-11 : Définition de la classe d'objet "cellule" de FPIAA

La Figure II-12 montre l'architecture complète de FPIAA.

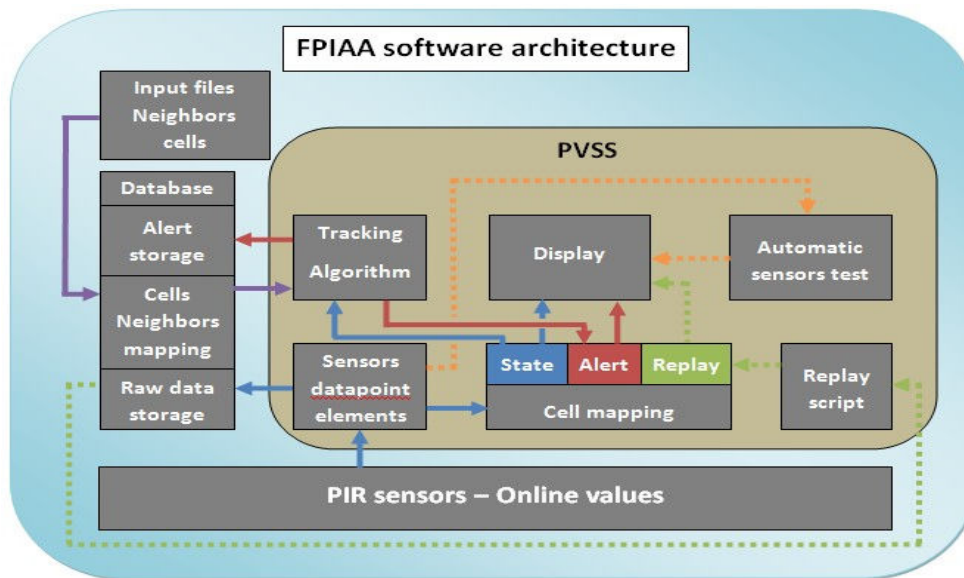


Figure II-12 : Architecture logicielle de FPIAA

Chaque capteur déclaré dans FPIAA a un objet associé qui est mis à jour à chaque changement d'état. Cette donnée brute est archivée et est traitée par un premier processus qui met à jour l'état de la cellule correspondante. Un algorithme de suivi des personnes prend en compte chaque nouveau mouvement

et le traite en fonction des mouvements précédemment traités et des informations provenant d'une base de données de configuration. Les informations relatives aux cellules (mouvement, alertes) sont mises à jour en continu sur les interfaces utilisateurs.

## 4. Suivi actif des personnes

### 4.1. Conception d'un algorithme de suivi automatisé des personnes

FPIAA est non seulement un outil de détection des personnes dans la caverne expérimentale d'ATLAS mais aussi un outil de suivi automatisé des personnes capable de générer des alertes dans la salle de contrôle si quelqu'un « disparaît » de la caverne. Les capteurs PIR utilisés sont en effet des capteurs de mouvement, ils détectent donc une personne uniquement si elle se déplace dans leurs champ de vision. Ce mode de fonctionnement, combiné à un algorithme de traitement des données, permet à FPIAA de déterminer une non-détection anormale d'une personne.

Afin de pouvoir détecter la disparition d'une personne à n'importe quel endroit de la caverne, FPIAA doit pouvoir être capable de suivre le personnel à partir du moment où la personne pénètre dans la caverne et jusqu'à sa sortie. Comme le montre la Figure II-13, chaque personne ou groupe de personnes (les capteurs ne peuvent pas discriminer le nombre de personnes détectées) entrant dans la caverne (ENTRY) génère un processus de suivi qui va traiter individuellement chaque cas, quel que soit le chemin emprunté ensuite dans la caverne. Chaque processus de suivi peut être stoppé pour deux raisons :

- La personne quitte la caverne (EXIT)
- La personne disparaît dans une cellule qui n'est pas considérée comme une cellule d'entrée et une alerte est générée dans la salle de contrôle d'ATLAS (ALERT).

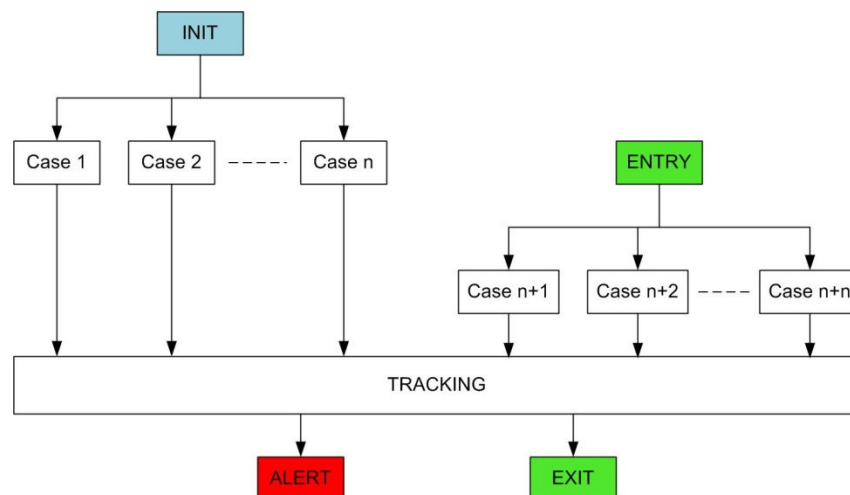


Figure II-13 : Génération de processus de suivi des personnes par FPIAA

La séquence d'initialisation (INIT) du système est une phase critique car des personnes peuvent déjà se trouver dans la caverne lorsque l'algorithme est démarré, et les processus de suivi des personnes ne peuvent être activés que lorsqu'une personne est détectée dans une cellule déclarée comme point

d'entrée du système. Afin de pouvoir gérer cette condition initiale, l'algorithme de suivi des personnes active un mode d'initialisation pendant les trois minutes qui suivent son démarrage pendant lesquelles toutes les cellules sont considérées comme cellules d'entrée (Figure II-14). Chaque nouveau mouvement détecté génère alors un processus.

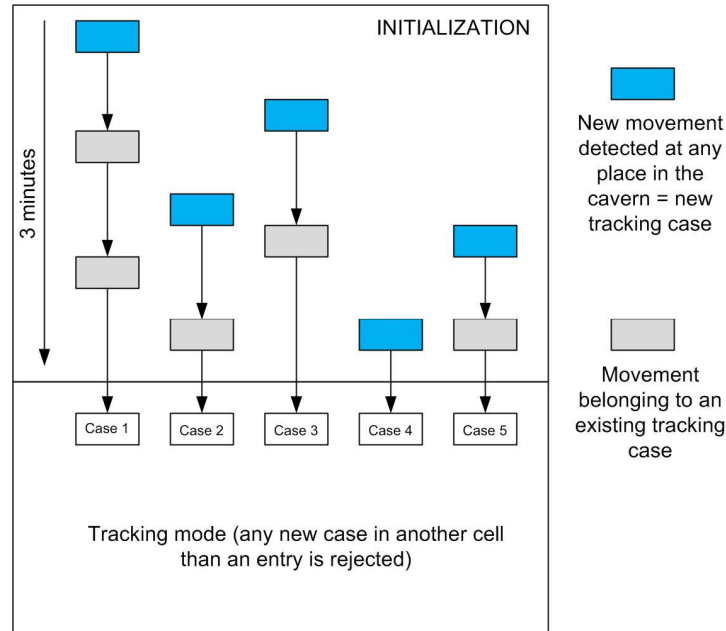


Figure II-14 : Séquence d'initialisation de FPIAA

Chaque processus de suivi actif, généré pendant la séquence d'initialisation ou à chaque entrée d'une personne dans la caverne, se présente sous la forme d'une boucle de contrôle présentée sur la Figure II-15.

Si le point de départ n'est pas une cellule d'entrée, le processus considère que la détection n'est pas relative à la présence d'une personne (ERROR), le mouvement est ignoré. Ce mécanisme a été implémenté pour éviter les fausses alertes qui pourraient être produites suite à l'activation inopinée d'un capteur par une personne située dans une cellule éloignée de celui-ci.

Si le point de départ est une cellule d'entrée du système, un processus est activé sur cette cellule (ACTIVE). Dès que la personne n'est plus détectée dans la cellule, l'algorithme charge la liste de ses voisins possibles et attend un nouveau mouvement dans l'une de celles-ci (WAIT). Si la personne est détectée dans la même cellule ou dans une cellule voisine, l'algorithme considère que la personne s'est déplacée (MOVE) et il repositionne le cas sur la nouvelle cellule active (ACTIVE). Cette boucle est répétée jusqu'à ce que la personne soit de nouveau détectée dans une cellule d'entrée, et soit considérée comme sortie de la zone contrôlée.

Si aucun mouvement n'est détecté après un premier délai de trois minutes (Timeout 1), un premier niveau d'alerte est généré et transmis dans la salle de contrôle d'ATLAS (WARNING). Finalement, si la personne n'est pas de nouveau détectée dans la cellule active ou une cellule voisine (MOVE) avant un deuxième délai de deux minutes (Timeout 2), un deuxième niveau d'alerte est généré dans la salle de

contrôle (FATAL) et le processus s'arrête. Dans ce cas, l'opérateur en charge de la sécurité doit comprendre la source de cette alerte et éventuellement agir.

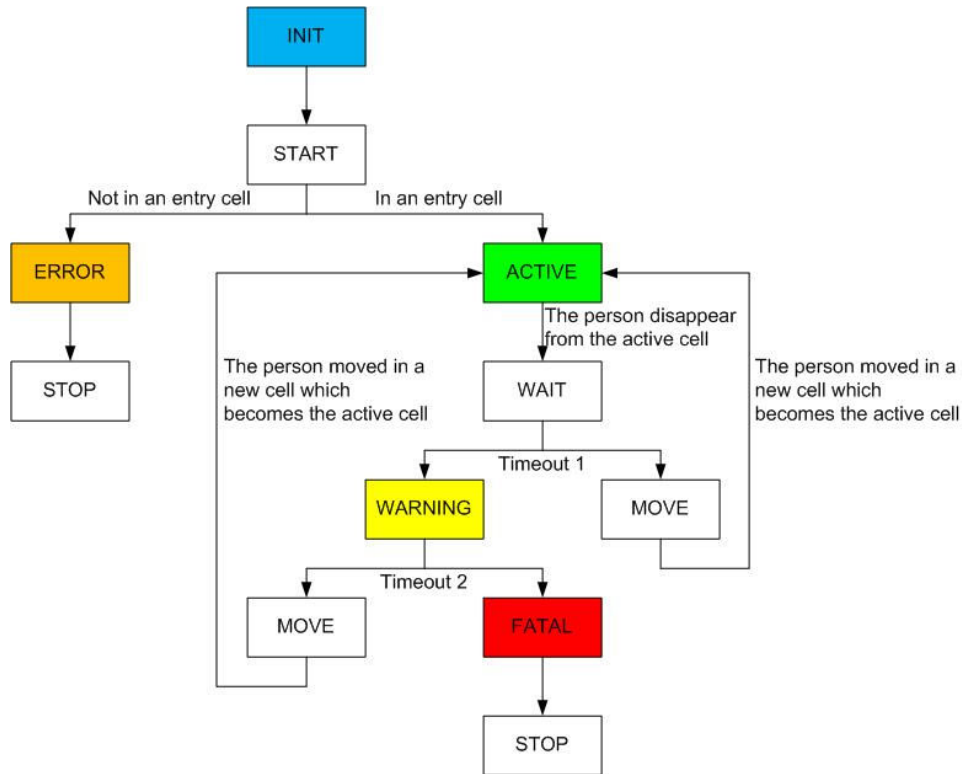


Figure II-15 : Diagramme du processus de suivi des personnes

Une subtilité a été ajoutée au modèle présenté ci-dessus pour gérer les cas où plusieurs processus interagissent entre eux. En effet, lorsque deux personnes / groupes de personnes se déplacent dans la caverne, leurs chemins peuvent se croiser. Or étant donné que les capteurs ne peuvent pas discriminer le nombre de personnes qui se trouvent dans leur zone de détection, alors les deux processus correspondants deviennent un seul et deux issues sont possibles : les personnes présentes dans la cellule se déplacent ensemble et un seul cas doit être considéré ou leurs chemins se séparent et plusieurs cas doivent être considérés. Afin de gérer cette situation, un processus auxiliaire (Figure II-16) est conservé sur chaque cellule qui vient d'être quittée par une personne (lorsque la personne s'est déplacée sur une cellule voisine). L'algorithme conserve une boucle de contrôle sur la cellule qui attend pendant trois minutes un éventuel nouveau mouvement. Dans le cas où une personne serait toujours présente dans la cellule, lorsque cette personne bouge de nouveau, l'algorithme déclenche un nouveau processus. Mais si aucun mouvement n'est détecté dans la cellule après trois minutes, le processus auxiliaire est stoppé et la cellule est considérée comme définitivement vide.



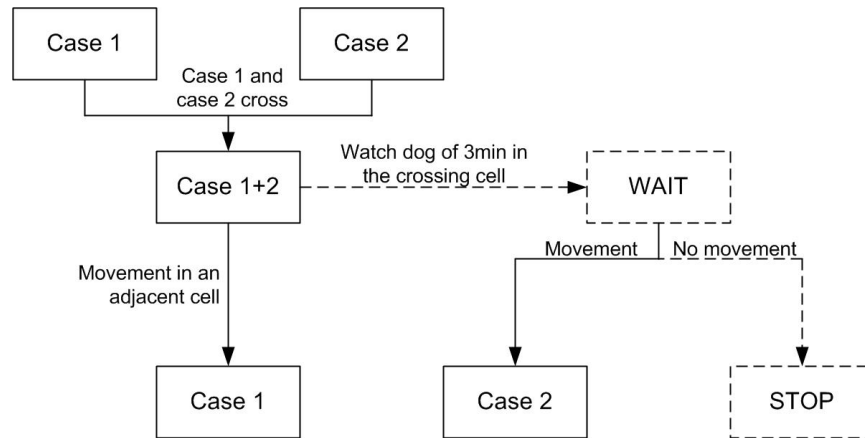


Figure II-16 : Comportement de l'algorithme pour le croisement de deux personnes

Le diagramme fonctionnel détaillé de l'algorithme de suivi des personnes est en Annexe 2.

## 4.2. Configurations de l'algorithme

L'algorithme de suivi des personnes utilise une grande quantité de données de configuration qui doivent être enregistrées et gérées centralement pour faciliter la maintenance du système. L'algorithme est en effet capable de suivre un trajet cohérent d'une personne dans la caverne grâce à une liste des voisins possibles de chaque cellule déclarée. Cependant la topologie de la caverne, et en particulier celle du détecteur n'est pas fixe, ce dernier peut en effet être ouvert pendant la période de maintenance. Les grandes roues et les petites roues du détecteur à muons ainsi que les End-Cap de l'aimant toroïdal et les éléments externes du calorimètre sont alors glissés vers l'extérieur, laissant des espaces libres où sont installés des échafaudages temporaires.

Afin de pouvoir détecter la présence de personnel dans les zones du détecteur ouvertes temporairement, des capteurs PIR ont été installés et ne sont utilisés qu'en configuration ouverte. Cela implique la déclaration de nouvelles cellules et donc la modification de la liste de voisins possibles des cellules environnantes. Pour faciliter la configuration de l'algorithme pour un scénario ouvert ou fermé, des tables de configurations prédéfinies ont été implémentées dans la base de données de configuration d'ATLAS. Elles permettent de charger les paramètres de chaque cellule, explicitement la liste de ses voisins et un booléen indiquant si la cellule est une entrée de la zone couverte ou pas, en fonction de la topologie de la caverne expérimentale.

## 4.3. Tests en situation réelle et résultats

Dans un premier temps il a été décidé de valider et de faire fonctionner le suivi actif des personnes uniquement à l'intérieur du détecteur car le confinement de cette zone en fait l'endroit le plus critique de la caverne pour la sécurité des personnes. L'algorithme a donc été paramétré de façon à ce que les entrées déclarées dans le système soient les points d'accès au détecteur et les personnes se trouvant sur les structures adjacentes sont ignorées, bien que leurs mouvements soient tout de même visualisés.

L'algorithme a été testé en deux étapes :

- D'abord une série de tests basés sur des mouvements de personnes contrôlés pendant lesquels le comportement de l'algorithme a été mis à l'épreuve afin de le débayer et d'obtenir les réactions voulues,
- ensuite une série de tests en situation réelle (en « utilisant » les personnes se déplaçant dans la caverne pour les interventions de maintenance) pour :
  - Identifier les comportements qui n'ont pas été prévus,
  - déceler les problèmes hardware tels que capteurs mal orientés ou défectueux pouvant générer de fausses alertes.

La Figure II-17 montre les résultats d'analyse des derniers tests de l'algorithme de suivi actif des personnes effectués dans le détecteur ATLAS. Ces tests ont été effectués en condition normale de maintenance du détecteur avec en moyenne une dizaine de personnes évoluant à l'intérieur. Lors du test du 11/06/09 d'une durée de trois heures, six alertes de premier niveau (1, WARNING) ont été déclenchées. L'une d'entre elles (cellule TOR\_S13\_L1\_1b) n'a pas donné lieu à une alerte de second niveau (3, FATAL) car la personne qui n'avait pas bougé pendant plus de trois minutes (timeout 1, se référer à la Figure II-15) s'est de nouveau déplacée avant le déclenchement de la seconde alerte (timeout 2). Les cinq autres alertes de niveau 1 ont donné lieu à des alertes de niveau 2. Les archives ont été utilisées pour comprendre le scénario qui a conduit à ses alertes. Ainsi trois alertes étaient dues à des erreurs de définition de cellules voisines (TOR\_S13\_L1\_6b, TOR\_S7\_L1\_2, TOR\_S3\_L1\_6), une alerte était due à un capteur mal orienté (TOR\_S1\_L1\_8a) et la dernière alerte (TOR\_S13\_L1\_1) a été déclenchée par une personne qui n'a pas bougé suffisamment pour être détectée pendant plus de cinq minutes. Cette alerte montre les limites du système lorsque les personnes se trouvent dans une zone très exiguë où peu de mouvements sont possibles. Lors du test effectué le 12/06/09 d'une durée de quatre heures, une seule alerte a été générée (TOR\_S5\_L2\_6). L'analyse des données a montré que la personne s'est déplacée de cette cellule vers une cellule adjacente (TOR\_S5\_L2\_7) par un passage non autorisé car dangereux. Ces deux cellules n'étant pas considérées comme voisines, l'algorithme a considéré la personne comme perdue dans la cellule TOR\_S5\_L2\_6, et a généré un nouveau cas de suivi dans la cellule TOR\_S5\_L2\_7. Cette fonctionnalité qui n'avait pas été envisagée au départ est utilisée pour identifier les comportements à risque dans la caverne et éventuellement modifier les structures d'accès pour améliorer la sécurité des personnes.

FPIAA - Test of the tracking algorithm - 11/06/09 - Duration : 3 hours

| Time                    | Cell          | Alert | Comments   |
|-------------------------|---------------|-------|--|
| 2009.06.11 13:43:10.223 | TOR_S13_L1_1  | 1     | A person did not move / has not been detected during more than 5 minutes -   |
| 2009.06.11 13:45:11.161 | TOR_S13_L1_1  | 3     | <b>UNAVOIDABLE</b>   |
| 2009.06.11 14:00:23.317 | TOR_S1_L1_8a  | 1     | A lot of unexpected movement on this cell just before, until a track generation -> sensor triggered from cell TOR_S1_L2_8 (not a neighbor) - <b>UNDERSTOOD</b> |
| 2009.06.11 14:04:08.316 | TOR_S13_L1_6b | 1     | Somebody in cell S13_L1_7 is seen by this sensor -> Neighborhood must be enlarge -   |
| 2009.06.11 14:06:09.160 | TOR_S13_L1_6b | 3     | <b>SOLVED</b>  |
| 2009.06.11 14:29:41.004 | TOR_S13_L1_1b | 1     | The person moved again before the FATAL alert... <b>OK</b>   |
| 2009.06.11 14:30:05.333 | TOR_S13_L1_1b | 0     |  |
| 2009.06.11 15:03:34.036 | TOR_S7_L1_2   | 1     | The person went to S7_L2_1 and he was detected last in S7_L1 in cell 2 instead of cell 1 -   |
| 2009.06.11 15:05:34.114 | TOR_S7_L1_2   | 3     | > neighbouring reviewed - <b>SOLVED</b>  |
| 2009.06.11 15:28:09.301 | TOR_S3_L1_6   | 1     | Exactly the same scenario than for the case above -> same actions taken - <b>SOLVED</b>  |
| 2009.06.11 15:30:09.333 | TOR_S3_L1_6   | 3     |  |

FPIAA - Test of the tracking algorithm - 12/06/09 - Duration : 4 hours

| Time                    | Cell                    | Alert | Comments   |
|-------------------------|-------------------------|-------|--|
| 2009.06.12 10:33:57.267 | FPIAA_CELLS/TOR_S5_L2_6 | 1     | A person went from this cell to cell S5_L2_7 -> this path is not allowed (and dangerous) |
| 2009.06.12 10:35:57.283 | FPIAA_CELLS/TOR_S5_L2_6 | 3     |  |

Figure II-17 : Résultats d'analyse des alertes générées par l'algorithme de suivi actif des personnes

Les derniers tests prouvent la stabilité de l'algorithme de suivi des personnes. Il entre maintenant en phase pré-opérationnelle pendant laquelle il va être utilisé pendant les périodes d'activité dans le détecteur et les alertes qui seront générées pendant ces périodes seront analysées pour faire les derniers ajustements de représentation de la topologie du détecteur.

## 5. Interfaces utilisateurs

FPIAA est un des outils mis à disposition de l'opérateur en charge de la sécurité d'ATLAS. Une interface utilisateur claire et intuitive doit donc être implémentée afin de permettre une navigation dans la caverne pour suivre le personnel. Des interfaces utilisateurs sont également nécessaires aux experts travaillant sur le projet pour faciliter la configuration et déboguer le logiciel. La Figure II-18 montre deux des 112 panneaux qui ont été créés afin de visualiser les 500 cellules implémentées dans la caverne dans tous les secteurs du détecteur et tous les niveaux des structures adjacentes. Une cellule bleue indique la présence d'une personne.

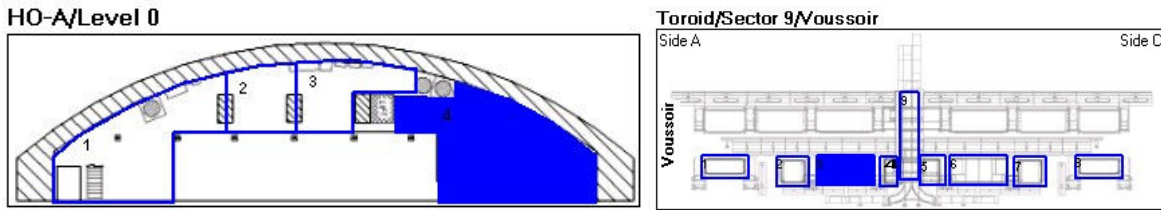


Figure II-18 : Exemple de panneaux de visualisation de FPIAA. Haut: Structure HO coté A niveau 0. Bas: Détecteur secteur 9 partie interne

Ces panneaux individuels sont utilisés par plusieurs interfaces utilisateurs dans la salle de contrôle et accessibles par connexion à distance depuis n'importe quel ordinateur, sous réserve que la personne se connectant ait les droits d'accès appropriés à la visualisation de FPIAA.

### 5.1. Interface pour le monitoring online

Deux interfaces sont à la disposition des opérateurs en charge de la sécurité d'ATLAS. La première est une interface qui permet uniquement la visualisation des mouvements dans la caverne et des alertes générées par l'algorithme de suivi des personnes. Comme le montre la Figure II-19, l'interface se décompose en trois blocs principaux qui affichent, de gauche à droite, la vue générale de la caverne, la zone sélectionnée, et la sous-zone sélectionnée. Cette interface indique également l'état des ELMB impliqués dans l'acquisition de données des capteurs de la zone affichée.

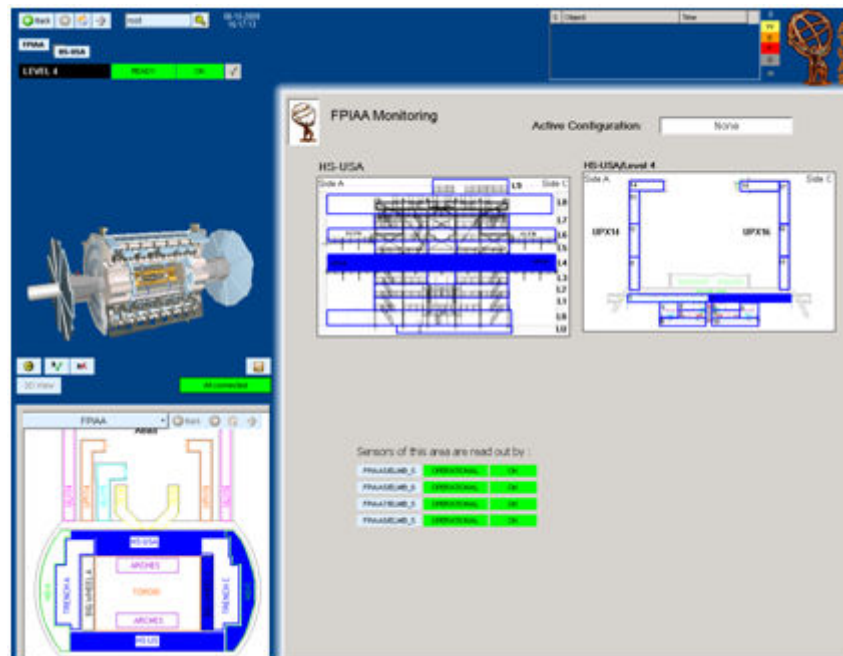


Figure II-19 : Interface de visualisation de FPIAA

La seconde interface utilisateur de FPIAA est intégrée dans le modèle à état fini d'ATLAS (FSM). Comme le montre la Figure II-20, FPIAA fait partie de l'arborescence FSM dédiée à la sécurité d'ATLAS (SAFETY). Sa structure FSM a deux types de domaines : les domaines relatifs au suivi des personnes (un domaine par zone) et les domaines relatifs aux services.

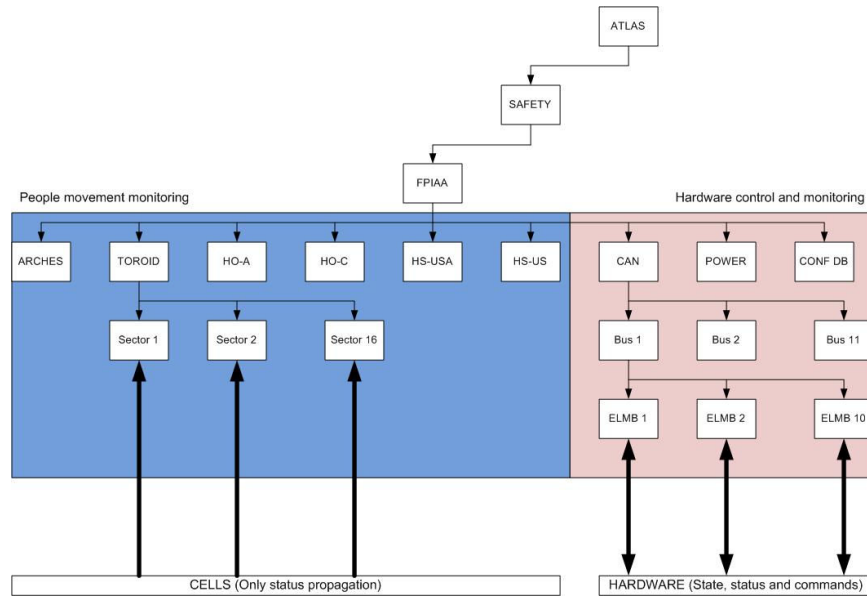


Figure II-20 : Structure FSM de FPIAA

Les domaines relatifs au suivi des personnes sont scindés en DU (un DU par sous-zone) qui représentent le statut des cellules qu'ils contiennent. Les alertes qui peuvent être générées par les cellules sont propagées dans l'arborescence vers le nœud principal de FPIAA. La Figure II-21 montre un exemple de panneau FSM de FPIAA où une alerte générée dans une cellule est propagée dans l'arborescence.

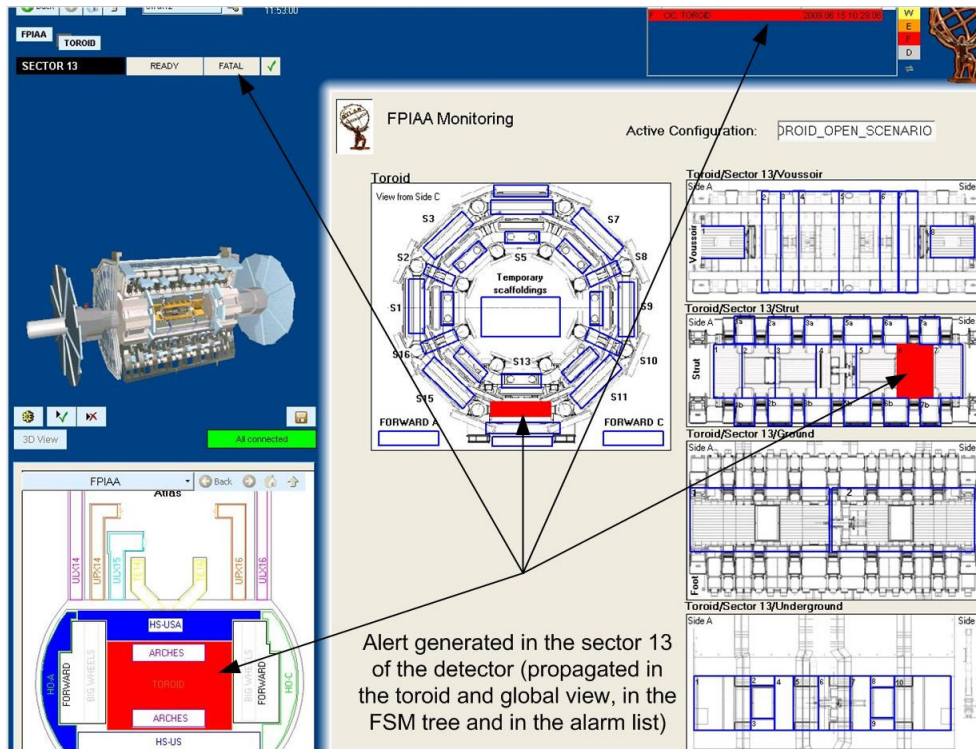


Figure II-21 : Exemple de panneau FSM pour la visualisation des personnes (Décteur, secteur 7)

Les services de FPIAA sont également représentés dans la structure FSM. Cette partie de l'arborescence permet de charger de nouvelles configurations dans l'algorithme de suivi des personnes, de contrôler et de monitorer les ELMB, leur alimentation, les alimentations des capteurs PIR ainsi que de monitorer les paramètres opérationnels des boîtiers d'acquisition de données. La Figure II-22 montre un panneau FSM qui permet la gestion de l'électronique FE. La partie gauche de la fenêtre permet de contrôler les alimentations 15 V des capteurs et la partie de droite permet de monitorer les tensions d'alimentation et les températures dans les boîtiers.

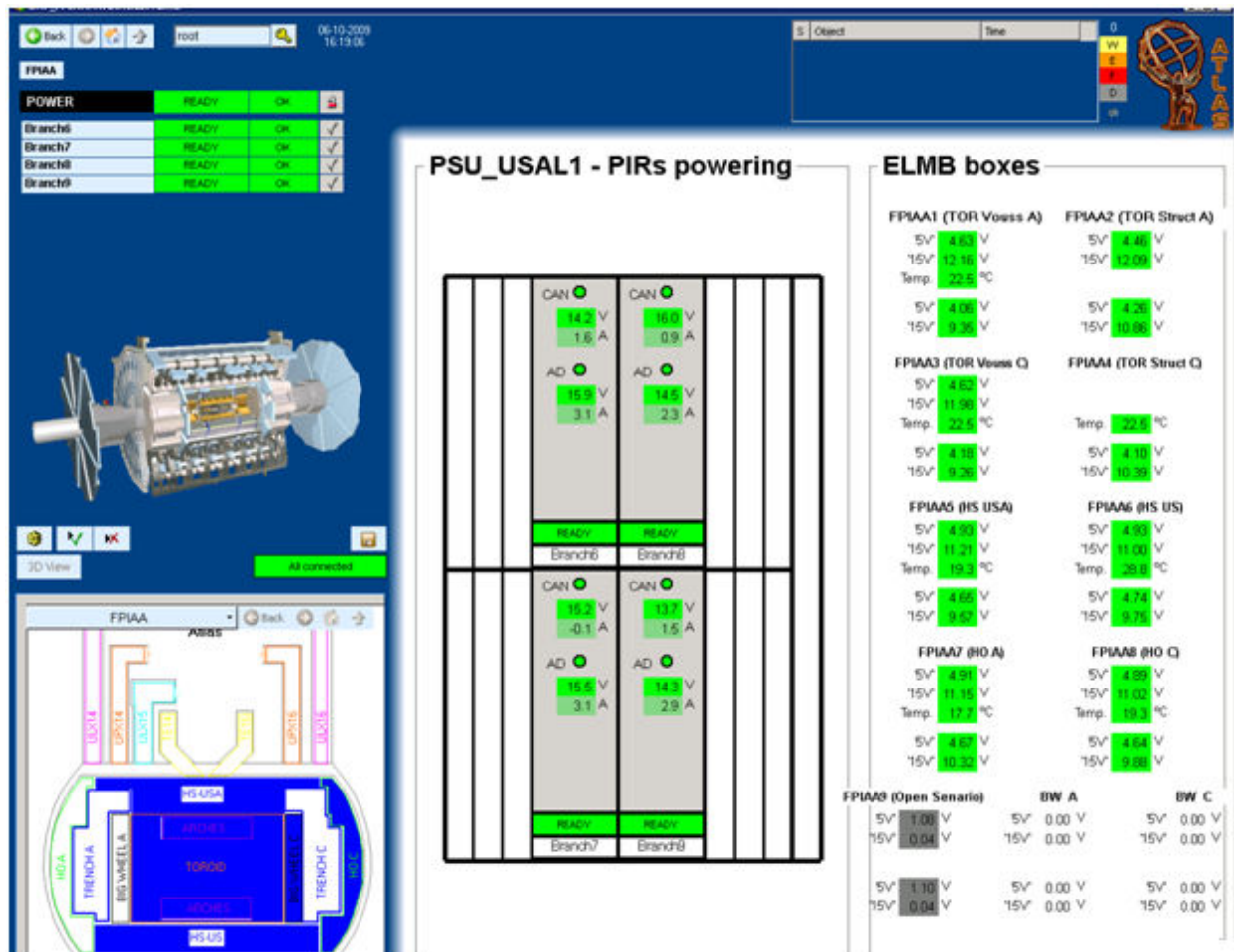


Figure II-22 : Panneau FSM pour le contrôle des alimentations des capteurs PIR et le monitoring des boîtiers d'acquisition

L'état et le statut de l'électronique FE est également propagé vers le nœud principal de FPIAA et cette partie de l'arborescence permet d'envoyer trois types de commandes vers les DU :

- arrêt / marche des alimentations
- commandes simples aux ELMB (Start, stop, reset)
- chargement d'une nouvelle configuration dans l'algorithme de suivi des personnes

## 5.2. Outils d'aide au développement

Une série d'interfaces utilisateurs a également été développée pour faciliter le paramétrage de FPIAA et la compréhension des alertes qui peuvent être générées. La Figure II-23 montre le panneau qui donne accès aux outils de visualisation offline (cf. paragraphe 5.2.1), de configuration (cf. paragraphe 5.2.2) et de test automatisé des capteurs (cf. paragraphe 5.2.3). Il permet également d'appliquer à l'algorithme de suivi des personnes de nouvelles configurations de cellules en fonction des changements de topologie de la caverne (« Open Scenario », « Closed Scenario ») et de régler les valeurs des délais appliqués par l'algorithme avant de déclencher successivement les deux niveaux d'alerte (WARNING et FATAL).

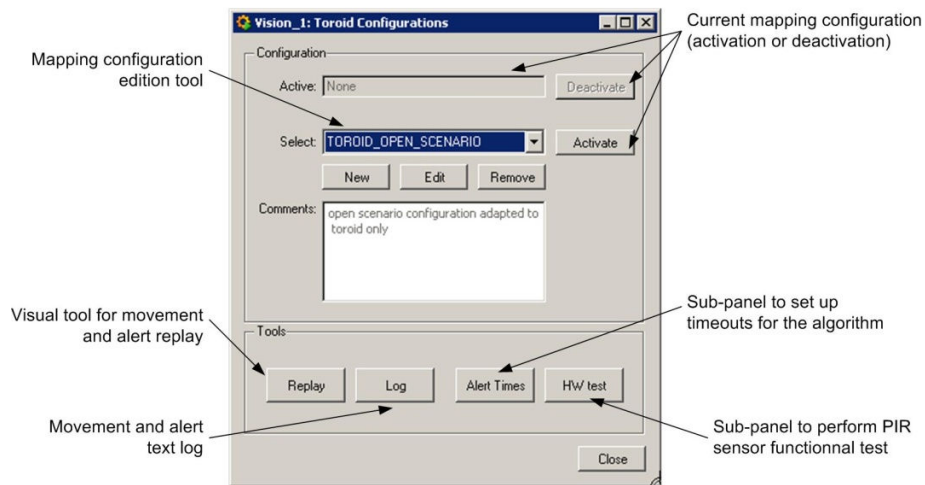


Figure II-23 : Panneau d'accès aux outils de configuration et aux bases de données

### 5.2.1. Outils d'analyse offline

Les mouvements du personnel détectés par FPIAA et les alertes qui peuvent être générées sont enregistrés dans une base de données Oracle. Deux outils ont été développés pour accéder à ces données :

- Un outil de récupération des événements sous forme de fichier texte pour permettre à l'utilisateur de faire une analyse à l'aide d'un tableur de type Excel (Figure II-24). La récupération des données se fait en trois étapes. L'utilisateur spécifie d'abord une période de temps, le logiciel se synchronise ensuite avec la base de donnée pour récupérer l'historique des mouvements détectés par FPIAA et des alertes générées, et les données sont enregistrées dans un fichier texte.

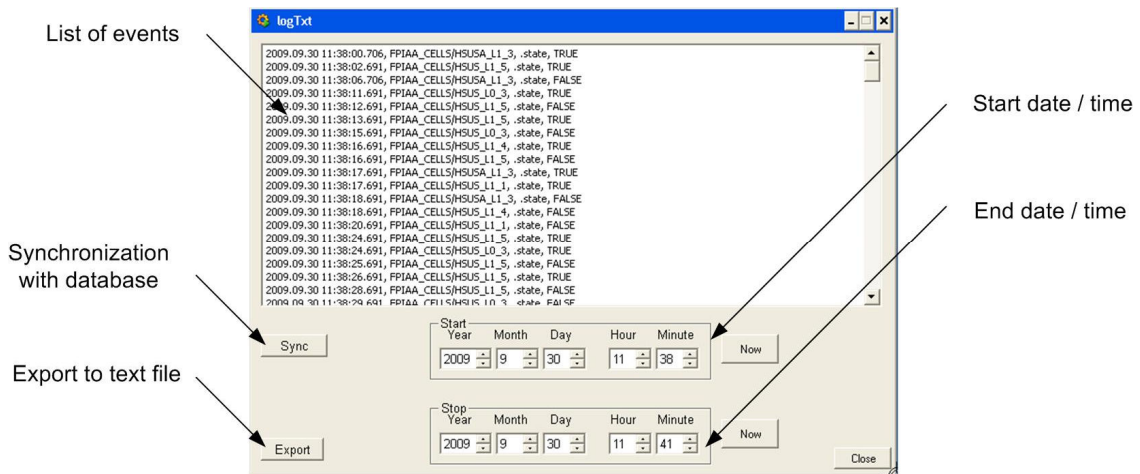


Figure II-24 : Outil de récupération des données archivées par FPIAA sous forme de fichier texte

- L'analyse des données sous forme de texte devenant très vite ingérable (plusieurs milliers d'événements enregistrés par heure en période d'activité de maintenance), un outil a été développé pour « revoir » les mouvements des personnes et les alertes sur une interface semblable à celle utilisée pour le monitoring online (Figure II-25). L'utilisateur spécifie la date et l'heure de départ à partir desquelles le logiciel commence à récupérer les événements de la base de données. Chaque événement est corrélé à sa date d'enregistrement pour l'affichage des activations de cellules à vitesse réelle ou accélérée. Le logiciel « rejoue » l'activation des cellules dans la caverne en utilisant des éléments de la classe « cellule » (Figure II-11) différents (replayAlert et replayState) de ceux utilisés par le monitoring online (alert, state) afin de ne pas perturber ce dernier pendant le visionnage d'événements depuis la base de données.

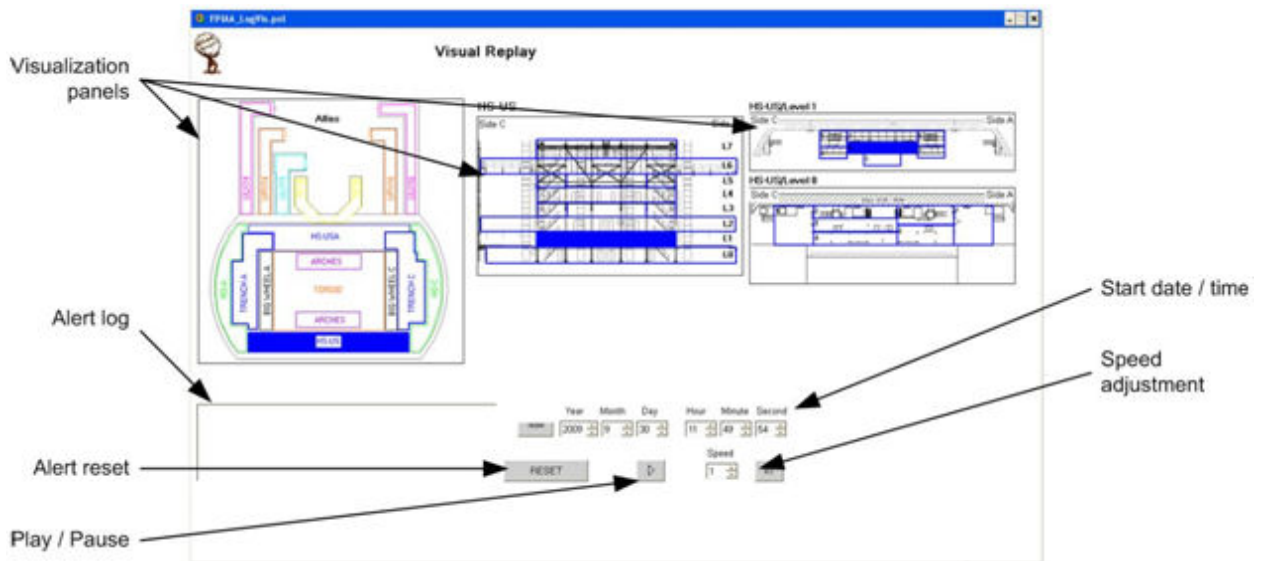


Figure II-25 : Panneau de visualisation des données archivées par FPIAA



### 5.2.2. Outil de configuration

Les tables de configurations prédéfinies qui sont appliquées aux 828 cellules pour définir leur voisinage et pour définir les cellules d'entrées de la zone couverte par FPIAA en fonction de la topologie de la caverne peuvent évoluer au cours du temps en fonction des modifications qui seront apportées au détecteur et à ses services pendant son exploitation. Des interventions ponctuelles dans la caverne peuvent également modifier sa topologie. Afin de pouvoir modifier ces fichiers de configurations, une interface intuitive a été développée. Comme le montre la Figure II-26, les panneaux de l'interface de visualisation sont utilisés pour naviguer dans la caverne et sélectionner une cellule à configurer. Elle apparaît alors en bleu et un clic droit avec la souris la définit comme cellule d'entrée (elle apparaît alors en jaune). Lorsque la cellule cible est sélectionnée, il suffit de sélectionner ses voisins qui apparaissent alors en vert. Un second clic sur la cellule cible valide les modifications qui sont enregistrées localement dans l'élément « neighbourhoodDB » de la cellule (Figure II-11). L'opération est répétée sur chaque cellule qui doit être (re)configurée puis les nouvelles configurations de chaque cellule sont enregistrées sur la base de données, mettant à jour le fichier de configuration sélectionné, ou créant un nouveau fichier de configuration.

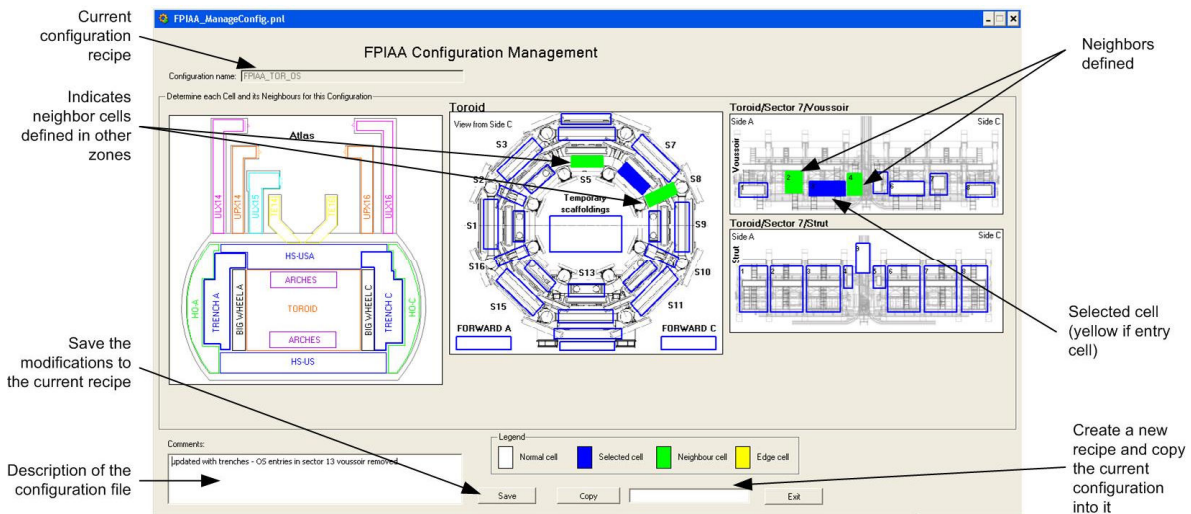


Figure II-26 : Panneau de configuration des cellules

### 5.2.3. Outil de test automatisé des capteurs

La lecture locale de l'état d'alimentation de chaque capteur PIR par les ELMB ayant été abandonnée (voir paragraphe 2.2), une méthode alternative permettant de tester les capteurs a été envisagée. Il est en effet nécessaire de pouvoir prouver que chaque capteur PIR impliqué dans le système FPIAA est en état de fonctionnement afin de garantir que chaque personne présente dans la zone expérimentale pourra être détectée. De plus, le dysfonctionnement d'un capteur ne laisse aucun signe visible lors de l'exploitation de FPIAA car il se comporte de la même manière que lorsque personne n'est dans sa zone de détection, c'est-à-dire en laissant l'entrée digitale de l'ELMB correspondante à 0. Enfin, il n'est pas envisageable de procéder à des vérifications régulières sur site des 828 capteurs installés dans la caverne.

La méthode de test s'appuie sur la séquence d'initialisation des capteurs lors de leur mise sous tension. En effet, comme le montre la Figure II-27, l'électronique des capteurs effectue une séquence fixe d'environ 30 secondes à la mise sous tension pendant laquelle la séquence 101 est émise sur la sortie digitale du capteur. A la suite de cette séquence, le capteur est opérationnel et transmet sur cette même sortie l'information de détection de mouvements.

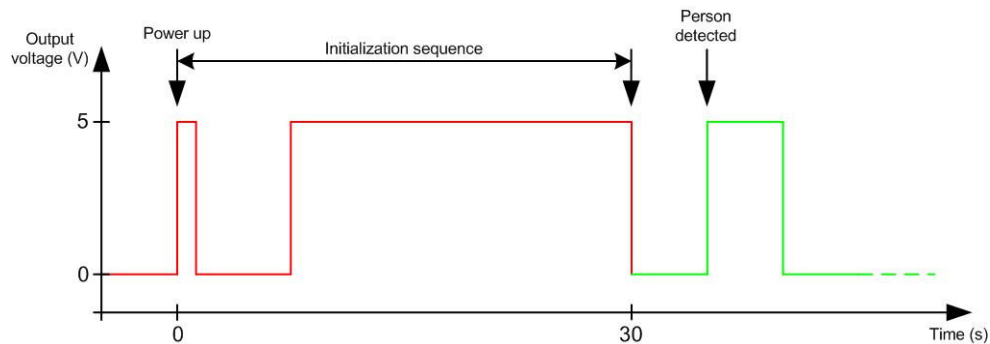


Figure II-27 : Séquence de démarrage d'un capteur PIR après mise sous tension

Cette caractéristique des capteurs peut être exploitée pour effectuer un test opérationnel en vérifiant le comportement des capteurs lors de leur mise sous tension. Un processus décrit en Figure II-28 a été implémenté sous PVSS pour effectuer une séquence automatisée qui permet de vérifier l'état de l'ensemble des capteurs PIR utilisés par FPIAA. A l'initialisation du processus, la liste des entrées digitales utilisées dans FPIAA est récupérée dans l'arborescence de définition des cellules pour être stockée localement dans une table dynamique. Cette méthode minimise la maintenance de cet outil puisque tout capteur ajouté ou retiré d'une cellule active de FPIAA sera respectivement pris en compte ou ignoré par le processus de test. De cette façon, toute entrée digitale d'un ELMB utilisée dans FPIAA sera considérée dans le test. Le processus arrête ensuite les modules d'alimentation de la PSU dédiés aux capteurs PIR en agissant sur l'ELMB qui contrôle les relais de la PSU concernée (voir chapitre 1, paragraphe 2.2). Un script est ensuite exécuté pour chaque capteur / entrée digitale trouvé dans le système qui réagit sur chaque changement d'état du capteur. Après avoir redémarré les alimentations des capteurs, le processus maintient l'acquisition de données des sous-fonctions pendant 45 secondes. Pendant cette période, les changements d'état de chaque capteur sont enregistrés dans la table dynamique créée à l'initialisation du processus. Cette table est ensuite scannée pour vérifier l'activité de chaque capteur lors de la mise sous tension. Si les trois premiers bits enregistrés sont 101, alors le capteur est considéré comme opérationnel.

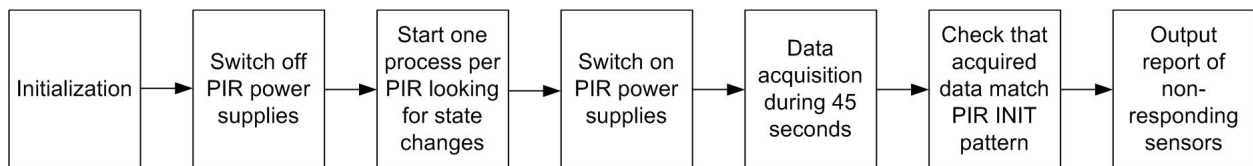


Figure II-28 : Diagramme du processus de test de fonctionnel automatisé des capteurs PIR

Une interface utilisateur présentée en Figure II-29 a été développée pour permettre à un opérateur de lancer la procédure de test automatisé des capteurs PIR. Un champ de texte informe l'utilisateur de

l'avancement de la séquence et indique le nombre de capteurs trouvés sur le système ainsi que le nombre de capteurs défectueux à l'issue de la séquence de test (« process log »). 780 capteurs étaient identifiés sur le système lors du test illustré dans la Figure II-29 car les capteurs PIR situés sur les grandes roues du sous-détecteur Muon et dans les tranchées latérales du détecteur n'étaient pas encore intégrés au système au moment du test (48 capteurs, pour obtenir les 828 capteurs installés au total). Lorsque la procédure de test est terminée, la liste des capteurs défectueux associée à leur emplacement dans la caverne est affichée sur l'interface (« List of dead sensors ») et est écrite dans un fichier texte généré automatiquement.

