

# 8

## Nederlandse samenvatting –Dutch Summary–

De eerste stap in de upgrade van de *Large Hadron Collider* (LHC) naar de *High Luminosity LHC* (HL-LHC) werd aangevat eind 2018, bij het begin van de zogenaamde *Second Long Shutdown* (LS2), waarbij de deeltjesversneller en de bijhorende experimenten voor 2 jaar stilgelegd werden voor onderhoudswerken en aanpassingen. Het doel hierbij is de luminositeit van de versneller met een factor 10 te verhogen om zo het potentieel op te drijven voor de ontdekking van nieuwe fysica die niet door het huidige Standaardmodel (SM) van de deeltjesfysica beschreven wordt. Vele uitbreidingen van het SM voorspellen het bestaan van nieuwe deeltjes zoals bijvoorbeeld *Heavy Stable Charged Particles* (HSCPs) waarbij, binnen de context van het Compacte Muon Solenoïde (CMS) experiment, het muonsysteem een belangrijke rol zou kunnen spelen om deze deeltjes te identificeren. Een toename in de ogenblikkelijke luminositeit van de versneller zal aanleiding geven tot een verhoging van zowel de achtergrondruis alsook de stralingsniveaus waaraan de detectoren blootgesteld zullen worden. Bovendien, hoewel de huidige detectoren ontworpen werden voor 10 jaar bedrijf aan standaard LHC condities, wordt er nu verwacht dat ze nog eens minstens 10 jaar langer operationeel blijven tijdens de HL-LHC met sterk verhoogde luminositeit. Daarom werd er een uitgebreid R&D programma gelanceerd voor de upgrade van alle CMS muonsubsystemen naar de HL-LHC fase toe.

Een eerste gegeven in deze upgrade van het muonsysteem is het feit dat de detectoren gecertificeerd moeten worden voor de HL-LHC periode. Daarnaast zal het muonsysteem in de voorwaartse detectorregio, d.w.z. dichtbij de LHC deeltjesbundel, ook uitgebreid worden met nieuwe detectoren, inclusief twee nieuwe stations uitgerust met verbeterde Resistive Plate Chambers (RPCs), de zogenaamde RE3/1 en RE4/1 stations. De bedoeling hiervan is om een hoge kwaliteit van de muontrigger te verzekeren door effecten ten gevolge van achtergrond te minimaliseren en door de redundantie van het systeem te verhogen. Dit zal eveneens bevorderlijk zal zijn voor de reconstructie van de muonsporen doorheen de CMS detector. Een upgrade zal ook plaatsvinden op niveau van het *Link Board* systeem dat de front-end electronica (FEE) van de CMS RPCs verbindt met de triggerprocessors, om zo de robuustheid van het systeem te verbeteren en ook beter gebruik te maken van de effectieve tijdsresolutie van de Resistive Plate Chambers (van de orde 1 ns). De CMS RPC upgrade omvat zodoende een uitgebreid onderzoeksprogramma. De CMS RPC collaboratie kwam na een aantal jaren van R&D tot een reeks passende oplossingen die zullen uitgevoerd worden in het vooruitzicht

van de HL-LHC. Hoewel de consolidatie van de huidige CMS RPC-infrastructuur en de certificatie van nieuwe technologieën nog steeds verder loopt, is de toekomst van CMS wat de RPCs betreft ondertussen zeer duidelijk. Om dit punt te bereiken is mijn bijdrage tijdens de R&D-fase van het RPC-upgradeprogramma cruciaal geweest op twee vlakken: (i) de consolidatie van de huidige detectoren, en (ii) de keuze van de FEE waarmee de verbeterde RPCs (ofwel iRPCs) zullen uitgerust worden. Bij elke stap in het onderzoek speelde ik een belangrijke rol zowel in het opzetten van de testexperimenten als in het vergaren en analyseren van de metingen.

