

Startverslag

8 oktober 2018

Silicon Tracker Endcap for the upgraded CMS experiment at the High-Luminosity LHC at CERN

De Large Hadron Collider (LHC) te CERN is de hoogste prioriteit van de deeltjesfysica gemeenschap om vooruitgang te maken in het onderzoek naar de kleinste bouwstenen van de materie. Belgische onderzoeksgroepen zijn reeds vanaf begin de jaren negentig actief bij eerst het ontwerpen en bouwen van de CMS detector nabije de LHC, tot vandaag het onderhouden van dit experiment en het uitvoeren van fundamenteel onderzoek. Vanaf 2026 begint de High-Luminosity LHC fase waarvoor een vernieuwde of ge-upgrade CMS detector nodig is. Binnen de internationale collaboratie nemen de Belgische instellingen het voortouw om een voorwaartse Silicon Tracker Endcap te bouwen. Deze is essentieel voor het onderzoek en komt overeen met de van ons verwachte bijdrage aan de opbouw van deze vernieuwde CMS detector. Dit “Hercules”-project voorziet in de financiële bijdrage om dit project te realiseren.

Betrokken Belgische universiteiten:

Vrije Universiteit Brussel
Universiteit Antwerpen
Universiteit Gent
Université Libre de Bruxelles
Université Catholique de Louvain



VRIJE
UNIVERSITEIT
BRUSSEL



Universiteit
Antwerpen



UCL
Université
catholique
de Louvain

Context van het project

Met de huidige Large Hadron Collider (LHC) te CERN worden proton botsingen gecreëerd bij de hoogste energieën die we in onze laboratoria kunnen maken. De veelvoud aan deeltjes die ontstaan in deze botsingen worden met specifiek ontworpen deeltjesdetectoren opgemeten. De Compact Muon Solenoid (CMS) detector is diegene waar de Belgische instellingen aan bijdragen en toelaat om baanbrekend onderzoek te verrichten. Zo hebben we in 2012 het Brout-Englert-Higgs deeltje kunnen ontdekken, wat wereldwijd erkend is als een unieke doorbraak.

De botsingsdata die we in de huidige fase van het LHC programma zullen verzamelen sinds 2010 en tot 2023 laat een bijzonder ruime waaier aan onderzoeksmogelijkheden toe. Dit vertaalt zich in ongeveer 100 peer-reviewed publicaties per jaar in toptijdschriften door de internationale CMS Collaboratie. Om het recent ontdekte Brout-Englert-Higgs deeltje nauwkeuriger te bestuderen is echter veel meer botsingsdata nodig. De volgende fase die door het CERN werd goedgekeurd is om vanaf 2026 tot 2037 de deeltjesversneller dermate te verbeteren dat we elk jaar eenzelfde hoeveelheid data kunnen verzamelen als tijdens de volledige eerste fase van de LHC tussen 2010 en 2023. Dit is de zogenaamde High-Luminosity LHC fase of HL-LHC.

Om deze botsingen op een equivalente wijze op te meten is een vernieuwde en verbeterde CMS detector nodig. Vooral de detector die de geladen deeltjes opmeet moet volledig herzien worden. Op basis van een nieuw ontwerp van deze Silicon Tracker kunnen we ook in de tweede fase met eenzelfde performantie de botsingen bestuderen. Recent werd dit ontwerp na grondige peer review goedgekeurd door de relevante internationale instanties [CERN-LHCC-2017-009, zie verder].

Binnen de CMS Collaboratie hebben de Belgische instellingen als consortium het vertrouwen gekregen, en nu ook de verantwoordelijkheid, om een van de twee sluitstukken (of Endcaps) van de Silicon Tracker te bouwen. Dit ambitieus project is recent begonnen in onze laboratoria, en omvat niet alleen de constructie of assemblage van de detectie elementen, maar ook het grondig testen van de precisie en performantie van de detector componenten.