Cette procédure de test automatisée a été testée avec succès et elle a permis d'identifier 6 capteurs défectueux qui ont été remplacés. Cette méthode est en outre plus complète qu'une simple lecture de l'état d'alimentation du capteur car elle permet de s'assurer que toute la chaîne d'acquisition de données est opérationnelle, y compris les entrées digitales des ELMB.

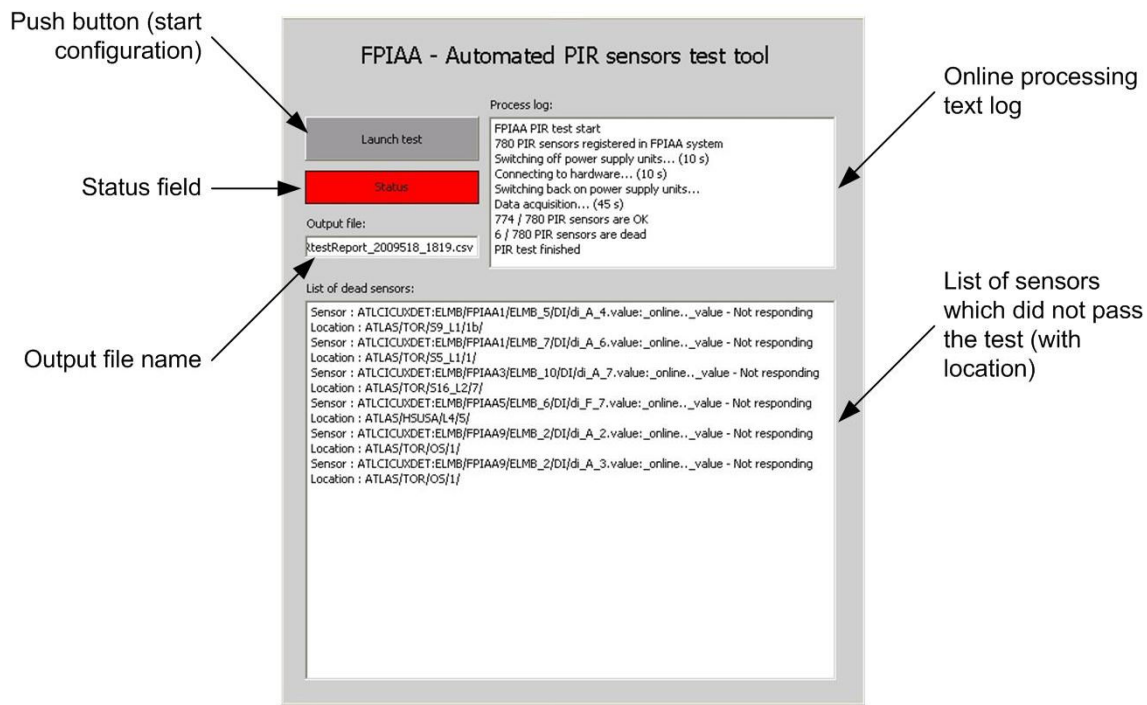


Figure II-29 : Interface utilisateur pour le test automatisé des capteurs PIR

## 6. Conclusion

Le projet FPIAA est aujourd'hui fonctionnel et est utilisé par l'opérateur en charge de la sécurité dans la salle de contrôle d'ATLAS. L'interface logicielle est stable et fournit tous les outils nécessaires à l'exploitation et à la maintenance du système. L'installation de l'électronique FE est terminée et réceptionnée. FPIAA a atteint son premier objectif qui est de fournir une interface de visualisation des personnes dans la caverne d'ATLAS à l'opérateur en charge de la sécurité du détecteur. Le deuxième objectif qui est de mettre en activité le système de suivi automatisé des personnes dans le détecteur a

également été validé, l'algorithme fonctionnant de façon stable et sans génération de fausse alerte. Des interventions de maintenance seront nécessaires, notamment pour effectuer les réparations nécessaires sur les capteurs endommagés, pour contrôler de façon périodique que toutes les zones accessibles de la caverne sont effectivement couvertes, et éventuellement pour mettre à jour le système si des modifications majeures de la topologie de la caverne sont faites dans le futur.

FPIAA a été développé pour l'expérience ATLAS mais le choix de composants industriels standard et la flexibilité de son logiciel ont été pensés pour rendre ce système de sécurité exportable vers d'autres environnements. Des systèmes de suivi des personnes basés sur FPIAA pourraient facilement être implémentés dans des milieux industriels à risque (industrie nucléaire, stations off-shore...) pour lesquels, moyennant l'installation d'une électronique de détection, la structure logicielle pourrait être utilisée avec pour toute modification une reconfiguration de la topologie en fonction du nouvel environnement et l'édition de panneaux de visualisation adaptés.

Le projet FPIAA a été initié par le responsable de la sécurité du détecteur ATLAS en 2004 pour répondre à un besoin de sécurité du personnel dans la caverne expérimentale. Le choix et les tests du matériel de détection ainsi que les premières considérations quant au mode de fonctionnement de FPIAA ont été faites conjointement avec des équipes des deux laboratoires partenaires du projet (LIP et IDMEC/IST, Portugal). J'ai ensuite pris en charge ce projet pour son développement dans le cadre de l'expérience ATLAS. J'ai développé les interfaces d'acquisition de données et, après avoir organisé leur production en série par une industrie, j'ai dirigé une équipe de techniciens pour leur installation et le câblage (bus CAN, alimentations) dans la caverne d'ATLAS. J'ai procédé aux tests et validations sur site de cette électronique avec l'aide d'un ingénieur de mon équipe. En parallèle, j'ai coordonné, avec l'aide d'une équipe de la Coordination Technique d'ATLAS, l'installation, le câblage et les tests et validations de tous les capteurs PIR dans la caverne. L'installation de tous les composants de FPIAA (87 boîtiers d'acquisition de données, 828 capteurs et environ 8 kilomètres de câble) a duré un an et demi. J'ai intégré l'électronique de FPIAA dans le système de contrôle de l'infrastructure d'ATLAS et j'ai implémenté les premiers prototypes logiciels pour l'affichage et le suivi actif des personnes dans la caverne. Après avoir mis au point l'architecture complète du logiciel et avoir développé la structure logicielle pour l'affichage des mouvements des personnes dans le détecteur, j'ai dirigé un étudiant (IDMEC/IST, Portugal) pendant six mois qui a développé une première version des composants logiciels restants (affichage du mouvement des personnes sur les structures adjacentes au détecteur, algorithme de suivi actif des personnes, outils de configuration et de visualisation des données archivées). J'ai ensuite repris ce développement pour les tests sur site des algorithmes, leur consolidation et leur validation. Enfin, j'ai implémenté de nouvelles zones couvertes par FPIAA (configuration ouverte du détecteur, grandes roues, tranchées) et j'ai développé un outil qui permet d'effectuer un test opérationnel de tous les capteurs PIR installés, afin de faciliter la maintenance du système.

### III. Monitoring des radiations dans le détecteur ATLAS

L'usage d'un faisceau de particules génère des radiations ionisantes de plusieurs types, notamment aux points d'interactions où les collisions de protons ont lieu comme dans le détecteur ATLAS. Plusieurs types de détecteurs de radiations ont été implémentés dans ATLAS pour d'une part mesurer les débits de dose résiduels après l'exploitation du détecteur afin d'autoriser l'accès des personnes pendant les périodes de maintenance, et d'autre part pour évaluer la quantité de radiations reçue par les systèmes de détection pendant l'exploitation.

Ce chapitre présente le développement d'un système de mesure des radiations pour mesurer la dose totale intégrée (TID) et la fluence de particules NIEL (Non Ionizing Energy Loss, équivalent neutron à une énergie de 1 MeV) dans le détecteur ATLAS. Le développement présenté ici dépend du contrôle de l'infrastructure commune du détecteur et ne concerne que la mesure des radiations ionisantes à l'extérieur des calorimètres d'ATLAS, où les niveaux de radiations attendus sont faibles. Un système de mesure similaire a également été implémenté dans le détecteur interne avec une électronique FE adaptée à des débits de dose importants, cette application a été mise au point par l'équipe en charge du système de contrôle du sous-détecteur Pixel. Après avoir expliqué le principe de mesure du TID et de la fluence de particules, les composants électroniques mis en jeu seront présentés ainsi que leur mode d'utilisation. Enfin la procédure d'étalonnage des capteurs et la structure logicielle sera décrite.

#### 1. Principe de mesure de la dose et de la fluence de particules

Plusieurs types de capteurs dédiés à la mesure de dose et de la fluence de particules dans les expériences du LHC ont été étudiés [25]. Des systèmes de mesure passifs (nécessitant une intervention et une analyse en laboratoire) et actifs (couplés à un système d'acquisition de données) ont été envisagés. Un système de dosimétrie actif a été choisi pour la mesure de la dose et de la fluence de particules dans les sous-détecteurs d'ATLAS, combinant un capteur radFET pour la mesure de la dose intégrée et une diode PIN pour la mesure de la fluence de particules.

##### 1.1. Le capteur RadFET

Les radFET sont des transistors de type MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) utilisés comme dosimètres. Lorsqu'un MOSFET est soumis à un rayonnement ionisant, des charges sont piégées dans l'oxyde de grille par la formation de paires électron-trou. Cette accumulation de charges dans l'oxyde de grille provoque une variation de la tension de seuil du transistor qui peut alors être corrélée à la quantité de dose reçue par le transistor [25].

Comme le montre la Figure III-1, le transistor couplé à une source de courant peut être utilisé comme dosimètre actif par l'injection d'un courant  $I_{bias} = 0,5 \text{ mA}$  suivie d'une mesure analogique de sa tension de seuil  $V_s$  afin d'évaluer sa déviation par rapport à une tension de seuil  $V_{Sref}$  mesurée avant irradiation du capteur.

La dose  $D$  (a) reçue par le radFET est donnée par la formule empirique suivante [25] :

$$D \text{ (Gy)} = e^{\left(\frac{1}{C_{db}} \times (\ln(V_S - V_{Sref}) - \ln(C_{da}))\right)} \quad \text{a.}$$

Avec deux constantes  $C_{da} = 0,515$  et  $C_{db} = 0.481$  déterminées empiriquement.

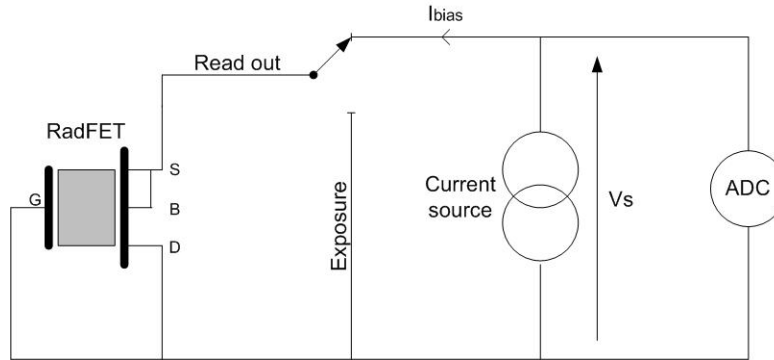


Figure III-1 : Schéma de montage d'un MOSFET couplé à une source de courant pour la mesure de dose ionisante

Deux modes de fonctionnement du capteur sont pilotés par un contacteur :

- Un mode d'exposition pendant lequel le capteur est soumis aux radiations ionisantes, il est alors isolé de la source de courant.
- Un mode d'acquisition de données qui permet d'envoyer un courant dans le radFET et de mesurer sa tension de seuil. Un temps de latence d'une seconde est nécessaire entre l'activation du radFET et la mesure de sa tension de seuil pour qu'elle soit stabilisée.

La dose de radiations ionisantes n'est pas le seul facteur influant sur la tension de seuil des radFET. Outre les effets internes dus à la recombinaison des paires électron-trou par effet tunnel et par guérison thermique, la tension de seuil des radFet varie en fonction de la température ambiante. Un étalonnage préliminaire des capteurs est donc nécessaire et cet étalonnage doit être renouvelé périodiquement car l'effet de la température ambiante sur la tension de seuil dépend de la dose accumulée.

Des capteurs radFet de type LAAS 1600 ont été choisis pour la mesure de dose des zones externes du détecteur ATLAS (extérieur du calorimètre). Leur test d'irradiation [26] a montré une sensibilité de 500 mV/Gy et une gamme de mesure allant de quelques milligrays jusqu'à quelques dizaines de gray à saturation, en accord avec la quantité de dose attendue dans cette zone (Figure I-4).

## 1.2. Le capteur à diode PIN

Des diodes PIN silicium sont utilisées pour la mesure de la fluence de particules. Ces diodes possèdent une zone non dopée, dite intrinsèque, entre les pôles P et N. Lorsque la diode est exposée à une fluence de particules, les collisions de particules avec les atomes de silicium de la zone intrinsèque engendrent des zones de défaut de charge dans ce dernier. Ces défauts locaux dans le silicium induisent une

augmentation de la résistivité globale du matériau qui peut alors être exploitée pour quantifier la fluence de particules à laquelle la diode a été exposée [25].

Comme le montre la Figure III-2, la résistivité de la diode PIN est mesurée en injectant un courant  $I_{bias} = 1 \text{ mA}$  en polarisation directe. La tension aux bornes de la diode est mesurée après un délai de 0,5 seconde qui permet à la tension aux bornes de la diode de se stabiliser. Comme pour le radFET, la diode PIN est isolée de la source de courant pendant les phases d'irradiation à l'aide d'un contacteur.

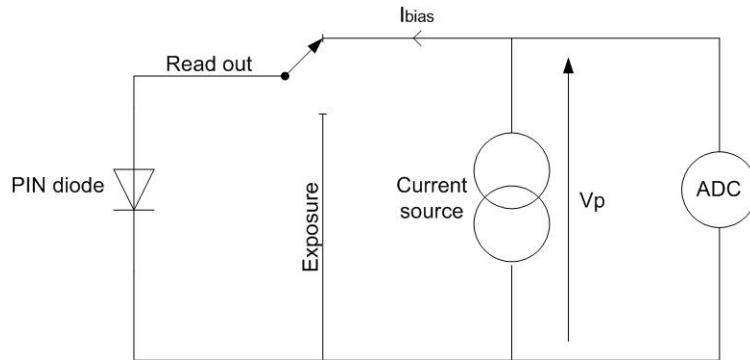


Figure III-2 : Schéma de montage d'une diode PIN couplée à une source de courant pour la mesure de la fluence de particules

La fluence de particules  $\Phi$  (b) est alors une fonction linéaire de la variation de tension aux bornes de la diode PIN. Elle est calculée par la formule empirique suivante [25] :

$$\Phi \text{ (n/cm}^2\text{)} = C_f \times (V_p - V_{Pref}) \quad \text{b.}$$

avec :

- $C_f = 1,7 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{V}^{-1}$ ,
- $V_p$  la tension mesurée aux bornes de la diode PIN (V),
- $V_{Pref}$  la tension de référence avant irradiation de la diode PIN (V).

La résistivité de la zone intrinsèque de la diode PIN varie en fonction de la température. Un étalonnage des diodes est donc nécessaire pour corriger la mesure. Comme le radFET, l'influence de la température ambiante sur la résistivité varie avec son vieillissement sous radiations ionisantes, des étalonnages réguliers sont donc nécessaires.

Des diodes PIN de type CMRP (Clamped Mode Resonant Pole) ont été choisies pour la mesure de la fluence de particules dans les zones externes du détecteur ATLAS (extérieur du calorimètre). Leur test d'irradiation [26] a montré une sensibilité de  $1,7 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{mV}$  et une pleine échelle de  $2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ , en accord avec la quantité de dose attendue dans cette zone (Figure I-4).

## 2. Electronique frontale (FE)

### 2.1. Capteurs

Les capteurs ou RMSB (Radiation Monitoring Sensor Board) pour le monitoring des radiations ionisantes se présentent, comme le montre la Figure III-3, sous la forme d'un PCB accueillant un radFET de type LAAS 1600 pour la mesure de la dose, d'une diode PIN de type CMRP pour la mesure de la fluence de particules ainsi qu'une sonde NTC 10 kOhms permettant une mesure de température afin de pouvoir corriger les tensions lues aux bornes du radFET et de la diode PIN en fonction de la température ambiante.

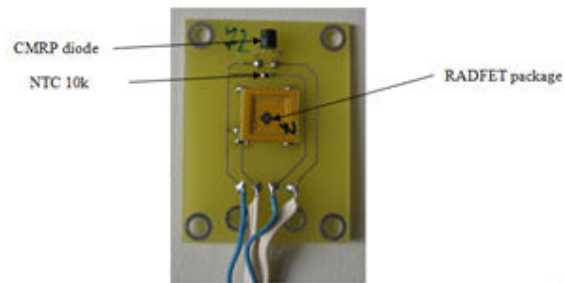


Figure III-3 : Capteur de radiations ionisantes utilisé dans les zones externes du détecteur ATLAS

Dans les zones externes du détecteur ATLAS, 48 RMSB de ce type ont été installés pour mesurer la dose accumulée et la fluence de particules reçus par les éléments de détection et l'électronique FE des sous-détecteurs. Ainsi, comme le montre la Figure III-4, 16 RMSB sont placés dans les calorimètres à Argon liquide, 6 RMSB sont installés dans les calorimètres à tuiles, 10 RMSB équipent les alimentations locales du sous-détecteur Pixel placées dans l'aimant toroïdal et enfin 16 RMSB sont installés sur les petites roues et les grandes roues du détecteur à Muons.

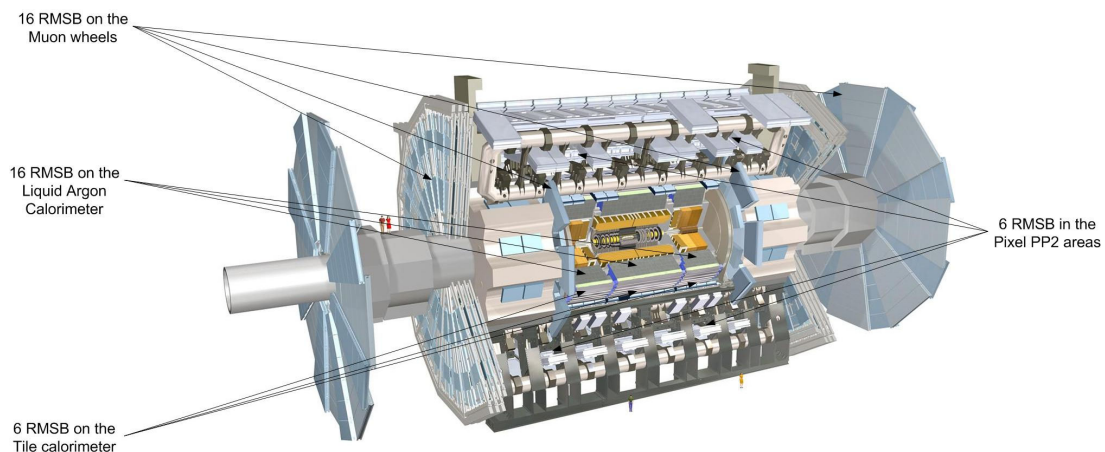


Figure III-4 : Emplacement des RMSB dans le détecteur ATLAS



Dans le détecteur interne, 18 RMSB ont également été installés. Ces capteurs contiennent trois types de radFET et trois types de diodes PIN avec des pleines échelles allant de respectivement quelques dizaines de grays à plusieurs centaines de kGrays et de  $10^{12}$  à  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> pour fournir une mesure de radiations ionisantes dans cette zone plus exposée pendant toute la durée d'exploitation d'ATLAS. Ces capteurs complètent le dispositif de mesure des radiations dans le détecteur mais ne font pas partie de l'architecture d'acquisition de données présentée ici.

## 2.2. Chaîne d'acquisition de données

### 2.2.1. Composants

Un boîtier d'acquisition de données spécifique au monitoring des radiations a été développé au Joseph Stefan Institute (Ljubjana, Slovénie) dans un format identique à celui développé pour le projet FPIAA (cf. chapitre II). Comme le montre la Figure III-6, le boîtier contient un ELMB qui fournit l'interface sur bus de terrain et 64 entrées analogiques pour les lectures des tensions aux bornes des radFET et des diodes PIN ainsi que pour les mesures de température. Un DAC (Digital to Analog Converter) de type MAX525 (Figure III-5) fournissant 16 sorties analogiques permet de fournir le courant aux radFET et aux diodes PIN ainsi que les contacteurs situés sur une carte auxiliaire (PP) pour ouvrir ou fermer les boucles de courants. Les boîtiers sont équipés d'un ou deux couple(s) DAC/PP pour faire l'acquisition de données de 6 ou 12 RMSB.

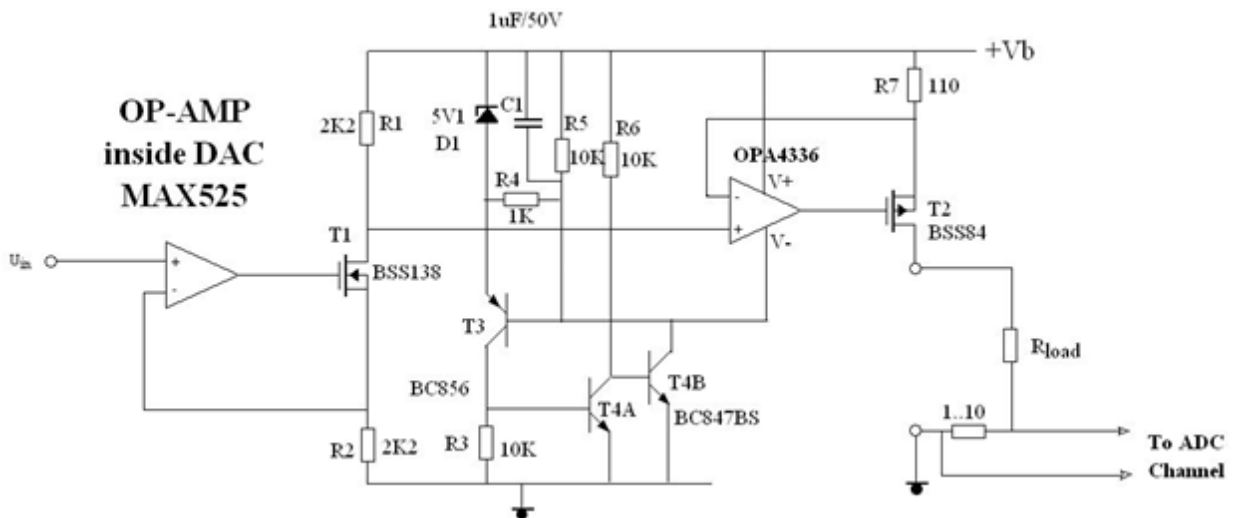


Figure III-5 : Schéma électrique du DAC MAX525 utilisé comme source de courant pour alimenter les radFET et diodes PIN

L'ELMB pilote les DAC par l'intermédiaire de son port SPI. Le ou les DAC sont alimentés en 24 V, ce qui constitue la pleine échelle d'exploitation des capteurs. Les entrées analogiques de l'ELMB ont été équipées de diviseurs de tension (/11) qui permettent une acquisition de données par l'ADC (Analog to Digital Converter) sur une pleine échelle de 5 Volts.

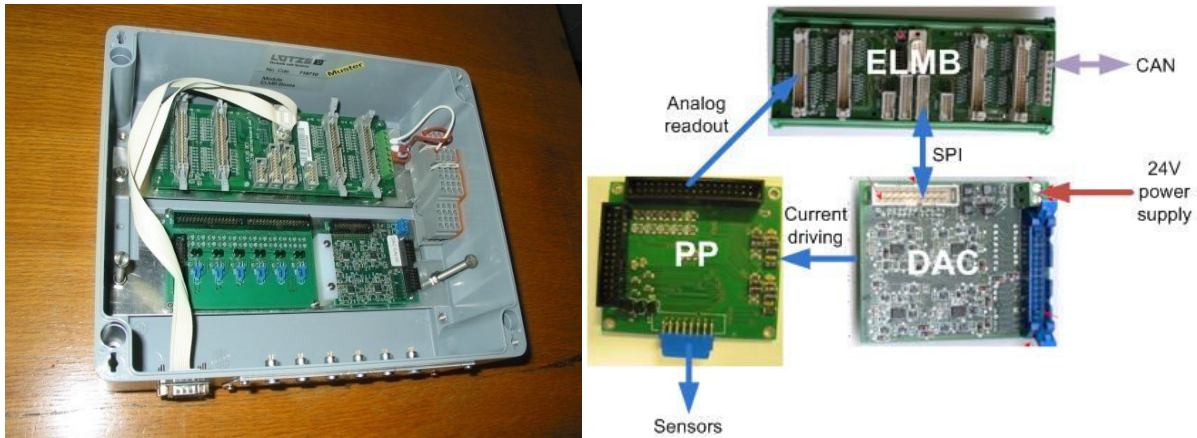


Figure III-6 : gauche : boîtier d'acquisition de données pour le monitoring des radiations; droite : communication entre les composants

Six boîtiers sont connectés aux bus de terrains qui ont été déployés dans la caverne expérimentale pour le contrôle de l'infrastructure commune (Figure II-7) :

- Deux boîtiers équipés pour l'acquisition de données de douze RMSB dédiés au calorimètre à Argon liquide et au calorimètre à tuiles.
- Deux boîtiers équipés pour l'acquisition de données de six RMSB dédiés aux alimentations du sous-détecteur Pixel.
- Deux boîtiers équipés pour l'acquisition de données de douze RMSB dédiés aux roues du détecteur à Muon.

Un module 24 V de la PSU située dans le rack d'électronique permet l'alimentation des DAC utilisés dans les boîtiers d'acquisition de données.

### 2.2.2. Processus d'acquisition de données des RMSB

Les radFET et les diodes PIN nécessitent une procédure d'acquisition de données (cf. paragraphe 1) qui n'est pas compatible avec la procédure standard d'acquisition de données analogiques de l'ELMB. La méthode standard consiste à l'envoi d'une requête de synchronisation pour déclencher une acquisition de données simultanée de tous les canaux analogiques des ELMB présents sur le bus. La méthode synchrone utilise le protocole CANOpen PDO (Process Data Object) qui permet l'envoi d'une requête à haut niveau de priorité sur le bus permettant l'activation d'une application locale sur l'électronique réceptrice du message, ici l'acquisition de données des 64 canaux de l'ELMB. L'acquisition de données des RMSB nécessite une alternance précise d'activation des canaux des DAC et de lectures analogiques, c'est pourquoi le protocole CANOpen SDO (Service Data Object) a été choisi. Il permet l'envoi de requêtes individuelles non prioritaires ciblées sur un ELMB spécifique donnant accès à toute la bibliothèque d'objets implémentés dans le microcontrôleur, et donc l'accès individuel aux canaux de l'ADC et du DAC.

La Figure III-7 montre la séquence d'acquisition de données qui a été implémentée pour les RMSB en utilisant le protocole SDO. Un canal du DAC est d'abord activé pour actionner un contacteur qui ferme

les boucles de courants des radFET et diodes PIN des six RMSB connectés au DAC. Deux canaux du DAC et quatre canaux de l'ADC sont attribués à chaque capteur et sont actionnés dans l'ordre suivant :

- Lecture du canal ADC de la sonde NTC pour la mesure de température.
- Activation du canal du DAC pour injecter un courant de 100  $\mu\text{A}$  dans la diode PIN.
- Lecture du canal ADC de la diode PIN pour la mesure de la tension  $V_p$  après un délai de 500 millisecondes.
- Lecture du canal ADC attribué à la lecture du courant  $I_{\text{bias}}$ .
- Désactivation du canal du DAC attribué à la diode PIN pour stopper l'injection de courant.
- Activation du canal du DAC pour injecter un courant de 1 mA dans le radFET.
- Lecture du canal ADC du radFET pour la mesure de la tension  $V_p$  après un délai de 1 seconde.
- Lecture du canal ADC attribué à la lecture du courant  $I_{\text{bias}}$ .
- Désactivation du canal du DAC attribué au radFET pour stopper l'injection de courant.

Lorsque la procédure d'acquisition de données est terminée pour tous les RMSB connectés à un DAC, le contacteur principal est de nouveau actionné pour ouvrir les boucles de courant et remettre ainsi les RMSB en mode d'exposition aux radiations ionisantes.

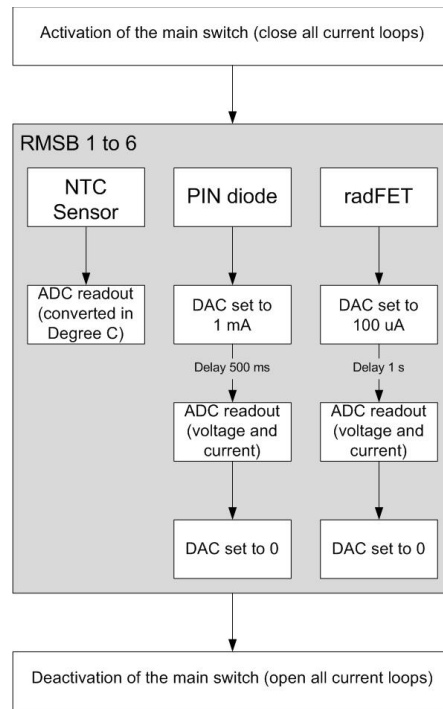


Figure III-7 : Séquence d'acquisition de données d'un RMSB

### 3. Etalonnage des capteurs

#### 3.1. Calcul des tensions de référence et des facteurs de correction en température

Après l'installation des RMSB et de l'électronique d'acquisition de données, une campagne d'étalonnage a été menée pour mesurer les tensions de référence  $V_{Sref}$  et  $V_{Pref}$  des radFET et des diodes PIN et pour quantifier l'influence de la température ambiante. Pendant un mois, avant la mise en service du détecteur ATLAS, les données brutes des capteurs (tensions, courants et température) ont été acquises toutes les 30 minutes en respectant la procédure décrite dans la Figure III-7 et archivées par un programme d'acquisition de données développé sous PVSS sur la machine dédiée au contrôle de l'infrastructure de la caverne (ATLCICUXDET).

Les données de chaque RMSB sont ensuite extraites de la base de données et sont analysées à l'aide d'un programme qui traite les données en trois étapes qui sont illustrées dans ce paragraphe par les résultats d'analyse d'un RMSB de la zone PP2 (alimentations électriques).

La moyenne (Mean) et l'écart type (Stdev) des tensions brutes  $V_{Sref}$  et  $V_{Pref}$  mesurées pendant l'acquisition de données sont d'abord calculés. Comme le montre la Table III-1, les écarts types sur les tensions  $V_{Sref}$  et  $V_{Pref}$ , représentant respectivement 2.5% de la mesure pour la diode PIN et 1% de la mesure pour le radFET traduisent le bruit du système de mesure.

Table III-1 : Valeurs brutes des tensions de référence et des courants d'activation du radFET et de la diode PIN d'un RMSB de la zone PP2

| RAW   | PIN diode      |                 | radFET         |                 |
|-------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|       | $V_{Pref}$ (V) | $I_{Bias}$ (uA) | $V_{Sref}$ (V) | $I_{Bias}$ (uA) |
| Mean  | 3.372          | 1044.892        | 2.497          | 99.151          |
| Stdev | 0.090          | 0.440           | 0.023          | 0.488           |

L'influence de la température sur les fluctuations des tensions aux bornes du radFET et de la diode PIN est ensuite évaluée. La tension aux bornes du radFET (Figure III-8) et de la diode PIN (Figure III-9) varie linéairement en fonction de la température dans le domaine [19, 31] degrés Celsius. Certains points de mesure sont écartés de la droite de régression. Le capteur étudié étant placé sur une alimentation électrique, les variations de températures rapides au démarrage ou à l'arrêt de l'alimentation peuvent induire une différence entre la température mesurée par la NTC et la température réelle du radFET et de la diode PIN.

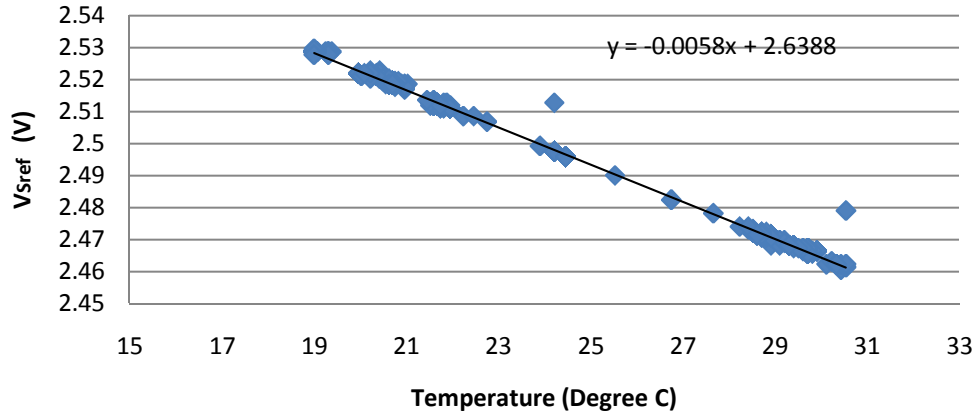


Figure III-8 : Evolution de la tension de référence du radFET d'un RMSB de la zone PP2 en fonction de la température

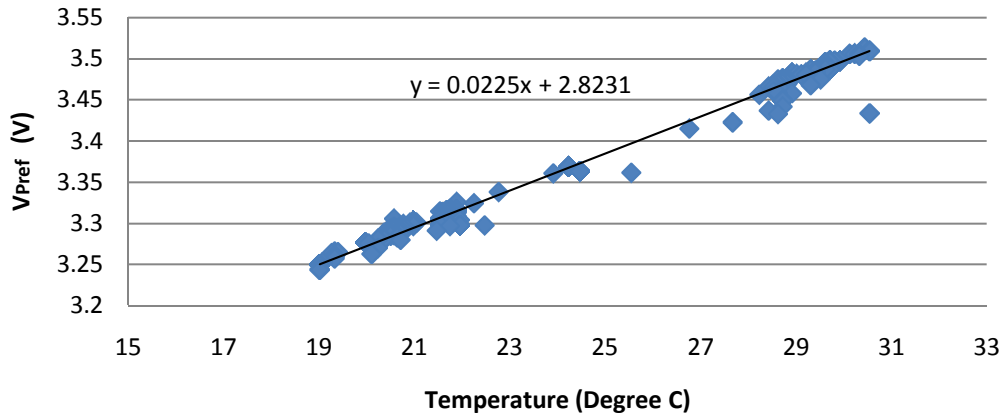


Figure III-9 : Evolution de la tension de référence de la diode PIN d'un RMSB de la zone PP2 en fonction de la température

Le coefficient directeur des deux courbes est calculé en appliquant une régression linéaire aux séries de données pour obtenir les coefficients de correction en température du radFET et de la diode PIN nommés respectivement  $C_{T_{rad}}$  et  $C_{T_{pin}}$  exprimés en Volt par degré Celsius.

Les facteurs de correction en température permettent de calculer les tensions de référence  $V_{SrefCorr}$  du radFET (c) et  $V_{PrefCorr}$  de la diode PIN (d) à une température de référence choisie comme étant égale à  $T_{ref} = 20$  degrés Celsius en appliquant les équations :

$$V_{SrefCorr} = V_{Sref} - C_{T_{rad}} \times (T - T_{ref}) \quad \text{c.}$$

$$V_{PrefCorr} = V_{Pref} - C_{T_{pin}} \times (T - T_{ref}) \quad \text{d.}$$

avec T (degré Celsius) la température au moment de la mesure.

La Figure III-10 montre les tensions brutes (rouge) et corrigées en température (vert) aux bornes du radFET et de la diode PIN d'un RMSB de la zone PP2 en fonction du temps.

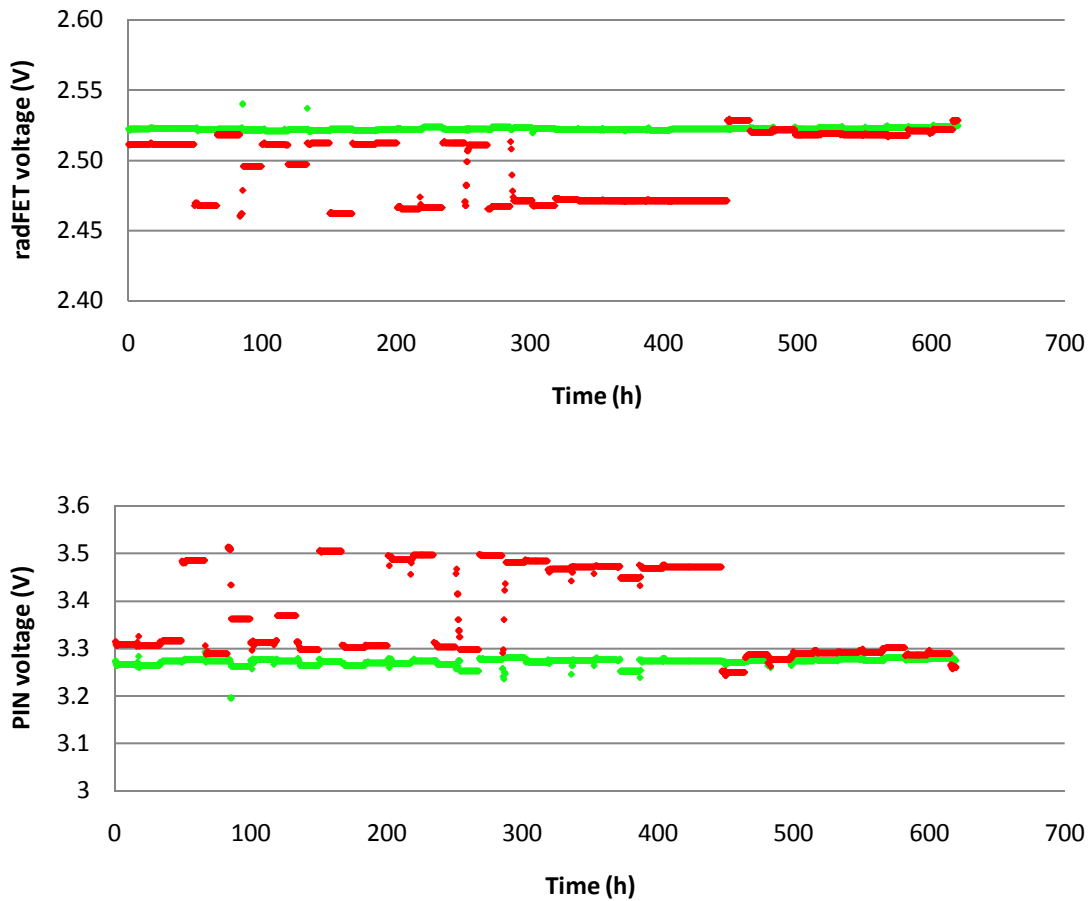


Figure III-10 : Tension de référence aux bornes du radFET (haut) et de la diode PIN (bas) en fonction du temps avant (rouge) et après (vert) correction en température

Les données corrigées peuvent alors être de nouveau moyennées pour obtenir les tensions de référence du radFET et de la diode PIN à la température de référence de 20 degrés Celsius présentées dans la Table III-2.

Table III-2 : Tensions de référence corrigées en température et courants d'activation du radFET et de la diode PIN d'un RMSB de la zone PP2

| Corrected | PIN diode                 |                        | radFET                    |                        |
|-----------|---------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
|           | V <sub>PrefCorr</sub> (V) | I <sub>Bias</sub> (uA) | V <sub>SrefCorr</sub> (V) | I <sub>Bias</sub> (uA) |
| Mean      | 3.273                     | 1044.892               | 2.523                     | 99.151                 |
| Stdev     | 0.007                     | 0.440                  | 0.001                     | 0.488                  |

Après correction, l'écart type des mesures de tension est divisé d'un facteur 10, ce qui confirme que les variations de la température ambiante représentent le facteur principal de fluctuations de mesure. La stabilité des mesures à long terme a également été étudiée : deux séries de données d'étalonnage datant de juillet/août 2008 et de février 2009 provenant de 25 RMSB ont été analysées avec la méthode présentée dans ce paragraphe pour calculer leur tension de référence corrigée en température. Il en a résulté un écart de 22 millivolts pour les diodes PIN et de 1 millivolt pour les radfets (moyenne sur les 25 RMSB) entre les deux périodes. Si on se réfère aux équations (a) et (b), cela correspond à une déviation de  $3.74 \times 10^9$  n/cm<sup>2</sup> pour la mesure de fluence de particules et de 2.3 micro Gray pour la mesure de dose. La déviation est négligeable pour la mesure de dose (pleine échelle de quelques dizaines de Gray) mais ne l'est pas pour la mesure de fluence de particules (pleine échelle de  $2 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>). Les résultats de cet étalonnage ont été transmis au Joseph Stefan Institute (Slovénie) qui est en charge de ce système de mesures de radiations.

Ces tensions de références seront ensuite prises en compte lors de l'exploitation des capteurs pour calculer la dose D (e) et la fluence de particules  $\Phi$  (f) normalisés pour un fonctionnement à une température ambiante de 20 Degrés Celsius à partir des équations a, c et b, d par :

$$D (Gy) = e^{\left( \frac{1}{c_{ab}} \times \left( \ln \left( (V_S - C_{T_{rad}} \times (T - T_{ref})) - V_{S_{refCorr}} \right) - \ln(C_{da}) \right) \right)} \quad \text{e.}$$

$$\Phi (n/cm^2) = C_f \times \left( (V_P - C_{T_{pin}} \times (T - T_{ref})) - V_{P_{refCorr}} \right) \quad \text{f.}$$

### 3.2. Outil d'étalonnage automatisé en température

Le comportement en température des radFET et des diodes PIN n'est pas constant, il varie avec le vieillissement des capteurs sous radiations ionisantes, en particulier pour la diode PIN pour laquelle l'influence de la température sur la tension à ses bornes augmente fortement après irradiation. Il est ainsi nécessaire de calibrer les capteurs en température chaque année pendant les périodes de maintenance du détecteur ATLAS.

La méthode présentée dans le paragraphe 3.1 est longue à mettre en œuvre car elle nécessite une extraction des données en dehors de l'environnement de PVSS, elle n'est donc pas optimale pour un étalonnage régulier des capteurs. Afin de faciliter la maintenance à long terme du monitoring des radiations, un logiciel d'étalonnage en température des capteurs a été implémenté sous PVSS. La Figure III-11 montre l'interface utilisateur de cet outil sur laquelle l'expert en charge de l'étalonnage des RMSB choisit les capteurs à calibrer ainsi qu'une période de temps pendant laquelle les données des RMSB ont été acquises alors que ces derniers n'ont pas été irradiés, c'est-à-dire pendant une période de maintenance du détecteur. L'utilisateur spécifie un nom de fichier de sortie et démarre l'étalonnage.

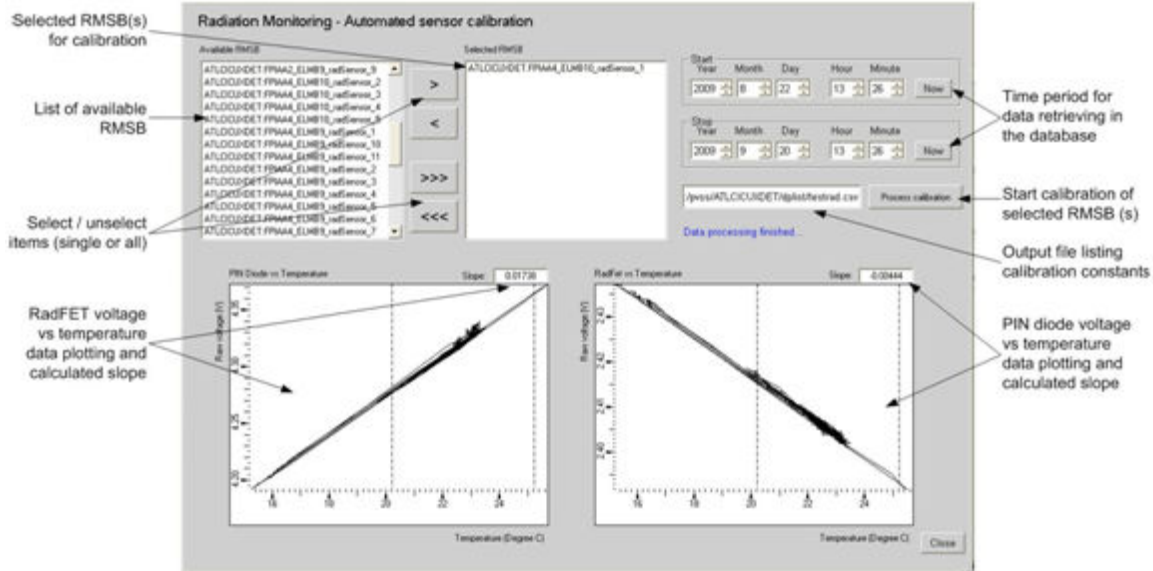


Figure III-11 : Interface pour l'étalonnage automatisé des RMSB en température

Le logiciel d'étalonnage traite séquentiellement les données de chaque RMSB. Les données sont d'abord récupérées de la base de données et scannées afin de repérer toute mesure défectueuse. L'électronique FE présente en effet des instabilités aléatoires qui peuvent conduire à une acquisition de données erronées. Une hypothèse quant à l'origine de cette instabilité de mesure a été envisagée : le microcontrôleur de l'ELMB utilise une sortie numérique commune pour piloter l'ADC et le port SPI qui est utilisé pour contrôler le DAC. L'utilisation séquentielle de ces deux composants dans le processus d'acquisition de données des RMSB peut induire des conflits dans le microcontrôleur. Cet effet étant aléatoire et non reproductible, il a été décidé d'ignorer ses événements dans le traitement des données en sachant que les valeurs de sortie de l'ADC sont toujours identiques dans ce cas et donc facilement identifiables.

Une régression linéaire par la méthode des moindres carrés est appliquée pour le calcul de la pente « a » de la tension V aux bornes du radFET et de la diode PIN en fonction de la température T (g).

$$a = \frac{S_{TV}}{S_T^2} = \frac{\langle V \times T \rangle - \langle V \rangle \times \langle T \rangle}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} \quad \text{g.}$$

avec  $S_{TV}$  la covariance des mesures de tension et de température et  $S_T^2$  la variance des températures mesurées.

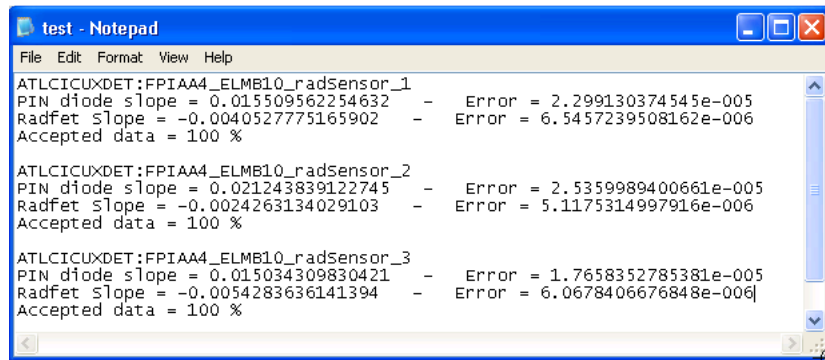
L'erreur sur le calcul de la régression (h) est calculée en évaluant la variance résiduelle de l'écart vertical  $\varepsilon_i$  entre la droite de régression et les points  $(T_i, V_i)$  défini par  $\varepsilon_i = V_i - a \times T_i - b$  avec l'ordonnée à l'origine de la droite de régression  $b = \langle V \rangle - a \times \langle T \rangle$ .

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{n-2} \times \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad \text{h.}$$



avec  $n$  la taille de l'échantillon de données.

Lorsque les données de tous les RMSB sélectionnés ont été traitées, un rapport d'analyse est créé sous la forme d'un fichier texte (Figure III-12) dans lequel apparaît la liste des capteurs avec pour chacun d'entre eux les coefficients de correction en température du radFET et de la diode PIN avec l'erreur commise sur la régression ainsi que le pourcentage de données récupérées de la base de données qui ont pu être utilisées pour faire la régression.



```
test - Notepad
File Edit Format View Help
ATLCICUXDET:FPIAA4_ELMB10_radSensor_1
PIN diode slope = 0.015509562254632 - Error = 2.299130374545e-005
Radfet slope = -0.0040527775165902 - Error = 6.5457239508162e-006
Accepted data = 100 %

ATLCICUXDET:FPIAA4_ELMB10_radSensor_2
PIN diode slope = 0.021243839122745 - Error = 2.5359989400661e-005
Radfet slope = -0.0024263134029103 - Error = 5.1175314997916e-006
Accepted data = 100 %

ATLCICUXDET:FPIAA4_ELMB10_radSensor_3
PIN diode slope = 0.015034309830421 - Error = 1.7658352785381e-005
Radfet slope = -0.0054283636141394 - Error = 6.0678406676848e-006
Accepted data = 100 %
```

Figure III-12 : Rapport d'analyse de données pour l'étalonnage en température des RMSB

L'expert en charge de l'étalonnage utilise alors ce rapport d'analyse pour juger de la pertinence des résultats obtenus en s'appuyant sur les erreurs sur les régressions et sur le pourcentage de données acceptées et prend en charge la mise à jour des facteurs de correction en température dans la structure logicielle du monitoring des radiations.

## 4. Logiciel

### 4.1. Représentation des RMSB dans PVSS

Le logiciel de production pour l'acquisition et le traitement des données du monitoring des radiations est fait sous PVSS. Les données et les paramètres de configuration de chaque RMSB sont manipulés à partir d'une classe d'objets représentant les capteurs. Cette classe d'objet ou datapoint (Figure III-13) est définie par une arborescence qui contient trois branches dédiées à la mesure de dose, de la fluence de particules et de températures et un bit de véto qui permet d'exclure le capteur du processus d'acquisition de données (« excluded »). La branche dédiée à la mesure de dose contient deux éléments pour la tension brute aux bornes du radfet (« voltage ») et le courant injecté (« current ») qui sont connectés à l'électronique FE et mis à jour à chaque nouvelle acquisition de données. Un élément reçoit les valeurs de dose calculées après chaque acquisition de données (« value »). Une sous branche (« correction ») contient les paramètres d'étalonnage du capteur : tension de référence (« baseline ») et facteur de correction en température (« tempSlope »). Enfin un paramètre permet d'ajuster la valeur de DAC (« enable ») qui conditionne l'intensité du courant injecté dans le radFET et un bit d'invalidité (« invalid ») est utilisé par le processus de traitement des données si l'acquisition de données échoue. La structure de la branche dédiée au calcul de la fluence de particules est identique à celle de la branche

dédiée au calcul de la dose mais utilise les données et paramètres relatifs à la diode PIN. Enfin, la branche dédiée à la température se résume à un élément (« value ») qui reçoit la valeur de température calculée en degré C à partir de la valeur mesurée en Volt.