De certificatie van de nieuw voorgestelde technologieën die beantwoorden aan de noden van CMS voor de RE3/1- en RE4/1-regio's van de muon endcap disks, en van het huidige RPC-systeem wordt momenteel uitgevoerd in de nieuwe *Gamma Irradiation Facility* (GIF++) op CERN, waar een stralingsbunker rondom een nieuwe muonenbundel werd gebouwd. Deze faciliteit beschikt over een cesiumbron van 14 TBq. Het doel van deze nieuwe faciliteit is het simuleren van de HL-LHC condities en het uitvoeren van verscheidene lange termijn studies binnen de context van het HL-LHC upgrade programma. Het prototype van de nieuwe iRPCs voor CMS zijn trapeziumvormige *double-gap* kamers bestaande uit twee 1.4 mm dikke gasruimtes gevormd door even dikke *High-Pressure Laminate* (HPL) elektroden. Het verlagen van de dikte van de elektroden en gasruimtes t.o.v. het huidige RPC systeem werd gedreven door de lagere versterking of *gain* van zulke detectoren bij gelijkaardige elektrisch veldsterktes, wat de levensduur van deze detectoren ten goede komt. De uitlezing van de RPC-signalen zal gebeuren via een *Printed Circuit Board* (PCB) dat 96 longitudinale strips bevat met een onderlinge afstand die varieert tussen de 4 mm aan het smalle uiteinde en 8 mm aan de brede zijde van de trapeziumvorm. Dit ontwerp definieert de basisversie van wat er uiteindelijk in CMS geïnstalleerd zal worden.

Mijn bijdrage aan de CMS upgrade was het valideren van twee mogelijke FEE technologieën: (i) een voorversterker met laag ruisniveau die gebruik maakt van SiGe-technologie ontwikkeld door INFN Tor Vergata, en (ii) FEE gebaseerd op de PETIROC ASIC die eveneens gebruik maakt van SiGe-technologie ontwikkeld door de OMEGA collaboratie en vooral gebruikt wordt voor tijds-gerelateerde toepassingen. Om de veroudering van de geïnstalleerde detectoren in de voorwaartse richting nabij de LHC bundellijn waar het stralingsniveau relatief hoog is, tegen te gaan, zal een verlaging van de benodigde ladingsdepositie binnenin de gaskamer om een meetbaar signaal te genereren zeker helpen. Dit kan bekomen worden door gebruik te maken van meer gevoelige elektronica met versterkers met een lagere drempelwaarde voor elektrische lading, d.w.z. 10 fC in plaats van 140 fC zoals op het huidige CMS RPC Front-end Board (FEB).

In een eerste stap werd de INFN Tor Vergata voorversterker tweemaal getest en vergeleken met de huidige CMS FEE. Bij een eerste test werd de voorversterker rechtstreeks verbonden met vier uitleesstrips van een reserve-RPC, en werd het uitgangssignaal gedigitaliseerd door middel van een discriminator. De voorversterker werd gebruikt met een lage drempelwaarde van 3 fC voor gedetecteerde lading, en resulteerde in een verlaging van de RPC-werkspanning van 475 V ten opzichte van een RPC uitgerust met de huidige CMS-elektronica. Om de vergelijking van de INFN-technologie met de huidige CMS FEB te verbeteren werd een nieuwe versie van de FEB zonder voorversterker ontworpen die dan met de voorversterker verbonden werd. Dit liet ons toe een directe vergelijking te maken tussen de nieuwe voorversterker met lage ruis en de huidige CMS RPC FEB. De elektronica werd wederom gemonteerd op een reserve-PRC om de voorgaande test te herhalen. De verlaging van de geobserveerde RPC werkspanning liep op tot 410 V bij een drempelwaarde van 5 fC, wat consistent is met mijn eerste resultaat.

De eerste versie van de FEE ontworpen door OMEGA werd getest op één enkele reserve RPC HPL gaskamer uit de oude RE4-productie. Om een vergelijking te maken werd het geheel in een RPC-behuizing gemonteerd en werd de detector ook met de standaard CMS FEB in single-gap modus bedreven. Het resultaat toonde aan dat de HARDROC2 ASIC een reductie in de RPC werkspanning

van bijna 500 V kan teweegbrengen in single-gap modus bij een ladingsgevoeligheid van 121.4 fC, hetgeen vergelijkbaar is met de drempelwaarde van 146 fC bij de standaard CMS FEE, terwijl de ruiswaarde lager dan 0.1 Hz/cm<sup>2</sup> blijft. Diezelfde OMEGA technologie werd ook eerder al gecertificeerd door andere experimenten die gebruik maakten van detectoren zoals scintillatoren of andere RPC types. De OMEGA FEE biedt eveneens de mogelijkheid tot een tweedimensionale uitlezing van de RPC strips, hetgeen de spatiale resolutie van de detector in de radiale richting sterk zou verbeteren t.o.v. het huidige systeem. Er werd aangetoond dat gebruik maken van de goede tijdsresolutie van deze elektronica en van het uitlezen van de iRPC uitleesstrips aan beide uiteinden zal resulteren in een spatiale resolutie van ongeveer 2 cm langsheen de richting van de strips, wat de bijdrage van de RPCs aan de muon spoorreconstructie enorm zal verhogen ten opzichte van het huidige CMS muonsysteem.