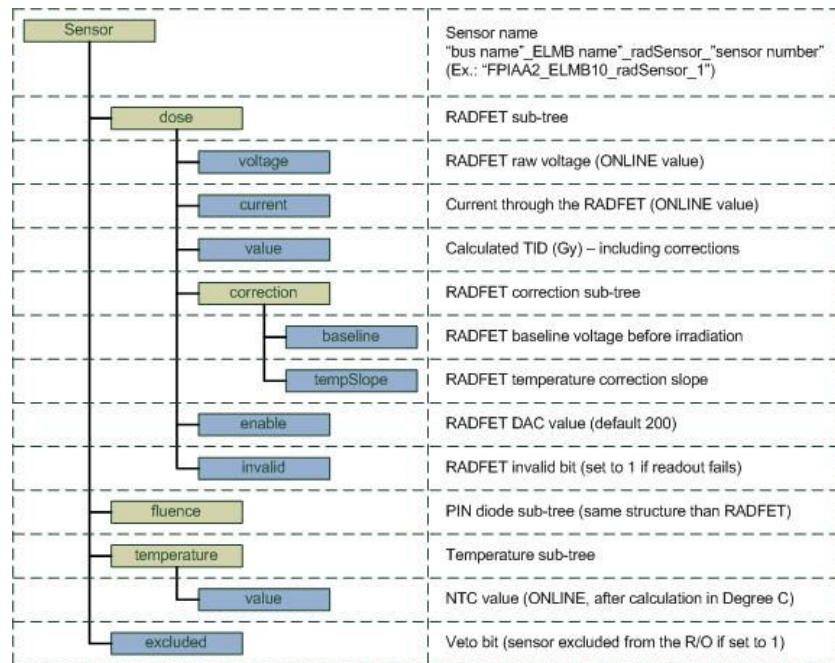


Figure III-13 : Représentation des RMSB par une classe d'objets dans PVSS

## 4.2. Processus d'acquisition et de traitement des données

Un processus a été développé pour gérer l'acquisition et le traitement des données des RMSB sous PVSS. Comme le montre la Figure III-14, il s'agit d'une boucle fermée qui traite séquentiellement les RMSB et effectue les actions suivantes :

- Il vérifie que le capteur n'est pas exclu de l'acquisition de données, sinon il passe au capteur suivant,
- il fait l'acquisition de données du radFET, de la diode PIN et de la sonde NTC du capteur en cours de traitement en respectant la procédure décrite dans la Figure III-7,
- il contrôle les données brutes afin d'identifier une lecture erronée des données,
- si le test de qualité n'est pas validé, le processus tente jusqu'à trois acquisitions de données. Si le test échoue après trois tentatives, les données du capteur ne sont pas traitées ni archivées, un bit d'invalidité est activé et une alerte est transmise à la salle de contrôle d'ATLAS,
- si le test de qualité est validé, le processus calcule les nouvelles valeurs de dose et de la fluence de particules corrigés en température relatifs à cette acquisition de données et les enregistre dans la base de données. Les mesures de dose et de fluence sont effectuées avec une précision de +/- 10 à 20%.

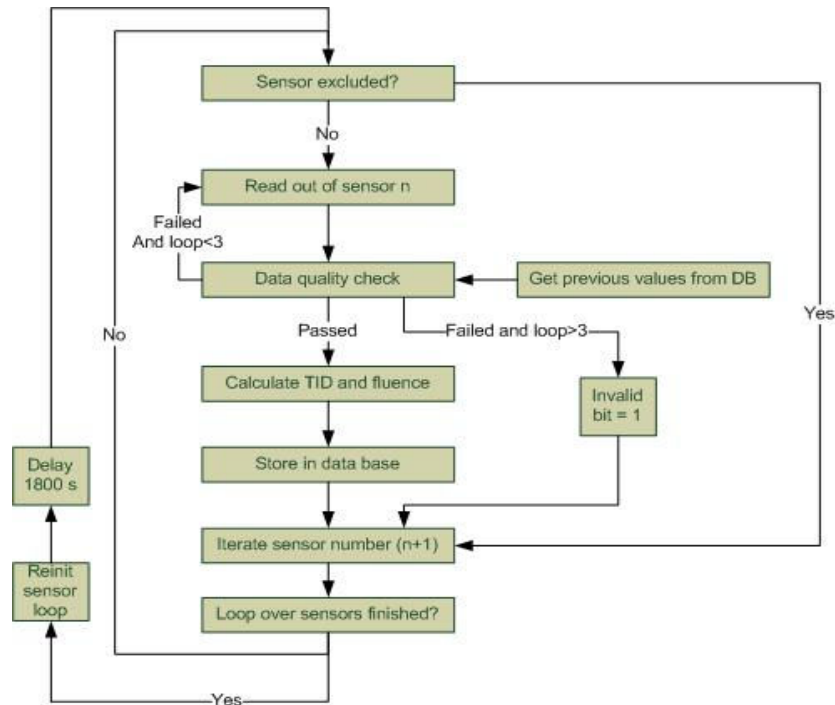


Figure III-14 : Processus d'acquisition et de traitement des données des RMSB

Cette séquence est reproduite pour les 48 RMSB et dure environ deux minutes. Elle est réitérée toutes les 30 minutes bien que ce délai pourrait être revu après la première période d'exploitation d'ATLAS, en fonction de l'intensité des radiations ionisantes. Il est en effet inutile de procéder à une nouvelle acquisition de données si les variations de tensions aux bornes du radFET et de la diode PIN entre deux acquisitions sont inférieures à leur résolution.

## 5. Contrôle haut niveau du système de monitoring des radiations

### 5.1. Structure FSM

Une arborescence FSM (voir Chapitre I) a été implémentée pour inclure l'application de monitoring des radiations dans le système de contrôle de l'infrastructure commune du détecteur ATLAS. Comme le montre la Figure III-15, le nœud principal nommé RADMON est scindé en quatre sous domaines qui représentent chaque sous-détecteur équipé de RMSB. Le premier domaine représente le détecteur interne pour lequel les données des RMSB ne sont pas acquises dans ce projet. Cependant, cette branche de la structure FSM se connecte aux données issues du système de contrôle du détecteur interne afin de regrouper toutes les mesures de radiations dans une seule arborescence. Les trois domaines suivants représentent les RMSB des trois sous-détecteurs qui sont physiquement lus dans ce projet : les calorimètres, le détecteur à Muons et les alimentations du détecteur Pixel. Chaque domaine contient deux DU représentant les mesures de radiations et les mesures de températures. Enfin deux branches supplémentaires ont été implémentées pour le contrôle et le monitoring des ELMB et des alimentations nécessaires au fonctionnement de l'électronique (12 V et 24 V).

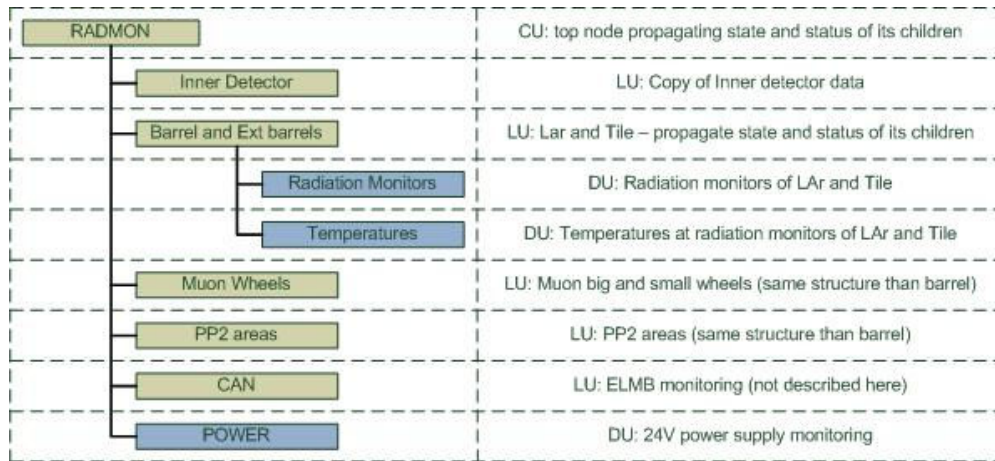


Figure III-15 : Arbrescence FSM pour le monitoring des radiations

La Table III-3 montre les états et statuts possibles des DU implémentés dans le FSM du monitoring des radiations. L'état des mesures de dose, de la fluence de particules et de température est conditionné par l'état du processus d'acquisition et de traitement des données (READY si le processus est opérationnel, sinon NOT READY). Le statut des mesures de dose et de la fluence de particules est contrôlé par le processus de traitement des données pour chaque capteur. Le statut d'un capteur est OK si les données acquises passent le contrôle de qualité des données (Figure III-14) et une alerte de premier niveau (WARNING) est propagée dans l'arborescence si trois tentatives consécutives d'acquisition de données échouent. Deux niveaux d'alerte successifs ont été implémentés sur les mesures de température (WARNING et ERROR), avec l'idée de profiter des NTC présents sur les RMSB pour fournir une information sur la température ambiante dans les sous-détecteurs d'ATLAS. Enfin l'état et le statut de l'électronique FE (ELMB, alimentation) est implémenté sur le même modèle que l'électronique FE de FPIAA (cf. chapitre II, paragraphe 5.1).

Table III-3 : Etats et statuts du modèle FSM du monitoring des radiations

|              |        |   |   |
|--------------|--------|---|---|
| TID and NIEL | State  | READY                                     | R/O control manager is running  |
|              |        | NOT READY                                 | R/O control manager stopped or crashed  |
|              | Status | OK  | Valid Data - invalid bit = 0  |
| WARNING      |        | Invalid Data - Invalid bit = 1            |   |
| Temperature  | State  | READY                                     | R/O control manager is running  |
|              |        | NOT READY                                 | R/O control manager stopped or crashed  |
|              | Status | OK  | $10\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$   |
|              |        | WARNING                                   | $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ or $40\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
|              |        | ERROR                                     | $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ or $T > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$   |
| Services     | State  | READY                                     | Powering is OK  |
|              |        | NOT READY                                 | Powering is partially or completely stopped   |
|              | Status | OK  | No issue  |
|              |        | WARNING                                   | Power failure   |
|              | ERROR  | CAN / ELMB communication or power failure |   |

## 5.2. Interfaces utilisateur

Une interface utilisateur a été développée pour chaque DU représentant les RMSB d'un sous-détecteur d'ATLAS afin de pouvoir localiser les capteurs dans le détecteur et y afficher les valeurs actualisées de dose et de la fluence de particules. La Figure III-16 en fait l'illustration pour les 16 RMSB du sous-détecteur Muon.

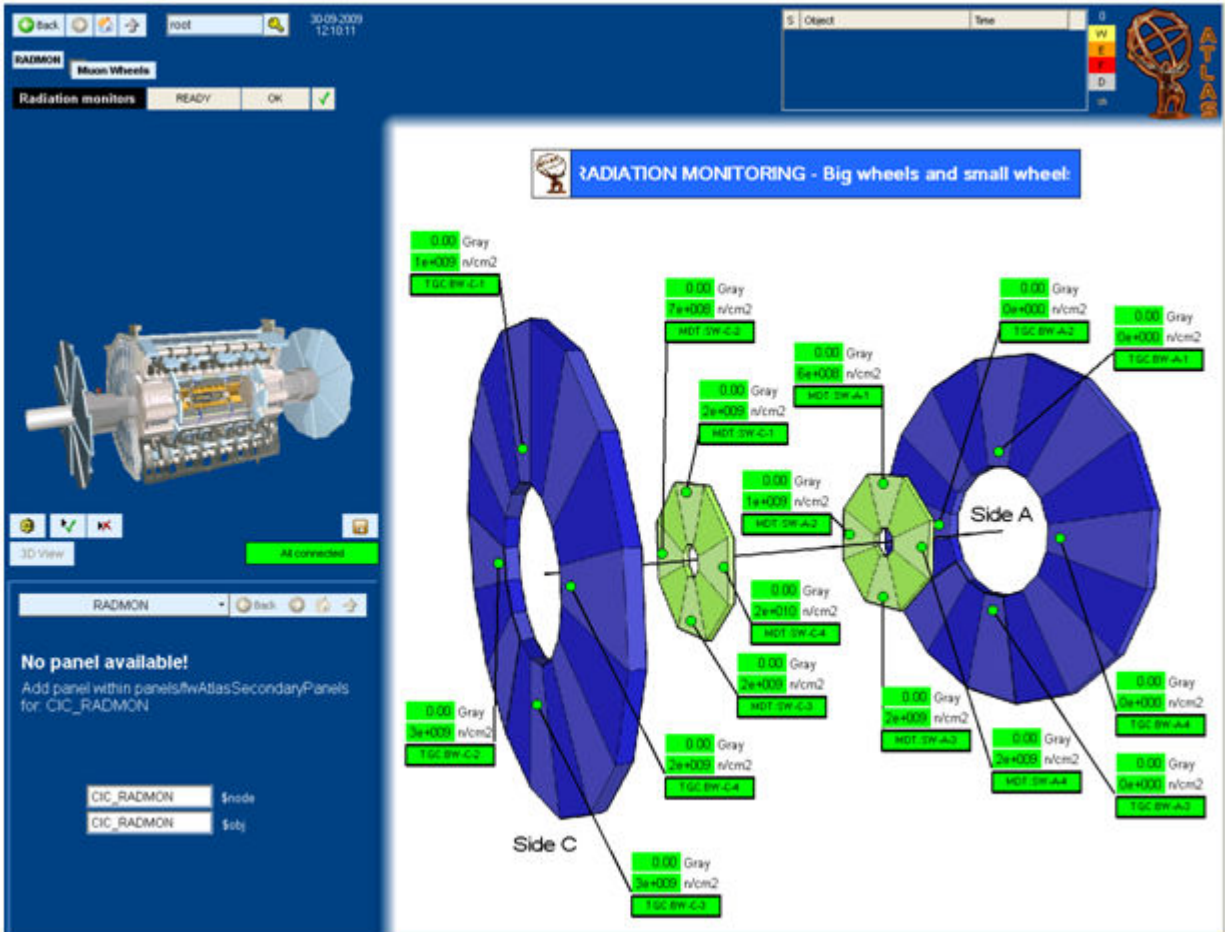


Figure III-16 : Exemple d'interface utilisateur développée pour le monitoring des radiations dans le sous-détecteur Muon

Chaque point sur les roues indique l'emplacement d'un capteur auquel est attribué un bloc de cases actives qui se mettent à jour automatiquement à chaque acquisition de données des RMSB. Les valeurs de dose et de la fluence de particules sont mis à jour et la couleur des cases renseigne sur l'état du capteur, c'est-à-dire vert si le capteur fonctionne, jaune si l'acquisition de données a échoué et gris si le capteur a été exclu du processus d'acquisition de données.

## 6. Conclusions

Le système de monitoring des radiations est prêt pour le redémarrage du LHC en automne 2009 qui va induire les premières radiations ionisantes dans le détecteur ATLAS. En effet, l'électronique frontale de

détection et d'acquisition de données est installée et déclarée opérationnelle. Les capteurs ont tous été étalonnés et l'infrastructure logicielle bas niveau, pour le traitement des données, est opérationnelle. Le logiciel haut niveau, pour le contrôle de l'application par les opérateurs d'ATLAS, est en place dans la salle de contrôle du détecteur.

Outre le monitoring des radiations depuis la salle de contrôle, les données issues de cette application vont être utilisées dans deux cadres différents. D'abord, les simulations qui ont été effectuées pour estimer les niveaux de radiations dans les couches de détection d'ATLAS pourront être confrontées aux données expérimentales, ce qui devrait permettre d'optimiser les algorithmes de simulation. Ensuite les sous détecteurs d'ATLAS auront ces données à disposition (ainsi que d'autres systèmes de mesure de radiations également présents dans ATLAS) pour corrélérer le vieillissement de leur matériel de détection en fonction du taux de radiations mesuré. Des études pourront alors être menées pour estimer le temps de vie des éléments du détecteur en fonction de leur degré d'exposition.

Les capteurs de radiations utilisés pour cette application ainsi que les boîtiers d'acquisition de données ont été construits au Jozef Stefan Institute (Slovénie). J'ai dirigé une équipe de techniciens pour l'installation et le câblage des capteurs et de l'électronique d'acquisition de données dans le détecteur ATLAS. J'ai validé et intégré cette électronique dans le contrôle de l'infrastructure du détecteur. J'ai conçu une méthode de lecture des données asynchrone adaptée au mode de fonctionnement des capteurs que j'ai utilisé pour cette application et qui est également utilisée pour le sous-détecteur TOTEM de CMS. J'ai développé l'interface logicielle et je l'ai intégrée au système de contrôle du détecteur ATLAS. J'ai effectué l'étalonnage des capteurs sur site, et j'ai développé un outil d'étalonnage automatisé qui permettra de recalculer et d'ajuster les facteurs de corrections en température des RADFet et diodes PIN à chaque période de maintenance du détecteur ATLAS.

## IV. Conclusions sur les applications pour le contrôle de l'infrastructure commune du détecteur ATLAS

La complexité et la taille du détecteur ATLAS n'a pas de précédent dans l'histoire des expériences de physique des hautes énergies. Un détecteur de la taille d'un immeuble de huit étages totalisant plus de 100 millions de canaux d'acquisition et des services (alimentations, systèmes de refroidissement...) à une échelle industrielle demande des efforts de développements considérables tant du point de vue de la cohérence des systèmes d'acquisition de données que de la capacité de contrôler et de surveiller tous les paramètres opérationnels. En outre, la durée de vie de l'expérience étant au minimum de quinze ans, le choix de logiciels et d'électronique industrielle a été préférée tant que possible afin de faciliter la maintenance à long terme.

Le système de contrôle du détecteur ATLAS (DCS) est hiérarchiquement organisé en une structure pyramidale qui permet d'une part de contrôler l'ensemble des sous-détecteurs et des services de l'expérience depuis une interface utilisateur centralisée, et d'autre part, de pouvoir surveiller les paramètres de l'ensemble de l'électronique front-end. Ceci est possible grâce à un logiciel de contrôle et d'acquisition de données (PVSS) qui permet de concevoir une application hautement distribuée et d'une couche logicielle haut niveau (FSM) qui fournit un modèle à état fini du détecteur pour appliquer des commandes complexes au détecteur et fournir à l'opérateur une vue globale des paramètres opérationnels. L'électronique front-end est composée d'équipements commerciaux (alimentations haute tension, basse tension...) et d'équipements développés au CERN (ELMB, alimentations sur bus CAN...).

Les services du détecteur sont scindés en deux catégories. Les services externes, tels que la distribution d'électricité et de gaz, les systèmes cryogéniques ou encore les systèmes de refroidissement par eau, ont chacun un système de contrôle spécifique qui est connecté au DCS d'ATLAS. Le système de contrôle de l'infrastructure commune du détecteur est intégré au DCS. Cette branche regroupe les services qui sont communs à tous les sous-détecteurs et elle est divisée en deux parties : le contrôle des locaux d'électroniques (contrôle des racks, paramètres environnementaux) et le contrôle de la caverne expérimentale. Un réseau d'électronique front-end d'acquisition de données a été développé et installé pour couvrir la caverne expérimentale afin de répondre aux besoins de contrôle des paramètres environnementaux et pour l'implémentation de deux applications spécifiques.

Un système de détection et de suivi actif de personnes dans la caverne (FPIAA : Finding Persons Inside ATLAS Areas) a été implémenté pour la sécurité du personnel lors des interventions de maintenance du détecteur. Des capteurs infrarouges ont été installés dans toutes les zones accessibles de la caverne et du détecteur au personnel et les données collectées sont analysées en quasi-temps réel afin de fournir une interface utilisateur dans la salle de contrôle qui permet à l'opérateur en charge de la sécurité de visualiser tous les mouvements de personnes dans la caverne expérimentale. Un logiciel a également été développé afin de suivre activement le déplacement de chaque personne dans la caverne et ainsi de pouvoir détecter la « disparition » d'une personne et générer une alerte par un algorithme complexe

couplé à une définition précise de l'ensemble des chemins possibles dans la caverne. La visualisation des personnes est utilisée par l'opérateur en charge de la sécurité du détecteur. Cet outil s'avère très utile pour par exemple vérifier qu'une zone interdite au personnel n'est pas visitée, ou pour contrôler que le personnel a bien quitté la caverne lors d'une alerte d'évacuation. FPIAA ne se substitue cependant pas aux patrouilles systématiques faites lors de la fermeture de la caverne avant l'injection du faisceau. L'algorithme de suivi actif des personnes fonctionne de façon stable à l'intérieur du détecteur et il est prévu de l'utiliser lors de la prochaine période de maintenance. L'utilisation de matériel commercial et la flexibilité du logiciel fait de FPIAA une application facilement transposable à d'autres types d'environnements et pourrait être utilisé en milieu industriel.

La seconde application spécifique du contrôle de l'infrastructure de la caverne expérimentale d'ATLAS est la surveillance des radiations ionisantes dans le détecteur. Un réseau de 48 capteurs a été installé dans ATLAS afin de pouvoir mesurer le débit de dose et la fluence de particules reçus par les composants du détecteur. Après leur installation, les capteurs ont été étalonnés sur site et leur comportement en température a été étudié afin de pouvoir effectuer les corrections nécessaires lors des prises de données qui seront faites pendant l'activité du LHC. Plusieurs interfaces utilisateurs ont été produites afin de fournir aux opérateurs une vue de la position des capteurs dans le détecteur ainsi que les débits de dose et les fluences de particules mesurés. Les données sont archivées et seront disponibles pour une analyse offline qui permettra d'une part de comparer les mesures avec les simulations faites lors du développement du détecteur et d'autre part de corrélérer le vieillissement des éléments de détection d'ATLAS avec les débits de dose et les fluences de particules reçus.



**PARTIE 2**  
**ÉTUDES ET DÉVELOPPEMENTS**  
**POUR LE SOUS-DÉTECTEUR ALFA**

# I. LE DÉTECTEUR ALFA

## 1. Introduction

Les détecteurs de particules du projet ALFA (Absolute Luminosity For ATLAS [27]) ont été développés pour déterminer la luminosité absolue au point d'interaction des faisceaux du LHC au niveau du détecteur ATLAS (IP1). Deux groupes de deux stations sont installés à 240 mètres de part et d'autre du détecteur ATLAS pour détecter et mesurer la trajectoire de protons ayant subi une collision élastique au point d'interaction (Figure I-1). Le détecteur ALFA sera utilisé sur un mode de faisceau du LHC à basse luminosité ( $10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) pour fournir un étalonnage au détecteur LUCID. Ce dernier fera une mesure de luminosité relative du faisceau du LHC au point d'interaction d'ATLAS à haute luminosité.

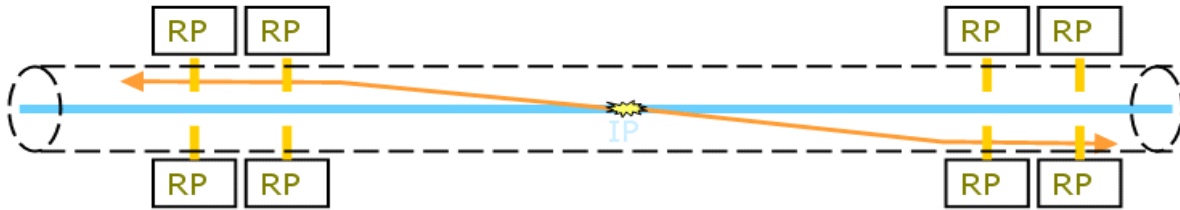


Figure I-1 : Emplacement des stations ALFA pour la détection des protons déviés par une collision élastique

Ainsi la luminosité du faisceau ( $L$ ) peut être déduite du taux de particules déviées élastiquement ( $\frac{dN}{dt}$ ) par [27]:

$$\frac{dN}{dt} = L\pi \times |f_c + f_N|^2 \approx L\pi \times \left| -\frac{2\alpha}{|t|} + \frac{\sigma_{tot}}{4\pi} \times (i + \rho) \times e^{-b|t|/2} \right|^2 \quad \text{i.}$$

Avec  $f_c$  l'amplitude d'interaction électromagnétique et  $f_N$  l'amplitude d'interaction forte qui peuvent être écrites par :

$$f_c = -\frac{2\alpha}{|t|} \quad \text{j.}$$

$$f_N = \frac{\sigma_{tot}}{4\pi} \times (i + \rho) \times e^{-b|t|/2} \quad \text{k.}$$

Avec :

- $|t|$  le transfert d'impulsion (four-momentum) des particules lors de leur interaction en  $\text{GeV}^2$ ,
- $\alpha = 1 / 137$ , la constante de structure fine,
- $\sigma_{tot}$  la section efficace totale d'une interaction proton-proton en mb,
- $\rho = \frac{\text{Re}(f_{el}(|t|=0))}{\text{Im}(f_{el}(|t|=0))}$ ,
- $b$  le paramètre de pente (Slope parameter) de la force forte en  $\text{GeV}^{-2}$ .

Les détecteurs doivent s'approcher à une distance du faisceau de l'ordre du millimètre, l'objectif étant d'atteindre la région d'interférences de Coulomb où l'interaction électromagnétique l'emporte sur l'interaction nucléaire forte. Ainsi, en considérant les équations (j) et (k), on obtient :

$$f_C \equiv f_N \text{ pour } |t| = 0.00065 \text{ GeV}^2 \quad \text{l.}$$

Or, aux petits angles, le transfert d'impulsion peut être écrit en fonction de l'énergie de la particule ( $p$ ) et de l'angle de déviation ( $\theta$ ) par:

$$|t| = (p \times \theta)^2 \quad \text{m.}$$

Ainsi si on considère les équations (l) et (m) et  $p = 7 \text{ TeV}$ , alors la région d'interférence de Coulomb se situe à un angle de déviation de 3,5 microradians, ce qui implique une déviation d'environ 1 mm au niveau du détecteur ALFA.

Dans la région d'interférences de Coulomb, la section efficace totale  $\sigma_{tot}$  est équivalente à la section efficace élastique  $\sigma_{elastique}$ . Ainsi le nombre de protons déviés élastiquement comptés dans le détecteur ALFA peut être écrit de la façon suivante :

$$N = f(a, \varepsilon, \sigma_{elastique}, L) \quad \text{n.}$$

Avec :

- $a$  : l'acceptance définie par la géométrie du détecteur et le taux de protons perdus entre le point d'interaction d'ATLAS et le détecteur ALFA (données simulées)
- $\varepsilon$  : l'efficacité de détection du détecteur ALFA déterminée par la caractérisation préalable du détecteur

Ainsi avec une bonne connaissance théorique de la section efficace élastique, il devient possible de déterminer la luminosité absolue du faisceau du LHC au point d'interaction d'ATLAS (L) avec le comptage de protons déviés élastiquement effectué par ALFA.

Chaque station est constituée de deux *Pots Romains* (nommés ainsi car le concept a été inventé par une collaboration du CERN avec un institut situé à Rome) placés respectivement en dessous et au dessus de l'axe du faisceau. Chaque Pot Romain (Figure I-2) accueille les éléments de détection, l'électronique frontale ou Front-End ainsi que la partie mécanique qui permet le déplacement vertical de l'ensemble pour approcher le faisceau.

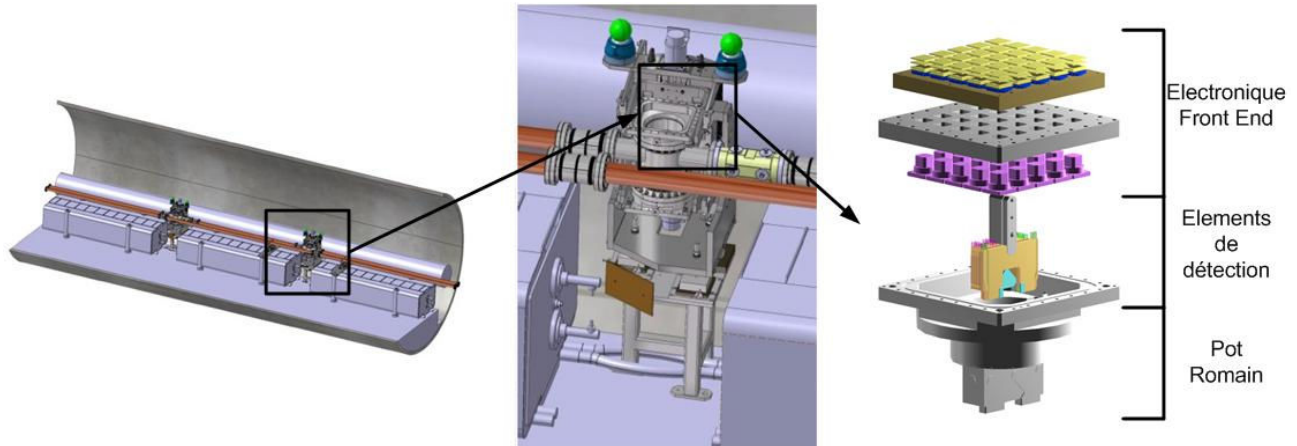


Figure I-2 : Vue générale d'un Pot Romain

## 2. Description du détecteur

### 2.1. Détection de particules

#### 2.1.1. Exigences et choix technologique

La technologie de détection de particules utilisée pour les détecteurs ALFA doit répondre à plusieurs exigences relatives aux conditions de mesures requises et à l'environnement du détecteur :

- La zone non sensible aux particules au bord des détecteurs doit être minimisée afin de pouvoir approcher le faisceau au plus près et ainsi pouvoir mesurer les déviations de particules à petit angle. Cela implique de minimiser l'épaisseur de la fenêtre métallique qui sépare le détecteur du faisceau afin de le placer dans un vide secondaire (voir paragraphe 2.1.2).
- La résolution spatiale du détecteur doit être significativement plus petite que le diamètre apparent du faisceau au niveau des détecteurs. Avec un diamètre apparent du faisceau de  $130 \mu\text{m}$ , une résolution spatiale de  $30 \mu\text{m}$  est considérée comme suffisante.
- Le détecteur doit pouvoir résister aux radiations induites par le faisceau. Dans le cas des détecteurs ALFA, le niveau de radiation intégré est largement dominé par le halo du faisceau qui a été estimé entre 10 et 100 Gy/an à une luminosité de  $10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Une tolérance aux radiations de 100 Gy/an est donc suffisante.
- Les détecteurs doivent être insensibles au bruit électromagnétique généré par le passage des paquets de protons du faisceau. Pour cela, il faut choisir des détecteurs peu sensibles au bruit électromagnétique ou blinder les détecteurs, en sachant que le blindage risque d'augmenter la « zone morte » de celui-ci (cf. point 1).

La technologie de détection choisie est basée sur l'utilisation de fibres scintillantes qui remplissent toutes les conditions citées ci-dessus. En effet, les fibres en plastique scintillant sont intrinsèquement des détecteurs de particules sans bord inactif. De plus, elles sont insensibles au bruit électromagnétique généré par le faisceau du LHC et ne nécessitent pas de système de refroidissement, ce qui facilite leur mise en oeuvre sous vide et leur intégration dans les Pots Romains. En outre, la tolérance aux radiations des fibres sélectionnées a été testée et validée en laboratoire [28].

### 2.1.2. Le détecteur principal

Les fibres scintillantes sont carrées et ont une section de  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ . Elles sont arrangées en plans de 64 fibres, collées sur un substrat en titane, dans un référentiel UV qui subit une rotation de  $45^\circ$  par rapport au référentiel XY représentant les axes perpendiculaires à l'axe du faisceau (Figure I-3).

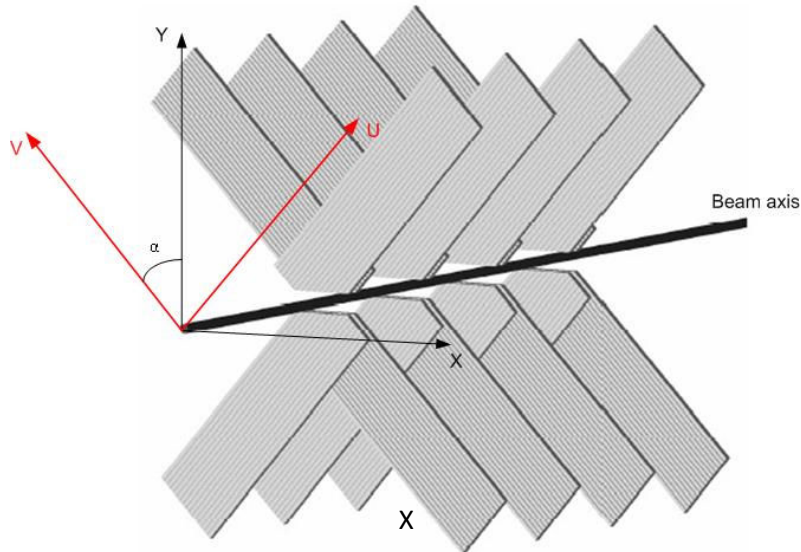


Figure I-3 : Principe d'un détecteur à fibres scintillantes avec 4 plans en géométrie UV

Chaque détecteur est composé de deux fois 10 plans (U et V) décalés entre eux par des multiples de  $\delta = 70.7 \text{ }\mu\text{m}$  (o) et qui sont assemblés à l'aide de lames métalliques sur des axes de précision pour obtenir un pas effectif des fibres de  $50 \text{ }\mu\text{m}$  dans le plan (X, Y).

$$\delta = \frac{l}{n \times \cos \alpha} = \frac{500 \text{ }\mu\text{m}}{10 \times \cos 45} = 70.7 \text{ }\mu\text{m} \quad \text{o.}$$

avec  $l$  la largeur des fibres,  $n$  le nombre de plans et  $\alpha$  l'angle de rotation du référentiel (U, V) par rapport au référentiel (X, Y).

Comme le montre la Figure I-4, dix supports en titane accueillant deux plans de fibres (U et V) sont assemblés sur un bras métallique qui est suspendu à une flasque étanche dans le Pot Romain. Le détecteur est isolé du vide poussé du tube du faisceau par une fenêtre en inox (316L) de  $200 \text{ }\mu\text{m}$  d'épaisseur. Un vide secondaire de l'ordre de l'hectopascal est maintenu dans le Pot pour minimiser la différence de pression entre le Pot et le tube du faisceau. Les paquets de fibres scintillantes (non représentés sur la figure) sont amenés sur la flasque étanche pour être assemblés sur des connecteurs optiques qui assurent l'interfaçage avec les photo-détecteurs et l'électronique de conversion du signal.

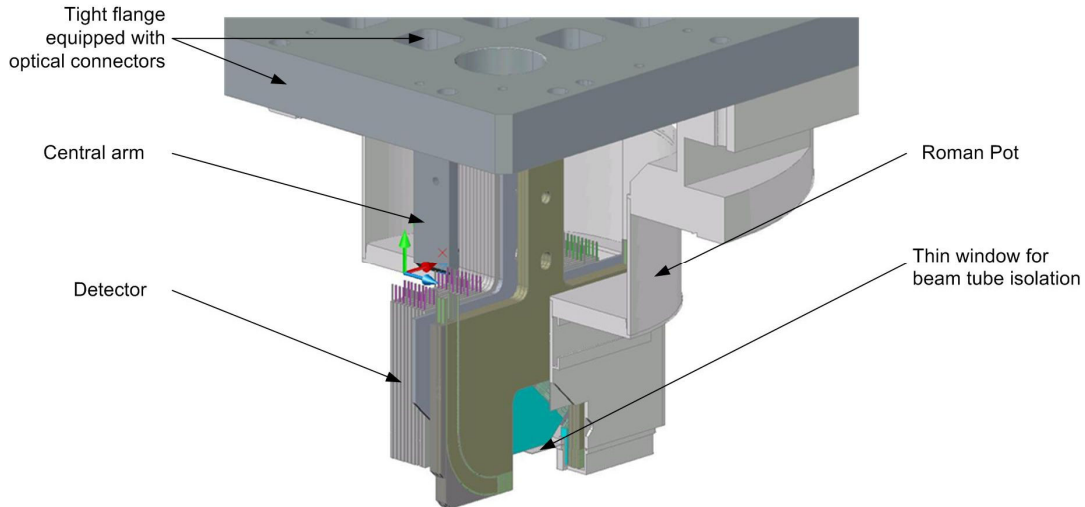


Figure I-4 : Vue en coupe d'un pot romain équipé de son détecteur (routage des fibres sur la flasque étanche omis)

Les performances du détecteur principal ont été évaluées lors d'un test à DESY en 2005 sur un faisceau d'électrons à 6 GeV [29] où une résolution spatiale de 36  $\mu\text{m}$  a été mesurée avec une efficacité de reconstruction de 99%. Les résultats d'un second test fait au CERN en 2006 [30] sur un faisceau de protons à 230 GeV ont démontré une résolution de 26  $\mu\text{m}$  avec une efficacité de reconstruction de 96%. Ces résultats sont en accord avec la résolution requise pour l'exploitation du détecteur ALFA. Ces expériences ont été faites avec des détecteurs partiels de deux fois 10 couches de 16 fibres scintillantes.

### 2.1.3. Les détecteurs de la région de chevauchement « Overlap »

La position réelle du faisceau de protons au niveau des détecteurs ALFA peut varier dans une fenêtre de quelques millimètres, il est donc nécessaire de pouvoir positionner les détecteurs supérieurs et inférieurs de chaque station relativement à la position réelle du faisceau. Un premier positionnement des détecteurs est effectué en tenant compte des données des BPM (Beam Position Monitor) [31] situés dans l'environnement immédiat des stations ALFA.

Ensuite, la position relative des deux détecteurs est précisément évaluée à l'aide des détecteurs Overlap. Deux détecteurs Overlap sont installés de part et d'autre des détecteurs principaux des Pots inférieurs et supérieurs de chaque station.

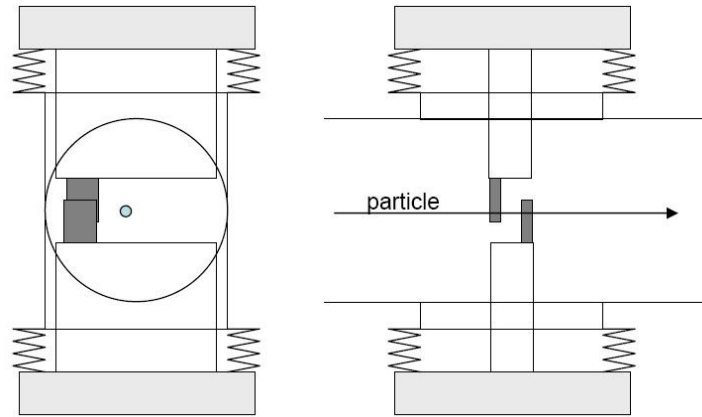


Figure I-5 : Schéma de principe des Overlap avec une paire de détecteurs pour mesurer la position relative des deux Pots

Ils mesurent uniquement une coordonnée verticale ( $Y$ ) à l'aide de 3 couches de 30 fibres scintillantes disposées dans le plan horizontal. Les détecteurs Overlap du Pot inférieur et supérieur se recouvrent et détectent les particules du halo du faisceau (Figure I-5). La reconstruction des traces de ces particules permet alors de mesurer la position relative des Pots par accumulation statistique avec une précision qui dépend de trois facteurs : la résolution spatiale des détecteurs Overlap, le nombre de particules détectées (plusieurs centaines de milliers d'événements) et l'incertitude de positionnement des détecteurs Overlap avec le détecteur principal auquel ils sont attachés. Ces instruments de positionnement ont été étudiés lors d'un test faisceau sur une zone de test du SPS (Super Proton Synchrotron) au CERN en décembre 2006 [30].

La transmission des signaux lumineux issus des fibres scintillantes des détecteurs Overlap est basée sur le même principe que le détecteur principal : les fibres sont routées vers trois connecteurs optiques et sont couplées à trois photomultiplicateurs multi-anodes (MAPMT) 64 canaux sur la flasque étanche.

#### 2.1.4. Les compteurs de déclenchement

Des compteurs Trigger, qui déclenchent l'acquisition de données, sont installés devant le détecteur principal et les détecteurs Overlap. Ils définissent leur aire active, ceci est d'autant plus important que les fibres sont scintillantes sur toute leur longueur, y compris la partie uniquement utilisée comme guide de lumière. Des scintillateurs plastiques ont été choisis, ils sont connectés à un photomultiplicateur monocanal par l'intermédiaire de fibres optiques. Une étude détaillée des compteurs Trigger est présentée dans le Chapitre II.

## 2.2. Conversion du signal

### 2.2.1. Conversion photo-électrique

La conversion photoélectrique du signal lumineux issu des fibres scintillantes est faite par des photomultiplicateurs multicanaux qui sont couplés aux connecteurs optiques. Les photo-détecteurs sont un élément clé du détecteur ALFA pour lesquels les performances suivantes sont requises :

- Une bonne efficacité quantique à la longueur d'onde de scintillation maximale des fibres (le spectre d'émission des fibres choisies<sup>1</sup> a une bande passante allant de 415 à 550 nm avec un maximum à 440 nm).
- La possibilité de détecter les photoélectrons uniques, donc de pouvoir les discriminer du bruit. Cela implique un gain important ( $> 10^6$ ).
- Un débordement de canal à canal (cross-talk) faible ( $< 3\%$ ) car c'est une source de bruit sur l'acquisition de données.

Le MAPMT 64 canaux R7600 de Hamamatsu [32] a été sélectionné pour le détecteur ALFA, ses performances ont en outre été validées en laboratoire (cf. chapitre II).

### 2.2.2. *Electronique frontale*

Chaque MAPMT (23 au total par Pot) possède sa propre électronique Front-End (Photo Multiplier Front-end, PMF). Elle est composée de trois PCB (Printed Circuit Board) montés en sandwich directement sur le MAPMT :

- Une première carte reçoit la haute tension nécessaire au fonctionnement du MAPMT et la distribue sur ses étages de dynodes (voir Chapitre II)
- Une carte active sur laquelle se trouvent un FPGA<sup>2</sup> et une puce (ASIC) MAROC (Multi-Anode Read-Out Chip) [33].
- Une carte intermédiaire passive qui assure la connectivité des signaux de sortie du MAPMT avec les entrées de la carte active.

La puce MAROC (Figure I-6) est un ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 64 canaux développé au LAL (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire) à Orsay.

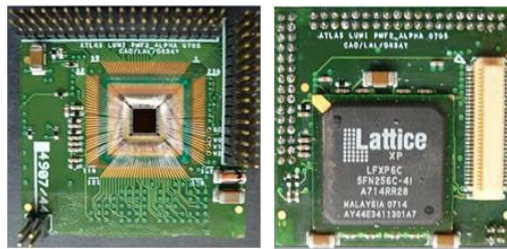


Figure I-6 : Carte active du PMF - Gauche: puce MAROC - Droite: FPGA

Pour chaque canal, le signal du MAPMT est d'abord amplifié par un préamplificateur à gain variable (6 bits) qui permet de compenser les dispersions de gain entre les canaux du MAPMT (jusqu'à un facteur 4). Puis le signal est transmis à un circuit de mise en forme rapide (Fast Shaper) (15 ns) suivi d'un discriminateur (ADC 10 bits) dont la sortie déclenche une conversion binaire du signal.

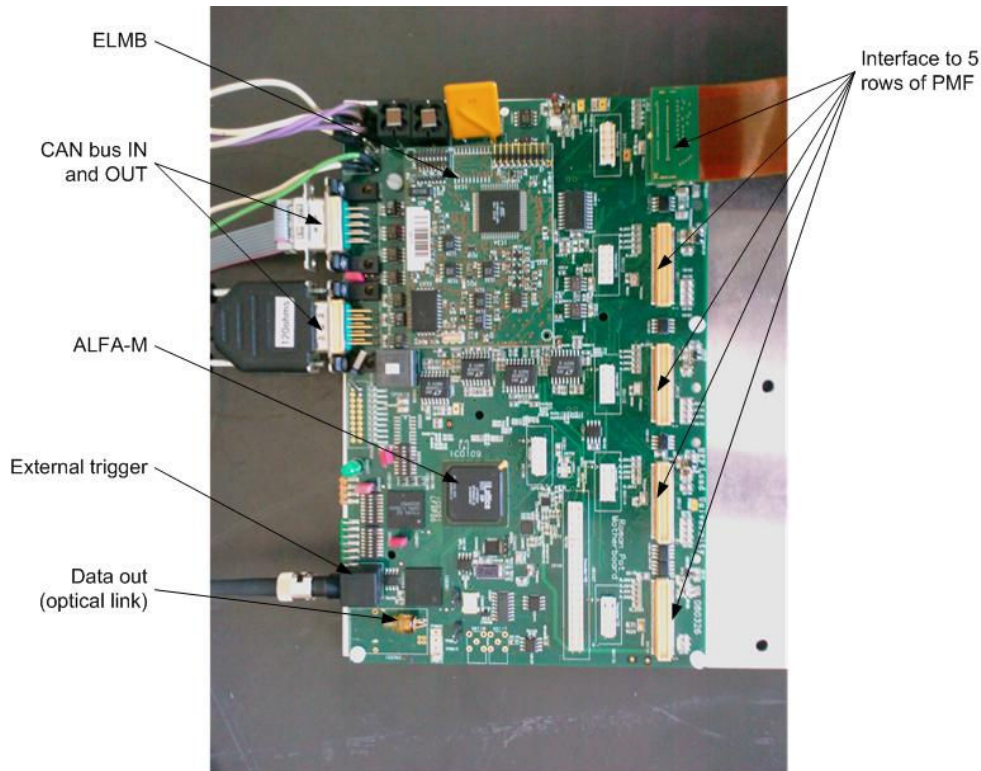
<sup>1</sup> Kuraray SCSF-7, S-type, 0.5x0.5 mm<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Lattice LC5768MC



En parallèle, un Slow Shaper combiné avec deux mémoires analogiques (Sample and Hold, 5 MHz) peut fournir une mesure analogique du signal (les 64 canaux sont alors multiplexés) avec une pleine échelle de cinq pico Coulomb.

Le FPGA est utilisé comme interface entre la puce MAROC et la carte mère (une carte mère par Pot, donc pour 23 PMF). Il assure la transmission des données de configuration (gains, seuils de déclenchement, cf. chapitre 4) et traite les données acquises par la puce MAROC. Les PMF sont connectés par rangées de cinq sur des nappes en Kapton à la carte mère. La carte mère (Figure I-7) a pour fonction l'acquisition de données et la configuration des 23 PMF du Pot Romain, la conversion analogique / numérique des signaux provenant des compteurs Trigger ainsi que le contrôle des paramètres locaux (tensions, courants, température). Les opérations effectuées sur la carte mère sont contrôlées par un FPGA<sup>3</sup> (ALFA-M) et un ELMB (voir Partie 1, Chapitre 1, paragraphe 2.1) assure la configuration des PMF et le contrôle des paramètres locaux du Pot Romain (voir chapitre 4). Une interface optique est prévue pour transférer les données acquises vers un rack d'électronique situé dans les locaux d'électronique de l'expérience ATLAS et deux connecteurs accueillent le bus CAN utilisé pour contrôler l'ELMB.



<sup>3</sup> Lattice LFXP20C

### 3. Schéma global et services du détecteur

Le détecteur ALFA est composé du système de détection, les Pots Romains, et de services qui sont nécessaires à son exploitation. L'architecture globale du détecteur est présentée dans la Figure I-8. Chaque Pot Romain est équipé d'un système permettant de le déplacer verticalement pour lui permettre d'approcher le faisceau. Un système mécanique composé d'un moteur pas à pas, de capteurs de position et de contacteurs est contrôlé et monitoré par un châssis PXI<sup>4</sup> situé dans un local d'électronique du détecteur ATLAS. Le contrôle du mouvement des Pots Romains est effectué par les opérateurs du LHC.

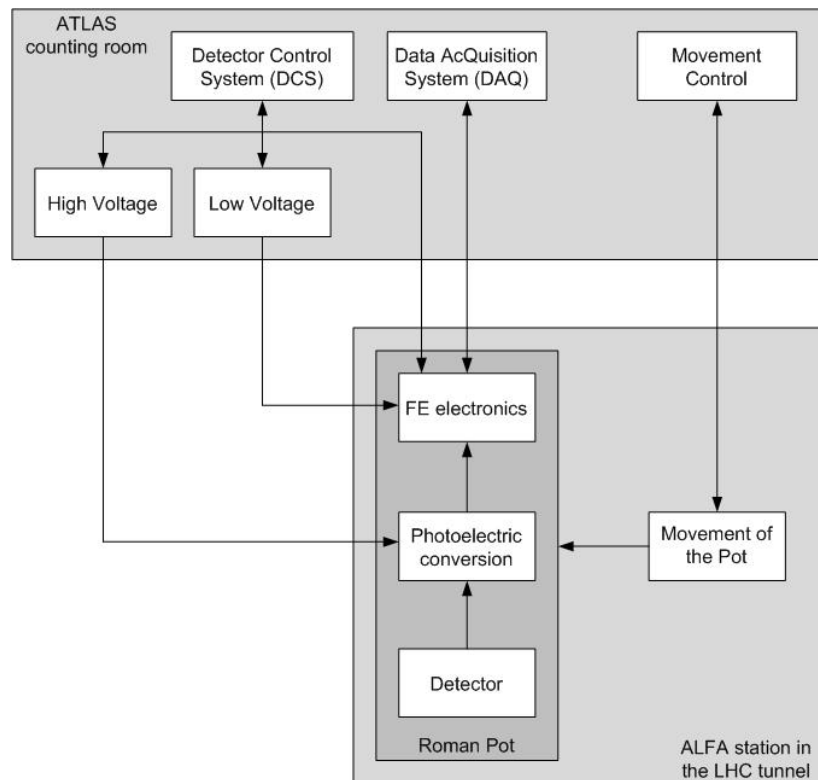


Figure I-8 : Schéma global du détecteur ALFA

Le détecteur possède également un système de contrôle qui sera intégré dans le système de contrôle global d'ATLAS comme sous-détecteur, il permet de configurer l'électronique FE, de monitorer les paramètres du détecteur et de contrôler les systèmes d'alimentation. Enfin le système d'acquisition standard du détecteur ATLAS synchronise les acquisitions de données avec les déclenchements des compteurs Trigger et gère le traitement et l'archivage des données.

<sup>4</sup> National Instruments

## 4. Conclusion

Le détecteur ALFA est actuellement en phase finale de construction. Le principe de détection de particules a été validé par plusieurs tests faisceaux et les huit détecteurs sont en cours d'assemblage. La mécanique des huit Pots Romains est en phase de test final. Les services du détecteur sont en cours de développement en laboratoire, avant de pouvoir être finalisés lorsque le détecteur sera installé sur le LHC. La première station devrait pouvoir être installée avant le redémarrage du LHC en 2009.

J'ai participé au test faisceau fait en 2006, mentionné dans ce chapitre, ainsi qu'à l'analyse des données qui a eu pour but de valider les performances du détecteur principal d'ALFA. Je travaille actuellement sur l'analyse des données d'un second test faisceau fait en 2008 qui a pour but de confirmer les performances du détecteur dans sa forme finale. Cependant, les performances de la carte mère n'étaient pas optimales lors de cette dernière expérimentation et un nouveau test faisceau, auquel je participe, avec une carte mère optimisée, est en cours de préparation. Les chapitres suivants présentent en détails les autres travaux que j'ai effectués pour le développement du détecteur ALFA. Tout d'abord, une étude de performances du système de photo-détection du détecteur va être présentée avec pour but de confirmer les caractéristiques des photomultiplicateurs choisis. Ensuite, une étude consistant à affiner les choix technologiques des compteurs Trigger du détecteur ALFA et de proposer des alternatives au matériel actuellement utilisé va être présentée. Enfin, le système de contrôle du détecteur va être décrit en détails et plusieurs développements spécifiques à ALFA vont être présentés.

## II. Conversion photo électrique

La lumière émise par les fibres scintillantes du détecteur ALFA à chaque passage de particules est collectée et transformée en signal électrique par des photomultiplicateurs multicanaux (MAPMT). Les MAPMT sont le premier étage d'acquisition du signal du détecteur, leurs caractéristiques doivent donc être connues afin de garantir une efficacité de détection optimale des signaux bruts par l'électronique FE de traitement du signal.

Ce chapitre propose une description des caractéristiques d'un photomultiplicateur suivie d'une étude expérimentale faite en laboratoire sur le modèle de MAPMT choisi pour le détecteur ALFA afin de confirmer que ses performances sont conformes au cahier des charges.

### 1. Description et caractéristiques d'un photomultiplicateur

Un photomultiplicateur (Figure II-1) est composé tout d'abord d'une photocathode qui convertit les photons issus de la scintillation en électrons par effet photoélectrique. Les électrons sont ensuite accélérés par un jeu d'électrodes et multipliés dans une cascade de dynodes placées sous vide d'air par émission d'électrons secondaires. Au bout de la chaîne de dynodes, une anode collecte les électrons produits et fournit le signal de sortie du photomultiplicateur.

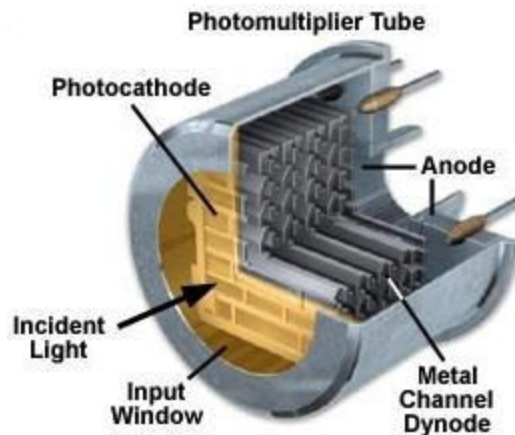


Figure II-1 : Schéma d'un photomultiplicateur

L'exemple présenté ici représente un photomultiplicateur monocanal. Les MAPMT utilisés dans le détecteur ALFA (Figure II-2) sont construits de la même manière mais contiennent 64 canaux représentant une matrice de 8x8 pixels de 2,3 mm de côté. Les 64 étages de dynodes connectés à 64 anodes sont placés derrière une photocathode unique.

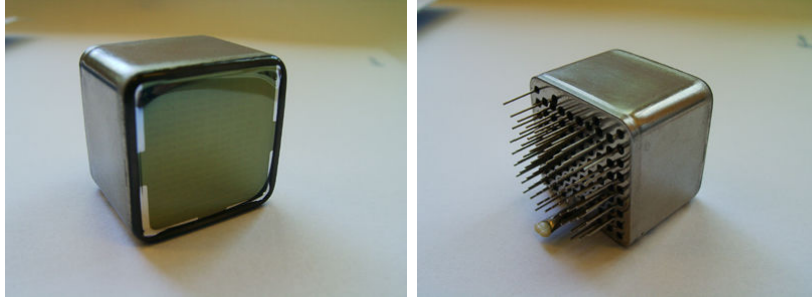


Figure II-2 : MAPMT Hamamatsu R7600

### 1.1. Emission photoélectrique – Principe de la photocathode

A basse énergie, l'émission photoélectrique est le résultat de l'interaction entre un photon et la structure cristalline d'un semi-conducteur. Pour qu'un électron soit émis par la photocathode, le photon incident doit avoir une énergie au moins égale au seuil de photoémission  $W_{ph} = E_g + E_a$ .  $E_g$  est l'énergie nécessaire à l'électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction et  $E_a$  est l'affinité électronique de la bande de conduction. L'électron doit conserver une énergie supérieure à  $W_{ph}$  lors de son trajet jusqu'au bord de la photocathode en considérant les pertes d'énergie dues aux interactions essentiellement avec les atomes du matériau. En effet, la bande de conduction d'un semi-conducteur est pratiquement vide, la probabilité qu'un électron excité interagisse avec un autre électron libre est donc très faible. Le libre parcours moyen entre deux collisions varie entre 2,5 nm et 5 nm et l'énergie perdue par collision est en moyenne de 0,05 eV.

Les MAPMT ont une photocathode semi-conductrice Bi-Alkali ( $K_2CsSb$ ) et semi transparente qui permet de collecter les électrons sur la face opposée à celle qui collecte la lumière. Le rapport entre le nombre de photoélectrons émis  $n_p$  par la photocathode et le nombre de photons incidents  $n_i$  est l'efficacité quantique (QE), c'est une des caractéristiques principales du MAPMT qui est dépendante de la longueur d'onde des photons, définie par :

$$QE(\lambda) = \frac{n_p}{n_i} \quad \text{p.}$$

### 1.2. Acquisition et amplification du signal

La quantité d'électrons fournie par la photocathode n'est pas suffisante pour être directement mesurable, c'est pourquoi le signal est amplifié à travers une chaîne de dynodes.

Les électrons issus de la photocathode sont d'abord collectés par la première dynode. L'efficacité de collection ( $\eta$ ) du MAPMT est le rapport entre le nombre d'électrons collectés par la première dynode  $n_d$  et le nombre de photoélectrons émis par la photocathode  $n_p$  :

$$\eta(\lambda) = \frac{n_d}{n_p} \quad \text{q.}$$

L'efficacité de collection du MAPMT est directement liée à la vitesse initiale des électrons, et donc à la longueur d'onde des photons ainsi qu'à la géométrie interne du MAPMT et de sa première dynode. Elle dépend également de l'intensité du champ électrique produit entre la photocathode et la première dynode, et donc de la tension appliquée entre celles-ci.

Comme le montre la Figure II-3, les électrons collectés sur la première dynode sont ensuite dirigés vers les étages inférieurs. Les dynodes sont agencées de telle façon que les émissions secondaires issues des électrons incidents soient dirigées sur l'étage de dynodes inférieur, ainsi se fait la multiplication.

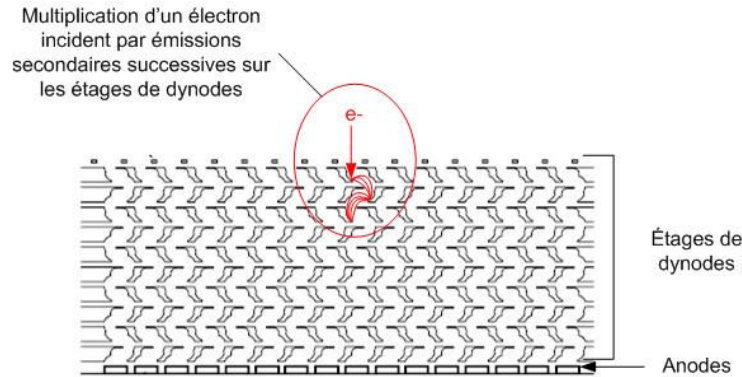


Figure II-3 : Trajet d'un électron sur les étages de dynodes d'un MAPMT

Les  $n$  étages de dynodes sont alimentés par une haute tension  $V_{HT}$  (typiquement 900 V). Cette tension est appliquée sur un pont diviseur pour être fractionnée sur chaque étage de dynodes avec un coefficient multiplicateur  $k_i$ , pour obtenir un gain  $G$  :

$$G = \prod_{i=1}^n (k_i \times V_i^\alpha) \quad r.$$

où  $\alpha$  est un coefficient déterminé empiriquement et varie entre 0.6 et 0.8. Cette approche est valable si on considère l'efficacité de collection de la première dynode comme quasiment égale à 100% et s'il n'y a pas de saturation de charges d'espaces dans les derniers étages de dynodes.

On peut définir le gain du photomultiplicateur de façon plus générale en fonction de l'efficacité de collection de la première dynode  $\eta$ , ainsi que de chaque étage de multiplication  $\eta_i$  et du coefficient d'émission secondaire de chaque étage de dynode  $\delta_i$ , qui est proportionnel à la tension appliquée :

$$G = \eta \times \prod_{i=2}^n (\delta_i \times \eta_i) = \eta \times \prod_{i=2}^n g_i \quad s.$$

où  $g_i$  est le gain de l'étage  $i$ .

L'équation (s) indique que l'efficacité de collection du photomultiplicateur reste corrélée à son gain. Aucune méthode non invasive de mesure absolue de l'efficacité de collection n'a encore été mise au

point. Les efficacités de collections des étages de dynodes  $\eta_i$  sont intégrées aux gains de chaque étage et l'efficacité de collection de la première dynode  $\eta$  est un facteur de réduction du gain global du photomultiplicateur.

### 1.3. Réponse du photomultiplicateur

Après amplification, les électrons produits sont finalement collectés sur l'anode de chaque canal, ils constituent alors le signal de sortie du photomultiplicateur, avec les caractéristiques suivantes :

- Le temps de transit  $T$  des électrons dans le photomultiplicateur, c'est-à-dire l'intervalle de temps entre l'arrivée de l'impulsion lumineuse sur la photocathode et la collection de l'impulsion électrique correspondante sur l'anode,
- le temps de montée  $t_r$  (rise) et le temps de descente  $t_f$  (fall) du signal, c'est-à-dire le temps nécessaire au courant d'anode pour monter/descendre de 10% à 90% de sa valeur maximale.

## 2. Etude expérimentale d'un MAPMT

Les caractéristiques du photomultiplicateur R7600 64 canaux de Hamamatsu qui sera utilisé sur les stations du détecteur ALFA sont étudiées ici. Ce photomultiplicateur est une matrice de 8 x 8 canaux de 2,3 mm de côté. Sa photocathode couvre une surface de 18,4 x 18,4 mm<sup>2</sup>. Les caractéristiques de ce photomultiplicateur sont étudiées expérimentalement dans ce paragraphe.

### 2.1. Efficacité quantique

L'efficacité quantique de la photocathode du MAPMT est quantifiée en mesurant le courant, donc la quantité d'électrons qui est extrait de la photocathode ( $p$ ), en réponse à une impulsion lumineuse monochromatique, sous l'influence du champ électrique généré par une différence de potentiel entre la photocathode et la première dynode (Figure II-4)

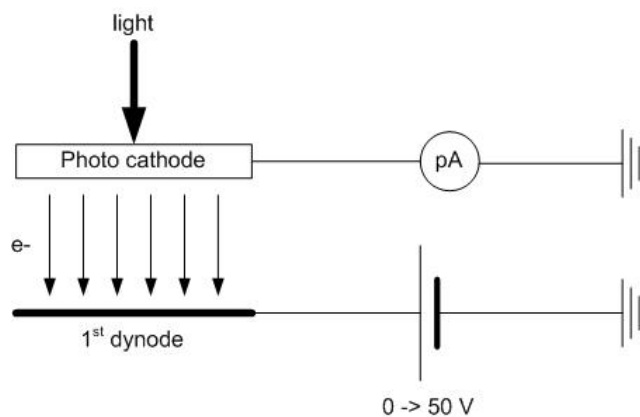


Figure II-4 : Principe de mesure de l'efficacité quantique

Le montage expérimental (Figure II-5) utilisé pour mesurer l'efficacité quantique (QE) est composé d'une source de lumière au Xénon, d'un double monochromateur (Jobin Yvon DH-10) qui permet de

sélectionner la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière incidente, d'une photodiode calibrée (Newport type 818-UV) qui est utilisée comme référence, ainsi que d'un miroir rotatif qui permet de diriger la lumière alternativement vers la photodiode et vers le MAPMT. Le tout est installé dans une boîte noire qui préserve l'expérience de la lumière ambiante.

Un pico ampèremètre pilote la tension appliquée entre la photocathode et la première dynode du MAPMT ainsi que la lecture du courant généré par le flux d'électrons extraits de la photocathode. Une interface Labview pilote le pico ampèremètre via une interface GPIB et le double monochromateur via une interface RS232.

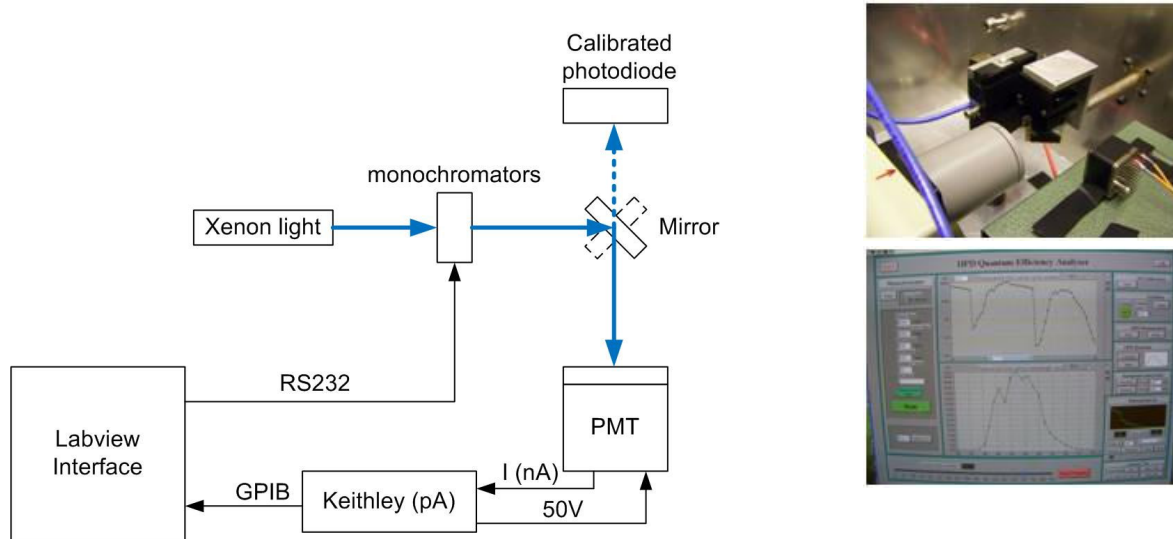


Figure II-5 : Montage expérimental pour l'évaluation de l'efficacité quantique du MAPMT

L'efficacité quantique de la photodiode calibrée (diode PIN silicium) est connue avec une précision de +/-2%. Le graphique présenté en Figure II-6 montre sa courbe d'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière monochromatique incidente.

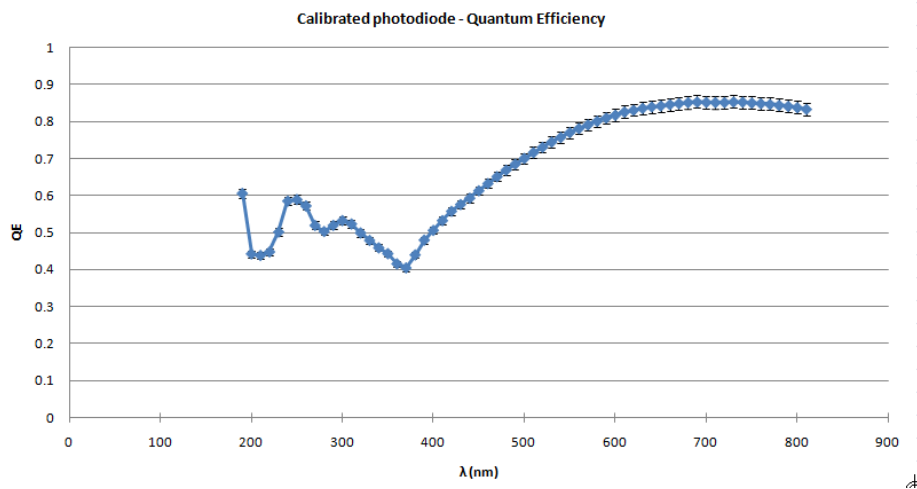


Figure II-6 : Efficacité quantique de la photodiode en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente



L'efficacité quantique du MAPMT peut être calculée par :

$$QE_{MAPMT}(\lambda) = \frac{QE_{diode}(\lambda) \times I_{MAPMT}(\lambda)}{I_{diode}(\lambda)} \quad t.$$

avec  $\lambda$  (nm)  $\in [200; 700]$  par pas de 20 nm.

L'efficacité quantique de la photodiode étant connue, il suffit donc de mesurer le photo-courant généré par celle-ci et par le MAPMT en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente.

Cependant, avant d'effectuer cette expérience, il faut s'assurer que tous les électrons extraits de la photocathode du MAPMT sont effectivement collectés. Ce facteur dépend de l'intensité du champ électrique entre la photocathode et la première dynode, et donc de la tension appliquée à la première dynode.

Une première série de mesures est donc effectuée pour évaluer la tension minimale nécessaire sur la première dynode qui garantit une extraction totale des électrons.

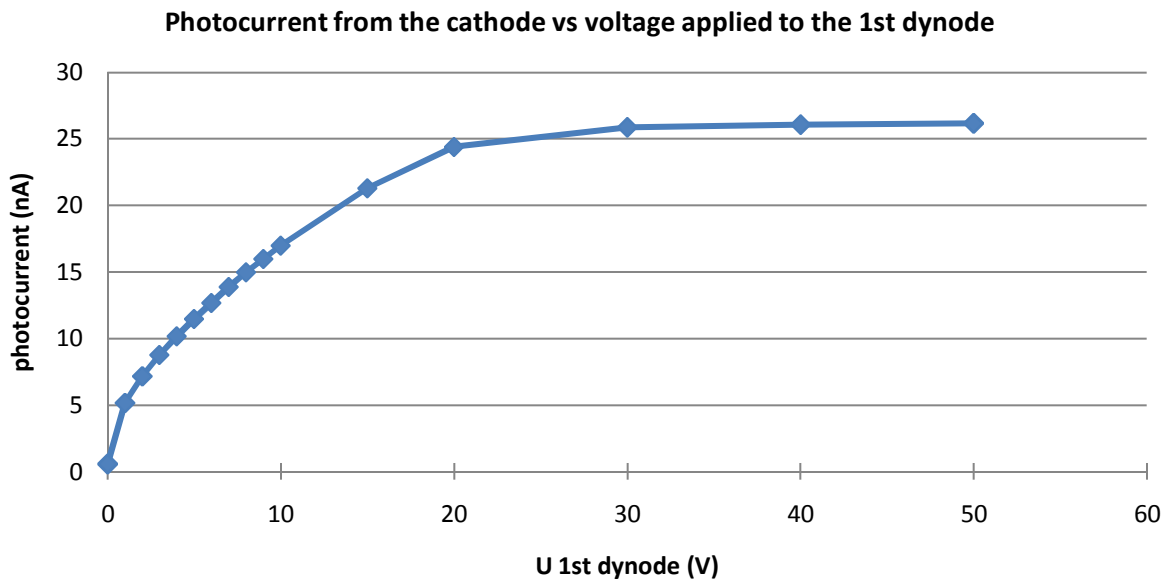


Figure II-7 : Courant mesuré entre la photocathode et la première dynode en fonction de la tension appliquée

La Figure II-7 montre une saturation du photo-courant, et donc du nombre d'électrons extraits à partir d'une tension de 30V sur la première dynode. Nous sommes donc sûrs d'être dans un mode d'extraction maximale des électrons à partir de cette tension, et une tension de 50V sera choisie pour les expériences suivantes.

La Figure II-8 montre une première série de mesure avec la photodiode qui permet d'établir l'intensité du photo-courant  $I_{diode}(\lambda)$  en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente.

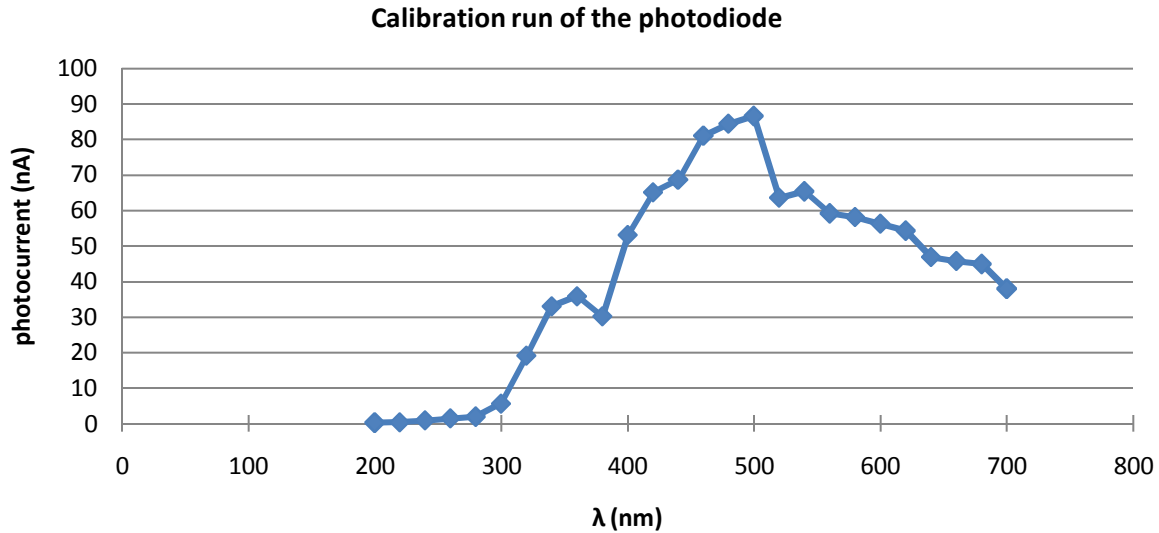


Figure II-8 : Photo-courant mesuré aux bornes de la photodiode en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente

Une seconde série de mesures est effectuée dans les mêmes conditions avec le MAPMT. Elle permet de connaître le photo-courant du MAPMT  $I_{\text{MAPMT}}(\lambda)$  en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente et de calculer son efficacité quantique ( $s$ ) avec les résultats précédents sur la photodiode.

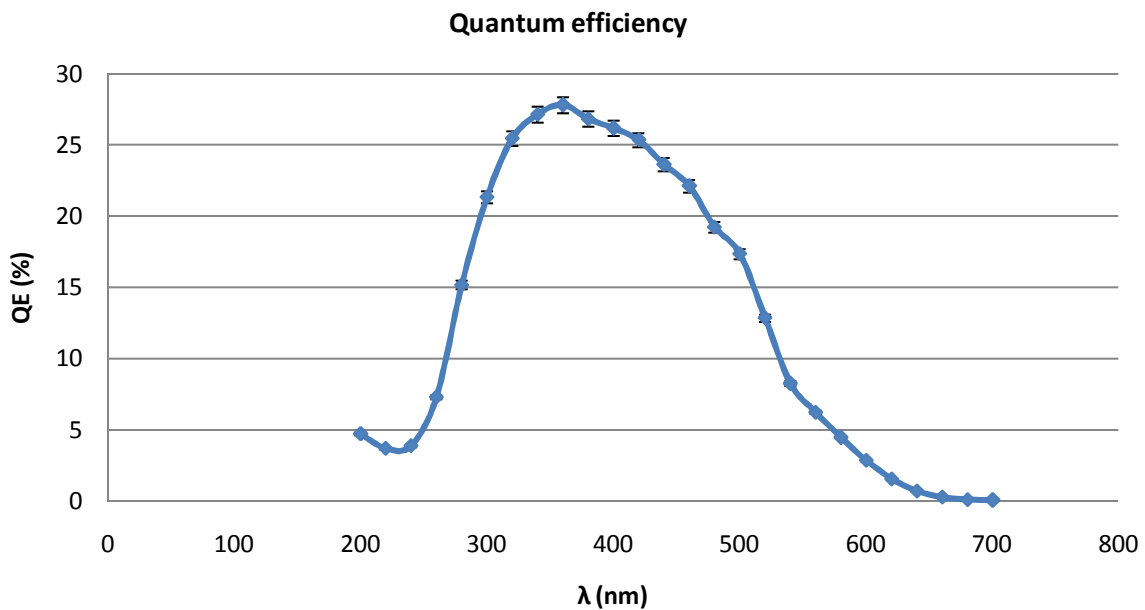


Figure II-9 : Efficacité quantique du MAPMT en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente

La Figure II-9 présente l'efficacité quantique du MAPMT en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. On observe un maximum à  $\lambda = 360$  nm, ce qui est typique d'une photocathode Bialkali. A cette longueur d'onde, l'efficacité quantique est de 28%, ce qui correspond aux données constructeur (entre 25% et 28%). La chute rapide de l'efficacité quantique de la photocathode pour une longueur

d'onde  $\lambda < 350$  nm est due à la baisse du taux de transmission de la lumière par la fenêtre du MAPMT dans le proche ultraviolet. La légère augmentation d'efficacité quantique pour  $200 \text{ nm} < \lambda < 250$  nm s'explique par la très faible intensité lumineuse à cette longueur d'onde et donc au très faible photo-courant généré aussi bien par le MAPMT que par la photodiode. L'efficacité quantique ( $t$ ) est alors calculée sur la base de deux valeurs très petites, qui sont du même ordre de grandeur que la précision de la mesure. Les valeurs calculées d'efficacité quantique dans cette bande de longueur d'onde n'ont donc pas de signification physique.

En outre, l'efficacité quantique du MAPMT est de 24% à la longueur d'onde d'émission maximale des fibres scintillantes utilisées dans le détecteur ALFA.

## 2.2. Détection du photoélectron unique – Gain

Le gain du MAPMT va être déterminé en s'intéressant à la réponse de celui-ci à des photoélectrons uniques. La Figure II-10 montre le montage expérimental utilisé où une haute tension de 1000 V est appliquée entre la photocathode et les anodes du MAPMT, la réponse de ce dernier étant lue avec un oscilloscope digital (Lecroy LT344). Un générateur d'impulsions alimente une LED bleue (400 nm), qui est utilisée pour fournir la lumière incidente, et déclenche l'acquisition du signal par l'oscilloscope. Les données sont enregistrées dans la mémoire locale de l'oscilloscope, puis sont transférées par GPIB vers un PC.

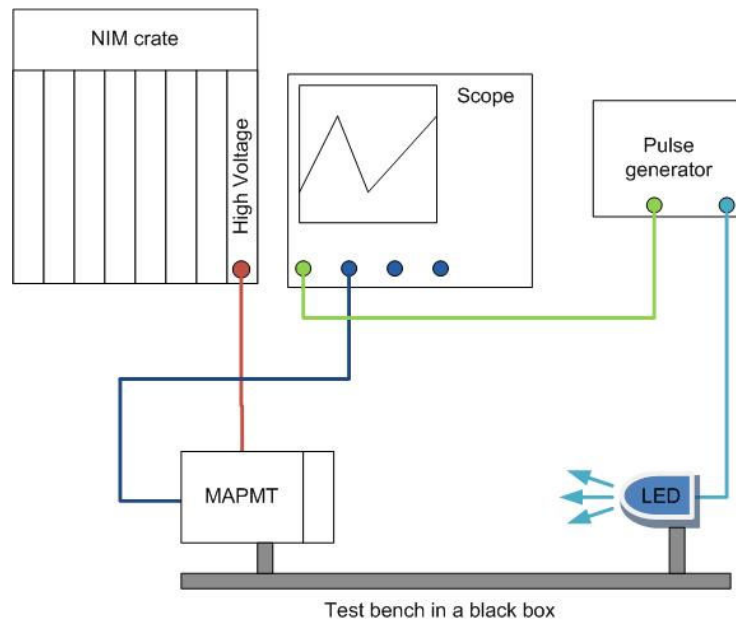


Figure II-10 : Montage expérimental pour l'acquisition d'un canal du MAPMT

Avant de faire cette expérience, il s'agit de quantifier l'intensité lumineuse qui va être fournie pour considérer que le MAPMT va répondre majoritairement à des photoélectrons uniques. Pour cela, la tension d'alimentation de la LED est diminuée jusqu'à ce qu'on observe en moyenne une réponse non nulle du canal du MAPMT tous les cinq triggers.

En effet, la réponse d'un canal du MAPMT à une impulsion lumineuse de faible intensité suit une loi de probabilité de Poisson :

$$P_k^\mu = \frac{e^{-\mu} \times \mu^k}{k!} \quad \text{u.}$$

avec k, le nombre de photoélectrons et  $\mu$  le nombre moyen de photoélectrons.

Si le MAPMT fournit une réponse en moyenne tous les cinq triggers, cela fait une valeur moyenne de  $\mu = 0.2$ . Alors la probabilité d'obtenir une réponse à un photoélectron unique est de (u):

$$P_1^{0.2} = \frac{e^{-0.2} \times 0.2^1}{1!} = 0.164 = 16.4\%$$

Et la probabilité d'obtenir une réponse à deux photoélectrons est de (u) :

$$P_2^{0.2} = \frac{e^{-0.2} \times 0.2^2}{2!} = 0.016 = 1.6\%$$

Avec un tel réglage, on peut alors considérer que les photoélectrons uniques sont majoritaires et étudier la réponse du MAPMT.

La quantité de charge relative à chaque événement est mesurée à l'oscilloscope en intégrant la réponse en tension du MAPMT. La Figure II-11 représente la convention adoptée pour la numérotation des canaux du MAPMT et l'emplacement des deux canaux choisis arbitrairement pour la mesure de gain.

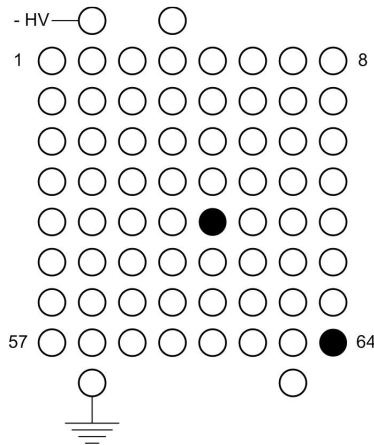


Figure II-11 : Vue arrière du MAPMT – Convention pour la numérotation des canaux du MAPMT (canaux sélectionnés en noir)

Un histogramme est ensuite rempli (Figure II-12) avec les quantités de charge mesurées sur le canal 37 :

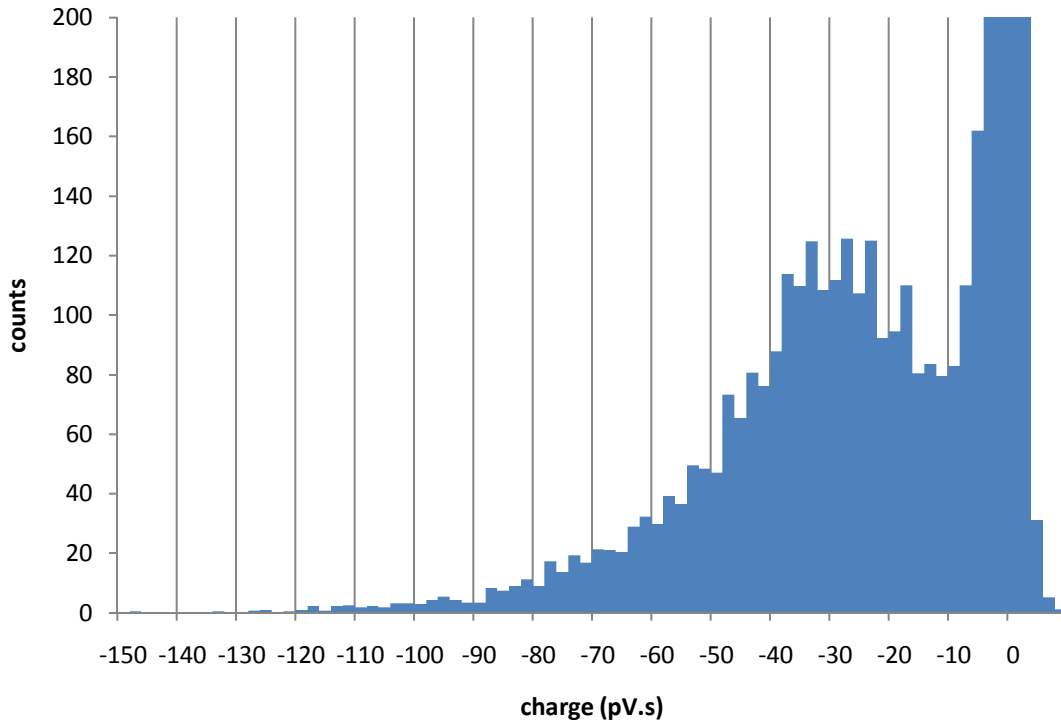


Figure II-12 : Quantité de charge mesurée sur le canal 37 du MAPMT

Nous voyons ici une large contribution du piédestal et le pic secondaire correspond à la réponse aux photoélectrons uniques. Si  $\langle Q \rangle$  est la valeur moyenne de ce pic, on peut alors calculer le gain  $G$  du MAPMT par :

$$G = \frac{\langle Q \rangle}{e} = \frac{\langle I \times t \rangle}{e} = \frac{\frac{U}{Z} \times t}{e} \quad \text{v.}$$

avec  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  et  $Z = 50 \text{ Ohms}$  (Impédance d'entrée de l'oscilloscope).

En calculant la valeur moyenne du pic 1PE du canal 37 sur la Figure II-12 comme étant égal à 29 pV.s à l'aide d'une gaussienne, on obtient un gain pour ce canal de (v):

$$G = \frac{29 \text{ pV.s} / 50 \Omega}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 3.6 \times 10^6$$

Et l'opération est réitérée sur le canal 64 (Figure II-13) :

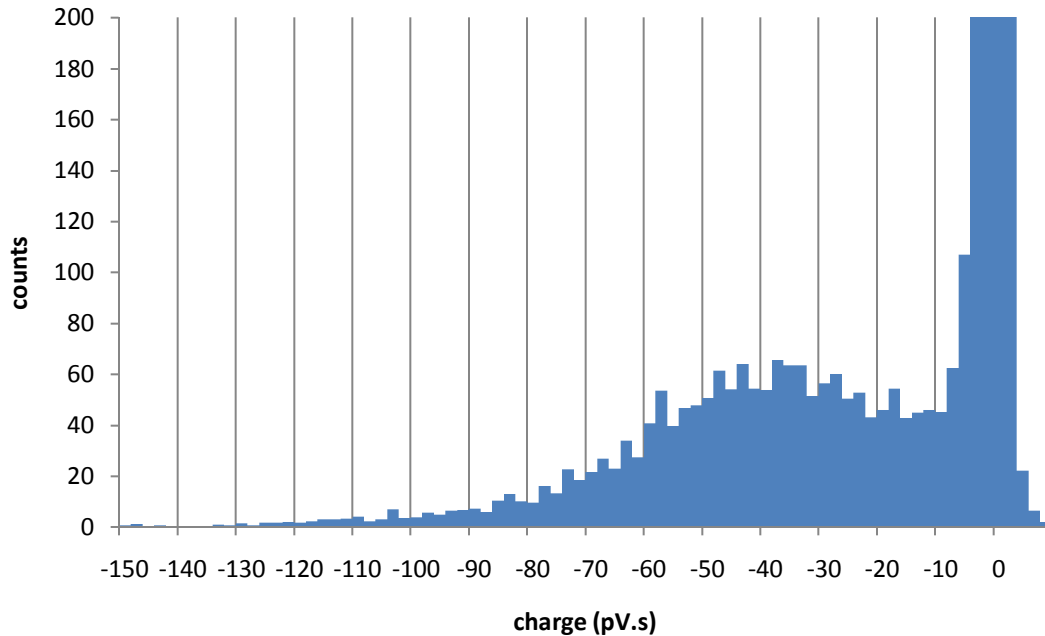


Figure II-13 : Quantité de charge mesurée sur le canal 64 du MAPMT

Une valeur moyenne de 36 pV.s est mesurée sur la Figure II-13, ce qui donne un gain  $G$  (v):

$$G = \frac{36 \text{ pV} \cdot \text{s} / 50 \Omega}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 4.5 \times 10^6$$

Pour ce type de MAPMT, un gain de l'ordre de  $10^6$  est attendu, les résultats de cette expérience confirment ce chiffre.

### 2.3. Caractéristiques du signal

Le montage expérimental présenté dans le paragraphe 2.2 (Figure II-10) a été utilisé pour quantifier les caractéristiques des signaux de sortie du MAPMT.

Une série de dix mesures sur les canaux 37 et 64 du MAPMT donnent un temps de montée moyen de 1,62 nanoseconde et un temps de descente de 2.52 nanosecondes. L'impulsion du MAPMT est donc très courte comparée à la période d'horloge du système d'acquisition de données (25 nanosecondes), ce qui justifie l'utilisation d'un fast shaper dans la puce MAROC (voir chapitre I, paragraphe 2.2.2) de 15 nanosecondes qui permet de reconditionner le signal du MAPMT sur un temps suffisamment long pour qu'il puisse être échantillonné.

Pour mesurer le temps de transit des électrons dans le MAPMT  $T_{\text{mapmt}}$ , il faut connaître les délais induits dans le montage expérimental. Comme le montre la Figure II-14, l'expérience est faite avec le MAPMT et une photodiode pour laquelle le temps de transit  $T_{\text{diode}}$  est considéré comme très inférieur à une nanoseconde. Cette comparaison est faite pour pouvoir s'affranchir du temps de réponse de la LED ( $T_{\text{LED}}$ )

qui n'est pas connu. Les temps de transit dans les câbles ( $TC_1$ ,  $TC_2$ ,  $T_{Cmapmt}$  ou  $T_{Cdiode}$ ) ainsi que le temps de parcours de la lumière entre la LED et le MAPMT ou la photodiode ( $T_{light}$ ) sont connus

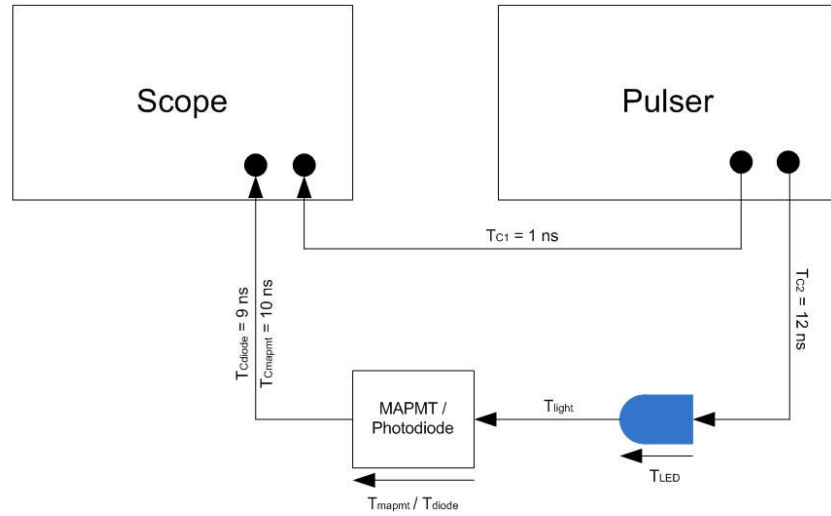


Figure II-14 : Montage expérimental pour la mesure du temps de transit des électrons dans le MAPMT

Le temps de transit des électrons dans le MAPMT et dans la photodiode peuvent alors être calculés par :

$$T_{diode} = T_{Sdiode} + T_{C1} - T_{C2} - T_{Cdiode} - T_{light} \quad w.$$

$$T_{mapmt} = T_{Smapmt} + T_{C1} - T_{C2} - T_{Cmapmt} - T_{light} \quad x.$$

avec  $T_{Sdiode}$  et  $T_{Smapmt}$  les temps de réponse de la photodiode et du MAPMT (incluant le temps de réponse de la LED et les retards dans les câbles) mesurés à l'oscilloscope tels qu'indiqués sur la Figure II-15.

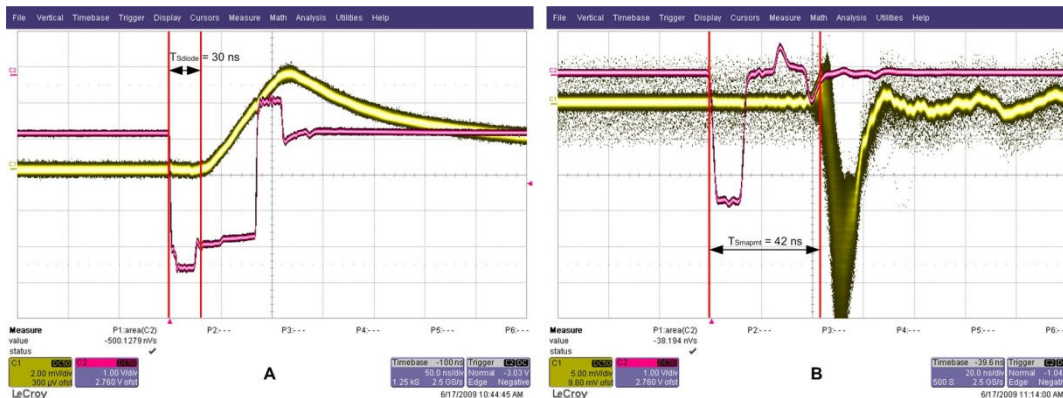


Figure II-15 : Temps de réponse mesuré à l'oscilloscope de la photodiode (A) et du MAPMT (B) à une impulsion lumineuse

En considérant  $T_{diode} \ll T_{mapmt}$  et en s'appuyant sur les équations (w) et (x), on peut calculer le temps de transit  $T_{mapmt}$  du MAPMT par l'équation.

$$T_{mapmt} = T_{Smapmt} - T_{Sdiode} - T_{Cmapmt} + T_{Cdiode} \quad y.$$

Soit :

$$T_{mapmt} = 42 \text{ ns} - 30 \text{ ns} - 9 \text{ ns} + 8 \text{ ns} = 11 \text{ ns}$$

Le temps de transit des électrons dans le MAPMT est donc de 11 ns, ce qui est en accord avec les spécifications du constructeur.

## 2.4. Linéarité/uniformité de la réponse

Cette étude va nécessiter un système d'acquisition qui permet une lecture simultanée des quantités de charges reçues sur les 64 anodes du MAPMT. La Figure II-16 montre ce montage, où le MAPMT est connecté à un PCB (photo en bas à droite). Ce PCB fournit la haute tension au MAPMT (950 V) et assure la connectivité des 64 canaux par quatre nappes qui sont ensuite connectées à deux QDC (convertisseurs de charge numériques) 32 canaux, 12 bits (CAEN V792AC). Les deux QDC sont montés sur un bus VME, dont le contrôleur est connecté par liaison Ethernet à un PC sous Linux qui fait l'acquisition de donnée avec une version simplifiée du système d'acquisition standard d'ATLAS.

Un générateur de pulses alimente une LED bleue (400 nm) et fournit le trigger aux QDC. Deux timers sont utilisés en série en aval du trigger afin de générer un retard variable sur l'arrivée du trigger sur les QDC. Le but est d'ajuster la fenêtre temporelle d'acquisition pour que la charge émise sur les anodes du MAPMT soit reçue dans la fenêtre d'acquisition.

Enfin, une logique de véto du déclenchement est réalisée afin de refuser tout nouvel événement tant que le système d'acquisition est occupé à traiter le précédent.

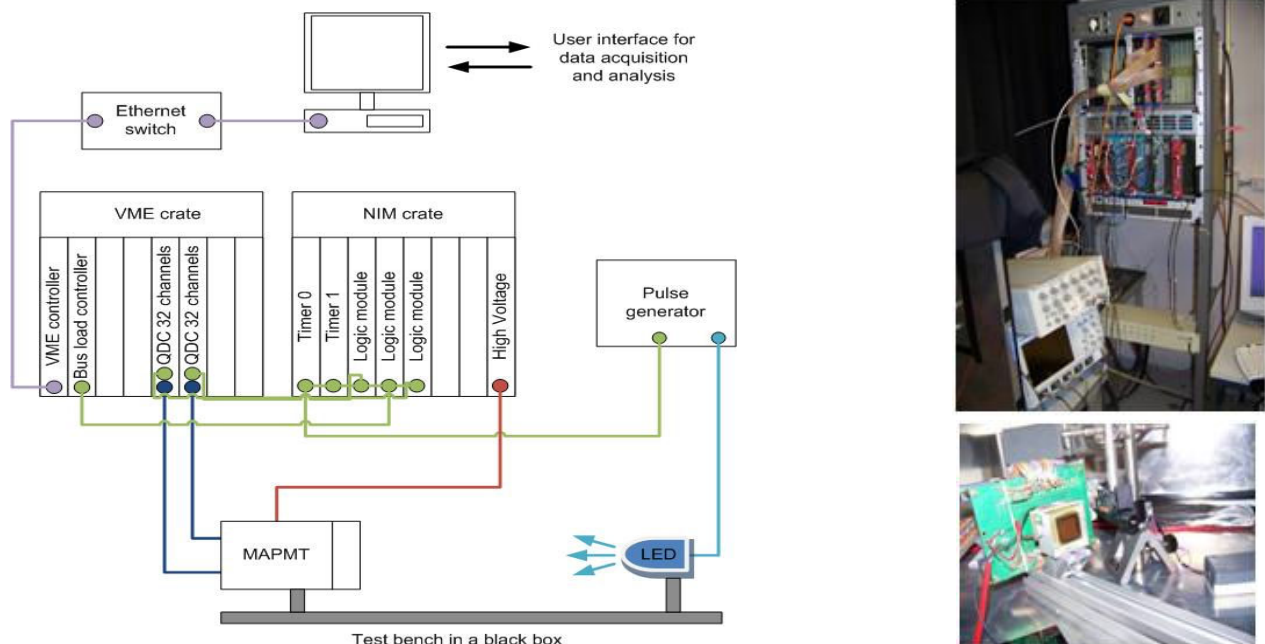


Figure II-16 : Montage expérimental pour l'acquisition des 64 canaux du MAPMT en parallèle



La première expérience consiste à vérifier si la réponse du MAPMT est linéaire en fonction de l'intensité de la lumière qui lui est appliquée. Le courant  $I$  qui est mesuré sur la source haute tension du MAPMT est défini par :

$$I = I_{bias} + I_{Anode} \quad z.$$

avec  $I_{bias}$  le courant fourni au diviseur de tension des dynodes et  $I_{Anode}$  le courant d'anode, c'est-à-dire le courant issu des électrons extraits de la photocathode multiplié par le gain du photomultiplicateur.

Selon le constructeur, le courant d'anode maximum est de  $100 \mu A$  pour ce MAPMT, et le courant fourni aux étages de dynodes est une constante  $I_{bias} = 434 \mu A$  pour ce MAPMT à 950 V.

La première étape de l'expérience consiste à ajuster l'intensité de la lumière incidente pour obtenir une consommation globale du MAPMT de  $534 \mu A$ , ce qui correspond à un courant d'anode de  $100 \mu A$ . On utilise ensuite un jeu de filtres gris (filtres qui diminuent l'intensité lumineuse sans modifier la longueur d'onde de la lumière incidente) qui sont insérés entre la LED et le MAPMT et plusieurs acquisitions de données sont faites avec une lumière incidente variant entre 100% ( $I_{Anode} = 100 \mu A$ ) et 0.72% de sa valeur initiale.

Pour chaque acquisition, le courant d'anode est mesuré, pour obtenir le graphe présenté en Figure II-17.

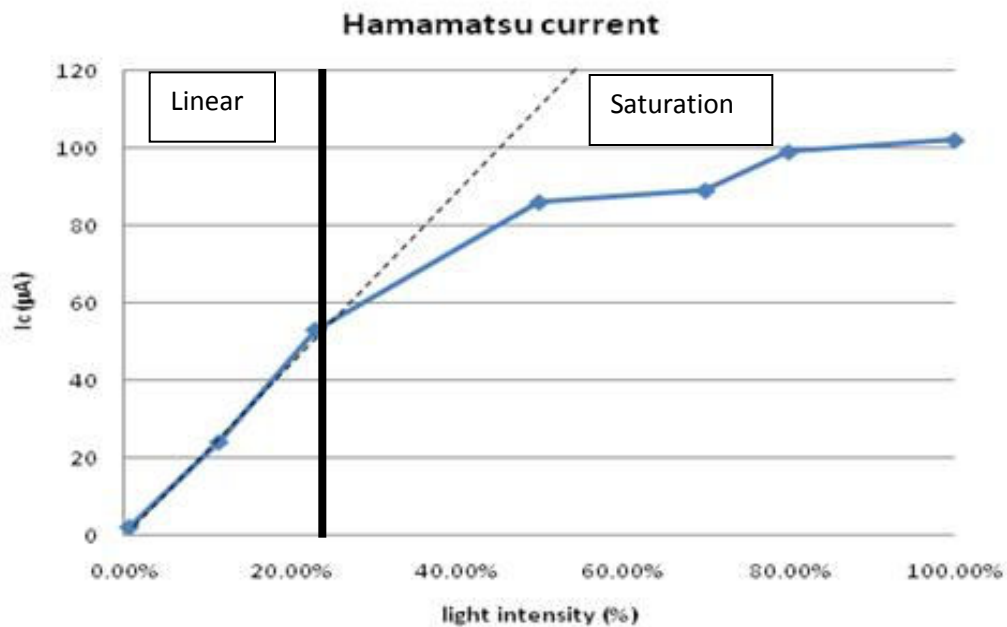


Figure II-17 : Evolution du courant d'anode en fonction de l'intensité de la lumière incidente

On voit sur la Figure II-17 que le courant d'anode évolue linéairement jusqu'à une valeur de  $53 \mu A$ , soit 12% de  $I_{bias}$ .

Nous nous placerons largement en dessous de ce seuil pour étudier maintenant l'uniformité de la réponse des 64 canaux du MAPMT. Pour cette mesure, une première acquisition est faite sans lumière afin de mesurer les piédestaux des QDC. Une seconde acquisition de 20000 événements est ensuite faite avec une lumière incidente uniforme sur la surface du MAPMT et avec une intensité moyenne de 4 ou 5 photoélectrons. L'uniformité de la lumière sur la surface de la photocathode est considérée en éloignant suffisamment la LED pour que la photocathode soit contenue entièrement dans le cône d'émission direct de la LED.

La réponse moyenne de chaque canal est calculée en soustrayant la quantité de charge des piédestaux à la quantité de charge moyenne mesurée par le QDC pour chaque canal du MAPMT en réponse à la lumière incidente. La Figure II-18 montre la réponse relative de chaque canal par rapport au canal le plus excité (=100%). Les trois canaux ayant une réponse inférieure à 40% du canal le plus excité sont à exclure de l'analyse en raison d'un dysfonctionnement du QDC.

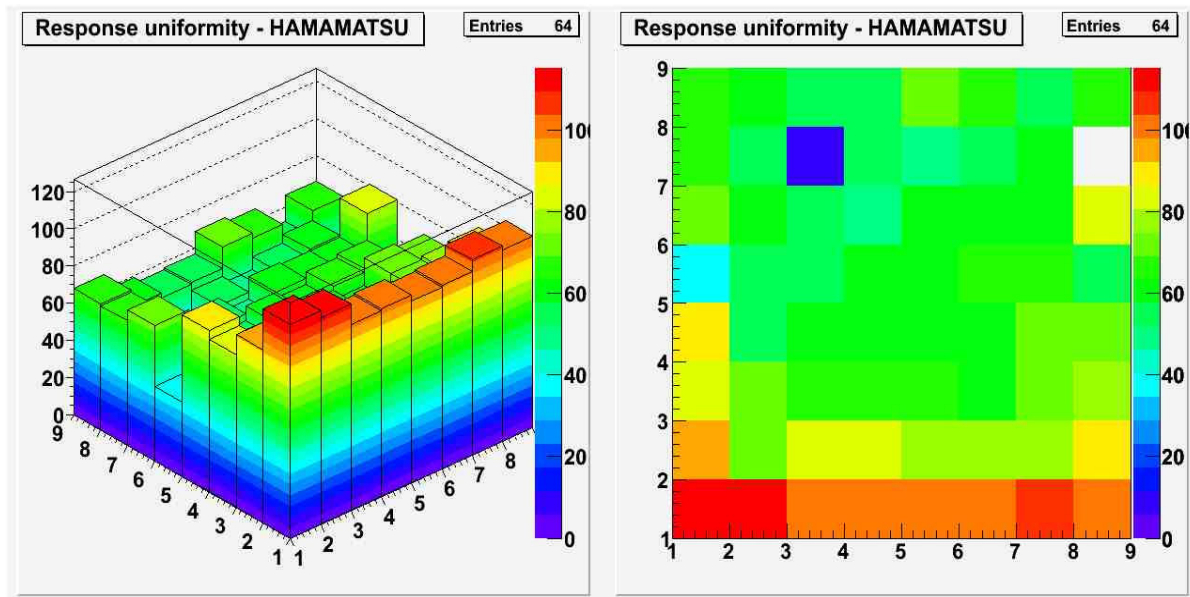


Figure II-18 : Uniformité de la réponse du MAPMT

Les canaux ayant le meilleur gain ont une réponse en moyenne trois fois plus élevée que les canaux les moins efficaces, ce qui correspond aux données de Hamamatsu. Les écarts de gains sont dus aux imperfections géométriques du micro-usinage des étages de dynodes. Les distances inter-dynodes étant de l'ordre de la fraction de millimètre, de faibles variations de distance sont possibles et agissent directement sur le facteur d'amplification des électrons. Cela confirme en outre la nécessité d'avoir une électronique Front-End à gain variable pour compenser les différences de gain entre canaux.