Verschillende FEE prototypes die beantwoorden aan de vereisten voor het CMS RPC systeem werden geproduceerd om deze in meer detail te testen, d.w.z. zowel FEE gebaseerd op de OMEGA PETIROC technologie als op het INFN Tor Vergata alternatief. Ter vergelijking werden ook testen met kosmische muonen zonder bijkomende bestraling uitgevoerd op een iRPC prototype gebruik makende van de huidige CMS FEBs. De detector bereikte zijn werkspanning op  $(7383 \pm 70)$  V met een efficiëntie van 97% bij een drempelwaarde van 133 fC. De gemiddelde grootte van de muonclusters werd bepaald op  $(2.4 \pm 0.1)$  strips, terwijl het ruisniveau van de orde  $10^{-1}$  Hz/cm<sup>2</sup> was. Tot nu toe werden al twee versies (FEBv0 en FEBv1) van de FEE gebaseerd op de PETIROC ASIC gekoppeld aan een FPGA getest, terwijl FEBv2 nog in voorbereiding is. Dit type FEE is efficiënt ontworpen om de 96 strips langs beide uiteinden uit te lezen, wat tweedimensionale plaatsinformatie geeft over de muon hits. FEBv0 werd gebruikt met een drempelwaarde van 100 fC terwijl FEBv1 aan een lagere waarde van 50 fC kon bedreven worden dankzij een PETIROC versie met een verlaagd cross-talk niveau. Zonder bijkomende bestraling bereikte het prototype voorzien van FEBv1 een efficiëntie van 99% bij een werkspanning van 7250 V. Met een achtergrondruis van 2 kHz/cm<sup>2</sup> liep de werkspanning op tot 7340 V bij een efficiëntie van 95%. Echter, zowel de Cyclone V FPGA en PETIROC2B ASIC hadden last van problemen gerelateerd aan stralingshardheid. FEBv2 zal dan ook een nieuwe versie van de Cyclone V FPGA bevatten, die speciaal ontworpen is voor toepassingen in omgevingen met hoge stralingsdichtheid. De nieuwe PETIROC2C wordt momenteel getest in de Louvain-la-Neuve (LLN) neutronenbundel met een fluentie van  $10^{14}$  pC/cm<sup>2</sup>, wat vijf maal de verwachte waarde bij CMS is.

Het INFN FEE testboard bevat acht SiGe voorversterkers, alsook twee discriminator-ASICs. Aldus werden twaalf van deze FEE boards geïntegreerd op een uitlees PCB. De detector werd bedreven aan een drempelwaarde van 5 fC en werd blootgesteld aan een achtergrond stralingsniveau tot 4 kHz/cm<sup>2</sup>, waarbij hij een efficiëntie aanhield van meer dan 92%. Zonder bijkomende bestraling had hetzelfde prototype een efficiëntie die hoger lag dan 99% voor een werkspanning lager dan 7000 V. De gemiddelde muonclustergrootte werd bepaald op  $(3.4 \pm 0.1)$ , wat als gevolg van de verhoogde gevoeligheid van de nieuwe FEE hoger is in vergelijking met de CMS FEB. Met een stralingsniveau van 2 kHz/cm<sup>2</sup> lag de efficiëntie op 97% en de werkspanning op 7250 V. Onder invloed van de achtergrondstraling daalde de muonclustergrootte tot  $(2.6 \pm 0.1)$ .

Mijn grootste bijdrage aan de CMS RPC-upgrade was gerelateerd aan de langlevendheidstudie en de certificatie van het huidige systeem voor de HL-LHC. Volgens extrapolaties van de CMS-data zouden de detectoren in het bestaande RPC systeem gecertificeerd moeten worden voor een achtergrondstraling van 600 Hz/cm<sup>2</sup> en een totale geïntegreerde lading van 840 mC/cm<sup>2</sup>. Dit stemt overeen met driemaal de hoogste te verwachten achtergrondstraling voor de HL-LHC zoals bepaald met behulp van de huidige meetgegevens van het RPC-systeem. Tijdens mijn doctoraatswerk werkte ik mee aan een allereerste studie in dit verband in de oude GIF in het CERN, waarbij een cesium-bron van 494 GBq beschikbaar was voor de bestraling van detectoren. Een opstelling met één enkele