## 2.5. Débordement canal à canal (cross-talk)

Afin d'évaluer le cross talk du MAPMT, c'est-à-dire le pourcentage de charge transféré sur les canaux voisins pour un éclairage localisé sur un canal, le système d'acquisition décrit dans le paragraphe 2.4 est réutilisé.

Cependant, et comme on le voit sur la Figure II-19, la lumière issue de la LED va être dirigée dans une fibre optique (de section carrée, 500  $\mu\text{m}$  de côté) afin d'illuminer un seul pixel (2,3 mm de côté) du MAPMT. Si on considère que la fenêtre de la photocathode a une épaisseur de 0,8 mm, que la fibre optique a un angle d'émission de 20 degrés et que les indices de réfraction de la fibre optique et de la photocathode sont équivalents, alors le pixel du MAPMT est illuminé sur une section d'environ 1,1 mm de côté.

La fibre optique est fixée sur une table de déplacement micrométrique suivant trois axes qui permet de la positionner précisément, et, pour chaque acquisition de données, la fibre est appuyée contre la fenêtre du MAPMT afin d'éviter que la lumière incidente ne pénètre dans les autres canaux.

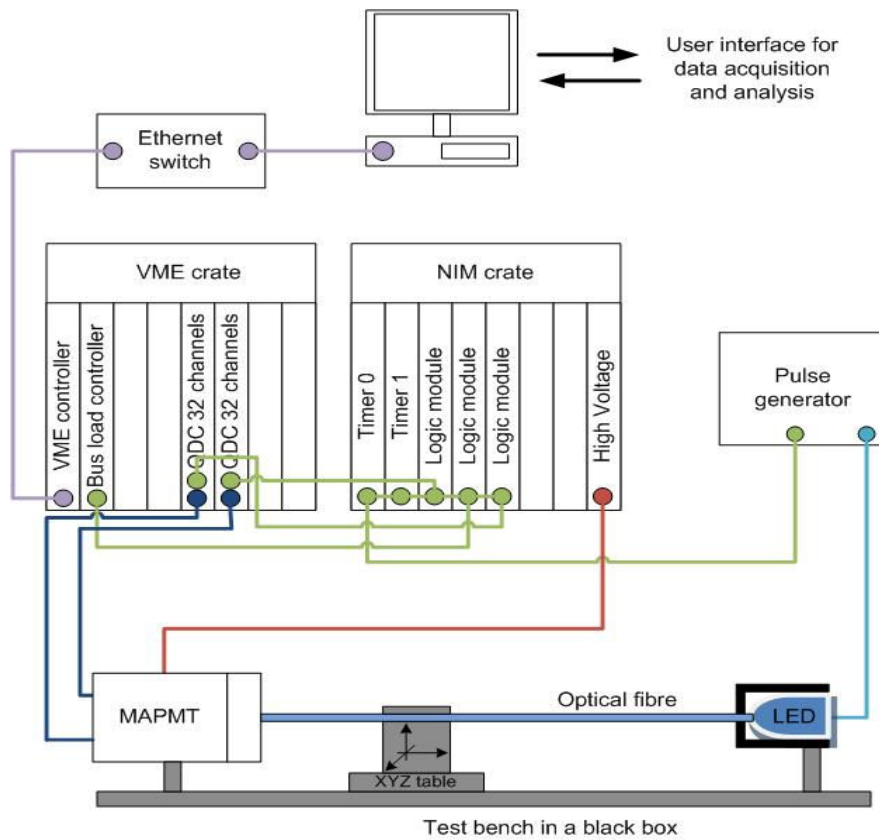


Figure II-19 : Montage expérimental pour l'étude du cross talk du MAPMT

Un pixel placé au centre du MAPMT est choisi pour l'étude (pixel 37). Il va d'abord être scanné par pas de 300  $\mu\text{m}$  en utilisant l'oscilloscope pour mesurer la valeur moyenne de l'amplitude du signal à lumière constante.

Le but de cette mesure préliminaire est de trouver le centre du pixel afin d'être certain de n'injecter de la lumière que dans celui-ci pour la mesure de cross talk.

La table micrométrique est d'abord réglée grossièrement pour placer la fibre en face du pixel à une position qui sera considérée comme l'origine. La Table II-1 donne les valeurs d'amplitude du signal en fonction du déplacement relatif de la fibre par rapport au point d'origine.

Table II-1 : Amplitude du signal (en mV) en fonction du déplacement de la fibre sur le pixel

|        |     | X axis |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|-----|--------|------|------|------|------|------|------|------|
|        |     | -0.3   | -0.6 | -0.9 | -1.2 | -1.5 | -1.8 | -2.1 | -2.4 |
| Y axis | 0   | 2.54   | 3.1  | 4.6  | 4.65 | 4.55 | 5.04 | 3.94 | 3.8  |
|        | 0.3 | 3.89   | 5.58 | 6.84 | 8.14 | 8.11 | 8.33 | 7.41 | 5.26 |
|        | 0.6 | 4.39   | 5.72 | 7.4  | 9.15 | 8.79 | 8.17 | 8    | 6.49 |
|        | 0.9 | 4.38   | 6.5  | 7.61 | 9.06 | 9.27 | 9.09 | 8.55 | 7.14 |
|        | 1.2 | 3.6    | 5.68 | 7.37 | 8.43 | 9.25 | 8.93 | 8.04 | 7.05 |
|        | 1.5 | 3.53   | 4.68 | 6.14 | 7.04 | 7.6  | 7.36 | 6.54 | 5.46 |
|        | 1.8 | 3.23   | 3.83 | 4.84 | 5.82 | 6.56 | 6.4  | 5.67 | 4.67 |
|        | 2.1 | 1.3    | 2.28 | 3    | 3.67 | 3.98 | 3.8  | 3.41 | 2.87 |

Un maximum d'amplitude (en mV) est trouvé à la position absolue  $x = -1.5$  mm;  $y = 0.9$  mm. Ces coordonnées représentent le centre du pixel dans le référentiel de la table avec une erreur de  $300 \mu\text{m}$ , c'est suffisant pour garantir que la fibre ne débordera pas sur les pixels voisins. Il faut cependant préciser que ce n'est pas nécessairement le centre géométrique du pixel, mais on peut considérer que la zone de réponse maximale en est suffisamment proche pour que la lumière émise par la fibre n'atteigne pas directement les pixels voisins.

La seconde étape consiste à connecter le MAPMT au banc de test pour une lecture multicanaux. Une première acquisition est effectuée sans lumière afin d'obtenir les piédestaux. Leur valeur moyenne est calculée ainsi que leur écart type.

La lumière (deux acquisitions sont faites avec une moyenne de un puis quatre photoélectrons) est ensuite injectée au centre du pixel sélectionné et les quantités de charges sont acquises sur tous les canaux.

La Figure II-20 montre le pourcentage de quantité de charge transférée sur les voisins du canal excité. Pour cela, le logiciel d'analyse calcule le nombre d'événements sur les voisins du canal excité pondéré par la quantité de charge correspondante. Le cross talk  $XT_i$  d'un voisin  $i$ , ramené en pourcentage du signal mesuré sur le canal excité, est alors défini par :

$$XT_i = \left\langle \frac{Q_i}{Q} \right\rangle \times 100 \quad \text{aa.}$$

avec  $Q$  la quantité de charge mesurée sur le canal excité,  $Q_i$  la quantité de charge sur le voisin  $i$ , et  $N$  le nombre d'événements.

Le bruit de fond représenté par le piédestal lors de la mesure doit être filtré. Le piédestal peut être représenté par une gaussienne pour laquelle on mesure l'écart type. Les événements pour lesquels la

quantité de charge est inférieure à trois fois l'écart type du piédestal sont alors écartés pour ne pas prendre en compte le bruit de fond.

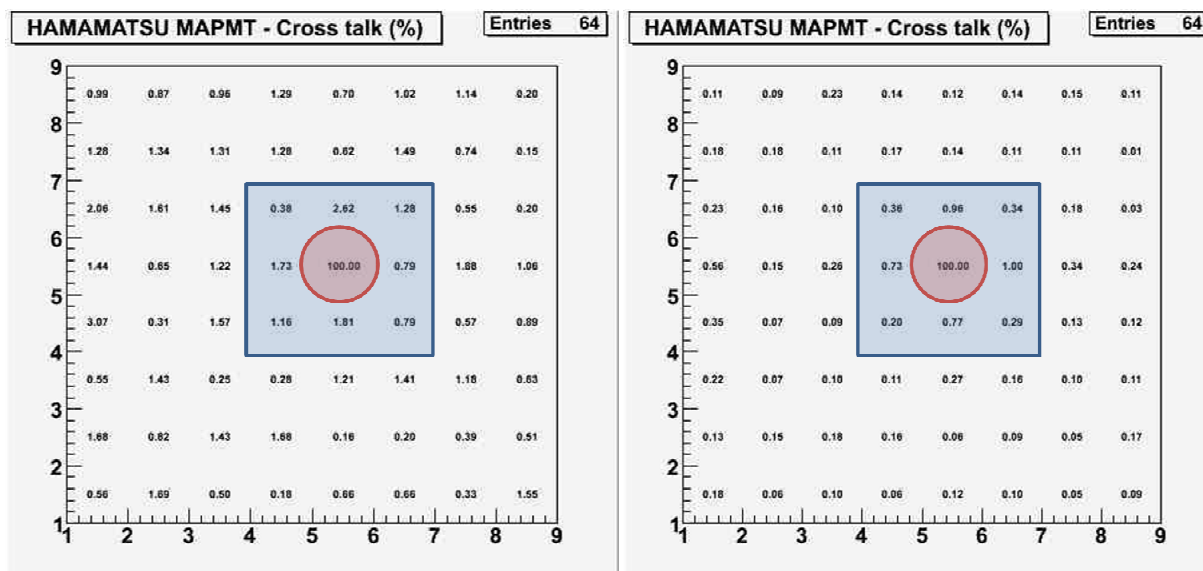


Figure II-20 : Cross talk pour une lumière incidente de 1PE (gauche) et 4 PE (droite) en moyenne sur le canal excité

Le cross talk observé sur ce MAPMT est conforme aux données du constructeur (<3%), on obtient même de très bons résultats pour une lumière incidente de 4 PE en moyenne (<1%) correspondant au rendement lumineux moyen du détecteur ALFA. Cette méthode permet de déterminer le cross talk global du MAPMT, mais pas de discriminer les différentes contributions telles que les effets optiques dans la fenêtre d'entrée du MAPMT, les effets optiques sur les électrons à l'entrée de la première dynode ou encore les fuites de charge dans les étages de dynodes.

### 3. Conclusions

Finalement, nous avons vu dans cette étude que le MAPMT R7600 de Hamamatsu répond aux spécifications relatives à la photo-détection pour le détecteur ALFA. L'efficacité quantique de la photo cathode est maximale à la longueur d'onde d'émission des fibres scintillantes. Le photoélectron unique est parfaitement discriminé du piédestal et permet l'étalonnage des canaux du MAPMT, et donc la correction des gains dans l'électronique front-end. Le cross-talk entre les canaux est de l'ordre de quelques pourcent, ce qui représente un bruit raisonnable qui ne détériorera pas de façon significative les performances du détecteur.

Les outils, notamment logiciels, que j'ai développés pour l'analyse des données du MAPMT sont utilisés pour la caractérisation des MAPMT qui seront installés sur le détecteur ALFA, notamment pour évaluer l'uniformité de la réponse des canaux afin d'appliquer des facteurs de correction appropriés à l'électronique frontale (voir Chapitre IV).

### III. Détection de particules pour les compteurs de déclenchement

L'efficacité de détection des compteurs Trigger, en particulier celui du détecteur principal, est un paramètre critique pour le détecteur ALFA. La mesure de la luminosité du faisceau s'appuie sur le taux de particules déviées au point d'interaction et de leur angle de déviation. Il faut donc garantir une efficacité de détection de particules homogène sur la surface active du détecteur. Or la solution la plus aisée pour garantir une efficacité de détection homogène et d'obtenir une efficacité de détection maximale (quasi-égale à 100%) sur toute la surface active des compteurs Trigger, et, pour ce faire, un rendement lumineux maximal.

Ce chapitre décrit de façon détaillée les technologies de détection employées pour les compteurs Trigger ainsi que les résultats d'un test faisceau fait à DESY (Hambourg) en décembre 2007 [34] qui a permis de valider les choix technologiques faits sur le matériel de détection des compteurs Trigger et de maximiser leur rendement lumineux. Une solution alternative de photo-détection est ensuite envisagée.

#### 1. Description des compteurs de déclenchement et choix technologiques

La détection de particules dans les compteurs Trigger est faite avec un plastique scintillant<sup>5</sup> de trois millimètres d'épaisseur qui produit de la lumière à chaque passage de particules chargées. Les plaques scintillantes du détecteur principal reprennent la forme de ce dernier avec pour dimensions 32 mm de côté et 31 mm de hauteur, celles placées devant les détecteurs de chevauchement (Overlap) sont de forme rectangulaire avec 6 mm de côté et 15 mm de hauteur (Figure III-1).

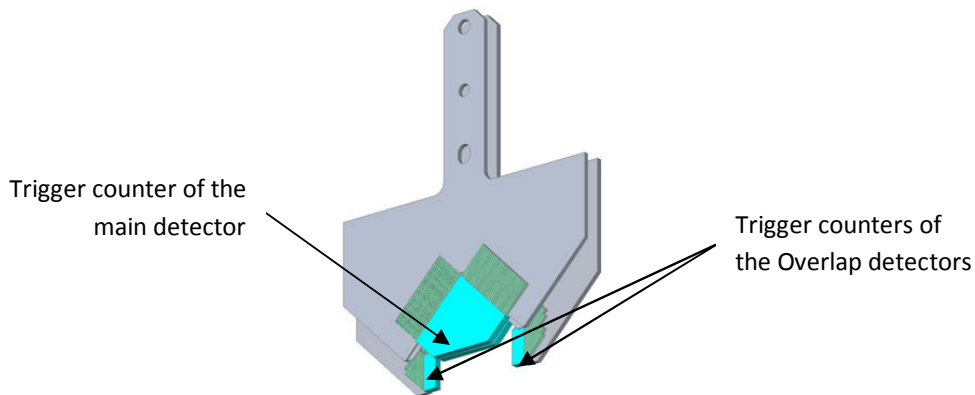


Figure III-1 : Compteurs Trigger du détecteur ALFA

---

<sup>5</sup> ELIEN EJ-200

Des photomultiplicateurs monocanal<sup>6</sup> (PMT) sont utilisés pour la conversion photoélectrique du signal. La lumière émise par le plastique scintillant est guidée jusqu'à la photocathode du PMT par deux paquets de 250 fibres optiques<sup>7</sup> de 5 mm de côté et de 40 cm de long. Ces fibres sont couplées au PMT par l'intermédiaire d'un connecteur optique, et elles sont collées sur les flancs gauche et droit du plastique scintillant à l'aide d'une colle optique<sup>8</sup>.

L'assemblage décrit ci-dessus représente la solution de base retenue pour le détecteur ALFA. Une étude a été menée pour tester plusieurs variantes de cette solution de détection et identifier laquelle est optimale pour le détecteur ALFA. Ainsi plusieurs types de revêtements ont été testés (Aluminium, peinture blanche diffusante<sup>9</sup>) sur les plastiques scintillants. Un test a été également effectué en remplaçant le plastique scintillant par des fibres scintillantes (sur le même principe que le détecteur principal). Plusieurs de ces montages sont représentés en Figure III-2.

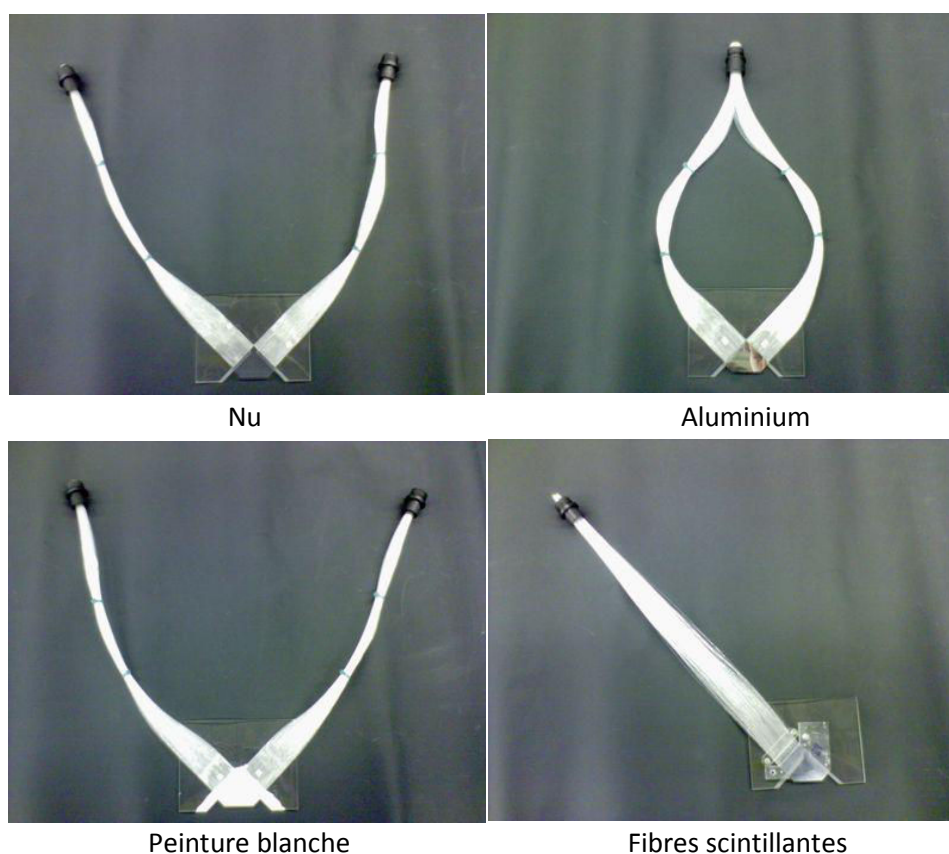


Figure III-2 : Différents revêtements et différents assemblages de fibres optiques

Plusieurs méthodes ont été envisagées pour la collecte de la lumière : un PMT par paquet de fibres optiques ou un seul PMT pour les deux paquets de fibres optiques (dans ce cas un PMT Hamamatsu

<sup>6</sup> Hamamatsu série R7400

<sup>7</sup> Kuraray Clear-PSM

<sup>8</sup> BICRON BC-600

<sup>9</sup> BICRON BC-620

R7401 équipé d'une lentille permettant de doubler la surface apparente de la photocathode a été utilisé). La liste exhaustive de toutes les combinaisons testées est donnée dans la Table III-1.

Table III-1 : Liste des combinaisons testées

| No | Revêtement             | Connexion au PMT                  | Fibres                            |
|----|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1  | -                      | 2 PMT pour 2 paquets de fibres    | Collées                           |
| 2  | -                      | 2 PMT pour 2 paquets de fibres    | Contact direct                    |
| 3  | -                      | 1 PMT sur guide de lumière rigide | Guide de lumière                  |
| 4  | Aluminium (bords)      | 2 PMT pour 2 paquets de fibres    | Collées                           |
| 5  | Aluminium (bords)      | 1 PMT pour deux paquets de fibres | Contact direct                    |
| 6  | Aluminium              | 1 PMT pour deux paquets de fibres | Collées                           |
| 7  | Aluminium              | 1 PMT pour deux paquets de fibres | Contact direct                    |
| 8  | Peinture blanche       | 2 PMT pour 2 paquets de fibres    | Collées                           |
| 9  | Peinture blanche       | 2 PMT pour 2 paquets de fibres    | Contact direct                    |
| 10 | Peinture blanche       | 1 PMT pour deux paquets de fibres | Contact direct                    |
| 11 | (fibres scintillantes) | 1 PMT pour 1 paquet de fibres     | Fibres scintillantes jusqu'au PMT |
| 12 | (fibres scintillantes) | 1 PMT pour 1 paquet de fibres     | Fibres scintillantes en contact   |
| 13 | (fibres scintillantes) | 1 PMT pour 1 paquet de fibres     | Fibres claires en contact direct  |

## 2. Test des compteurs de déclenchement sur faisceau

### 2.1. Mise en place de l'expérience

Une expérience sur faisceau a été menée à DESY, Hambourg, en décembre 2007, afin de tester les configurations possibles de matériel de détection pour les compteurs Trigger. Comme illustré sur la Figure III-3, une boîte noire contenant les compteurs Trigger à tester a été placée sur une table mobile sur le trajet d'un faisceau d'électrons à 6 GeV. Deux déclencheurs externes et un télescope Silicium ont été installés en aval de la boîte noire.

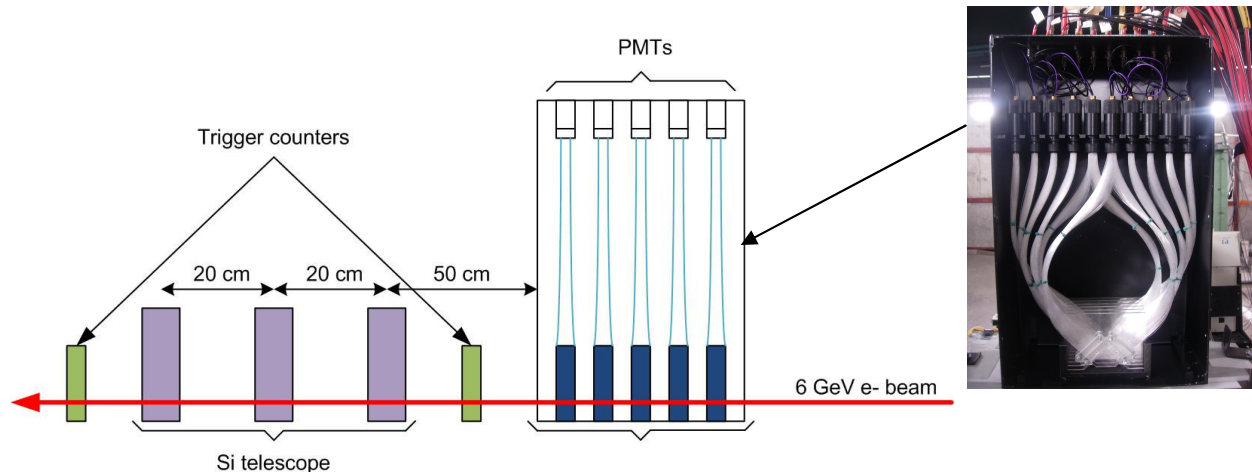


Figure III-3 : Banc de test sur faisceau à DESY



La coïncidence des deux déclencheurs externes déclenche l'acquisition de données d'un ADC (Convertisseur Analogique Numérique) CAEN V265 (8 canaux, 120 pC / 15 bits en haute sensibilité et 800 pC / 12 bits en basse sensibilité) qui lit le signal de sortie des PMT. En raison d'un problème technique, l'ADC n'a pu être exploité qu'en basse sensibilité durant l'expérience.

Le détecteur silicium est composé de trois modules, chacun mesurant les coordonnées des particules détectées sur les deux axes perpendiculaires à l'axe du faisceau. Pour cela, chaque module contient deux plaques de 640 bandes de silicium de 50 µm de coté. La reconstruction des coordonnées des particules dans le télescope silicium permet de corrélérer la quantité de lumière détectée sur la plaque scintillante avec la position géographique du point d'interaction de la particule sur la plaque.

Les dimensions des déclencheurs externes (20×20 mm<sup>2</sup>) implique plusieurs prises de données consécutives pour couvrir toute la surface des plaques scintillantes. Ainsi Les acquisitions de données sur faisceau se sont faites sur une base de quatre acquisitions de 100000 événements chacune avec quatre positions différentes de la table mobile pour couvrir toute la surface des plaques scintillantes. Les données sont ensuite groupées dans le logiciel de traitement (fait sous ROOT [35]) pour reconstruire la quantité de lumière produite sur toute la surface des plaques scintillantes.

## 2.2. Analyse des données

### 2.2.1. Rendement Lumineux

Les 10 PMT destinés à être couplés aux plaques scintillantes ont d'abord été calibrés en mesurant leur réponse à un photoélectron unique. Cette mesure a été effectuée à l'aide d'une diode pulsée et a été réitérée plusieurs fois pour obtenir la quantité de charge moyenne générée par le PMT en réponse à un photoélectron unique ( $Q_{1PE}$ ). Les 10 canaux de l'ADC ont également été calibrés pour fournir un coefficient multiplicateur  $\alpha_{ADC}$  qui permet de normaliser la quantité de charge en fonction de la réponse des canaux de l'ADC.

Ainsi, en sachant quel PMT et quel canal d'ADC a été utilisé pour chaque plaque scintillante, la quantité de lumière détectée (L) en réponse au passage d'une particule peut être calculée par :

$$L (\#PE) = \frac{Q_{ADC} (pC) \times \alpha_{ADC}}{Q_{1PE} (pC)} \quad \text{bb.}$$

Les graphes de la Figure III-4 montrent le spectre des données brutes et le rendement lumineux (bb) pour la combinaison 6. Le spectre du nombre de photoélectrons suit une distribution de Landau qui est caractéristique des fluctuations de perte d'énergie d'une particule chargée qui interagit avec une fine couche de matière, ici la plaque scintillante. La queue de la distribution est due au faible nombre de collisions individuelles, chacune d'entre elles ayant une faible probabilité de transférer une grande quantité d'énergie.

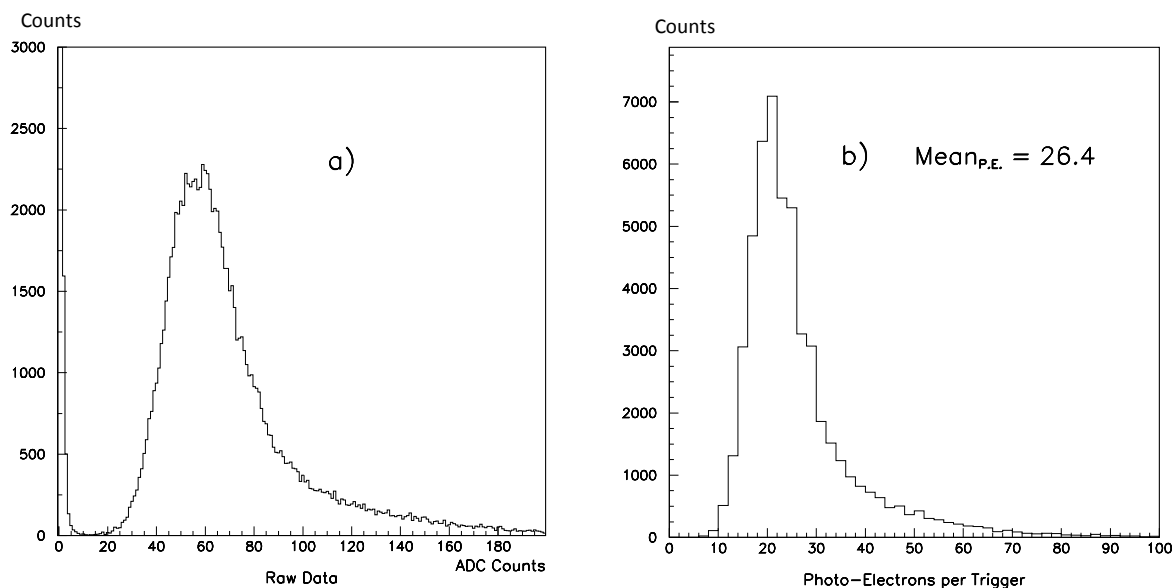


Figure III-4 : a) Spectre des comptages ADC et b) Rendement lumineux en nombre de photoélectrons pour la combinaison 6

Dans cette configuration, le compteur Trigger a un rendement lumineux de 26 PE par événement en moyenne (régression de Landau). Cette analyse est reproduite pour toutes les configurations testées, les résultats sont présentés dans la Table III-2. Afin de pouvoir comparer les résultats, le rendement lumineux de chaque configuration est normalisé à l'acquisition de données sur un PMT. Si les deux paquets de fibres sont connectés à deux PMT, le résultat présenté est la moyenne sur les deux PMT, si les deux paquets de fibres sont connectés à un PMT unique équipé d'une lentille, le résultat présenté est la moitié du résultat obtenu.

Table III-2 : Rendement lumineux moyen par paquet de fibres pour toutes les combinaisons testées

| Transmission/<br>Revêtement | 1 paquet de fibres par PMT | 2 paquets de fibres par PMT | Fibres scintillantes |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Nu                          | 26.1 +/- 4.1               | -                           | -                    |
| Aluminium (bords)           | 30.4 +/- 4.8               | 17.9 +/- 2.8                | -                    |
| Aluminium                   | -                          | 13.9 +/- 2.1                | -                    |
| Peinture blanche            | 40.8 +/- 6.4               | 18.7 +/- 2.9                | -                    |
| Fibres scintillantes        | 18.4 +/- 2.9               | -                           | 16.0 +/- 2.5         |

Ces résultats montrent que le meilleur rendement est obtenu pour une plaque scintillante recouverte de peinture blanche diffusante, avec une moyenne de 40 PE par paquet de fibres. Les plaques nues et recouvertes d'aluminium donnent un rendement inférieur, d'environ 30 PE. Les fibres scintillantes, quant à elles, fournissent un rendement faible, inférieur à 20 PE. En ce qui concerne le choix du PMT, on voit ici que les montages utilisant deux paquets de fibres connectées à un PMT R7401 équipé d'une lentille sont beaucoup moins efficaces, avec des rendements inférieurs à 20 PE, quel que soit le type de revêtement utilisé.

Ces résultats ont été confirmés par un test sous particules cosmiques (Muons) en laboratoire au CERN avec une dispersion inférieure à 15%. La Figure III-5 fait un résumé des résultats obtenus avec un couplage par fibres sous faisceau et sous particules cosmiques, ainsi que les résultats obtenus avec un guide de lumière sous faisceau (combinaison 3 de la Table III-1).

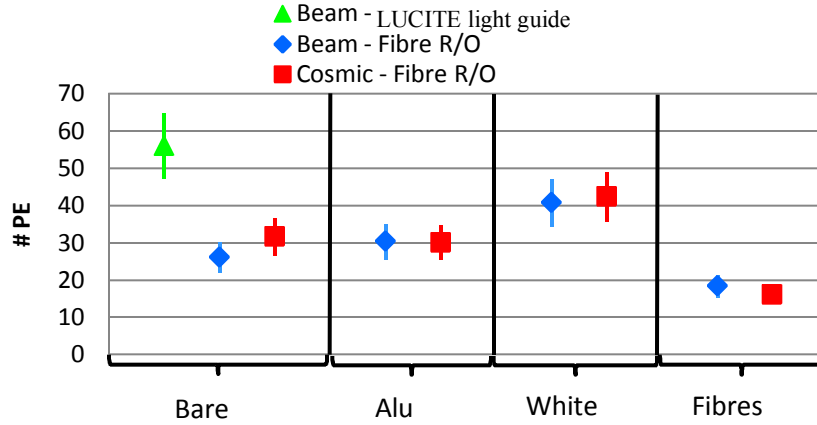


Figure III-5 : Résumé des rendements lumineux des configurations testées

Avec un PMT couplé directement à la plaque scintillante par un guide de lumière rigide, le rendement lumineux atteint 55 PE par événement, ce qui est bien meilleur qu'avec un couplage par fibres optiques.

Cependant, cette solution a été écartée pour le détecteur ALFA car cela impliquerait de placer le PMT sous la flasque étanche du Pot Romain, donc dans la zone de vide secondaire à 1 mbar. En effet, si on considère qu'une tension de 950 V est appliquée entre les pins d'alimentations du PMT distantes de 10 mm, alors la courbe de Paschen [36] présentée en Figure III-6 montre que des arcs électriques vont se produire entre les pins dans ces conditions de fonctionnement. Ce comportement a en outre été vérifié expérimentalement.

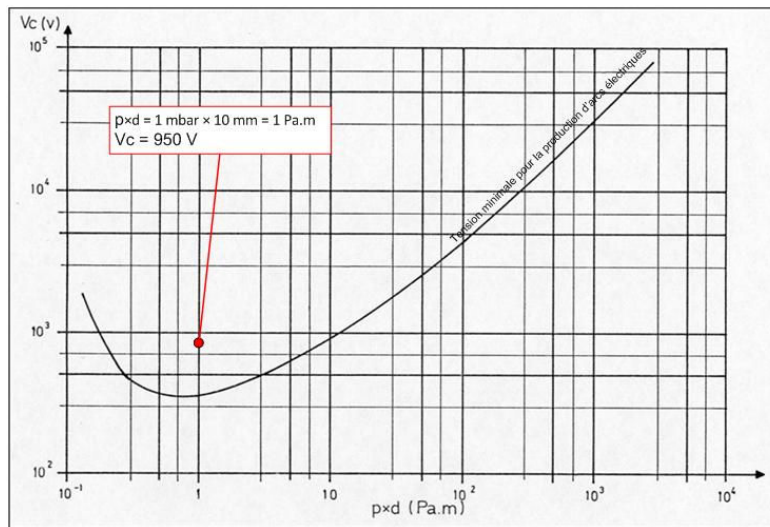


Figure III-6 : Tension de claquage en fonction du produit pression  $\times$  distance pour de l'air à 20 degrés C

### 2.2.2. Analyse géographique de la réponse de la plaque scintillante

Dans la seconde étape de l'analyse, nous nous intéressons à l'homogénéité du rendement lumineux et au comportement aux bords de la plaque scintillante.

Les données du télescope silicium sont utilisées pour reconstruire les coordonnées (X,Y) des particules détectées. Ces coordonnées sont alors projetées pour en déduire la position de la particule détectée sur la plaque scintillante. Une pixellisation de 500  $\mu\text{m}$  est adoptée, largement supérieure à la résolution intrinsèque de 20  $\mu\text{m}$  du télescope. La Figure III-7 montre le rendement lumineux sur la plaque scintillante avec un ou deux paquets de fibres connectés.

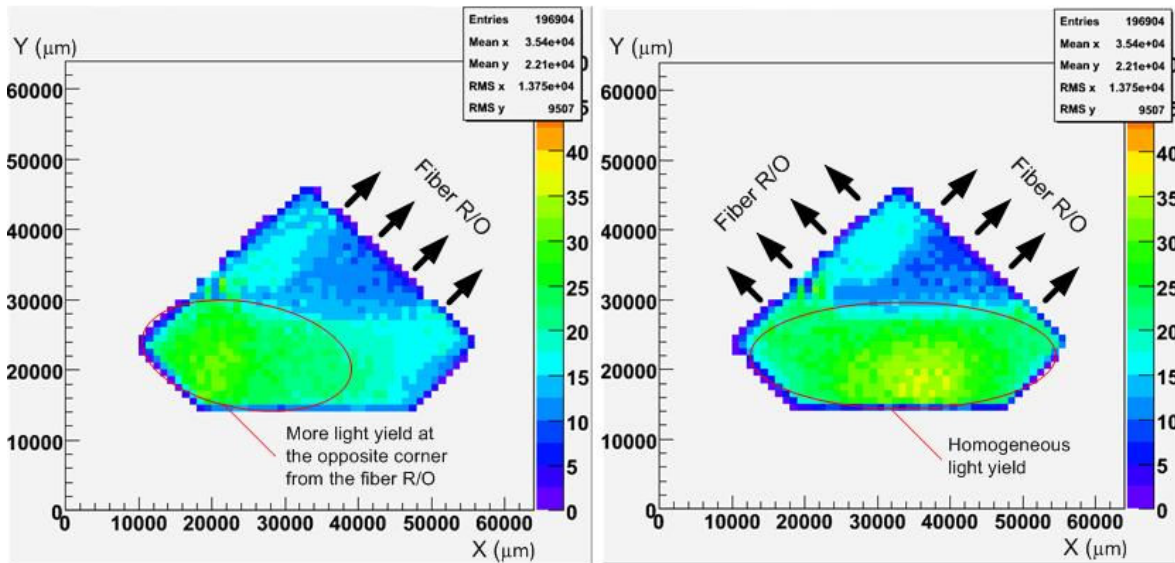


Figure III-7 : Combinaison 1: Rendement lumineux (en PE) en fonction de la position du point d'interaction des particules sur la plaque scintillante (gauche : un seul paquet de fibres connectés, droite : deux paquets de fibres connectés)

Il apparaît que la lumière est mieux collectée par les fibres lorsque le point d'interaction de la particule se trouve sur la partie de la plaque scintillante qui est opposée aux fibres. En effet, lorsqu'une particule interagit dans une zone proche de l'interface plaque / fibres, une majorité des photons émis pénètrent dans les fibres optiques avec un angle plus grand que l'angle critique des fibres (26,7 degrés pour les Kuraray Clear-SPM utilisées) pour des raisons géométriques. Il en résulte une non-homogénéité du rendement lumineux sur la surface de la plaque scintillante. Ce phénomène est compensé par le couplage d'un second paquet de fibres sur la plaque qui permet d'obtenir un rendement lumineux homogène sur la partie basse de la plaque scintillante, zone où les particules seront détectées lorsque le détecteur approchera du faisceau.

Le comportement aux bords du détecteur, et donc du compteur Trigger, est un paramètre important pour garantir la détection de particules déviées à petits angles. Une analyse du bord d'attaque du faisceau (bord inférieur) a donc été menée.

Une fenêtre d'étude est d'abord choisie sur le bord inférieur de la plaque scintillante, comme illustré par le cadre rouge sur la Figure III-8.

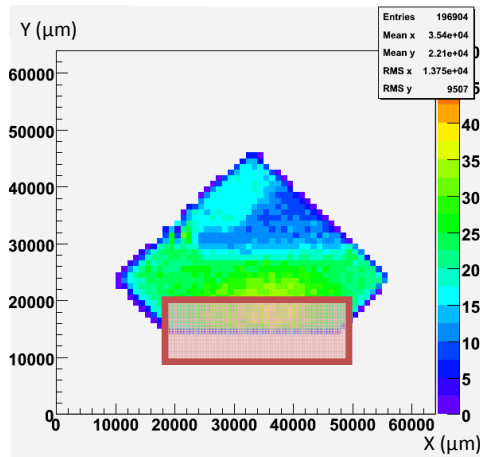


Figure III-8 : Fenêtre d'étude pour le comportement aux bords du compteur Trigger

Le but de cette analyse est de déterminer à partir de quelle distance du bord l'efficacité de détection du compteur Trigger est maximale. Pour cela, le rendement lumineux de chaque particule détectée dans la fenêtre est projeté sur l'axe Y afin de se ramener à une étude en une dimension.

Cette projection peut être néfaste à l'analyse si le bord inférieur de la plaque n'est pas perpendiculaire à l'axe Y, c'est pourquoi une première étape consiste à évaluer, et éventuellement corriger, l'angle de rotation de la plaque par rapport à l'axe du faisceau. Une matrice de rotation est appliquée (Figure III-9) à chaque pixel (X, Y) de la plaque situé dans la fenêtre d'étude pour définir les coordonnées (X', Y') après rotation par rapport au centre de la fenêtre :

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad \text{cc.}$$

où l'angle de rotation  $\theta \in [-80 \text{ mrad}; 100 \text{ mrad}]$  par pas de 20 mrad.

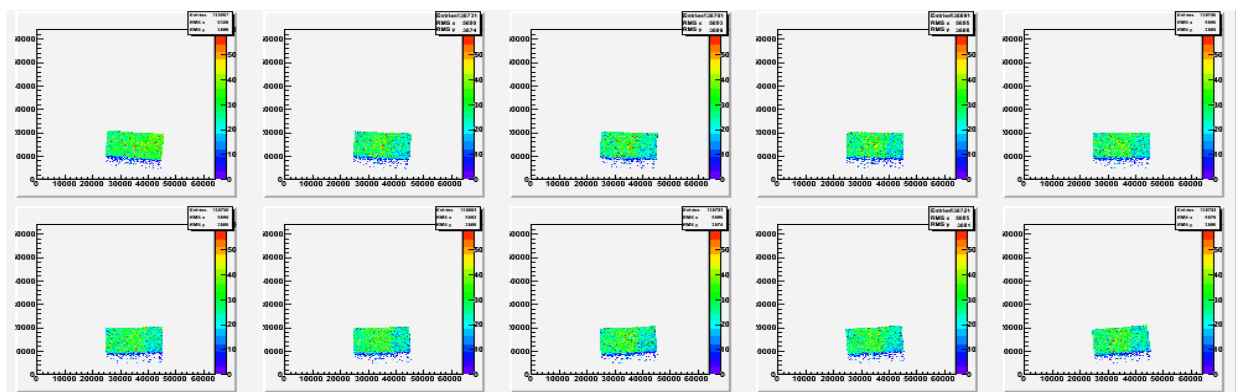


Figure III-9 : Rotation de la fenêtre d'étude par pas de 20 mrad (rendement lumineux en nombre moyen de photoélectrons en fonction de la position sur le plan XY)

Les fenêtres ainsi produites sont ensuite projetées sur l'axe Y en accumulant les particules détectées dans chaque pixel sur cette projection. La largeur de la zone « active » de la projection, c'est-à-dire où un signal est acquis, est mesurée, puis est intégrée dans un histogramme pour chaque valeur d'angle de rotation  $\theta$  (Figure III-10).

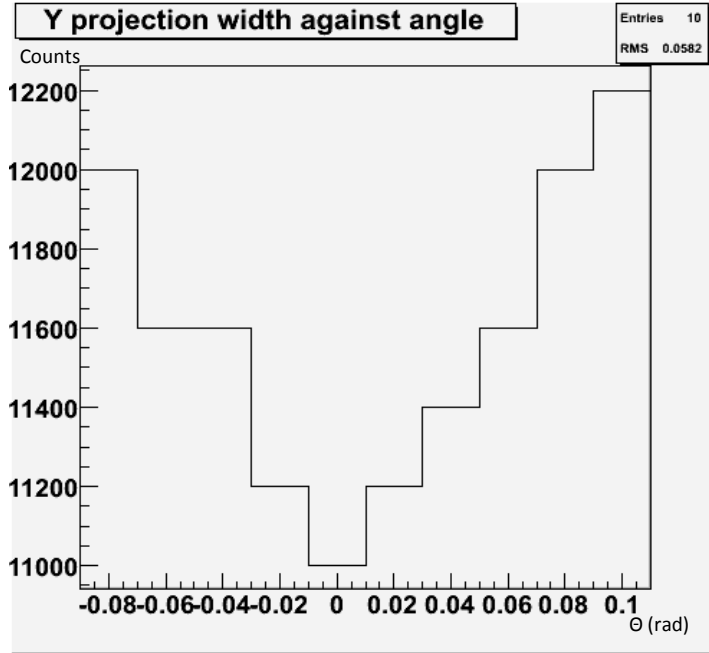


Figure III-10 : Largeur de projection de la fenêtre d'étude en fonction de l'angle de rotation de la fenêtre

La largeur de projection est minimale lorsque la fenêtre d'étude est perpendiculaire à l'axe Y (ici 0 rad). Cette rotation est conservée, et la projection qui en résulte est étudiée. Afin de quantifier la zone au bord de la plaque pour laquelle l'efficacité de détection est dégradée, le comportement au bord est modélisé par la convolution d'une fonction de Heaviside et d'une gaussienne [29], qui peut être écrite à l'aide d'une fonction d'erreur de Gauss (erf) :

$$F(y; N, c, \sigma) = \frac{N}{2} \times \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{y - c}{\sqrt{2} \times \sigma} \right) \right) \quad \text{dd.}$$

avec  $N$  un facteur de normalisation,  $c$  la coordonnée du bord sur l'axe Y et  $\sigma$  l'écart type de la gaussienne qui donne la profondeur de la zone non-active au bord de la plaque scintillante. La Figure III-11 montre l'application de cette fonction sur la projection de la fenêtre d'étude :

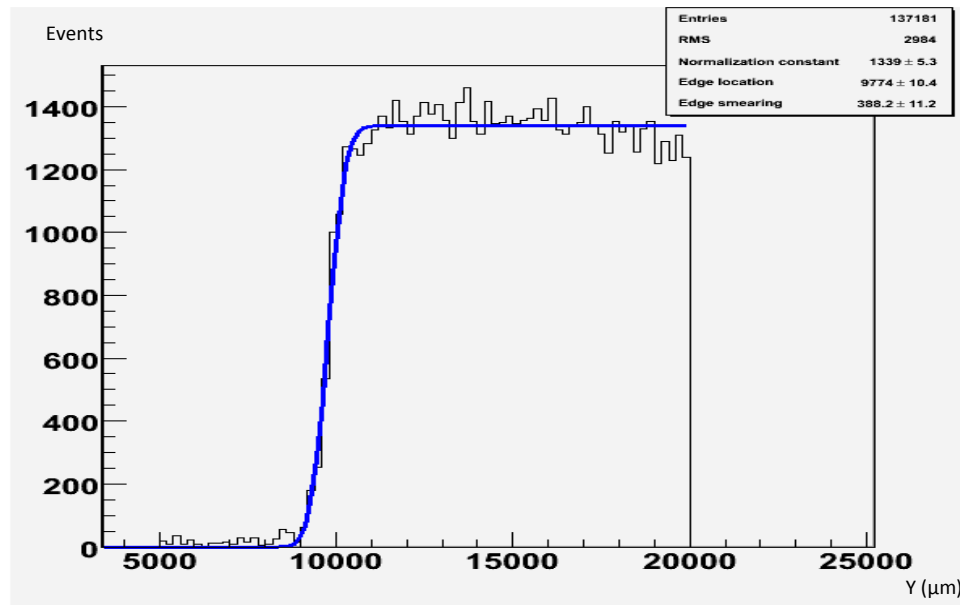


Figure III-11 : Modélisation du comportement au bord de la plaque scintillante par la convolution d'une fonction de Heaviside et d'une gaussienne

Cette analyse est effectuée pour chaque type de revêtement testé et pour les fibres scintillantes, les écarts types de la gaussienne ainsi que l'erreur sur la régression sont données dans la Table III-3.

Table III-3 : Résultats de la modélisation des bords pour chaque type de configuration testée

| Revêtement           | $\sigma$ ( $\mu\text{m}$ ) | Error ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------|----------------------------|-------------------------|
| Nu                   | 403                        | 126                     |
| Aluminium            | 458                        | 121                     |
| Peinture blanche     | 374                        | 110                     |
| Fibres scintillantes | 396                        | 133                     |

Les valeurs d'écart type de la gaussienne sont de l'ordre de 400  $\mu\text{m}$  quel que soit la configuration testée. Un précédent test faisceau [29] effectué sur un faisceau de protons avait révélé une zone inactive d'environ 30  $\mu\text{m}$ . Ce résultat n'a pas pu être confirmé ici. Des facteurs externes au détecteur peuvent être mis en cause, tels que le long bras de levier de 50 cm pour la projection des coordonnées du télescope silicium sur les plaques scintillantes, la diffusion multiple du faisceau d'électrons ou encore la précision d'alignement des plaques scintillantes dans le référentiel du télescope silicium.

### 2.3. Résultats

Ce test faisceau a permis d'affiner les choix technologiques des composants de détection des compteurs Trigger du détecteur ALFA. La peinture blanche diffusante apparaît comme le revêtement le plus efficace en termes de rendement lumineux. Les prototypes utilisant des fibres scintillantes ont été écartés car ayant un rendement trop faible. La collecte de la lumière de la plaque scintillante vers les PMT est optimisée avec deux paquets de fibres connectés à deux PMT standard, les mesures faites avec un PMT équipé d'une lentille et accueillant deux paquets de fibres ont donné des rendements lumineux

plus faibles. Finalement, la solution retenue est une plaque scintillante recouverte de peinture diffusante et connectée à deux PMT par deux paquets de fibres, obtenant ainsi un rendement lumineux homogène d'environ 40 PE en moyenne. Ceci est largement supérieur aux quantités de lumière détectées par le détecteur ALFA (environ 4 PE), ce qui garantit une efficacité de détection des compteurs Trigger approchant les 100%. Le comportement aux bords n'a pas pu être évalué de façon satisfaisante.

### 3. Solution alternative pour la photo-détection des compteurs Trigger

Il a été démontré dans le paragraphe précédent qu'un transport de lumière dans un guide de lumière rigide entre la plaque scintillante et le PMT permet un rendement lumineux plus important qu'avec un paquet de fibres optiques. Cependant cette solution ne peut pas être réalisée pour le détecteur ALFA car cela implique de placer le PMT dans la chambre de vide secondaire du Pot à 1 mbar. Dans ces conditions de pression, des décharges électriques se produisent entre l'anode et la cathode. Cependant une solution alternative pourrait être envisagée, consistant à remplacer le PMT par une G-APD (Geiger mode Avalanche Photo Diode) [37].

#### 3.1. La photodiode avalanche en mode Geiger

Les G-APD sont des photomultiplicateurs silicium formés d'une jonction PN polarisée en inverse (Figure III-12). La polarisation génère un champ électrique qui maintient une zone de la jonction sans porteur libre. Lorsqu'un photon interagit avec la photocathode (la zone P), une paire électron-trou est générée. Les électrons et les trous vont se déplacer en sens inverse et être accélérés sous l'influence du champ électrique. D'autres paires électron-trou vont être créées sur leur passage par ionisation du substrat, et vont à leur tour créer de nouvelles paires, etc. Le mode Geiger consiste à utiliser la photodiode avec une polarisation inverse supérieure à la tension de claquage ( $V_{BD}$ : break down voltage). Dans cette configuration, le champ électrique est suffisamment important pour que l'interaction d'un seul photon avec la zone de jonction de la photodiode génère une avalanche jusqu'à ce que la tension de polarisation ( $V_{bias}$ ) redescende en dessous de la tension de claquage. Le gain  $G$  de la photodiode est donc directement relié à la surtension appliquée par rapport à la tension de claquage par une constante  $C$  :

$$G = C \times (V_{bias} - V_{BD}) \quad ee.$$

Les G-APD sont en fait constitués d'une matrice de photodiodes en mode Geiger. Chaque pixel fournit une quantité de charge connue à une tension de polarisation donnée en réponse à l'interaction d'un photon. Le signal de sortie de la G-APD est la somme des signaux de chaque pixel, qui peut directement être lié au nombre total de photoélectrons qui ont été produits pour un événement donné.



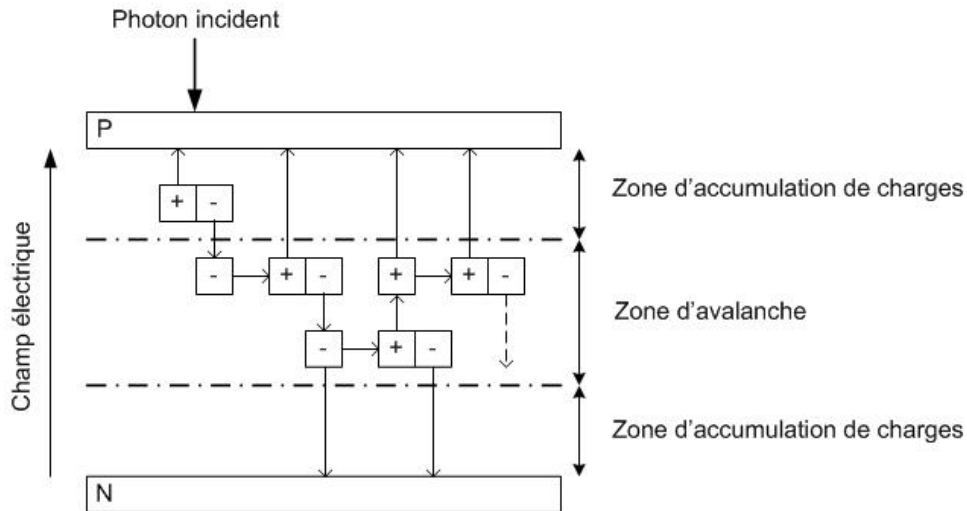


Figure III-12 : Principe de fonctionnement d'une photodiode à avalanche

Le modèle qui sera utilisé dans l'expérience suivante (Hamamatsu MPPC type S10362-33-100C) comporte 900 pixels de  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  sur une surface active de  $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ .

### 3.2. Test d'un compteur Trigger équipé d'une photodiode avalanche

Une photodiode avalanche type S10362-33-100C de Hamamatsu va être utilisée comme moyen de détection sur un compteur Trigger de détecteur ALFA [34]. Pour cela, une plaque scintillante recouverte de peinture blanche diffusante est couplée à un guide de lumière rigide avec de la colle optique. Ce guide de lumière fournit une ouverture de  $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$  à son autre extrémité sur laquelle la photodiode est posée avec de la graisse optique pour garantir un bon interfaçage optique.

La Figure III-13 montre le montage expérimental utilisé. La plaque scintillante équipée d'une photodiode à avalanche est placée horizontalement dans une boîte noire. Deux plaques scintillantes couplées à des PMT par des paquets de fibres optiques sont placées au-dessus et en dessous et déclenchent l'acquisition de données à chaque passage de particules cosmiques (Muons). Pour cela, les signaux de sorties des deux PMT sont discriminés et mis en coïncidence pour fournir un seul trigger afin de limiter l'angle solide d'acceptance des particules et ainsi de se rapprocher des conditions d'acquisition de données sous faisceau de particules où les particules interagissent avec la plaque scintillante sous de très petits angles.

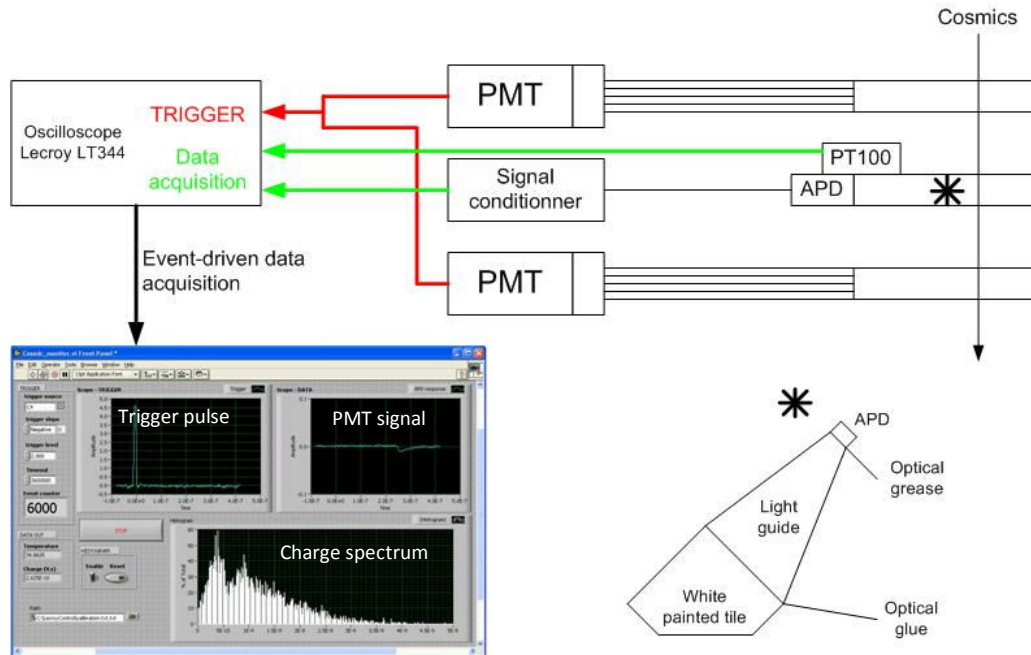


Figure III-13 : Montage expérimental pour le test d'un compteur Trigger couplé à une photodiode à avalanche sous particules cosmiques

Un oscilloscope fait une acquisition de données à chaque trigger reçu. Le signal de sortie de la G-APD est conditionnée par une électronique (Figure III-14) conçue au CERN fournissant un gain de 80 et un temps de montée / descente de 8 ns. La quantité de charge issue est alors mesurée par intégration de l'impulsion électrique générée. La réponse d'une photodiode a une forte dépendance à la température, c'est pourquoi sa température est mesurée par une sonde PT100 (classe B, +/- 0,3°C) pour pouvoir compenser son effet. Un logiciel développé sous Labview contrôle l'oscilloscope et automatise l'acquisition de données.

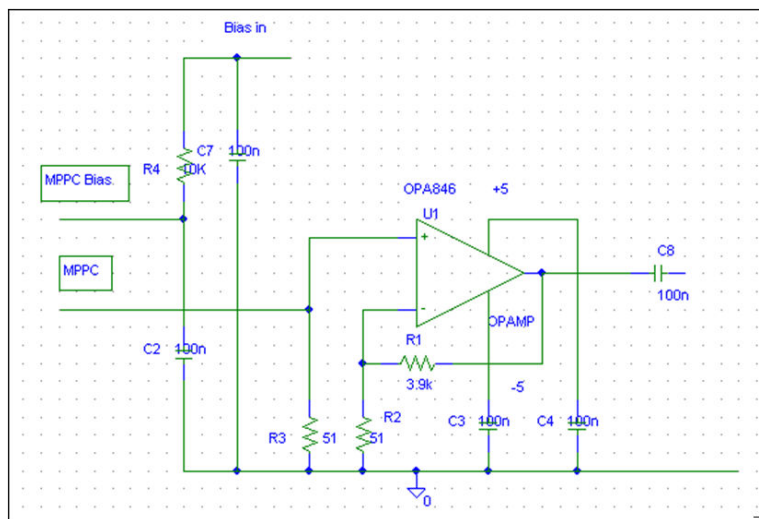


Figure III-14 : Schéma électrique du conditionneur de signaux utilisé avec la photodiode à avalanche

Une acquisition de données de 80 heures a été effectuée pendant laquelle 10281 particules cosmiques ont été détectées (en moyenne deux déclenchements par minute). La dépendance en température de la réponse de la photodiode est d'abord étudiée pour pouvoir ensuite normaliser les résultats.

La charge mesurée aux bornes de la photodiode est d'abord dépendante de la quantité de lumière collectée, et donc de l'énergie de la particule qui est entrée en interaction avec la plaque scintillante. Pour évaluer l'influence de la température, il faut s'affranchir de ce paramètre. Pour cela les événements vont être scindés en groupes contenant chacun 250 trigger consécutifs. La charge mesurée aux bornes de la photodiode et la température sont alors moyennés sur chacun de ces groupes. On peut considérer que l'énergie moyenne des particules incidentes de chaque groupe de 250 particules est équivalente. Le graphique présenté en Figure III-15 montre l'évolution de la charge moyenne et de la température moyenne pour chaque groupe de 250 particules au cours du temps.

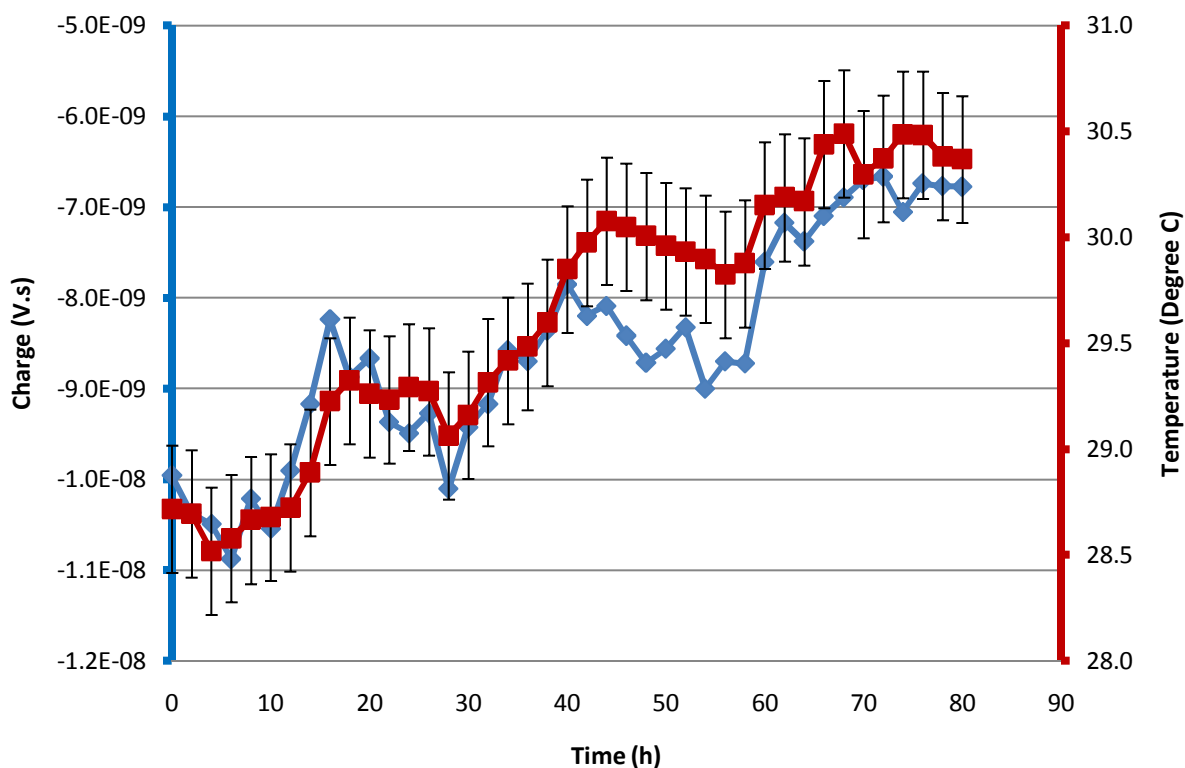


Figure III-15 : Evolution de la charge moyenne mesurée aux bornes de la photodiode et de la température moyenne par groupe de 250 particules au cours du temps

La courbe de charge suit la courbe de température, ce qui confirme la corrélation entre ces deux paramètres. Une régression linéaire est effectuée (Figure III-16) sur la charge en fonction de la température afin d'obtenir un coefficient  $K$  qui permet de calculer la charge  $Q_{i,corr}$  (ff) corrigée à une température de référence  $T_0$  pour une charge mesurée  $Q_i$  à une température  $T_i$  tel que :

$$Q_{i,corr} = Q_i - K \times (T_i - T_0) = Q_i + 2 \times 10^{-9} \times (T_i - T_0) \quad \text{ff.}$$

Si on considère  $Q_0$  la charge mesurée et  $G_0$  le gain à la température  $T_0$ , alors on peut écrire :

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{\Delta G}{G_0} = C \times (T - T_0) \quad \text{gg.}$$

Avec  $C$  la variation relative de gain de la G-APD par degré Celsius. Si on choisit  $T_0 = 29.6$  Degré C (la température moyenne pendant l'acquisition de données), alors :

$$C = \frac{K}{|Q_0|} = \frac{2 \times 10^{-9} \text{ V.s. K}^{-1}}{|-8.7 \times 10^{-9}| \text{ V.s}} = 0.23 \text{ K}^{-1} \quad \text{hh.}$$

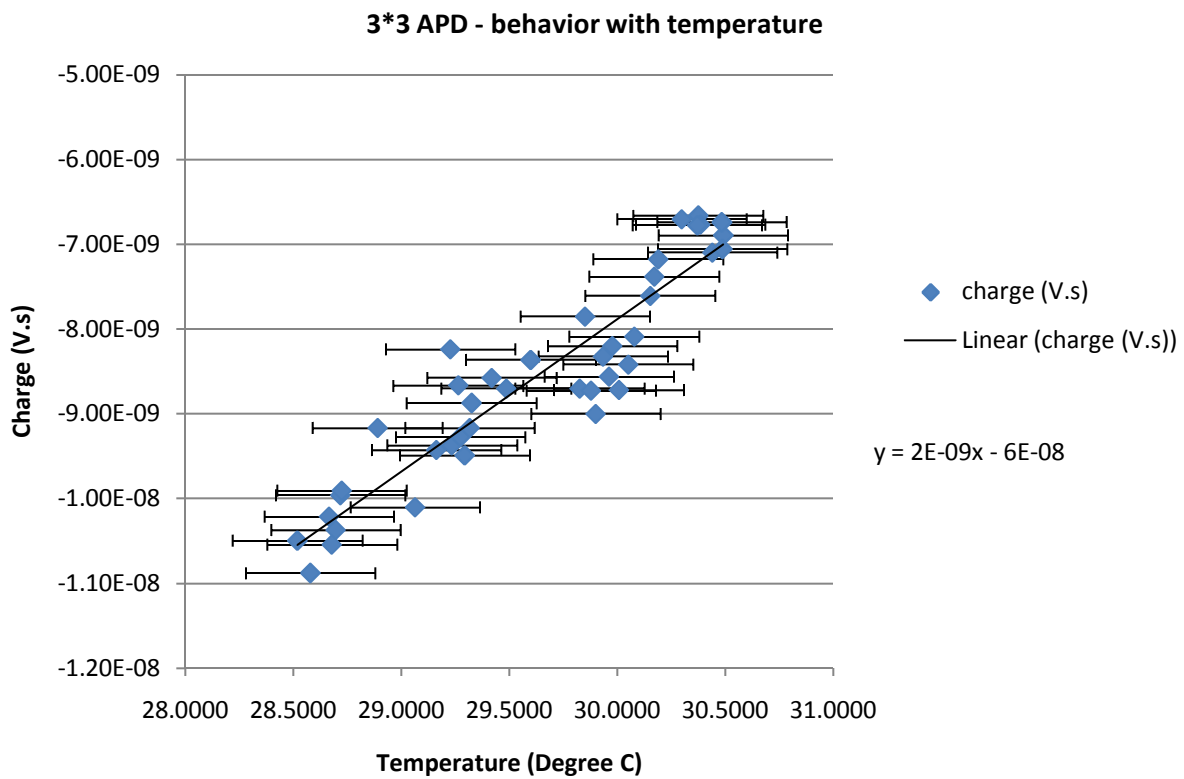


Figure III-16 : Charge mesurée par la photodiode en fonction de la température par paquets de 250 événements

La Figure III-17 montre la quantité de charge mesurée aux bornes de la photodiode normalisée en température ( $y$ ) par rapport à une température de référence  $T_0 = 29,6$  Degré C choisie car étant la température moyenne pendant l'acquisition de données.

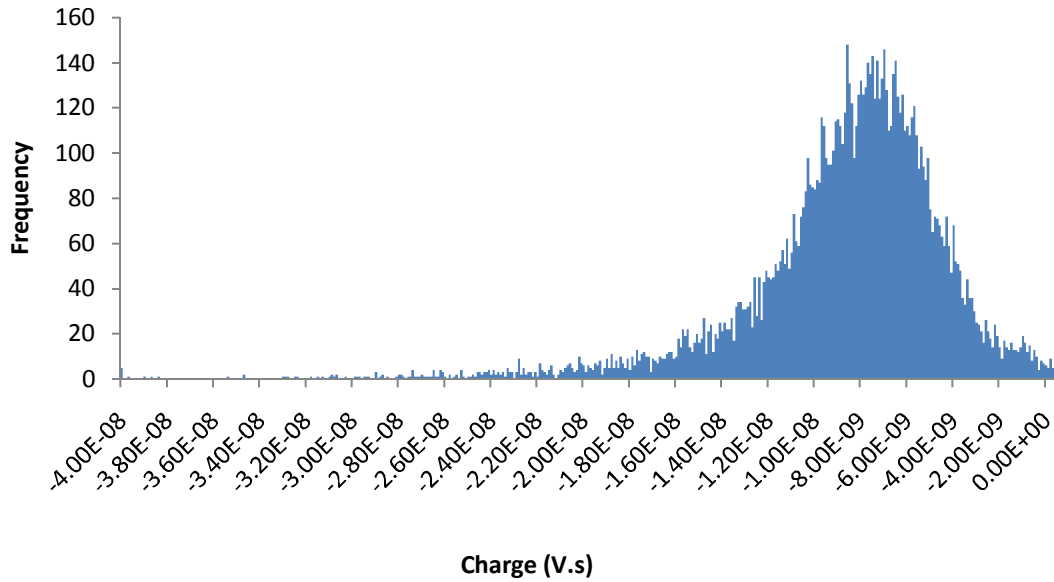


Figure III-17 : Spectre de charge mesurée par la photodiode normalisé à un température de référence de 29.6 Degré C

Afin d'obtenir le rendement lumineux de ce montage, la réponse à un photoélectron unique de la photodiode doit être mesuré. Pour cela le signal de sortie de la photodiode en réponse à une LED pulsée est acquis à l'oscilloscope. Comme on peut le voir sur la Figure III-18, l'identification du pic à 1 PE est aisée car la contribution des nombres de photo électrons est bien discriminée pour ce type de photo détecteur.

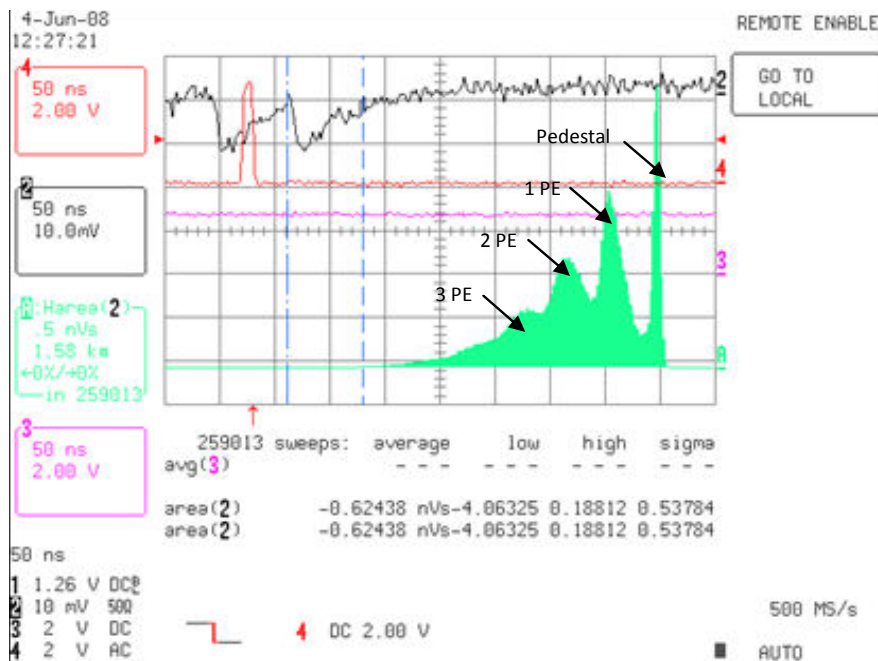


Figure III-18 : Réponse de la photodiode à des impulsions lumineuses de faible intensité d'une LED

En réponse à 1 PE, la photodiode fournit une charge moyenne  $Q_{1PE} = 0.38 \text{ nV.s}$  à une température mesurée pendant l'acquisition de données de 30,5 degré C. Cette charge moyenne est alors également corrigée en température par rapport à la même température de référence  $T_0 = 29,6 \text{ degré C}$  que précédemment pour obtenir (ff):

$$\frac{Q_{1PE.corr}}{50 \Omega} = 0.38 \times 10^{-9} + 0.15 \times 0.38 \times 10^{-9} \times (30.5 - 29.6) = 0.43 \text{ nV.s}$$

Le rendement lumineux du compteur Trigger équipé d'une photodiode peut alors être calculé pour chaque événement  $i$  par :

$$L (\#PE) = \frac{Q_{i.corr} (\text{nV.s})}{Q_{1PE.corr} (\text{nV.s})} \quad \text{ii.}$$

La Figure III-19 montre l'histogramme du rendement lumineux de ce montage, avec une moyenne de 19 photoélectrons.

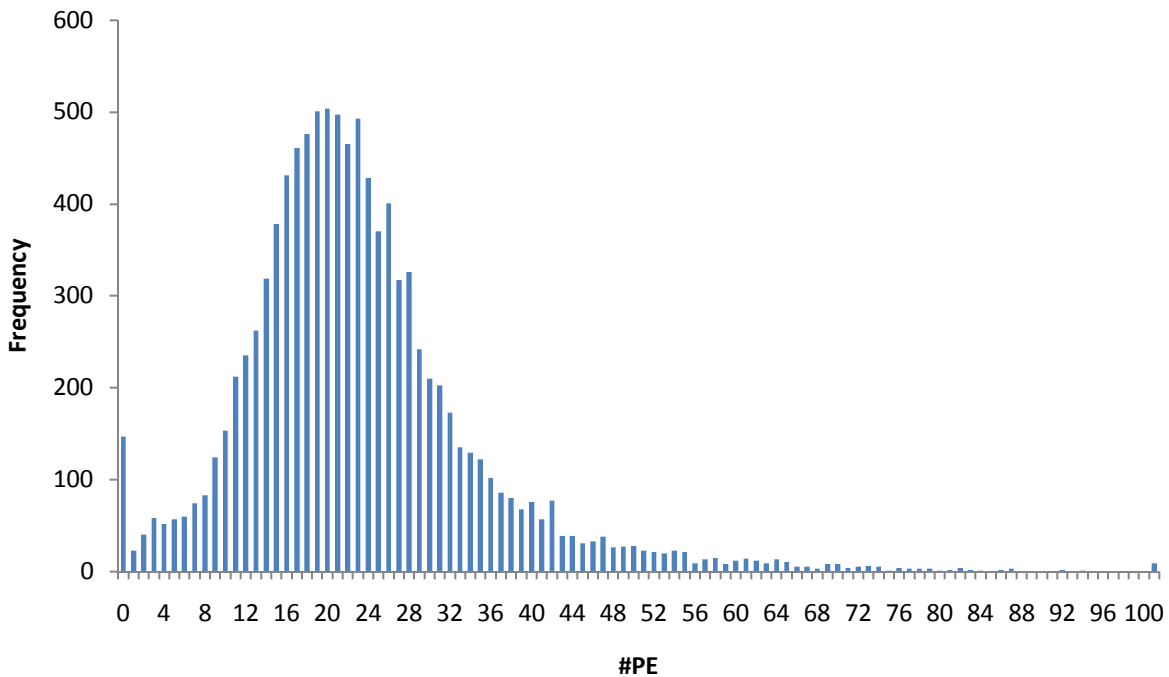


Figure III-19 : Rendement lumineux d'une plaque scintillante équipée d'une photodiode avalanche

### 3.3. Résultats

La surface active de la photodiode utilisée pour cette expérience est de  $9 \text{ mm}^2$  ( $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ) contre  $50 \text{ mm}^2$  (8 mm de diamètre) pour un PMT standard. Une plaque scintillante recouverte de peinture blanche a un rendement lumineux moyen de 40 photoélectrons lorsqu'elle est couplée à un PMT et de 19 photoélectrons lorsqu'elle est couplée à une G-APD. A surface active équivalente, le rendement lumineux de la G-APD est donc 2.5 fois plus important que celui du PMT. L'efficacité quantique de la G-

APD est en outre de l'ordre de 50% alors que celle du PMT est de l'ordre de 30%. De plus sa faible tension d'alimentation (70 V) permet son intégration dans le vide secondaire du détecteur, ce qui permet l'utilisation d'un guide de lumière rigide. En revanche, les photodiodes avalanches sont très sensibles au bruit électromagnétique, une étude complète devrait donc être faite avant toute intégration sur le LHC.

## 4. Conclusions

L'étude expérimentale menée à DESY a permis d'une part d'optimiser le rendement lumineux des plaques scintillantes du détecteur ALFA en validant le choix d'un revêtement en peinture blanche diffusante, et d'autre part de confirmer l'homogénéité de la réponse des compteurs Trigger. En revanche le comportement au bord des plaques n'a pas pu être confirmé en raison des conditions expérimentales.

La solution de photo-détection retenue pour les compteurs Trigger du détecteur ALFA, consistant en un PMT monocanal couplé à la plaque scintillante par un paquet de fibres optiques, permet d'obtenir un rendement lumineux suffisant, mais ce dernier pourrait être optimisé en remplaçant les paquets de fibres optiques par des guides de lumière rigides. Cette alternative n'est pas envisageable avec un PMT standard car cela implique de le faire fonctionner dans la zone de vide secondaire du détecteur où des décharges électriques se produisent entre ses contacts, à cause de la haute tension nécessaire à son fonctionnement. Ce problème pourrait être résolu en remplaçant la PMT par une G-APD qui a une tension d'alimentation de seulement 70 V. Il a été démontré qu'une photodiode avalanche couplée à un guide de lumière rigide fournit un meilleur rendement lumineux surfacique que la solution actuellement retenue pour les compteurs Trigger. Cependant une étude complète devrait être menée pour valider sa compatibilité avec les aspects environnementaux du LHC pour une éventuelle intégration dans le détecteur ALFA.

J'ai participé au test faisceau à DESY pour sa préparation et les prises de données. J'ai ensuite mené une analyse de données sous ROOT qui a permis de fournir les résultats présentés dans ce chapitre. Les résultats de cette analyse ont en outre été confirmés par une étude faite en parallèle sous PAW par Karlheinz Hiller, physicien de la collaboration ALFA. Nos résultats ont donné lieu à une note interne [38]. Je me suis ensuite intéressé à la possibilité d'utiliser une photodiode en mode Geiger pour la conversion photoélectrique du signal des compteurs Trigger. J'ai mené l'expérimentation en laboratoire présentée dans ce chapitre sous la direction de Christian Joram.

## IV. Réalisations pour le contrôle opérationnel du détecteur ALFA

Les installations du LHC et de ses détecteurs ne sont pas accessibles pendant l'exploitation du faisceau, c'est pourquoi un système de contrôle et de monitoring fiable et interconnecté est nécessaire pour garantir le fonctionnement de l'accélérateur, des détecteurs et permettre un pilotage concerté de tous les éléments.

Le détecteur ALFA fait partie des sous-détecteurs d'ATLAS et sera donc intégré dans l'architecture globale du DCS d'ATLAS. N'étant pas installé dans la caverne principale d'ATLAS, le détecteur ALFA doit également avoir un haut niveau de connectivité avec le système de contrôle du LHC. Après avoir décrit l'architecture globale du détecteur et identifié ses besoins, ce chapitre va présenter les développements préliminaires du système de contrôle en laboratoire ainsi que les développements futurs qui seront nécessaires à l'intégration d'ALFA lors de son installation.

### 1. Architecture globale du système de contrôle du détecteur

Le système de contrôle du détecteur ALFA, ou DCS [12], est divisé en trois couches opérationnelles partant de l'électronique Front-End (FE) et des services du détecteur jusqu'à la couche globale de contrôle du détecteur ATLAS. Comme le montre la Figure IV-1, une station de contrôle locale (LCS) située dans un local d'électronique attenante à la caverne expérimentale permet le monitoring et le contrôle de l'électronique FE du détecteur et des services tels que les alimentations hautes tensions et basses tensions ou le système de pompage pour la mise sous vide des Pots Romains. La LCS communique avec l'électronique FE par l'intermédiaire de bus de terrain de type CAN ou Modbus. Un serveur OPC fait la connexion entre les bus de terrain et un projet PVSS qui contient les applications de contrôle bas niveau. Le projet PVSS échange également des informations par liaison Ethernet avec un protocole DIM (Distributed Information Management) avec les systèmes qui ne font pas partie intégrante du DCS d'ALFA tels que le système d'acquisition de données (DAQ) ou le système de contrôle du mouvement des Pots Romains qui dépend du système de contrôle du LHC. La LCS est connectée à la SCS (Subdetector Control Station) d'ALFA qui est le nœud principal du système de contrôle. La SCS permet d'une part l'exploitation complète du détecteur et d'autre part de se connecter au système de contrôle global d'ATLAS en applications distribuées. La Figure IV-1 représente la structure du système de contrôle d'ALFA lors de son intégration finale dans l'expérience ATLAS qui aura lieu pendant la période d'arrêt du LHC de l'hiver 2010-2011, lorsque les détecteurs seront installés sur le LHC. L'implémentation de la couche de contrôle haut niveau (SCS) se fera pendant cette intégration en 2010 et n'est donc pas présentée ici. En revanche, les paragraphes suivants décrivent les développements préliminaires des applications bas niveau effectués en laboratoire qui prendront place dans la LCS sur trois axes :

- La configuration de l'électronique FE pour le réglage à distance des paramètres des puces MAROC.



- Le monitoring des paramètres locaux des Pots Romains
- L'implémentation des protocoles de communication avec le DAQ et le système de contrôle du mouvement des Pots.

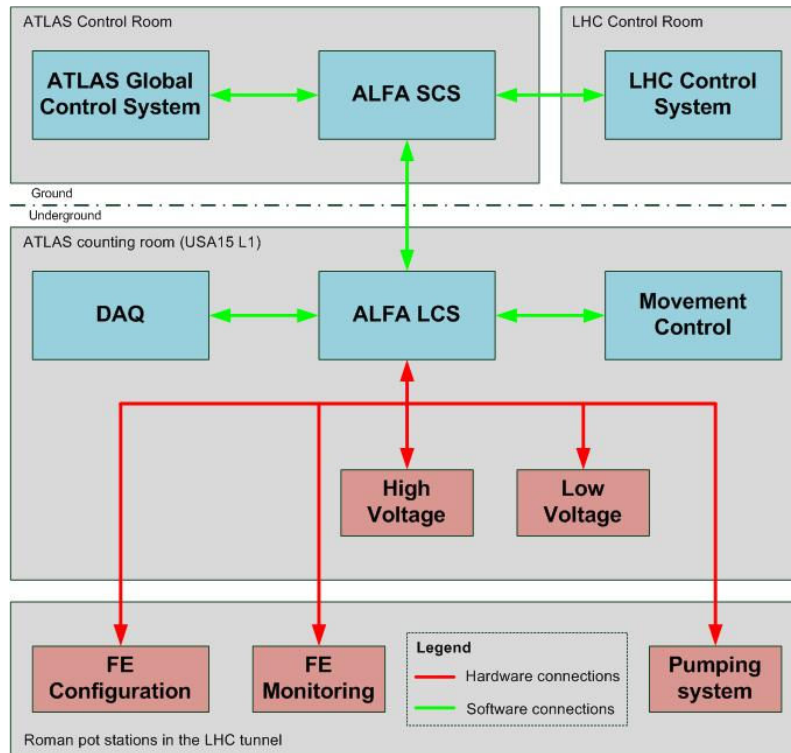


Figure IV-1 : Schéma global du système de contrôle du détecteur ALFA

## 2. Configuration de l'électronique frontale

### 2.1. Problématique

Chaque Pot Romain est équipé de 23 MAPMT auxquels sont connectés les 20 plans de 64 fibres scintillantes du détecteur principal et les six plans de 30 fibres des détecteurs Overlap (voir chapitre 1). Les signaux analogiques issus des canaux de chaque MAPMT sont convertis en signaux numériques par le PMF qui leur est associé.

Comme le montre la Figure IV-2, les MAPMT équipés de leur PMF sont agencés par rangées de cinq et sont connectés entre eux par des nappes en Kapton sur la carte mère (voir chapitre 1). Chaque puce MAROC produit un mot de 64 bits pour chaque acquisition de données et le FPGA assure le transfert des données sur le bus vers la carte mère. La carte mère compile les données des 23 PMF qui lui sont associés et transfère l'information vers le DAQ d'ALFA par fibre optique.

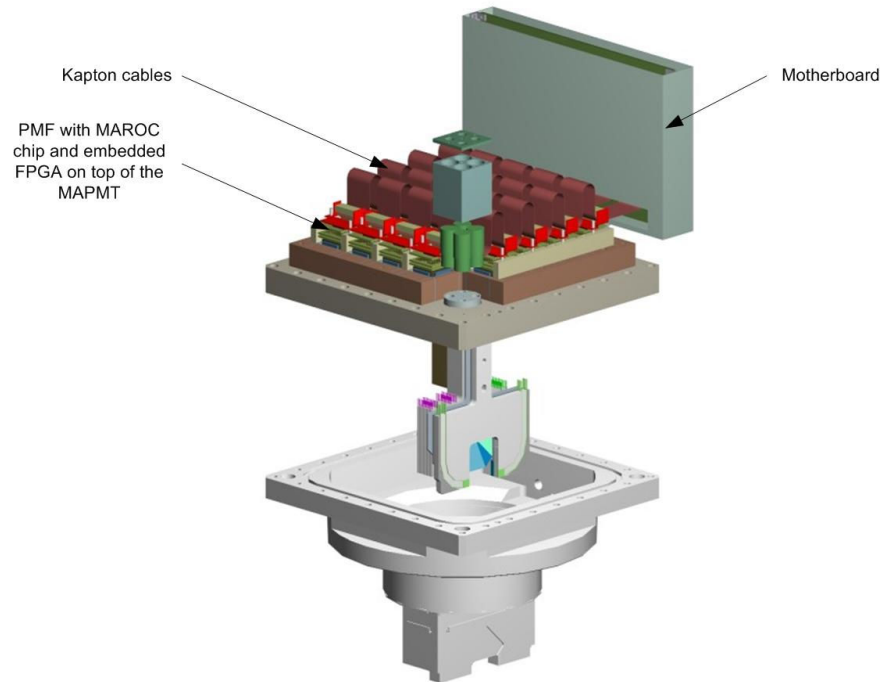


Figure IV-2 : Schéma d'un Pot Romain équipé de son électronique Front-End

Le fast shaper de la puce MAROC mesure les impulsions électriques provenant des canaux du MAPMT et les convertit en signal numérique si un seuil de déclenchement prédéfini est atteint. Ce seuil de déclenchement est commun aux 64 canaux du PMF, il est donc nécessaire de pouvoir régler indépendamment les gains appliqués aux signaux analogiques provenant des canaux du MAPMT afin de fournir un trigger homogène en fonction de la quantité de lumière reçue. Pour cela, le seuil de déclenchement, les gains des canaux et des bits de contrôle de la puce MAROC doivent être configurables à distance.

## 2.2. Description des paramètres de configuration de la puce MAROC

Chaque puce MAROC possède un registre à décalage dédié au stockage de ses paramètres de configuration. Ce registre a une profondeur de 538 bits qui sont utilisés de la manière suivante :

- 18 bits de contrôle utilisés principalement pour configurer le convertisseur analogique / numérique intégré à la puce MAROC,
- 72 bits pour le réglage du seuil de déclenchement des 64 canaux numériques,
- 448 bits pour l'ajustement des gains des 64 canaux.

La Figure IV-3 montre la structure du registre de configuration (A) et le détail de ses sous-ensembles. Les 18 bits de contrôle (B) permettent d'activer / désactiver et paramétrer des fonctions internes de la puce MAROC tels que le fast shaper pour la discrimination des signaux analogiques en signaux numériques ou encore l'ADC de type Wilkinson intégré. Les 72 bits suivants (C) permettent de régler le seuil de déclenchement des discriminateurs. Trois seuils peuvent être paramétrés sur 24 bits, avec respectivement DAC0 et DAC1 pour établir une fenêtre d'acquisition (cette fonctionnalité n'est pas

utilisée sur le détecteur ALFA) et DAC2 pour établir un seuil bas de déclenchement. Les 24 bits sont scindés en un « miroir » et un « thermomètre » codés respectivement sur 8 et 16 bits. Chacun des 16 bits du thermomètre représente une gamme de seuil et chaque gamme a 256 subdivisions codées sur 8 bits et représentées par le miroir. Enfin, chacun des 64 canaux de la puce MAROC ont un gain réglable qui permet de compenser les fluctuations de gains des canaux du MAPMT. Chaque gain est codé sur six bits plus un bit d'overflow (D) qui fournissent une pleine échelle de 64 en décimal. Un gain de 0,5 est obtenu avec une valeur décimale égale à 8, 1 avec 16, 2 avec 32... La pleine échelle de la correction du gain de la puce MAROC permet donc une compensation jusqu'à un facteur 3, ce qui est suffisant pour corriger les fluctuations de gain du MAPMT (voir chapitre 2).

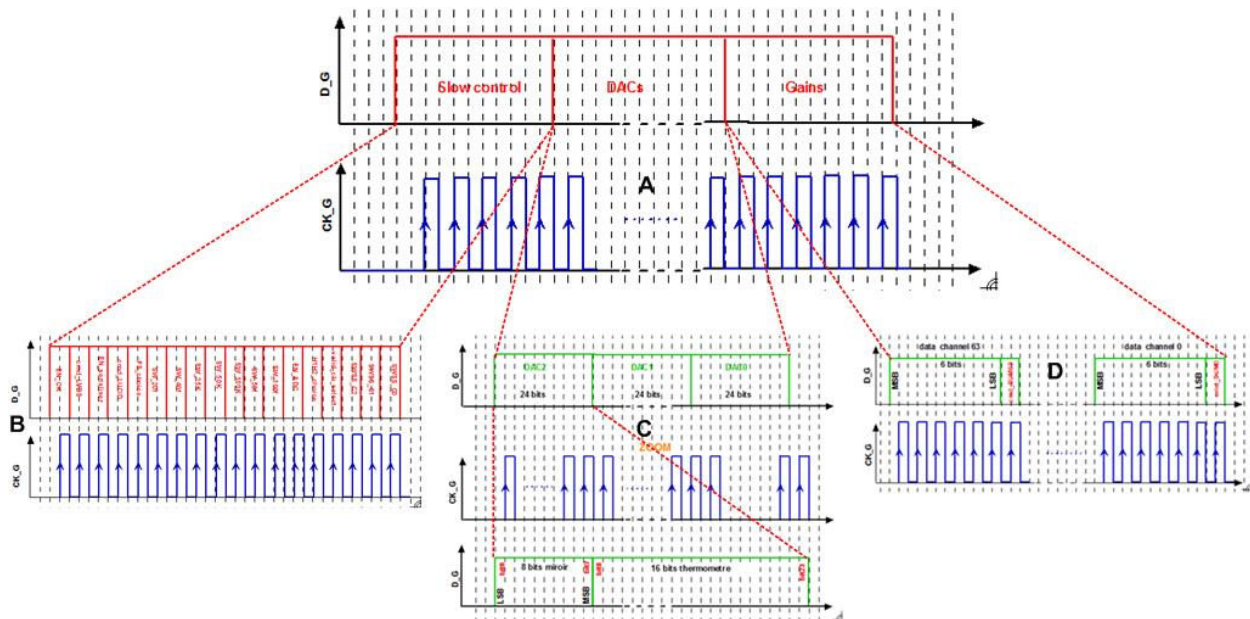


Figure IV-3 : A. Structure du registre à décalage de configuration de la puce MAROC. B. Zoom sur les bits de contrôle. C. Zoom sur les bits de paramétrage du seuil de déclenchement. D. Zoom sur les bits de paramétrage des gains

### 2.3. Remplissage du registre de configuration

Le remplissage du registre à décalage de configuration de la puce MAROC est fait par l'intermédiaire du FPGA situé sur le PMF ou ALFA-R [39]. Le ALFA-R contient six registres internes de 16 bits qui sont listés dans la Table IV-1.

Table IV-1 : Registres internes du FPGA ALFA-R

| Offset | R / W | Registre | Description                                |
|--------|-------|----------|--|
| 0x00   | W     | CONTROL  | Registre de contrôle                       |
| 0x01   | R     | STATUS   | Registre d'état                            |
| 0x02   | R / W | MASK1    | Registre de masque 1                       |
| 0x03   | R / W | MASK2    | Registre de masque 2                       |
| 0x04   | R / W | MASK3    | Registre de masque 3                       |
| 0x05   | R / W | MASK4    | Registre de masque 4                       |
| 0x06   | R / W | STREAM   | Registre de configuration de la puce MAROC |

Les registres CONTROL et STATUS permettent respectivement d'écrire et de lire les paramètres internes du ALFA-R. Les quatre registres de masque permettent d'inclure ou d'exclure individuellement chacun des 64 canaux de la puce MAROC pendant l'acquisition de données. Enfin le registre STREAM sert d'interface pour l'accès au registre de configuration de la puce MAROC. Comme le montre la Figure IV-4, les 3 bits de poids faible du registre sont utilisés pour transférer les bits de configuration. Le bit Reset est mis à 0 avant le lancement de la configuration de la puce MAROC, puis il est maintenu à 1 pendant la configuration. Le bit DATA passe les bits de configuration et enfin le bit Clock est utilisé comme horloge. Il faut donc envoyer deux registres de 16 bits à la puce MAROC pour remplir un bit du registre de configuration, par exemple pour passer un bit à 1 dans le registre, il faut envoyer 110 puis 111 (Reset, DATA, Clock).

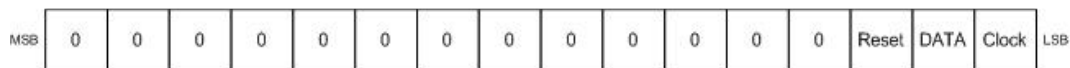


Figure IV-4 : Registre STREAM du ALFA-R pour la configuration de la puce MAROC

Pour configurer une puce MAROC, il faut donc passer 1077 mots de 16 bits (reset + données) dans le registre STREAM du ALFA-R.

## 2.4. Choix technologiques et tests préliminaires

Lors du développement de la première version de la carte mère d'ALFA, deux alternatives ont été envisagées pour la transmission des données de configuration vers l'électronique front-end :

- Une interface USB pour une transmission directe depuis le PC (LCS) vers la carte mère.
- L'utilisation du port série (SPI) de l'ELMB intégré à la carte mère pour le monitoring du Pot.

La transmission des données par une interface USB ne peut être qu'une solution provisoire, utilisable uniquement pour les tests en laboratoire. En effet, la transmission USB n'est d'une part pas adaptée à de longues distances (la LCS est située à plus de 300 mètres des stations) et n'est d'autre part pas suffisamment robuste pour une transmission de données dans un environnement « bruyant » tel que le LHC. Le choix s'est donc dirigé vers l'utilisation du port SPI de l'ELMB car il permet d'utiliser la transmission par bus de terrain depuis la LCS jusqu'aux stations ALFA.

Le protocole SPI utilise trois sorties et une entrée numérique utilisées comme suit :

- Chip Select : Permet d'activer la communication avec un client (actif bas). Le port SPI possède quatre chip select.
- Clock : cette sortie est utilisée pour transmettre l'horloge qui va cadencer la communication entre l'ELMB et ses clients.
- Data OUT : ligne de transfert de données de l'ELMB vers un client (mots de 8, 16, 24 ou 32 bits)
- Data IN : ligne de transfert de données d'un client vers l'ELMB (mots de 8, 16, 24 ou 32 bits)

La Figure IV-5 montre un exemple de séquence de transfert de données par SPI. Après activation du chip select, l'ELMB transmet 32 bits de données synchronisés sur l'horloge (1). Le chip select est désactivé pour clôturer l'opération d'écriture. Le chip select est réactivé et 16 bits de données synchronisés sur

l'horloge (2) sont envoyés comme requête de lecture, 16 fronts d'horloge sont ensuite envoyés (3) pour permettre au client d'envoyer les données requises sur la ligne data IN (non représentée ici). Le chip select est désactivé.

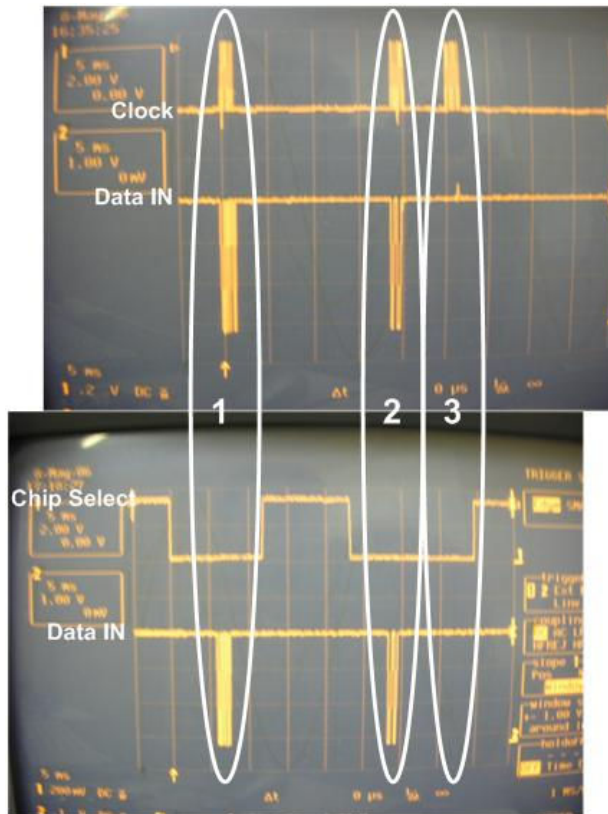


Figure IV-5 : Communication sur le port SPI de l'ELMB vue à l'oscilloscope (5 ms/division; 1V/division pour chip select et clock et 2V/division pour data IN)

## 2.5. Réalisation

### 2.5.1. Intégration des entrées/sorties de l'ELMB sur la carte mère

L'ELMB est intégré à la carte mère et ses entrées/sorties numériques sont connectées aux composants de l'électronique front-end. Comme le montre la Figure IV-6, les quatre lignes du port SPI de l'ELMB (data IN, data OUT, clock et chip select) sont connectées au FPGA principal de la carte mère (ALFA-M) et aux FPGA situés sur les PMF (ALFA-R) pour permettre à l'ELMB d'interagir avec chacun d'entre eux. Quatre sorties numériques de l'ELMB sont également câblées pour effectuer la réinitialisation des principaux composants de l'électronique front-end. Ainsi le ALFA-M, le GOL (Gigabit Optical Link), le TTC (Timing, Trigger and Control) ainsi que l'ensemble des ALFA-R (une sortie digitale pour tous les PMF) ont leurs entrées de reset connectées à l'une des sorties digitales de l'ELMB. L'ELMB est contrôlé à distance par bus CAN, ce qui permet d'effectuer l'ensemble des commandes de reset et de configuration de l'électronique front-end avec un seul protocole de communication.

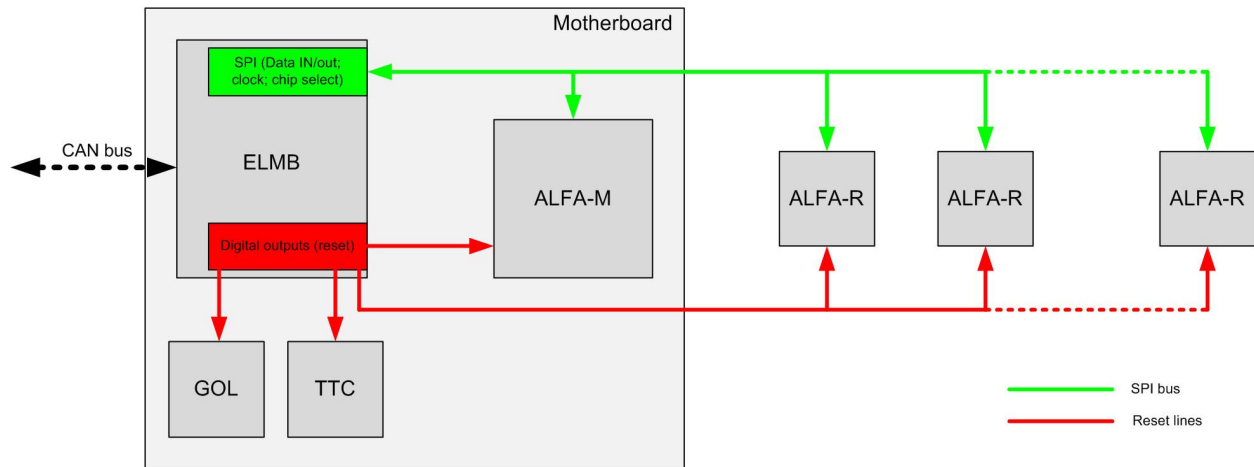
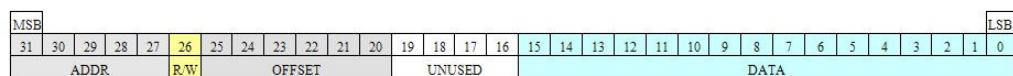


Figure IV-6 : Intégration des entrées sorties numériques de l'ELMB sur l'électronique front-end du détecteur ALFA

### 2.5.2. Définition d'un protocole de communication basé sur le SPI

Le protocole qui a été élaboré pour la communication entre l'ELMB et les composants FE est basé sur des mots de 32 bits pour l'écriture et de 16 bits pour la lecture. Ainsi comme le montre la Figure IV-7, le mot de 32 bits est scindé en deux parties :

- Un espace d'adressage de 16 bits qui contient l'adresse du composant cible (« ADDR » : 0 pour la carte mère, 1 à 25 pour les PMF et 31 pour une transmission simultanée à tous les PMF ou Broadcast), un bit qui permet de spécifier si la commande est une commande de lecture ou d'écriture d'un registre (« R/W » : 0 = lecture et 1 = écriture) et enfin une sous-adresse qui permet de pointer un registre dans la structure adressée (« OFFSET »).
- Un espace de données de 16 bits qui est joint à l'espace d'adressage dans le cas d'une commande d'écriture ou renvoyé par le composant cible si il s'agit d'une requête de lecture. Ainsi lorsque l'ELMB fait une demande de lecture d'un registre, il envoie les 16 bits d'adressage au composant cible sur la ligne data OUT pour spécifier le registre voulu et le composant cible renvoie le contenu du registre (16 bits) sur la ligne data IN du port SPI.



|                      |  |
|----------------------|--|
| <b><u>ADDR</u></b>   | <b><u>Addressed Structure</u></b><br>0: Motherboard<br>1 to 25: PMF<br>31: Broadcast to all PMFs |
| <b><u>R/W</u></b>    | <b><u>Read/WriteFlag</u></b><br>0: Request register data<br>1: Set register data                 |
| <b><u>OFFSET</u></b> | <b><u>Register Offset</u></b><br>Pointer to a given register of the addressed structure          |
| <b><u>DATA</u></b>   | <b><u>Data Field</u></b><br>Data as specified for addressed register.                            |

Figure IV-7 : Structure d'un mot de 32 bits pour la communication entre l'ELMB et l'électronique FE du détecteur ALFA

### 2.5.3. Schéma global de configuration des PMF

Le microcontrôleur ALFA-M possède deux registres qui sont adressables par l'ELMB : un registre de contrôle en écriture seule et un registre de statut en lecture seule qui est une copie du registre de contrôle. Comme le montre la Figure IV-8, chaque rangée de PMF (quatre ou cinq PMF par rangée) est adressée individuellement à l'aide d'un commutateur situé sur la carte mère et actionné par le ALFA-M.