reserve CMS RPC liet toe om eerste versies van een data acquisitiesysteem en tools voor de kwaliteitscontrole en data-analyse te ontwikkelen. De RPC werd geïnstalleerd in een bunker nabij de radioactieve bron om vervolgens bestraald te worden met een achtergrondstraling van  $600 \text{ Hz/cm}^2$ . De performantie van de detector werd getest met behulp van een op scintillatoren gebaseerde kosmische muontelescoop die fungeerde als trigger voor de data-acquisitie. De resultaten suggereerden dat de performantie van de detector daalde tot 80% efficiëntie, waarbij de werkspanning verhoogde tot 1000 V bij  $600 \text{ Hz/cm}^2$ .

Een grootschaliger experiment werd vervolgens opgebouwd in de CERN GIF++. Deze nieuwe opstelling maakte gebruik van twee reserve-RPCs van het type RE2/2, geproduceerd in 2007, en twee RE4/2 kamers uit 2013. Eén RPC van elk type diende als referentie terwijl het tweede exemplaar bestraald werd in een studie van de levensduur van deze detectoren bij HL-LHC condities. Op het moment van schrijven werd respectievelijk 74 (voor de RE2/2 detector) en 40% (voor de RE4/2 kamer) van de geplande bestraling uitgevoerd sinds 2016. Tijdens de metingen blijken de stroomdichtheid en de gedetecteerde achtergrondstraling in de RPCs sterk gecorreleerd aan de temperatuur in de GIF++. Wanneer dit in rekening wordt gebracht, vertonen de stroomdichtheid en de achtergrondruis gemeten in de bestraalde detectoren een dalende trend ten opzichte van de referentiekamers. Dit effect lijkt verband te houden met een waargenomen toename van de resistiviteit van de bestraalde detectoren met een factor 2 ten opzichte van de referentiekamers. De schommelingen in de gemeten stroomdichtheid en de achtergrondruis vertonen echter ook een correlatie met de relatieve luchtvochtigheid van het gebruikte gasmengsel in de RPCs. Het effect lijkt reversibel door de RPCs bloot te stellen aan een gasmengsel met hogere relatieve luchtvochtigheid.

Tot op heden is er geen verlies aan detectorperformantie merkbaar bij een achtergrondstraling van  $600 \text{ Hz/cm}^2$ . Alle RPCs behouden een efficiëntie boven de 94% bij bestraling tot het niveau dat bij de HL-LHC verwacht wordt. De gemeten verschuiving in de werkspanning van 100 V voor de RE2 RPCs en van 300 tot 500 V voor de RE4 RPCs is consistent met het verschil in de elektrode-resistiviteit van beide types detectoren. De RE2 detectoren hebben een elektrode-resistiviteit tussen  $1 \text{ à } 3 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  terwijl die van de nieuwere RE4 detectoren tussen de  $0.7 \text{ en } 2 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  bedraagt. Intern in de RPCs veroorzaakt de gammastraling van de GIF++ bron een spanningsdaling over de elektrodes evenredig met hun weerstand. Aangezien de RPC elektrodes zich gedragen als condensatoren, zorgt deze daling in spanning (gewoonlijk verwaarloosbaar bij afwezigheid van straling) ervoor dat het effectieve elektrische veld in het gasvolume voor een gegeven aangelegde detectorspanning ook daalt naarmate het aantal invallende gamma flux toeneemt. Wanneer we hier rekening mee houden verdwijnt deze waargenomen verschuiving in de RPC werkspanning. Alle andere parameters die tijdens deze testen opgevolgd werden zoals detectorefficiëntie, de gemiddelde muonclustergrootte en de ladingsdepositie per deeltjescascade, vertonen tot nu toe geen enkel verschil tussen de referentiekamers en de bestraalde detectoren.

Op dit moment is de CMS RPC groep nog steeds bezig om het huidige RPC-systeem te certifiëren voor de toekomstige HL-LHC periode. Deze levensduurstudie zou eind 2021 afgerond moeten zijn. Indien geen effecten van veroudering in de detectoren gevonden worden tijdens het verdere verloop van deze studie, zouden de huidige RPCs, ook mede dankzij de upgrade van het Link Board systeem, de hoge-luminositeitsfase van de LHC moeten kunnen doorstaan zonder grote veranderingen in hun performantie.