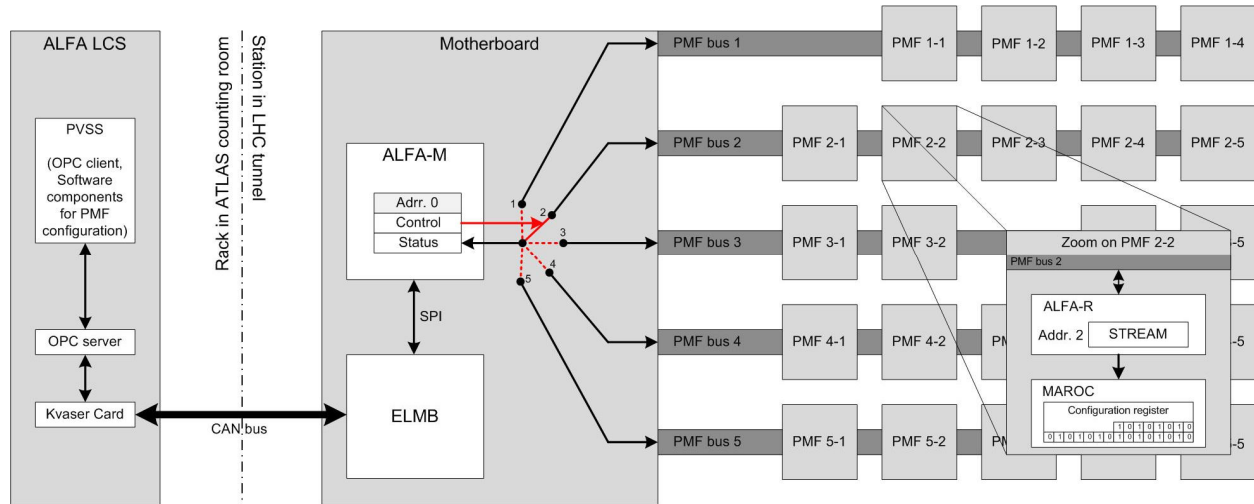


Figure IV-8 : Architecture de communication pour la configuration des puces MAROC

Afin de pouvoir accéder à un PMF, l'ELMB doit d'abord s'adresser au ALFA-M pour sélectionner le bus correspondant (1 à 5). Les PMF sont ensuite adressés de 1 à 4 (ou 5) sur chaque bus. Si la commande est une transmission de données simultanée sur tous les PMF, les cinq bus doivent d'abord être connectés.

L'ELMB active les bus de PMF en adressant le registre de contrôle du ALFA-M. Comme le montre la Figure IV-9, les cinq bits de poids faible de ce registre permettent d'activer individuellement chaque commutateur de bus.

|     |                            |    |    |    |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |
|-----|----------------------------|----|----|----|----|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| MSB | 15                         | 14 | 13 | 12 | 11 | 10       | 9 | 8 | 7 | 6 | 5   | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | LSB |
|     | Flags for data acquisition |    |    |    |    | Not used |   |   |   |   | PMF bus gates (1 = closed, 0 = open)<br>– bit 0 = bus 1 ... bit 4 = bus 5 |   |   |   |   |   |     |

Figure IV-9 : Structure du registre de contrôle du ALFA-M (16 bits)

En considérant l'activation du bus et la procédure de remplissage du registre de la puce MAROC décrite dans le paragraphe 2.3, le chargement des 538 bits de configuration dans le registre à décalage de la puce MAROC par le port SPI de l'ELMB est présenté dans la Table IV-2. Le bus sur lequel se trouve le PMF qui doit être configuré est d'abord activé (ici le bus 2) par un adressage du registre de contrôle du ALFA-M. Les PMF situés sur ce bus sont alors accessibles à l'ELMB et il est à noter que le registre de statut de la puce ALFA-M n'est plus accessible à l'ELMB lorsqu'un bus est activé, il n'est donc pas possible de relire le registre de statut pour confirmer que le bus voulu a bien été activé. Dans l'exemple présenté, la puce MAROC du PMF 2 est ensuite configurée en accédant au registre STREAM (offset = 6) du ALFA-R correspondant. Les bits de configuration sont transmis un par un à la puce MAROC après un reset de cette dernière. La séquence de configuration se termine par une désactivation du bus.

Table IV-2 : Séquence de configuration d'une puce MAROC - Exemple présenté pour le PMF 2 du bus 2

| Client          | Adresse | Registre | Offset | Données           | Commentaires                            |
|-----------------|---------|----------|--------|-------------------|---|
| ALFA-M          | 00000   | CONTROL  | 000000 | (10 bits) + 00010 | Activation du bus 2                     |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | STREAM   | 000110 | (12 bits) + 000   | Reset de la puce MAROC                  |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | STREAM   | 000110 | (12 bits) + 110   | Configuration - bit 1 = 1 (clock = 0)   |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | STREAM   | 000110 | (12 bits) + 111   | Configuration - bit 1 = 1 (clock = 1)   |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | STREAM   | 000110 | (12 bits) + 100   | Configuration - bit 2 = 0 (clock = 0)   |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | STREAM   | 000110 | (12 bits) + 101   | Configuration - bit 2 = 0 (clock = 1)   |
| ...             | ...     | ...      | ...    | ...               | ...                                     |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | STREAM   | 000110 | (12 bits) + 110   | Configuration - bit 531 = 1 (clock = 0) |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | STREAM   | 000110 | (12 bits) + 111   | Configuration - bit 531 = 1 (clock = 1) |
| ALFA-M          | 00000   | CONTROL  | 000000 | (10 bits) + 00000 | Désactivation du bus 2                  |

Il faut donc envoyer 1079 messages SPI de 32 bits pour configurer un PMF. La séquence est contrôlée par une application PVSS installée sur la LCS du détecteur ALFA qui est interfacée à un bus CAN par un serveur OPC et une carte PCI-CAN (voir Partie 1, chapitre 1) pour communiquer les données à être transmises à l'ELMB installé sur la carte mère.

#### 2.5.4. Structure logicielle pour la configuration des PMF

Une classe d'objets a été créée sous PVSS pour pouvoir manipuler les données relatives aux PMF. Ainsi, comme le montre la Figure IV-10, chaque PMF déclaré dans PVSS est représenté par huit éléments.

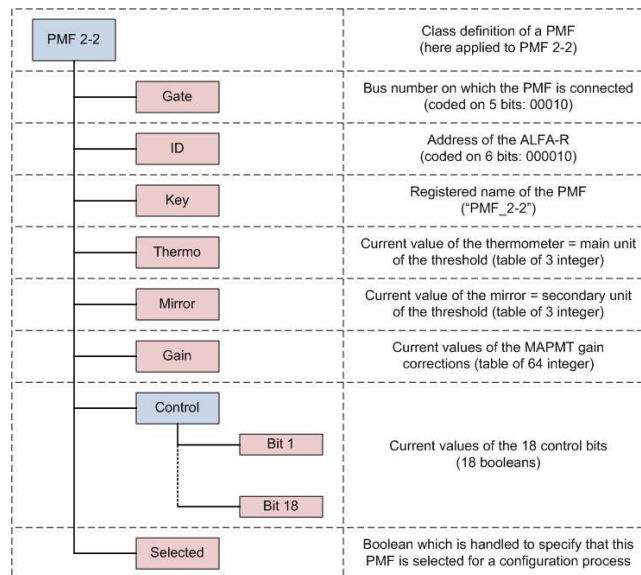


Figure IV-10 : Définition de la classe d'objet PMF dans PVSS; Exemple avec le PMF 2-2

Les trois premiers éléments (Gate, ID, Key) sont fixes et prennent respectivement la valeur du numéro de bus sur lequel se trouve le PMF, l'adresse du PMF sur ce bus et enfin la dénomination du PMF en



format texte. Les éléments suivants sont modifiables et permettent de changer localement les valeurs du seuil de déclenchement des canaux du PMF (Thermo, Mirror), les valeurs de compensation de gains des 64 canaux (Gain) et les bits de configuration du PMF (Control). Enfin un dernier élément (Selected) permet de marquer le PMF comme sélectionné pour une configuration.

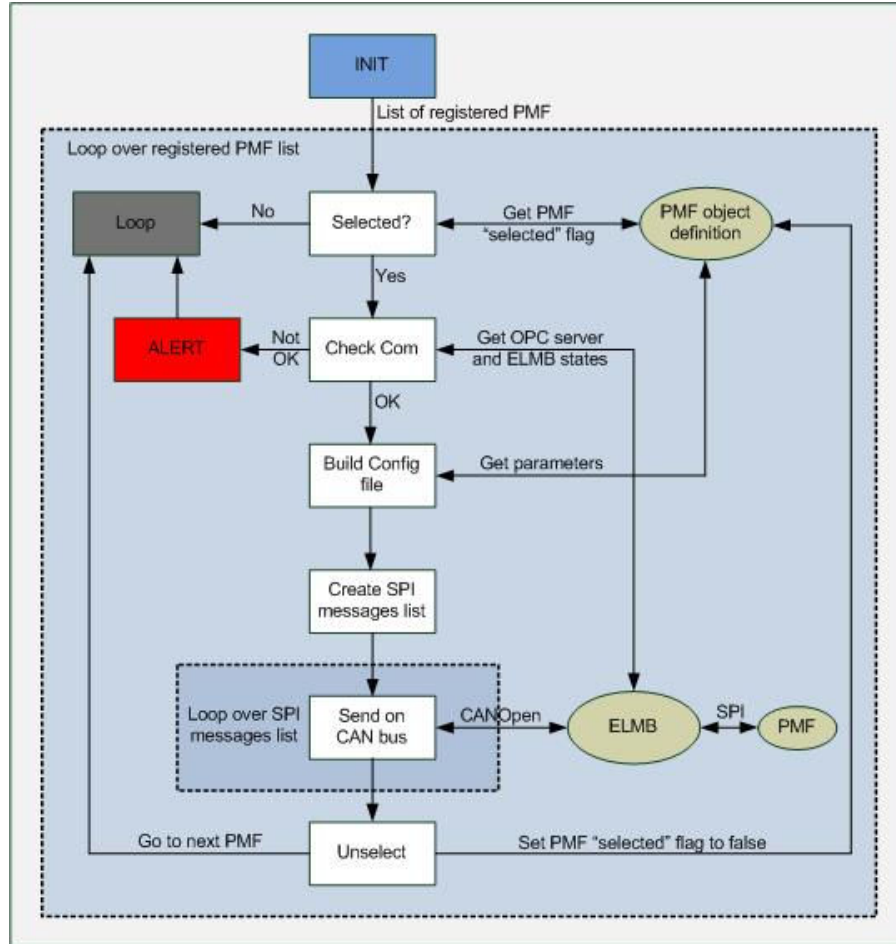


Figure IV-11 : Architecture du script de configuration des PMF sous PVSS

Un script de contrôle est implémenté sous PVSS pour gérer la configuration des PMF. Comme le montre la Figure IV-11, la liste des PMF déclarés dans ALFA est injectée dans une boucle qui traite les PMF un par un. Le script vérifie si le PMF en cours de traitement est sélectionné pour une configuration en lisant le bit « selected » de la classe d'objet du PMF. S'il n'est pas sélectionné, le script passe au PMF suivant, s'il l'est, la procédure de configuration est lancée. La première étape consiste à vérifier l'état de la communication avec l'électronique front-end, pour cela le script vérifie que PVSS est bien connecté au serveur OPC (donc qu'il est capable de communiquer sur le bus CAN) et une requête est envoyée à l'ELMB impliqué dans la configuration pour vérifier qu'il est opérationnel. Si l'un ou l'autre des tests n'aboutit pas, la procédure de configuration s'arrête et une alerte est transmise à l'opérateur. Si l'électronique front-end est en état de fonctionnement, le script récupère les tables de gains, de seuils de déclenchement (Mirror, Thermo) et les bits de contrôle du PMF stockés dans la classe d'objet du PMF et crée une copie locale du registre de configuration de la puce MAROC. Une liste de messages SPI de 32

bits est alors construite à partir de la copie du registre de configuration et en prenant en compte le schéma de configuration présenté dans la Table IV-2. La communication avec l'ELMB est finalement établie pour transmettre les 1079 messages SPI nécessaires à la configuration de la puce MAROC. Le dictionnaire d'objets CANOpen de l'ELMB contient des commandes préprogrammées pour activer / désactiver le chipselect et transmettre les messages de 32 bits sur le bus SPI.

### 2.5.5. Interface utilisateur

Une interface utilisateur a été développée afin de contrôler et monitorer la configuration des PMF. Cette interface, présentée en Figure IV-12, est adaptée aux tests en laboratoire et sur faisceau d'un Pot Romain, c'est-à-dire de 23 PMF. Lorsque l'interface est lancée, une liste déroulante est peuplée avec les PMF déclarés dans le système. Lorsqu'un PMF est sélectionné, des champs sont remplis avec sa dernière configuration connue des gains, seuils de déclenchement et bits de contrôle. Il est utile de préciser que ces valeurs de configuration sont celles stockées dans la LCS car il n'est pas possible de relire le registre de configuration de la puce MAROC et donc de connaître les valeurs qui y sont réellement stockées. L'utilisateur peut modifier individuellement les valeurs ou appliquer une valeur unique pour tous les éléments d'un même type. Il est également possible de copier les valeurs de configuration d'un PMF sélectionné vers un autre ou vers tous les autres PMF. Les modifications apportées sont enregistrées localement dans la classe d'objets des PMF. Un utilitaire permet également de charger des fichiers de configurations prédéfinis et de créer des fichiers de configurations avec les valeurs en cours des paramètres des PMF.

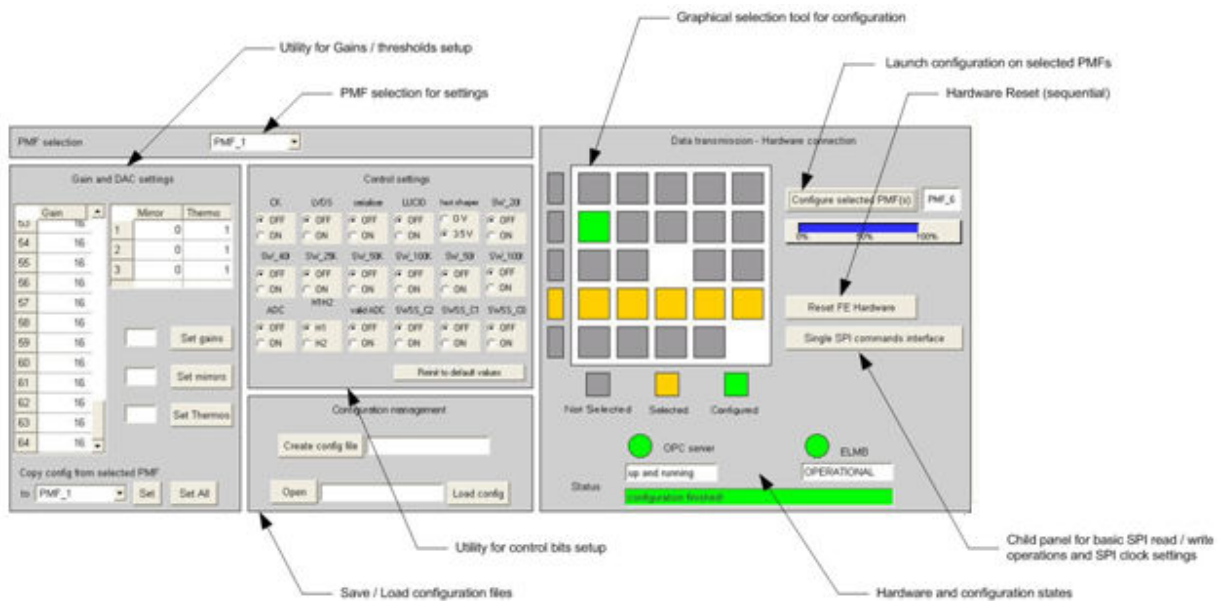


Figure IV-12 : Interface utilisateur pour la configuration de l'électronique front-end du détecteur ALFA

La seconde partie de l'interface permet de gérer la communication avec l'électronique. Les PMF y sont représentés graphiquement sur une vue qui se conforme à leur disposition réelle sur le Pot Romain. Les PMF peuvent y être sélectionnés (orange) / désélectionnés (gris) individuellement ou par rangées en vue d'une configuration (cette action agit sur le bit « selected » de la classe d'objet du PMF). Le statut du serveur OPC (« Up and running » ou « Disconnected ») et de l'ELMB impliqué dans la configuration

(« Operational », « stopped » ou « disconnected ») sont vérifiés et affichés lors de chaque configuration, ainsi que le statut de cette dernière. Enfin, trois boutons permettent respectivement de lancer la configuration sur les PMF qui ont été sélectionnés, de remettre à zéro l'électronique et de lancer un panneau secondaire pour effectuer des commandes bas niveau. Cet utilitaire, présenté sur la Figure IV-13, permet de lire ou d'écrire dans les registres des FPGA et de régler l'horloge du port SPI. L'horloge est réglée par défaut sur une période de 75 microsecondes et une activation des bits de données sur front montant.

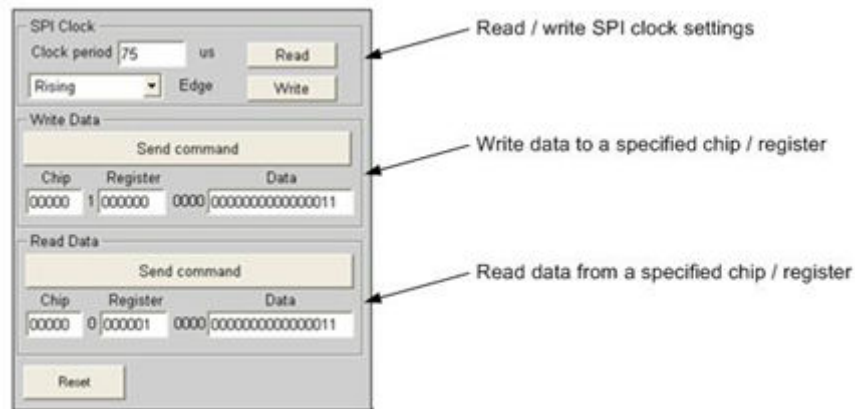


Figure IV-13 : Panneau secondaire de commandes SPI bas niveau

## 2.6. Optimisation

La méthode de configuration des PMF présentée dans le paragraphe 2.5.3 a été éprouvée avec succès lors d'un test faisceau en août 2008 au CERN pendant lequel un Pot Romain complet (deux fois dix couches de 64 fibres pour le détecteur principal et deux fois trois couches de 30 fibres pour les détecteurs Overlap, donc en tout 23 PMF) a été testé. Cependant, le point faible de cette méthode est sa lenteur d'exécution. Il faut en effet environ huit minutes pour configurer 23 PMF. La séquence d'envoi d'un message SPI vers un FPGA (activation du chipselect, envoi de 32 bits, désactivation du chipselect) dure environ 20 millisecondes et cette durée ne peut pas être optimisée par augmentation de la fréquence d'horloge du bus SPI car elle est largement dominée par les temps de latences du serveur OPC entre l'activation / désactivation du chipselect et la requête d'envoi des 32 bits. De plus, la méthode de réception des données sur la puce MAROC (deux messages de 16 bits pour 1 bit configuré) ne peut pas être modifiée. Cependant la mise à disposition d'une nouvelle version du PMF par le LAL équipée d'un FPGA<sup>10</sup> ayant plus d'espace mémoire que le précédent va permettre de modifier le schéma de transfert des données en amont de la puce MAROC.

### 2.6.1. Nouveau schéma de configuration des PMF

Ayant de l'espace mémoire disponible sur les FPGA ALFA-R, deux nouveaux registres y ont été implémentés comme indiqué dans la Table IV-3.

<sup>10</sup> Lattice LFXP6C

Table IV-3 : Nouvelle attribution de registres sur le FPGA ALFA-R

| Offset | R / W | Registre | Description                                  |
|--------|-------|----------|--|
| 0x00   | W     | CONTROL  | Registre de contrôle                         |
| 0x01   | R     | STATUS   | Registre d'état                              |
| 0x02   | R / W | MASK1    | Registre de masque 1                         |
| 0x03   | R / W | MASK2    | Registre de masque 2                         |
| 0x04   | R / W | MASK3    | Registre de masque 3                         |
| 0x05   | R / W | MASK4    | Registre de masque 4                         |
| 0x06   | R / W | STREAM   | Registre de configuration de la puce MAROC   |
| 0x08   | W     | ADDRESS  | Adressage du registre local de configuration |
| 0x09   | R / W | CONFIG   | Registre local de configuration (34x16 bits) |

L'idée est d'utiliser le ALFA-R comme intermédiaire dans le processus de configuration de la puce MAROC en copiant localement l'intégralité du fichier de configuration dans un registre (CONFIG) de 34 mots de 16 bits illustré dans la Figure IV-14 (544 bits disponibles pour 538 bits de données, le dernier mot de 16 bits n'est donc que partiellement utilisé). Ce registre peut alors être adressé par l'ELMB par protocole SPI afin de le remplir par mots de 16 bits, chacun d'entre eux étant adressable (de 0 à 33) par l'intermédiaire du registre ADDRESS.

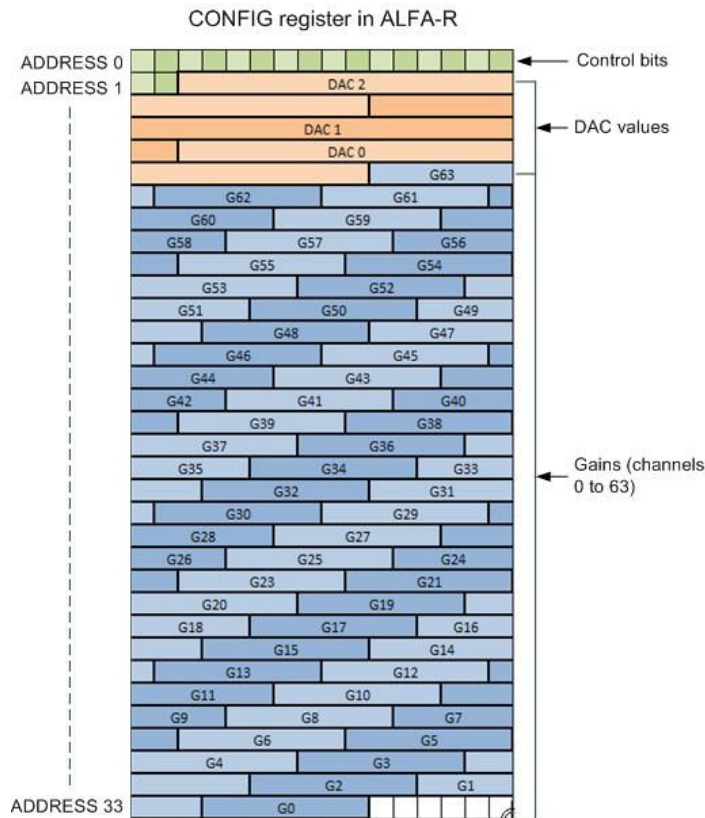


Figure IV-14 : Détails du remplissage du registre CONFIG du ALFA-R pour le stockage local des paramètres de configuration de la puce MAROC

Par cette technique, deux messages SPI de 32 bits sont nécessaires pour copier 16 bits de données de configuration sur le ALFA-R alors que 32 messages étaient nécessaires avec la méthode précédente. Un bit d'activation a été programmé sur le registre de contrôle du ALFA-R (bit 12) pour déclencher la configuration de la puce MAROC depuis le ALFA-R. Ainsi, une fois les données mises à jour dans le registre CONFIG du ALFA-R par l'ELMB, ce dernier déclenche une opération préprogrammée sur le ALFA-R qui envoie les bits de données de configuration dans le registre à décalage de la puce MAROC en respectant la méthode décrite dans le paragraphe 2.3. Le ALFA-R synchronise ce transfert de données sur son horloge interne qui est de 40 MHz. En suivant cette procédure, la nouvelle séquence de messages SPI pour la configuration d'un PMF est présentée dans la Table IV-4. Le bus sur lequel se trouve le PMF est activé, puis des drapeaux autorisant le processus de configuration sont activés. Les 34 sous adresses du registre CONFIG du ALFA-R sont ensuite remplis et le transfert des données du ALFA-R vers la puce MAROC est déclenché. Enfin le bus sur lequel se trouve le PMF est désactivé.

Table IV-4 : Nouvelle séquence de configuration d'une puce MAROC - Exemple présenté pour le PMF 2 du bus 2

| Client          | Adresse | Registre | Offset | Données           | Commentaires                           |
|-----------------|---------|----------|--------|-------------------|--|
| ALFA-M          | 00000   | CONTROL  | 000000 | (10 bits) + 00010 | Activation du bus 2                    |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | CONTROL  | 000000 | (12 bits) + 111   | Activation des bits de configuration   |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | ADDRESS  | 001000 | (9 bits) + 000000 | Configuration – adresse 0              |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | CONFIG   | 001001 | 16 bits           | Configuration – remplissage adresse 0  |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | ADDRESS  | 001000 | (9 bits) + 000001 | Configuration – adresse 1              |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | CONFIG   | 001001 | 16 bits           | Configuration – remplissage adresse 1  |
| ...             | ...     | ...      | ...    | ...               | ...                                    |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | ADDRESS  | 001000 | (9 bits) + 100001 | Configuration – adresse 33             |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | CONFIG   | 001001 | 16 bits           | Configuration – remplissage adresse 33 |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | CONTROL  | 000000 | 0001 + (11 bits)  | Transfert des données vers MAROC       |
| ALFA-R (PMF2-2) | 00010   | CONTROL  | 000000 | 0000 + (11 bits)  | Remise à 0 du bit de transfert         |
| ALFA-M          | 00000   | CONTROL  | 000000 | (10 bits) + 00000 | Désactivation du bus 2                 |

Cette nouvelle méthode de configuration permet en outre de ne transmettre au ALFA-R qu'une partie des données de configuration en fonction des changements qui doivent être effectués. Ainsi, si on se réfère à la Figure IV-14, la modification du seuil de déclenchement de la puce MAROC ne nécessite que de modifier le contenu du registre CONFIG aux adresses 1 à 5, le ALFA-R quant à lui, enverra toujours l'intégralité du registre à la puce MAROC. Cette méthode présente également l'avantage de pouvoir relire le contenu du registre CONFIG du ALFA-R et donc de vérifier que la transmission par bus CAN de la configuration et le traitement des données par l'ELMB ont bien été effectués, ce qui n'était pas possible avec la transmission directe sur la puce MAROC.

Comme le montre la Figure IV-15, une nouvelle interface utilisateur a été développée. Elle reprend les fonctionnalités de l'interface présentée en Figure IV-12 avec quelques fonctionnalités supplémentaires. Il est possible de sélectionner les paramètres des PMF qui vont être envoyés à l'ALFA-R (seuils de déclenchement, gains, bits de contrôle) afin de profiter de la possibilité de configuration partielle offerte par la nouvelle méthode de configuration. Un sous-panneau dédié aux commandes de remise à zéro a été développé ; il permet de réinitialiser séparément chaque composant (ALFA-M, ALFA-R, GOL ou TTC). Les bits de contrôle ne sont jamais modifiés lors de l'exploitation du détecteur car ils sont essentiellement dédiés au paramétrage de la conversion analogique des signaux dans la puce MAROC. Cette fonctionnalité n'est pas exploitée, c'est pourquoi l'utilitaire de gestion des bits de contrôle a été ramené à un sous-panneau. Enfin, l'interface de configuration a été intégrée à un panneau global qui permet également de surveiller les paramètres locaux des Pots Romains (voir paragraphe 3), deux boutons permettent donc de passer d'un panneau à l'autre.

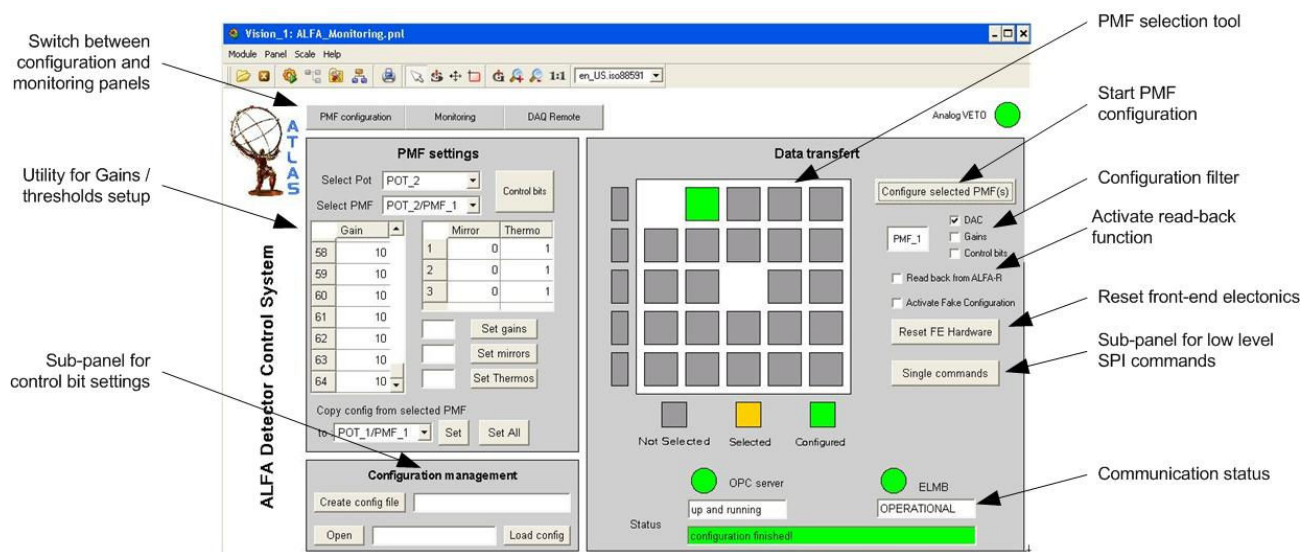


Figure IV-15 : Deuxième génération d'interface utilisateur pour la configuration de l'électronique front-end du détecteur ALFA

### 2.6.2. Performances

Le nouveau schéma de configuration des puces MAROC a été testé et validé en laboratoire sur un prototype complet de Pot Romain. La vitesse de configuration a été ramenée à un niveau acceptable pour l'exploitation du détecteur, avec 18 secondes pour reconfigurer complètement les 23 PMF d'un Pot Romain contre environ 8 minutes précédemment. Il est à noter que le paramètre qui est le plus manipulé est le seuil de déclenchement, en particulier lors des tests de caractérisation du détecteur et lors des campagnes d'étalonnage. Ainsi, en exploitant la possibilité de n'adresser que les champs du registre CONFIG du ALFA-R qui contiennent les valeurs de seuils (cinq mots de 16 bits), le temps de configuration d'un pot entier atteint sept secondes.

### 3. Monitoring des paramètres des Pots Romains

Outre la configuration de l'électronique front-end, les ELMB installés sur les cartes mères du détecteur ALFA sont également utilisés pour l'acquisition analogique des paramètres d'exploitation des Pots Romains. Ainsi, 62 entrées analogiques sur les 64 disponibles sont utilisées et réparties de la façon suivante :

- Tension d'alimentation des ALFA-R (2,5 V) par rangée (x5).
- Courant consommé par les ALFA-R par rangée (x5).
- Tension d'alimentation des puces MAROC (3,8 V) par rangée (x5).
- Courant consommé par les puces MAROC par rangée (x5).
- Tension d'alimentation (haute tension) des MAPMT (x23).
- Tension d'alimentation des lignes de contrôle des PMF (x2 : 3,3 V et 1,2 V).
- Courant consommé par les lignes de contrôle des PMF (x2).
- Courants consommés par les alimentations de la carte mère (x3)
- Courants consommés par le GOL et le TTC.
- Températures (connecteur sur la carte mère fournissant la connectivité pour dix sondes PT100)

Le convertisseur digital / analogique de l'ELMB est réglé sur une pleine échelle de 5 V qui permet une lecture directe des basses tensions. Les signaux fournis par les hautes tensions des MAPMT, la lecture des courants et la lecture des températures sont conditionnés pour parvenir à l'ELMB sur une échelle de zéro à 5 V.

Comme le montre la Figure IV-16, une interface utilisateur permet d'afficher les valeurs en ligne des paramètres sur une vue représentant le bloc de 23 PMF connectés par rangées de cinq sur la carte mère.

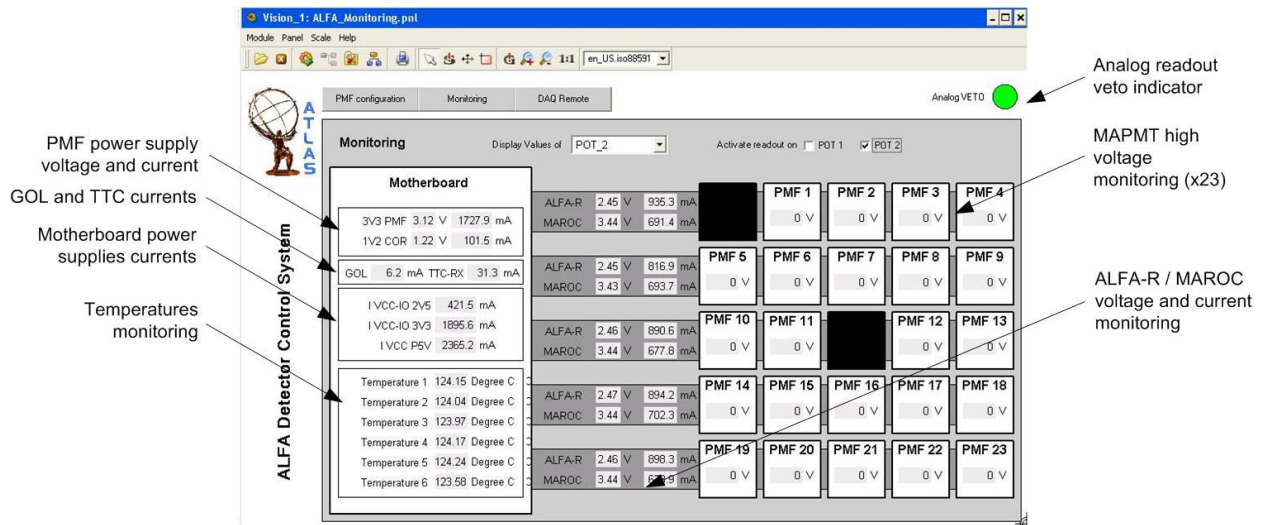


Figure IV-16 : Interface utilisateur pour le monitoring des paramètres locaux d'un Pot Romain

Les valeurs des paramètres sont rafraichies toutes les minutes par un script de contrôle qui effectue la lecture des 62 canaux analogiques de l'ELMB concerné. La méthode standard de lecture des données par synchronisation sur le bus n'a pas pu être appliquée ici car cela suppose un déclenchement systématique de l'acquisition de données toutes les minutes. Or, lors des premiers tests de lecture analogique, une incompatibilité a été identifiée entre l'utilisation de l'ADC et du port SPI de l'ELMB : ces deux composants sont contrôlés par la même sortie du microcontrôleur principal de l'ELMB. Il en résulte un dysfonctionnement de l'ELMB si une configuration des PMF (utilisation du port SPI) est activée alors que l'ADC est en cours d'utilisation. Pour éviter ce type de problème, un script a été développé pour la lecture des données analogiques. Il effectue une lecture des canaux de l'ELMB toutes les minutes en utilisant des messages CAN SDO (Single Data Objects) et il possède un bit de veto qui est contrôlé par le script en charge de la configuration des PMF. Si une configuration est lancée, le bit de veto est activé, et le script de contrôle de la lecture analogique stoppe son activité et / ou ne lance pas d'acquisition tant que le processus de configuration n'est pas terminé.

#### 4. Communication avec les systèmes externes

Le projet PVSS de la LCS du détecteur ALFA gère la communication avec l'électronique front-end mais il doit également pouvoir communiquer avec d'autres systèmes impliqués dans l'exploitation du détecteur tels que le système d'acquisition ou le système de contrôle du mouvement des Pots Romains sur le faisceau. La communication haut niveau entre PVSS et les autres systèmes s'effectue par un protocole DIM [40] (Distributed Information Management) qui fournit une couche de communication logicielle par réseau Ethernet. Comme le montre la Figure IV-17, le protocole DIM est basé sur un modèle client / serveur qui autorise la publication de services (groupes de données) identifiés par un nom unique. Un serveur de noms (Name Server ou DNS pour Domain Name System) est utilisé comme base de données de la liste de services disponibles par tous les processus connectés. Ainsi, lorsqu'un processus a besoin de souscrire à un service, il se connecte sur le serveur DNS, rendant l'opération totalement transparente pour le processus qui publie ce service. Chaque processus peut être à la fois serveur (publication de données) et client (réception de données) et peut être connecté à plusieurs serveurs DNS dépendants de plusieurs applications. Le serveur DNS peut être localisé sur une machine tierce ou sur une machine accueillant l'un des processus impliqués.

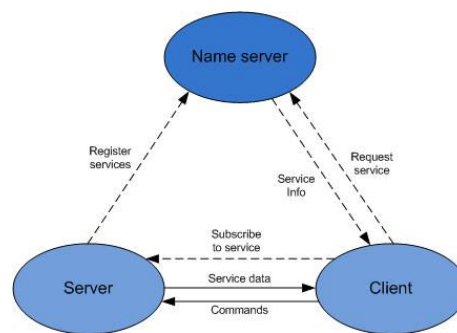


Figure IV-17 : Schéma de communication du protocole DIM



#### 4.1. Communication avec le système d'acquisition de données pour l'étalonnage du détecteur

La configuration des PMF est utilisée de manière intensive lors des procédures d'étalonnage des seuils de détection du détecteur. Cette manipulation consiste à éclairer les MAPMT du détecteur avec une lumière pulsée uniforme et contrôlée de l'ordre d'un photoélectron et de faire l'acquisition de données des canaux digitaux des PMF afin de produire des courbes en S, c'est-à-dire des courbes de déclenchement de l'acquisition en fonction de la valeur de seuil. Cet étalonnage nécessite donc plusieurs acquisitions de données successives et également plusieurs configurations des PMF (pour chaque changement de seuil). Cette procédure étant longue est fastidieuse pour un opérateur, il a été décidé d'implémenter un mécanisme automatisé de production de courbes en S.

##### 4.1.1. Description de l'architecture informatique nécessaire à l'automatisation de la production de S-curves

La Figure IV-18 présente l'architecture informatique qui a été mise en place en laboratoire pour ce développement. Deux PC sont connectés au réseau public du CERN. Le premier accueille un projet PVSS (PCRPDCS : il s'agit de la LCS d'ALFA) et un serveur DNS (DIM server). Un second PC (PCTBATL02) est équipé d'une version modifiée du système d'acquisition standard d'ATLAS (TDAQ) car le format de données actuel du détecteur ALFA n'est pas compatible avec le format de données du TDAQ standard. Une bibliothèque de fonctions appliquées à la communication par DIM a également été installée, elle fournit un ensemble de fonctionnalités de communication haut niveau entre le DCS et le TDAQ nommé DDC (DAQ to DCS Communication) [41]. Ces fonctionnalités ne seront cependant pas utilisées ici car elles ne sont pas compatibles avec le TDAQ modifié utilisé pour le détecteur ALFA. La communication DIM entre le DCS et le TDAQ se fera avec des fonctions bas niveau qui sont indépendantes des versions logicielles utilisées.

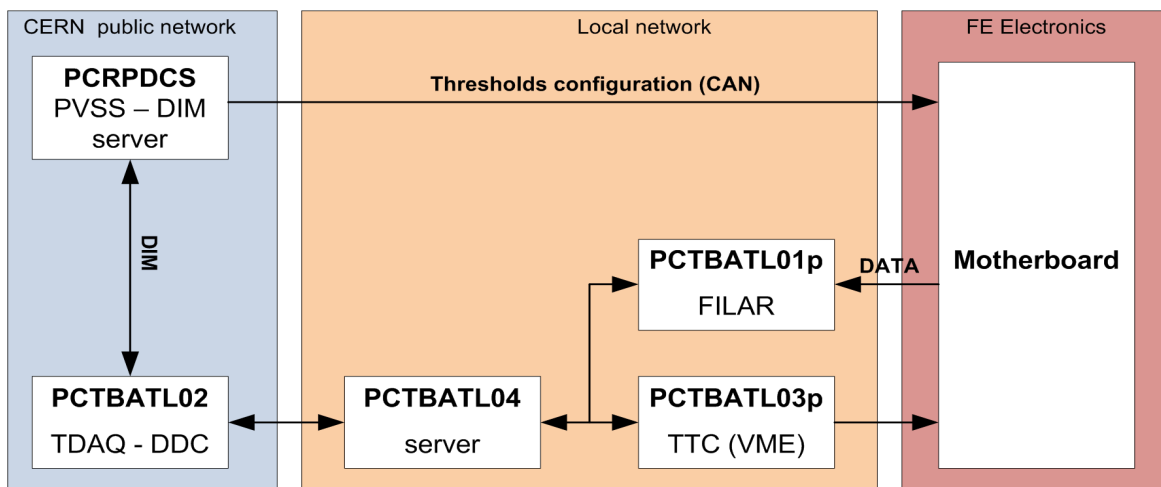


Figure IV-18 : Architecture informatique impliquée dans le processus de production automatisée de courbes en S

PCRPDCS gère la configuration des PMF par bus CAN et PCTBATL02 gère l'acquisition de données. Pour cela, un réseau local a été mis en place pour interconnecter un PC équipé d'une carte PCI/FILAR permettant l'acquisition de données par fibre optique (PCTBATL01p) et un châssis VME [42] équipé d'un

module TTC pour la gestion des trigger et la synchronisation de l'acquisition de données (PCTBATL03p). Ces deux systèmes sont pilotés par le TDAQ au travers d'un serveur local (PCTBATL04) qui assure la connexion entre le réseau technique dédié à l'acquisition de données et le réseau public.

#### 4.1.2. Réalisation logicielle de l'automatisation de la production de courbes en S

La communication DIM entre le DCS et le TDAQ doit pouvoir permettre le déclenchement d'un processus sous PVSS par le TDAQ (la configuration des PMF), l'injection d'un paramètre dans PVSS depuis le TDAQ (la valeur de seuil) et une réponse de PVSS vers le TDAQ (la confirmation que la configuration des PMF a bien été effectuée). Pour cela, un service de type RPC (Remote Procedure Call) a été implémenté, ce type de service est dédié à la commande à distance d'un processus sur un système par un autre système. Comme le montre la Figure IV-19, une structure de données est déclarée sous PVSS (« daqDcsCom ») et publiée sur le serveur DNS. Le TDAQ souscrit à ce service RPC qui permet l'interaction entre les deux systèmes. Le TDAQ manipule les éléments « trigger » et « parameters » pour respectivement déclencher un processus sous PVSS et injecter un paramètre dans ce processus. PVSS manipule l'élément « response » pour fournir un retour au TDAQ.

| Datapoint/Comment | Value | Bits  | Time                  |
|-------------------|-------|-------|-----------------------|
| parameters        | 1     | ----- | 2009.05.25 22:41:26.7 |
| response          | 1     | ----- | 2009.05.25 22:42:07.7 |
| trigger           | 1     | ----- | 2009.05.25 22:41:38.7 |

Figure IV-19 : Structure de données pour la communication DCS – DAQ

Ce processus RPC est la base du processus de production automatisée de courbes en S. La Figure IV-20 montre la réalisation de ce processus. L'utilisateur interagit uniquement avec le TDAQ en deux étapes. L'acquisition de données est d'abord lancée, cela démarre un processus dans le TDAQ qui va faire plusieurs acquisitions à plusieurs valeurs de seuils de déclenchement prédéfinis. Pour chaque valeur de seuil de déclenchement voulue, le TDAQ génère un trigger, accompagné d'un index représentant une valeur de seuil, tous deux publiés sur le service RPC. Le trigger du TDAQ déclenche un processus de configuration des PMF sous PVSS. La valeur de seuil voulue est lue dans une table stockée localement à l'index spécifié par le TDAQ et cette valeur est appliquée à tous les PMF déclarés dans PVSS en suivant la procédure décrite dans le paragraphe 2.6.1. Si la configuration des PMF s'est faite correctement, le processus de configuration publie la valeur du seuil demandé sur l'élément « response » du service RPC et le TDAQ procède à l'acquisition de données, et fait ensuite une nouvelle demande de changement de seuil. Si une erreur a été détectée lors de la configuration des PMF (perte de communication ou erreur

provenant de l'électronique front-end), la valeur -1 est publiée en réponse, ce qui déclenche l'arrêt du processus du TDAQ et la génération d'une alerte sur l'interface utilisateur.

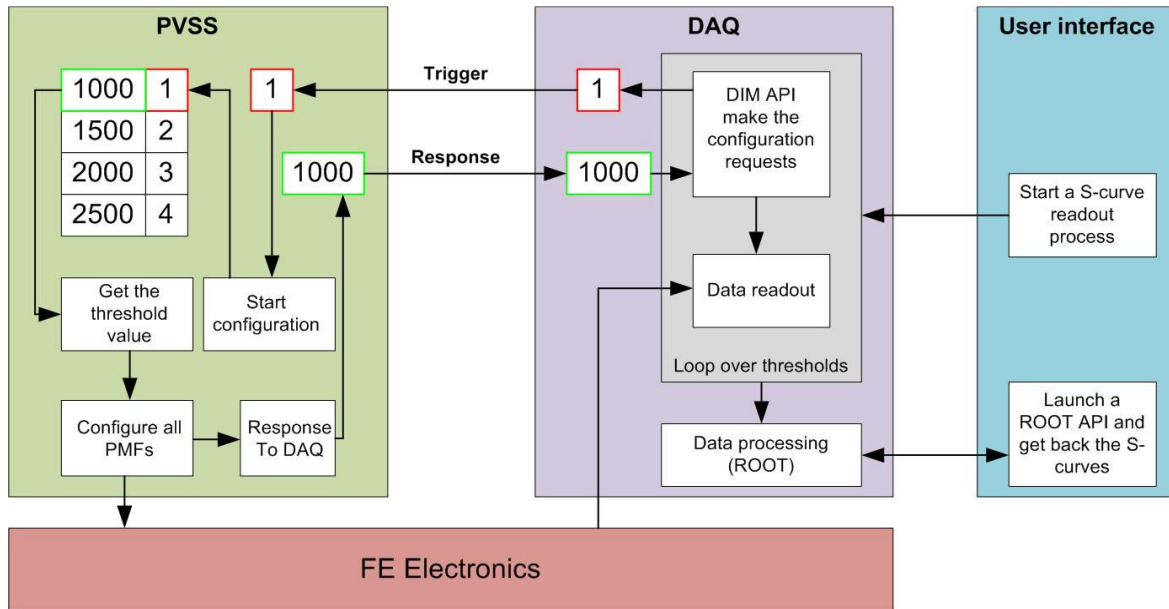


Figure IV-20 : Structure logicielle pour la production automatisée de S-curves

Une interface utilisateur présentée en Figure IV-21 a été développée sous PVSS afin de permettre à l'utilisateur de modifier la table de seuils de déclenchement qui sera ensuite utilisée par le processus de configuration des PMF. Les valeurs de seuils de départ et de fin du processus ainsi que le nombre d'itérations voulues sont paramétrables avant de créer la table de seuils.

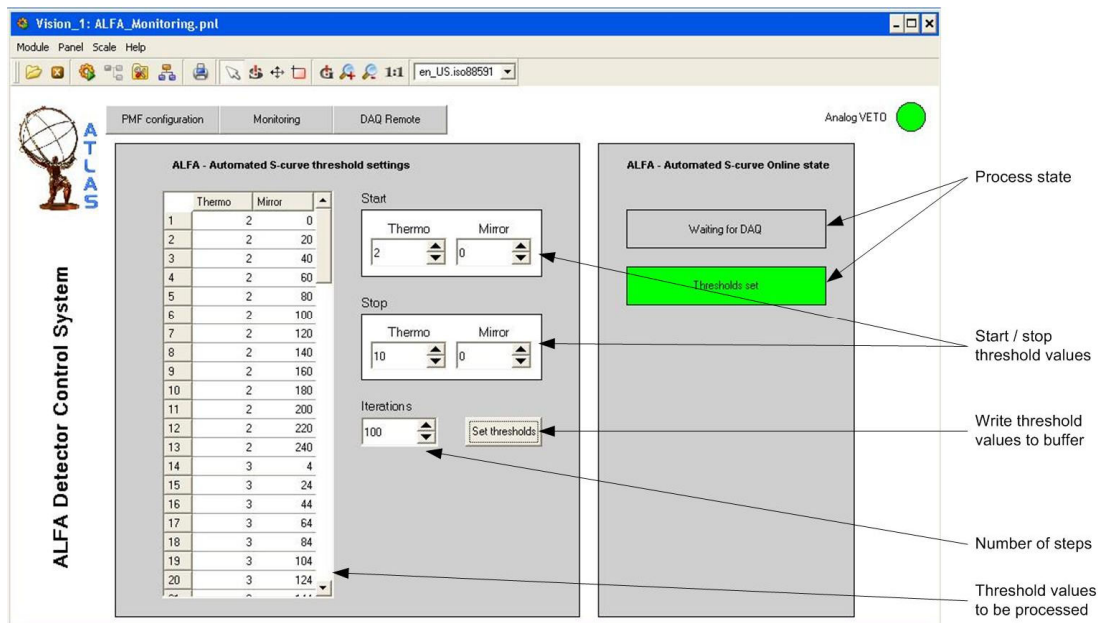


Figure IV-21 : Panneau de configuration sous PVSS pour le processus automatisé de production de S-curves

Lorsque les acquisitions de données à tous les seuils de déclenchement voulus sont terminées, l'utilisateur a à sa disposition un logiciel développé sous ROOT pour le traitement des fichiers de données et la production des courbes en S dont un exemple est présenté en Figure IV-22.

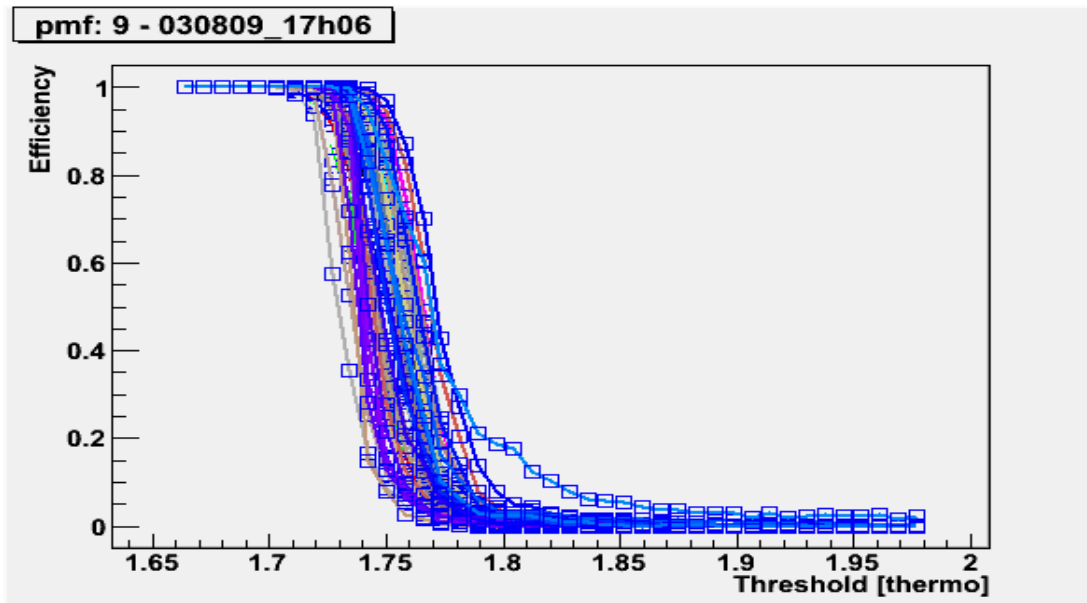


Figure IV-22 : Résultat du processus automatisé de courbes en S sur un PMF (64 canaux) avec 100 points de mesures – Efficacité de détection dans le bruit (sans excitation des canaux du PMF)

#### 4.2. Interfaçage avec le système de contrôle du mouvement des Pots

Les éléments de détection du détecteur ALFA doivent pouvoir s'approcher du faisceau du LHC. Pour cela, chaque Pot Romain est mobile et équipé d'un moteur pas à pas. Comme tous les éléments mobiles sur le faisceau, le mouvement des détecteurs ALFA est contrôlé par les opérateurs du LHC. La Figure IV-23 montre la structure du système de contrôle des Pots Romains. Chaque station est équipée de :

- Un moteur pas à pas (400 incréments par tour) par Pot couplé à un driver.
- De capteurs dédiés à la mesure de la position du Pot de deux types :
  - LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) pour une mesure directe de la distance du Pot par rapport au faisceau
  - Resolver pour une évaluation indirecte de la position du Pot par mesure du déplacement angulaire de l'axe du moteur.
- Sept contacteurs par station :
  - 1 contacteur de position de parking par Pot (x2)
  - 1 contacteur de position maximale haute par Pot (x2)
  - 1 contacteur de position maximale basse par Pot (x2)
  - 1 contacteur anti collision entre les deux Pots

Les moteurs et les capteurs de positions des stations ALFA sont contrôlés par un châssis PXI (National Instruments). Le PXI est connecté à un serveur DNS et publie ses données par protocole DIM. Un opérateur du LHC dispose d'une interface utilisateur permettant de contrôler le mouvement des Pots

Romains à travers un serveur FESA (Front End Software Architecture) qui fait office de passerelle vers le serveur DNS. Le serveur FESA est un équipement standard du LHC normalement utilisé pour l'interfaçage du contrôle du mouvement des collimateurs de faisceau qui a été adapté au contrôle du mouvement des Pots Romains. Les contacteurs de position de parking des Pots Romains sont connectés à un système d'interlock qui les utilise comme données d'entrées pour le système d'autorisation de faisceau du LHC et les transmet au châssis PXI.

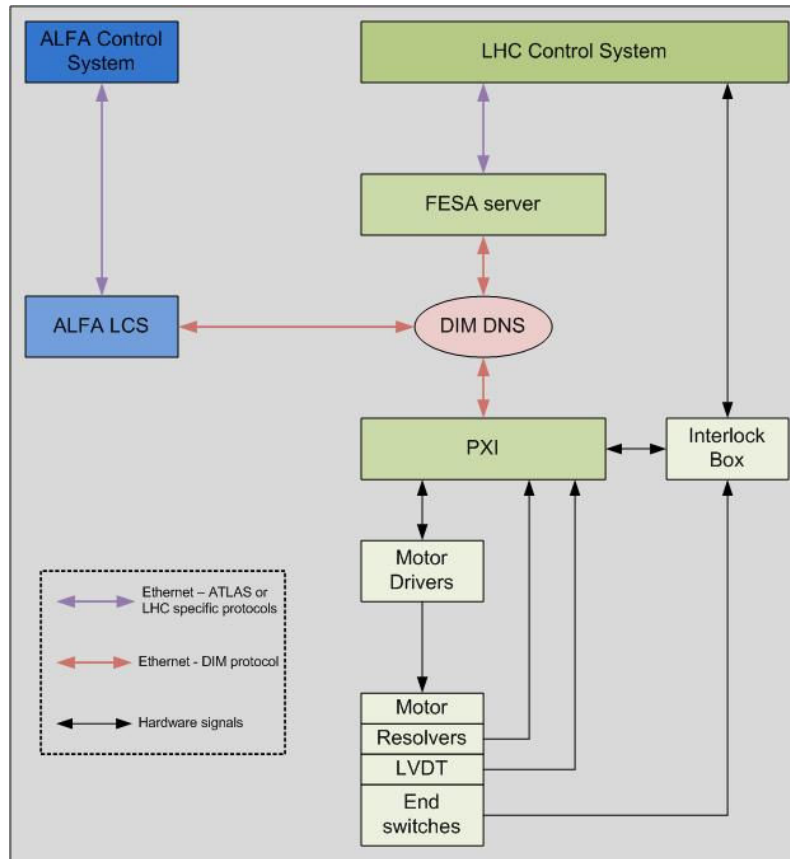


Figure IV-23 : Architecture du système de contrôle du mouvement des Pots Romains

Le système de contrôle du détecteur ALFA n'est pas impliqué dans la chaîne de contrôle du mouvement des Pots mais il doit néanmoins pouvoir effectuer un nombre limité d'actions et accéder aux données utiles à l'exploitation du détecteur, telles que la position des Pots Romains. Pour cela, la LCS du détecteur ALFA est également connectée au serveur DNS pour souscrire aux services publiés par le châssis PXI et le serveur FESA et publier ses propres services. La Table IV-5 montre les paramètres du contrôle de mouvement des Pots Romains qui sont accessibles au DCS. Le DCS peut ainsi connaître le statut du système d'interlocks du LHC, c'est-à-dire si le détecteur ALFA est autorisé à s'approcher du faisceau (Device Allowed) et si le système de contrôle du mouvement des Pots autorise l'injection du faisceau (Injection Permit) et s'il provoque un dump du faisceau (User Permit 1 / 2). Les positions requises et mesurées des Pots ainsi que les alertes associées sont également lues par le DCS. Pour finir l'archivage et un témoin d'activité du PXI et du serveur FESA sont reçus par le DCS. La mise à disposition de ces données à l'opérateur du détecteur ALFA dans la salle de contrôle d'ATLAS est importante car

c'est la seule source d'information qui permet de suivre le mouvement des instruments sur le faisceau, les demandes de mouvement d'un ou des Pots étant effectuées par un opérateur du LHC.

Table IV-5 : Liste des services publiés par le PXI et le serveur FESA souscrits par le DCS pour le monitoring du mouvement des Pots Romains

|                   |                    |   |
|-------------------|--------------------|---|
| Interlocks Status | User Permit 1      | Autorisation de faisceau (beam 1 = sens horaire)          |
|                   | User Permit 2      | Autorisation de faisceau (beam 2 = sens anti horaire)     |
|                   | Injection Permit   | Autorisation d'injection de faisceau                      |
|                   | Device Allowed     | Elements mobiles autorisés sur faisceau                   |
| Position Settings | Requested Position | Position requise (une par Pot)                            |
|                   | Alerts             | Alertes associées aux requêtes de déplacement             |
| Position Readout  | Actual Position    | Position mesurée (une par Pot)                            |
|                   | Alerts             | Alertes associées aux mesures de position                 |
| Alert Texts       | PXI Log            | Archivage de l'activité du PXI sous format texte          |
|                   | FESA Log           | Archivage de l'activité du serveur FESA sous format texte |
| Heartbeats        | PXI Heartbeat      | Témoin d'activité du châssis PXI (incrémenteur)           |
|                   | FESA Heartbeat     | Témoin d'activité du serveur FESA (incrémenteur)          |

La Table IV-6 montre les commandes possibles du DCS vers le châssis PXI par DIM (Software) et les commandes d'urgences qui sont prévues dans la salle de contrôle d'ATLAS (Hardware). Au démarrage du PXI, une commande provenant du DCS (RP Exists) spécifie l'identité des Pots qui peuvent être commandés. Lors de l'exploitation du détecteur, le DCS peut envoyer des demandes d'extraction des Pots de façon individuelle, par exemple si un dysfonctionnement est diagnostiqué sur l'électronique front-end. Enfin, le DCS fournit les retards maximum autorisés lors des commandes de mouvement (Movement Timeout) et d'extraction (Parking Timeout) avant la génération d'une alerte de non accomplissement de la commande par le PXI. Finalement le DCS fournit un témoin d'activité sur le serveur DNS qui garantit au PXI et au serveur FESA qu'il est opérationnel. Des commandes manuelles sont également prévues sous la forme de boutons poussoirs dans la salle de contrôle d'ATLAS permettant l'extraction d'urgence de tous les Pots (par coupure de l'alimentation des drivers des moteurs) et permettant l'inhibition du mouvement des pots, cette commande étant individuelle. Une commande semi manuelle est également prévue (Movement Override), elle permettra d'autoriser le mouvement des Pots sur le faisceau même s'il n'est pas en mode de faisceau stable. Cette commande sera déclenchée par PVSS au travers d'un ELMB dédié, par activation de l'une de ses sorties digitales et sous réserve qu'une clé de sécurité a été préalablement activée dans la salle de contrôle d'ATLAS (action manuelle).

Table IV-6 : Liste des services publiés par le DCS pour le contrôle du mouvement des Pots Romains

|          |                          |  |
|----------|--------------------------|--|
| Software | RP Exists                | Déclaration des Pots pouvant être exploités par le PXI   |
|          | Minimum Distance To Beam | Limite de position additionnelle par rapport à l'axe du faisceau   |
|          | Parking Timeout          | Temps maximal autorisé entre l'extraction d'un Pot et l'activation de son contacteur de position de parking    |
|          | Movement Inhibit Timeout | Temps maximal autorisé entre une demande de mouvement d'un Pot et la confirmation que la position est atteinte |
|          | RP Extraction            | Commande de retour des Pots à la position de parking (individuel)  |
|          | DCS Heartbeat            | Témoin d'activité du DCS (incrémenteur)  |
| Hardware | Movement Override        | Autorisation manuelle du mouvement des Pots sur faisceau instable  |
|          | Emergency Extraction     | extraction d'urgence de tous les Pots (bouton poussoir)  |
|          | Movement Inhibit         | Inhibition du mouvement des Pots (individuel, bouton poussoir)   |

La communication avec le serveur DNS dédié au mouvement des Pots a été implémentée sous PVSS et les services souscrits et publiés ont été associés à des classes d'objets illustrés dans la Figure IV-24. Chaque changement de valeur d'un paramètre du PXI associé à un service souscrit est reflété dans la variable locale qui lui est associée (rouge) et chaque service publié est mis à jour sur le serveur DIM lorsque la variable associée (vert) change de valeur.

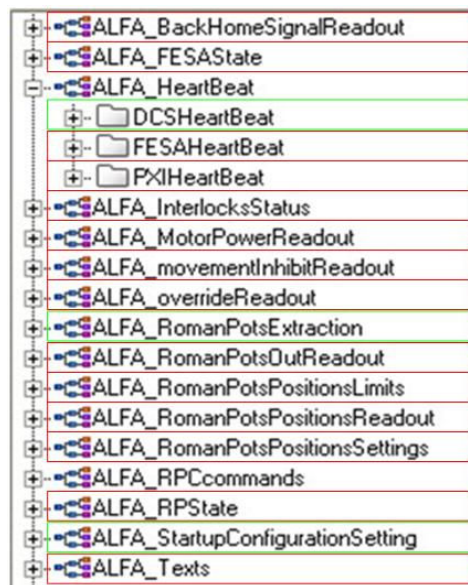


Figure IV-24 : Déclaration de variables dans PVSS associées aux services DIM publiés (vert) et souscrits (rouge)

L'échange de données entre le DCS d'ALFA et le PXI / serveur FESA fonctionne dans les deux directions, les interfaces utilisateur associées qui permettront de visualiser les positions des Pots Romains et d'envoyer des commandes au PXI doivent cependant être développées.

## 5. Conclusions et développements futurs

Les réalisations préliminaires effectuées sur le système de contrôle du détecteur ALFA couvrent les développements spécifiques au détecteur. Ainsi, la configuration de l'électronique front-end, le monitoring des paramètres locaux des stations et les communications par protocole DIM de la LCS avec le système d'acquisition pour la production automatisée de courbes en S et avec le système de contrôle du mouvement des Pots pour le transfert de paramètres et de commandes ont été implémentés et testés avec succès. Le développement du système de contrôle du détecteur ALFA nécessite encore des travaux sur deux axes qui sont la réalisation des couches logicielles bas niveau pour les alimentations (haute tension et basse tension) et la conception de l'architecture FSM et des interfaces utilisateur pour l'intégration d'ALFA dans le système de contrôle global du détecteur ATLAS. La programmation des couches logicielles de contrôle des alimentations ne demande pas de gros efforts de conception car elles sont intégrées dans les suites logicielles communes du contrôle des expériences et la couche logicielle haut niveau va être développée en parallèle de l'installation et de l'intégration du détecteur et de son électronique frontale en zone expérimentale qui devrait avoir lieu courant 2010.

Je suis toujours en charge du développement et de l'intégration du système de contrôle du détecteur ALFA. J'ai développé la partie « PVSS » du processus d'étalonnage automatisé du détecteur ALFA ainsi que du processus de communication avec le système de contrôle du mouvement des Pots. J'ai conçu et développé la méthode de configuration de l'électronique frontale du détecteur ALFA en détournant l'utilisation du port série (SPI) de l'ELMB. Ce port a en effet été réalisé sur l'ELMB pour contrôler des composants externes tels qu'un convertisseur numérique/analogique. Le détournement de cette fonction vers la configuration d'ASIC en série a demandé des efforts de conception en particulier pour optimiser la vitesse de transfert des données en passant par l'intermédiaire d'un FPGA.



## V. Conclusions sur les études et développements pour le détecteur ALFA

Le détecteur ALFA fait partie des sous-détecteurs d'ATLAS et a pour objectif de mesurer la luminosité absolue du faisceau du LHC au point d'interaction d'ATLAS. Il est composé de deux groupes de deux stations situées à 240 mètres de part et d'autre du détecteur ATLAS. Il utilise des détecteurs à fibres scintillantes pour détecter les protons qui ont subi une collision élastique au point d'interaction. Chaque station est composée de deux « Pots Romains » verticalement motorisés, situés au-dessus et en dessous de l'axe du faisceau.

Chaque Pot Romain accueille un détecteur composé de dix plans de deux fois 64 fibres scintillantes et chaque paquet de 64 fibres est connecté à un photomultiplicateur 64 canaux (MAPMT) qui convertit les signaux lumineux, issus de l'interaction des particules avec les fibres scintillantes, en impulsions électroniques. Les MAPMT sont les premiers maillons de la chaîne d'acquisition de données du détecteur et leurs performances sont donc un élément clé dans la capacité du détecteur ALFA à détecter efficacement les particules. Une étude préliminaire a été effectuée pour valider que les caractéristiques des MAPMT choisis (Hamamatsu R7600) sont conformes au cahier des charges du détecteur. Il a ainsi été démontré par une étude en laboratoire que ces MAPMT ont une efficacité quantique maximale dans la plage de longueur d'onde de scintillation des fibres et un gain de l'ordre de  $10^6$  qui est suffisant pour pouvoir discriminer une réponse à des événements à un photo-électron, ce qui est nécessaire pour faire un étalonnage précis de la conversion photo-électrique. La réponse des canaux du MAPMT à une impulsion lumineuse donnée varie au maximum d'un facteur trois, ce qui est dans la plage de correction de gain de l'électronique front-end. Enfin le cross talk entre les canaux est de l'ordre de quelques pourcent.

La détermination de la luminosité du faisceau du LHC dépend du taux de protons ayant subi une collision élastique. Il est donc primordial que l'efficacité de détection du détecteur ALFA soit homogène sur toute sa surface active délimitée par ses compteurs Trigger. La façon la plus simple d'y parvenir consiste à garantir une efficacité de détection des compteurs Trigger proche de 100 pourcent. L'étude expérimentale des plaques scintillantes utilisées comme compteur Trigger a permis de sélectionner un revêtement (peinture blanche diffusante) qui optimise le rendement lumineux pour atteindre une moyenne de 40 photoélectrons, ce qui est un ordre de grandeur supérieur au rendement lumineux du détecteur ALFA. La solution idéale consisterait à connecter le photomultiplicateur monocanal (PMT) à la plaque scintillante avec un guide de lumière rigide. Cette solution n'est pas envisageable en raison de la haute tension d'alimentation du PMT qui provoquerait des décharges électriques entre ses contacts dans le vide secondaire du Pot Romain. C'est pourquoi une solution alternative a été étudiée pour remplacer le PMT par une / des photodiodes à avalanches en mode Geiger (G-APD) qui fonctionnent avec une faible tension d'alimentation (de l'ordre de 70 V). Une G-APD couplée à la plaque scintillante par un guide de lumière rigide a montré un rendement surfacique 2,5 fois meilleur que la solution

actuellement retenue. Cette solution nécessiterait cependant une étude approfondie afin de valider son fonctionnement dans l'environnement du LHC.

L'électronique front-end et les services du détecteur ALFA nécessitent un système de contrôle pour l'exploitation et pour les phases d'étalonnage du détecteur. Des développements préliminaires ont été effectués afin de pouvoir configurer l'électronique à distance (gains et seuils de détection). Cet outil est déjà utilisé pour les tests sous faisceau et en laboratoire du détecteur. Un protocole de communication avec le système d'acquisition d'ALFA a également été réalisé afin de procéder à des étalonnages automatisés du détecteur qui nécessitent une alternance d'acquisitions de données et de configurations des seuils de déclenchement. Ce processus automatisé sera utilisé lors de l'étalonnage du détecteur avant le prochain test faisceau et avant l'installation des détecteurs sur le LHC. Enfin le déplacement des Pots Romains sur le faisceau est piloté depuis la salle de contrôle du LHC (comme tous les objets en mouvement sur le faisceau), il est donc nécessaire de connaître la position des détecteurs et d'avoir la possibilité de déclencher une extraction d'urgence des Pots en cas de problème technique. Pour cela, un protocole de communication a été réalisé entre le système de contrôle du mouvement des Pots Romains et le système de contrôle d'ALFA. La lecture des paramètres de déplacement des Pots et l'exécution de commandes depuis le système de contrôle d'ALFA ont été testées avec succès. Ces trois applications constituent les développements spécifiques du système de contrôle du détecteur ALFA. D'autres applications de bas niveau seront développées telles que le contrôle des alimentations en utilisant les suites logicielles disponibles au CERN pour ces équipements standards. Enfin les couches logicielles de haut niveau du système de contrôle du détecteur ALFA seront développées lors de l'installation des détecteurs en 2010 et donc lors de l'intégration du système de contrôle d'ALFA dans le système de contrôle du détecteur ATLAS.

# CONCLUSIONS DE LA THESE

Les réalisations instrumentales qui ont été présentées dans ce document sont axées sur l'apport de services au détecteur ATLAS. Ainsi, après avoir contribué au développement, aux premières installations et aux premiers tests sur site du système de Contrôle de l'Infrastructure Commune (CIC) du détecteur ATLAS, j'ai étendu mes travaux sur deux axes : le développement d'applications spécifiques pour le CIC dans la continuité de mon expérience précédente et j'ai élargi mon champ de recherche en travaillant sur les technologies de photo-détection et sur des applications pour le contrôle du sous-détecteur ALFA (Absolute Luminosity For ATLAS).

Les travaux effectués sur le CIC du détecteur ATLAS ont abouti à la mise en service d'une application pour le suivi du déplacement du personnel dans la caverne expérimentale (FPIAA) et d'une application pour la mesure des radiations ionisantes dans le détecteur. Ces deux projets s'inscrivent dans la perspective du contrôle des paramètres environnementaux de l'expérience ATLAS pendant son exploitation. En ce sens, FPIAA contribue à la sécurité du personnel lors des périodes de maintenance du détecteur en fournissant un moyen de localiser précisément et de suivre activement les personnes présentes dans la caverne depuis la salle de contrôle du détecteur. De même, la mesure des radiations ionisantes pendant l'exploitation du détecteur va fournir des données utiles à l'étude à long terme de l'effet des radiations ionisantes sur les éléments de détection et sur l'électronique frontale du détecteur ATLAS. Les modélisations du taux de radiations intégré par les éléments du détecteur qui ont été effectuées pour son développement pourront également être confrontées aux données expérimentales.

Le détecteur ALFA va fournir une mesure de la luminosité absolue du faisceau au point d'interaction d'ATLAS sur un mode de faisceau spécifique à basse luminosité. Ces données seront utilisées comme référence d'étalonnage pour un détecteur de luminosité relative qui sera exploité à haute luminosité (LUCID). Les données de luminosité du faisceau seront incluses dans le processus d'acquisition de données d'ATLAS pour ensuite être considérées lors de l'analyse des données. Les travaux qui ont été effectués sur le sous-détecteur ALFA ont permis de valider les moyens de photo-détection qui ont été choisis et d'optimiser les performances des éléments de détection de particules des compteurs Trigger. Deux objectifs ont été atteints : confirmer les choix technologiques qui ont été faits lors du design du détecteur et optimiser les performances du détecteur. Les applications de contrôle du détecteur qui ont été développées ont permis de piloter des prototypes du détecteur lors des campagnes de test effectués en laboratoire et sur faisceau, et seront exploités pour le développement du système de contrôle du détecteur lors de son intégration sur le LHC.

Le détecteur ATLAS est aujourd'hui opérationnel. Il est en phase de mise en service et de préparation pour la reprise de l'exploitation du LHC qui est prévue à l'automne 2009. Le détecteur ALFA devrait être installé lors de l'arrêt du LHC prévu pour l'hiver 2010-2011. Les données sur la luminosité du faisceau du LHC devraient donc être disponibles lors de l'exploitation du LHC en 2011.



# RÉFÉRENCES

- [1] R. Brout F. Englert, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 13, no. 321, 1964.
- [2] V Fanti et al., "A new measurement of direct CP violation in two pion decays of the neutral kaon," *Physics Letters B* 465 (1-4), pp. 335-348.
- [3] P. Bryant L. Evans, "LHC Machine," *JINST*, no. JINST-3-S08001, 2008.
- [4] The ALICE collaboration, "ALICE Technical Design Report," CERN, Geneva, TDR CERN-LHCC-2003-062, 2004.
- [5] The LHCb collaboration, "LHCb Technical Proposal," CERN, Geneva, TP CERN-LHCC-98-004, 98.
- [6] The CMS collaboration, "CMS Technical Proposal," CERN, Geneva, TP CERN-LHCC-94-38, 1994.
- [7] The ATLAS collaboration, "ATLAS : Technical proposal for a General Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN," CERN, Geneva, Technical proposal CERN/LHCC/94-43, 1994.
- [8] The TOTEM collaboration, "The TOTEM Experiment at the CERN Large Hadron Collider," *JINST*, no. doi: 10.1088/1748/0221/3/08/S08007, 2008.
- [9] The LHCf collaboration, "The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider," *JINST*, no. doi : 10.1088/1748-0221/3/08/S08006, 2008.
- [10] The ATLAS collaboration, "ATLAS Inner Detector Technical Design Report," CERN, Geneva, ATLAS TDR CERN/LHCC/97-16&17, 1997.
- [11] The ATLAS TRT collaboration, "The ATLAS Transition Radiation tracker (TRT) proportional drift tube : design and performance," *JINST*, no. doi 10.1088/1748-0221/3/02/P02013, 2008.
- [12] A. Barriuso Poy et al., "The Detector Control System of the ATLAS Experiment," *JINST*, vol. 5, no. 05006, 2008.
- [13] PVSS II SCADA Product. <http://www.pvss.com>.
- [14] CAN protocole. <http://www.can-cia.org>.
- [15] B. Hallgren, H. Boterenbrood, H. J. Burckhart, and H. Kvedalen, "The Embedded Local Monitoring

Board (ELMB) in the LHC front-end I/O control system," in *7th Workshop on Electronics for LHC Experiments*, Stockholm, Sweden, 2001.

- [16] S. Schmeling, B. Flockhart, S. Lueders, and G. Morpurgo, "The detector safety system for LHC experiments," *IEEE*, vol. 51, no. 10.1109/TNS.2004.828631, pp. 521-525, 2004.
- [17] 8-bit AVR Microcontroller with 125K Bytes In-System Programmable Flash, ATmega128. Product datasheet <http://www.atmel.com/products/AVR/>.
- [18] OPC. <http://www.opcfoundation.org>.
- [19] KVASER AB, Kvaser PCican. <http://www.kvaser.com/prod/hardware/pcican.htm>.
- [20] Oracle. <http://www.oracle.com>.
- [21] S. Kolos et al., "A software framework for Data Quality Monitoring in ATLAS," in *International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics*, Victoria BC Canada, 2007.
- [22] G. Benincasa, C. Carneira, D. Claudino, and A. Maio, "FPIAA - Find Persons Inside ATLAS Areas: A system for finding and rescuing persons in a very large physics experiment," in *5th International High Energy Physics Technical Safety Forum Workshop*, Menlo Park, California, 2005.
- [23] Pyronix MAGNUM ultra FP05802. <http://www.pyronix.com>.
- [24] C. Carneira et al., "Communication Architecture of a system to find persons inside ATLAS," in *6th International Workshop on Factory Communication Systems*, Torino, 2006.
- [25] Federico Ravotti, "Development and Characterisation of Radiation Monitoring Sensors for the High Energy Physics Experiments of the LHC Accelerator," CERN, Geneva, These CERN-THESIS-2007-013, 2006.
- [26] I. Mandic, V. Cindro, A. Gorisek, G. Kramberger, and M. Mikuz, "Online Integrating Radiation Monitoring System for the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider," *IEEE*, vol. 54, no. 10.1109/TNS.2007.895120, 2007.
- [27] "ALFA Technical Design Report," CERN/LHCC/2008-004, 2008.
- [28] A. Mapelli et al., "Development of a Detector (ALFA) to measure the absolute Luminosity at ATLAS," in *10th ICATPP Conference*, Villa Olmo, Como, Italy, 2007.
- [29] S. Ask et al., "Luminosity Measurement at ATLAS - development, construction and test of scintillating fibre prototype detectors," *NIM A 568*, pp. 588-600, 2006.

- [30] F. Anghinolfi et al., "Hadron Beam test of a scintillating fibre tracker system for the luminosity measurement at ATLAS," *JINST*, vol. 2, no. P07004, 2007.
- [31] L. Vos J. P. Papis, "Design Basis for the LHC Beam Position Monitor," CERN, Geneva, LHC note CERN SL/91-6 (BI), 1991.
- [32] Hamamatsu Photonics. <http://www.hamamatsu.com>.
- [33] P. Barrillon et al., "MAROC:Multi-Anode ReadOut Chip for MAPMTs," in *Nuclear Science Symposium*, San Diego, USA, 2006.
- [34] Sebastien Franz and Pierre Barrillon, "ATLAS ALFA - Measuring absolute luminosity with scintillating fibres," 2009.
- [35] ROOT - A Data Analysis Framework. [Online]. <http://root.cern.ch/>
- [36] F. Paschen, "Sur la différence de potentiel nécessaire à la formation d'arc électrique dans de l'air, de l'hydrogène et du gaz carbonique sous différentes pressions," *Wied. Annales de Physiques*, vol. 37, pp. 69-96, 1889.
- [37] J. Haba, "Status and perspectives of pixelated Photon Detector (PPD)," *NIM A 595*, no. 10.1016/j.nima.2008.07.061, pp. 154-160, 2008.
- [38] R. Ciesielski, S. Franz, I. Gregor, W. Hain, K. Hiller, C. Joram, U. Kötz, A. Mapelli, D. Petschull A. Braem, "Trigger counter studies for the ALFA detector," CERN, Geneva, ATLAS note ATL-LUM-PUB-2009-001, 2009.
- [39] W. Iwanski, "FPGA based Readout Logic of the Front-end Electronics of the ATLAS Absolute Luminosity Monitor," in *Topical Workshop on Electronics for Particle Physics*, Prague, Czech Republic, 2007, pp. 458-462.
- [40] C. Gaspar, M. Dönszelmann, and Ph. Charpentier, "DIM, a portable, light weight package for information publishing, data transfert and inter-process communication," *Comput. Phys. Commun*, vol. 140, pp. 102-109, 2001.
- [41] H. Burckhart, R. Hart, R. Jones, V. Khomutnikov, and Yu. Ryabov, "Communication between Trigger/DAQ and DCS in ATLAS," in *CHEP*, Beijing, China, 2001, pp. 106-109.
- [42] VME standard. <http://www.vita.com>.
- [43] M. Bruschi, "The ATLAS luminosity monitor," in *The 1st International Conference On Technology And Instrumentation in Particle Physics*, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 2009.

- [44] J. N. Jackson, "The ATLAS semiconductor tracker (SCT)," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, vol. A541, pp. 89-95, 2005.
- [45] O. Beltramello et al., "The Detector Safety System of the ATLAS experiment," *JINST*, no. JINST\_4\_P09012, 2009.



# LISTE DES ABREVIATIONS

ADC : Analogue to Digital Converter  
ALFA : Absolute Luminosity For ATLAS  
ATLAS : A Toroidal LHC Apparatus  
CAN : Controller Area Network  
DAC : Digital to Analogue Converter  
DCS : Detector Control System  
DIM : Distributed Information Management  
ELMB : Embedded Local Monitoring Board  
FE : Front End  
FPIAA : Finding Persons Inside ATLAS Areas  
FSM : Finite State Machine  
G-APD : Geiger-mode Avalanche Photo Diode  
GCS : Global Control Station  
LCS : Local Control Station  
LHC : Large Hadron Collider  
MAPMT : Multi Anode Photo Multiplier Tube  
MAROC : Multi-Anode ReadOut Chip  
NIEL : Non Ionizing Energy Loss  
PE : Photo Electron  
PIR : Passive InfraRed (sensor)  
PMF : PhotoMultiplier Front-end  
PMT : Photo Multiplier Tube  
PSU : Power Supply Unit  
PVSS : Prozess Visualisierung und Steuerung Software  
RMSB : Radiation Monitoring Sensor Board  
SCS : Subdetector Control Station  
SPI : Serial Port Interface  
TDAQ : Trigger and Data Acquisition  
TID : Total Integrated Dose



# ANNEXES

# Annexe 1 : Surveillance de la température des structures aluminium de l'aimant toroïdal d'ATLAS

Le réseau de boîtiers d'acquisition de données installé dans la caverne expérimentale d'ATLAS est principalement utilisé pour l'application de suivi des personnes (voir Partie 1, chapitre 2), mais il a également été prévu pour d'autres applications, notamment par la mise à disposition de 16 entrées analogiques de l'ELMB dans chaque boîtier. La surveillance de la température des structures aluminium de l'aimant toroïdal fait partie de ces applications.

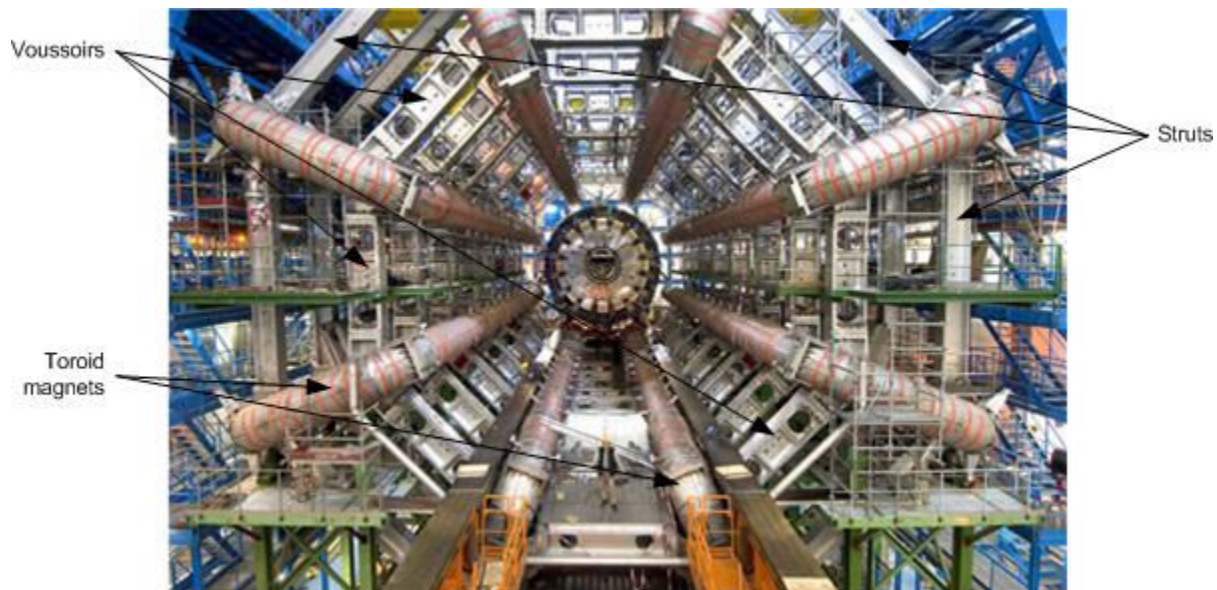


Figure 0-1 : Vue des aimants toroïdaux du détecteur ATLAS (fin de leur assemblage en 2005)

Comme le montre la Figure 0-1, les huit bobines des aimants toroïdaux d'ATLAS sont fixées entre elles par des bras en aluminium (voussoirs et struts) pour former une structure cylindrique autoporteuse de 44 mètres de longueur et 25 mètres de diamètre. Des variations rapides de température (dues par exemple à un incendie ou à une fuite cryogénique) peuvent modifier les caractéristiques mécaniques de la structure et compromettre sa stabilité. Une surveillance de la température des bras en aluminium a donc été implémentée. 137 sondes Platine 100 Ohms (PT100) ont été installées sur les structures aluminium et connectées au réseau de boîtiers d'acquisition de données. Les câbles utilisés ont été choisis pour conserver leurs caractéristiques électriques et mécaniques sur une plage de températures allant de -60 Degrés Celsius à +200 Degrés Celsius et les boîtiers d'acquisition de données sont situés à une distance minimale de 10 mètres des capteurs car les ELMB qu'ils contiennent fonctionnent jusqu'à une température de 85 Degrés Celsius). Ces précautions ont été prises afin de conserver une lecture des données pendant un maximum de temps après une élévation brutale de la température dans le détecteur.

La Figure 0-2 montre l'interface utilisateur qui a été développée sous PVSS pour la surveillance des températures des structures de l'aimant toroïdal du détecteur depuis la salle de contrôle d'ATLAS. Une vue globale fournissant les valeurs moyennes de température dans chaque secteur du détecteur est affichée en haut du panneau. Les valeurs mesurées sur chaque sonde PT100 est affichée sur une vue éclatée du détecteur. Un gradient de couleurs a été adopté pour la plage de température considérée comme normale (de 17 à 27 Degrés Celsius) afin de faciliter la visualisation d'augmentation ou de diminution locale de la température. Un premier niveau d'alerte est établi entre -10 et 0 Degrés Celsius et entre 40 et 60 Degrés Celsius suivi d'un second niveau d'alerte pour les températures inférieures à -10 Degrés Celsius ou supérieures à 60 Degrés Celsius.

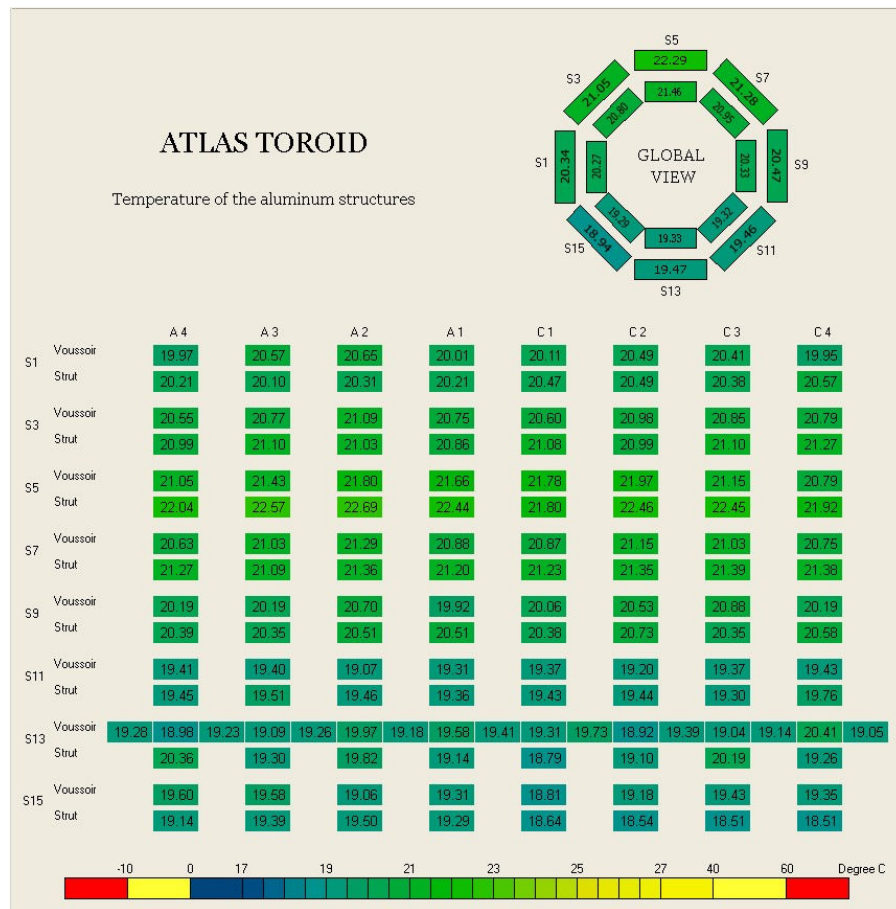


Figure 0-2 : Panneau de visualisation des températures des structures aluminium de l'aimant toroïdal d'ATLAS

Ce projet a initié une étude préliminaire sur la conception d'interfaces utilisateurs sous PVSS permettant la visualisation des éléments du détecteur en trois dimensions. La vue des températures des structures en deux dimensions présentée en Figure 0-2 fournit en effet difficilement une localisation précise de l'emplacement d'une élévation de température dans le volume du détecteur. Une suite logicielle développée au CERN pour l'affichage d'objets en perspective sur une interface utilisateur sous PVSS a alors été exploitée pour proposer le prototype présenté en Figure 0-3. Les voussoirs et struts sont affichés sur un panneau qui fournit une représentation de tous les éléments dans un espace en trois dimensions. L'utilisateur peut zoomer sur le détecteur et le manipuler à l'aide de la souris. Les struts

(éléments externes) peuvent être mis en transparence pour faciliter la vue des voussoirs (éléments internes). Dans cet exemple, les températures ont été simulées et représentées par un gradient de couleur et un incendie a été simulé (élément rouge).

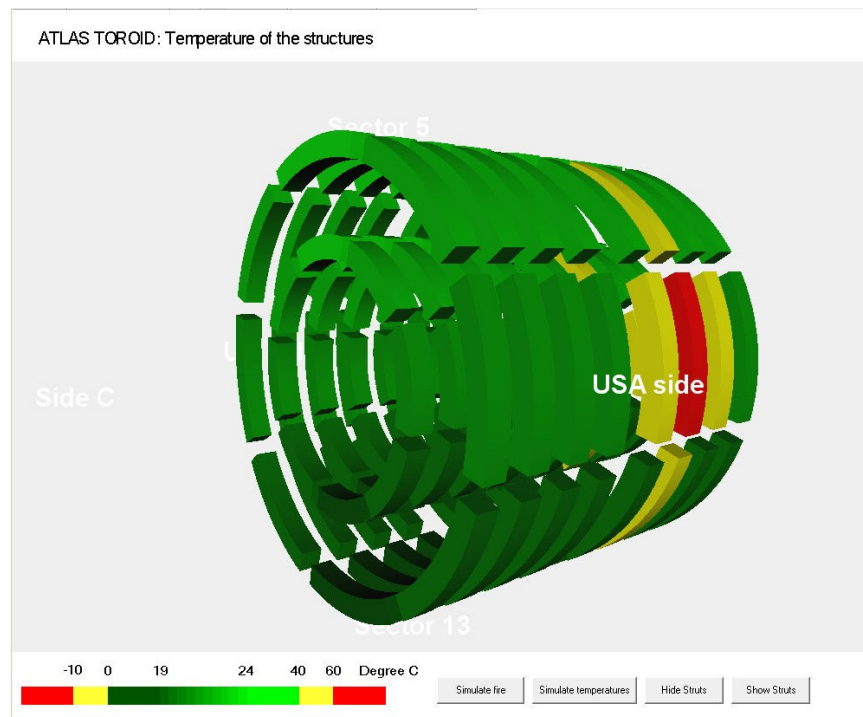


Figure 0-3 : Prototype de visualisation des températures de l'aimant toroïdal d'ATLAS en trois dimensions interactif (températures simulées)

L'utilisation d'interfaces utilisateurs interactives en trois dimensions est envisagée pour représenter le détecteur ATLAS dans la salle de contrôle. Pour cela des études vont se poursuivre pour utiliser la base de données d'intégration d'ATLAS, qui contient les coordonnées et les formes de chaque élément du détecteur, comme source pour l'affichage des éléments du détecteur dans PVSS.

## Annexe 2 : Description détaillée de l'algorithme de suivi des personnes dans la caverne d'ATLAS

La Figure 0-2 présente un diagramme détaillé du fonctionnement de l'algorithme de suivi des personnes de l'application FPIAA (voir Partie 1, chapitre 2, paragraphe 4). Il explique les processus mis en jeu à chaque changement d'état d'une cellule. Il fonctionne sur deux axes qui dépendent de la transition d'état de la cellule. Deux séries d'actions sont alors possibles si personne n'est détecté dans la cellule (to OFF) ou si un mouvement est détecté dans la cellule (to ON). Les processus mis en jeu utilisent alors les attributs de la cellule et des cellules environnantes (Figure 0-1) pour déterminer si l'activation de la cellule est due à un mouvement d'une personne ou à une activation de capteur non corrélée à un déplacement de personne (ERROR). Ainsi, lorsqu'une cellule est activée les cas correspondant à un mouvement cohérent sont testés, c'est-à-dire si la cellule est une cellule d'entrée (« edgeCell »), si une personne suivie est dans la cellule (« isFocused »), si un mouvement est en cours dans une cellule voisine (« movOnNeighbourhood »), si un mouvement est attendu sur une cellule voisine (« canActivate ») ou si une des cellules voisines est désactivée (« disabled »). De même, une série de processus est mis en jeu lorsqu'une personne n'est plus détectée dans une cellule. Ces processus utilisent également les éléments de la classe d'objets « Cellule » pour établir l'historique du mouvement et générer deux niveaux d'alerte successifs (WARNING et FATAL) si la personne ne réapparaît pas dans la cellule ou dans une cellule voisine.

ATLCICUXDET:FPIAA\_CELLS/TOR

| Datapoint/Comment  | Value                     | Bits    | Time                     |
|--------------------|---------------------------|---------|--------------------------|
| alert              | Alert state (integer)     | -----   | 2009.06.05 16:24:51.8... |
| canActivate        | Activation flag (integer) | -----   | 2009.06.05 16:20:18.0... |
| disabled           | TRUE if cell disabled     | --- --- | 1970.01.01 01:00:00.0... |
| edgeCell           | TRUE if set as edge cell  | -----   | 2009.06.05 16:20:17.0... |
| edgeCellDB         | TRUE                      | -----   | 2009.06.05 16:20:13.9... |
| isFocused          | TRUE if cell is focused   | -----   | 2009.06.05 16:20:18.0... |
| isTimerActive      | TRUE if timer is set      | -----   | 2009.06.05 16:20:18.0... |
| movOnNeighbourhood | TRUE if active neighbors  | -----   | 2009.06.05 16:20:18.0... |
| neighbourhood      | TOR_S1_L1_4 ; T...        | -----   | 2009.06.05 16:20:17.0... |
| neighbourhoodDB    | TOR_S1_L1_4 ; T...        | -----   | 2009.06.05 16:20:13.9... |
| replayAlert        | 0                         | -----   | 2009.05.25 16:55:05.9... |
| replayState        | FALSE                     | -----   | 2009.05.25 16:55:05.9... |
| selectedNeighbour  | FALSE                     | --- --- | 1970.01.01 01:00:00.0... |
| state              | FALSE                     | -----   | 2009.06.05 16:20:11.4... |

Update table [Cancel] [Help]

Figure 0-1 : Eléments de la classe d'objet "Cellule" utilisés par l'algorithme de suivi des personnes

Dans la Figure 0-2, le mot « Cell » est employé lorsque l'action ne concerne que la cellule qui est à l'origine du déclenchement du processus, le mot « neighbors » implique les voisins de la cellule qui est à

l'origine du déclenchement du processus, et enfin le mot « neighborhood » implique la cellule à l'origine du déclenchement du processus et ses voisins.

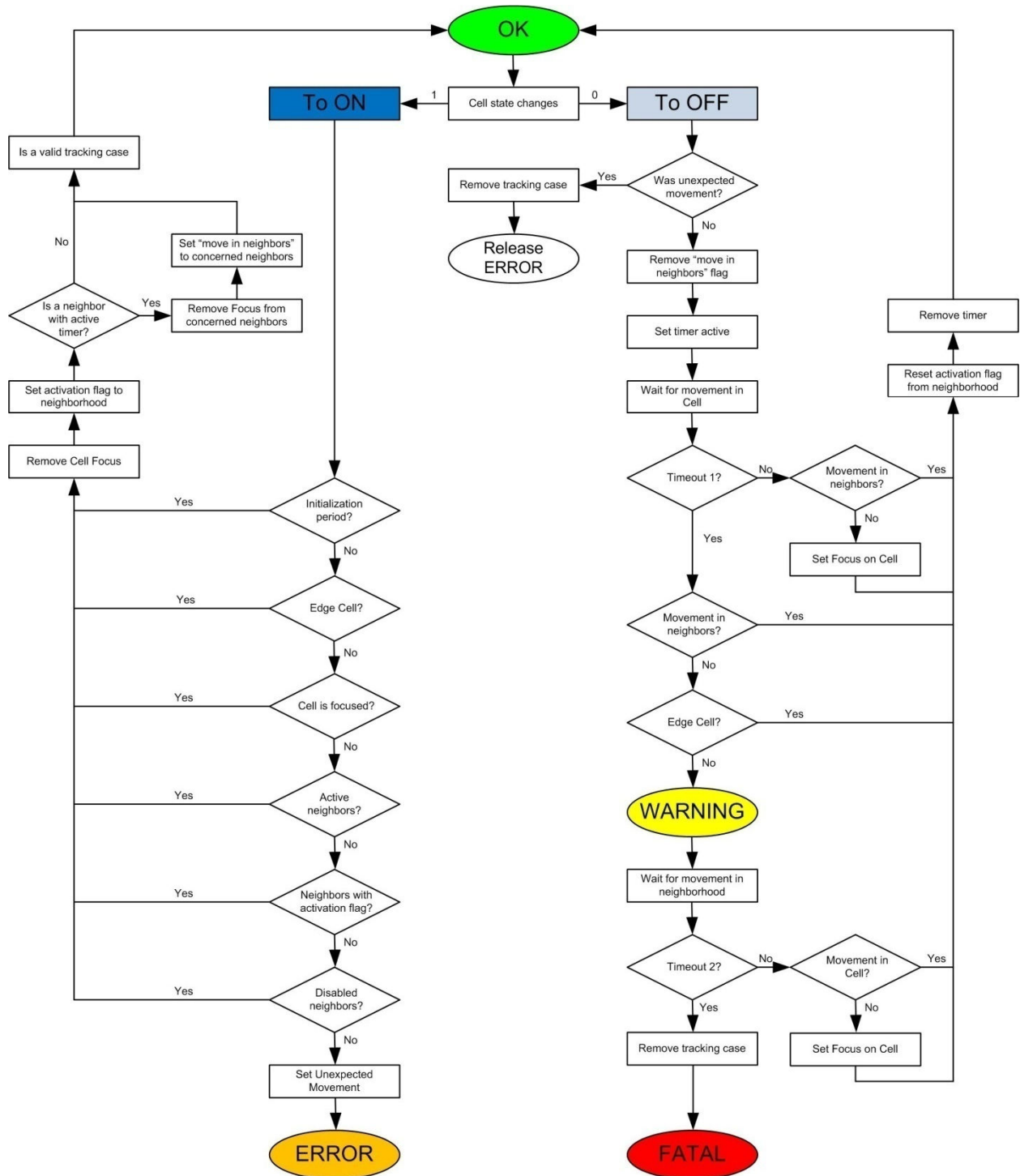


Figure 0-2 : Diagramme détaillé de l'algorithme de suivi des personnes de l'application FPIAA





## **Résumé :**

L'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire ou CERN, à Genève, est sur le point de mettre en service le LHC (Large Hadron Collider). Cet accélérateur de particules et les détecteurs dont il est équipé ont été conçus pour tenter de répondre aux interrogations que posent les théories de physique des particules actuelles. Le détecteur ATLAS est l'un de ces détecteurs, construit notamment pour confirmer ou infirmer l'existence du boson de Higgs. L'exploitation du détecteur et la qualité des données dépendent de la maîtrise de ses éléments de détection mais aussi de la maîtrise des conditions environnementales de l'expérience. Dans cette optique, Les travaux présentés dans ce document portent sur des réalisations instrumentales effectuées d'une part pour le contrôle de l'infrastructure du détecteur ATLAS et d'autre part pour le détecteur ALFA (Absolute Luminosity For ATLAS) qui doit fournir une mesure de la luminosité absolue du faisceau du LHC au point d'interaction d'ATLAS. La première partie présente la réalisation de deux projets intégrés dans le Système de Contrôle du Détecteur (DCS) : FPIAA (Finding Persons Inside ATLAS Areas) a été développé pour la sécurité des personnes dans la caverne expérimentale durant les périodes de maintenance du détecteur en fournissant une application de localisation et de suivi actif des personnes dans la caverne. Une seconde application a été développée pour mesurer la dose de radiations ionisantes et la fluence de particules intégrées par les éléments du détecteur pendant son exploitation afin de pouvoir évaluer à long terme leur vieillissement en fonction de la dose reçue. Les travaux réalisés sur le détecteur ALFA portent sur la qualification du matériel de photo-détection utilisé et sur l'évaluation et l'optimisation des performances des compteurs Trigger du détecteur. Enfin des réalisations préliminaires sur le DCS du détecteur ALFA sont présentées. Une structure logicielle a été développée pour configurer à distance l'électronique front-end ainsi que pour effectuer un étalonnage automatisé du détecteur et un protocole de communication haut niveau a été mis en place pour permettre au DCS d'ALFA d'échanger des informations avec le système de contrôle du mouvement des détecteurs sur le faisceau du LHC.

## **Summary :**

The European Organization for Nuclear Research or CERN, Geneva, is about to operate the Large Hadron Collider (LHC). This accelerator ring and its particles detectors have been built to try to answer to the actual questions given by the particle physics theories. One of these detectors, ATLAS, has been designed, for instance, to validate, or invalidate, the theories on the existence of the Higgs Boson. The operation of the detector and the quality of its data depend on the quality of the detection elements but it depends also strongly on the good monitoring of its environment. In this respect, the developments presented in this document are focused on the control of the infrastructure of the ATLAS detector and on the ALFA detector (Absolute Luminosity For ATLAS) which is designed to provide an absolute measurement of the luminosity of the LHC beam at the ATLAS interaction point. Two projects which are integrated in the Detector Control System (DCS) are presented in the first part of the document: FPIAA (Finding Persons Inside ATLAS Areas) has been developed as a tool for people safety in the experimental cavern during the maintenance periods of ATLAS. It consists in an application for people localization and an active tracking of people in the cavern. A second application has been developed to measure the level of ionizing radiations and the particles fluency in the detector during its operation. These data will be used to evaluate the aging of the elements of the detector in respect with the level of integrated radiations. The work done on the ALFA detector is focused on particle detection technologies and control applications. The photo detection devices which will be used have been evaluated, the hardware of the trigger counter have been studied and optimized. Finally, preliminary developments on the DCS of the ALFA detector will be presented. Software components have been implemented to configure remotely the front-end electronics of the detector and to perform automated calibrations. A high level communication scheme has also been implemented for data exchange between the ALFA DCS and the system which controls the movements of the detector on the LHC beam.