Internationale context van het project

In 2017 werd door de CMS Collaboratie een document afgeleverd ter goedkeuring door de wetenschappelijke commissies zoals geïnstalleerd door het CERN, in het bijzonder de LHCC en de Research Board. Het betreft het Technical Design Report (TDR) document getiteld "*The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker*" (CERN-LHCC-2017-009, <https://cds.cern.ch/record/2272264/files/CMS-TDR-014.pdf>). Na deze grondige wetenschappelijke evaluatie en de hieruit volgende goedkeuring werd het document voorgelegd aan de Resource Review Board (RRB) van het CMS experiment waarin een afgevaardigde zetelt van elke betrokken funding agency, zo ook het FWO-Vlaanderen vertegenwoordigd door professor Catherine De Clercq. Met de informatie dat bij alle betrokken funding agencies het budget beschikbaar is om deze upgrade te financieren, heeft de RRB ook het globale budget goedgekeurd. In Vlaanderen is dit budget voorzien via de bekomen financiering na de aanvraag bij de Hercules stichting. Ook de Waalse partners worden via het FNRS vertegenwoordigd in de RRB, en hebben dus ook goedkeuring gegeven voor hun financiële bijdrage zoals voorzien in de Hercules aanvraag. Deze bevestigingen zoals genotuleerd zullen weldra geformaliseerd worden in een Memorandum of Understanding (MoU) tussen de betrokken funding agencies en het CERN. Bijgevolg heeft de internationale gemeenschap een vergelijk heeft gevonden om de totale kost voor het globale Tracker upgrade project te dragen. Gezien de Silicon Tracker Endcap een belangrijk onderdeel is van een groter geheel, is deze bevestiging essentieel voor het wetenschappelijk programma dat we vanaf 2026 uitvoeren met het toestel.

Niet alleen de CMS Tracker krijgt een upgrade, maar ook vele andere onderdelen van de volledige CMS detector. Met bovenstaande procedure werden ook deze projecten goedgekeurd om tot een volwaarde upgrade te komen van het CMS experiment tegen 2026.

Vorbereiding constructie fase in België

Sinds de goedkeuring van het project werden verschillende stappen ondernomen om zo efficiënt mogelijk van start te gaan. Dit zowel met betrekking tot de nodige infrastructuur als het aanwerven en adequaat opleiden van personeel.

De installatie van de clean rooms is essentieel voor een goede start van het project. Hiervoor werd initiatief genomen door de betrokken onderzoeksgroepen, en vandaag is deze installatie afgerond of in uitvoering. In 2018, of ten laatste begin 2019, kan men verwachten dat alle clean rooms operationeel zijn. Niettegenstaande dit later is dan beschreven in de projectaanvraag, zal dit geen hinder geven voor het finale doel, i.e. de constructie van de CMS Silicon Tracker Endcap. De levering van de detector componenten is namelijk ook later dan voorzien, en bijgevolg zullen we een zo efficiënt mogelijke assemblage procedure moeten opzetten om tijdig de volledige detector op te bouwen.

Nieuw technisch personeel werd aangeworven in het kader van het CMS experiment. Hiervoor krijgen we steun van zowel de universiteiten als van het FWO Big Science (weldra IRI) programma. Ook nieuwe doctoraatsstudenten en postdoctorale medewerkers worden stap voor stap ingeschakeld om de eigenheid van het constructie project te leren. Wekelijks hebben we te Brussel een vergadering om de vooruitgang te bespreken, en op regelmatige basis presenteren we de stand van zaken binnen de CMS Collaboratie.

Eerste testen werden reeds uitgevoerd met betrekking tot de assemblage van dummy componenten, i.e. componenten met dezelfde structuur als de finale componenten maar zonder de effectieve elektronische functionaliteit. Met de ervaring van deze testen en in samenspraak met collega's binnen de internationale CMS Collaboratie, krijgen we stap voor stap een beeld hoe de finale assemblage procedure eruit zal zien. Zo komen we tot een ontwerp van de speciale assemblage platen ("*jigs*") die we daarna kunnen bestellen in grotere hoeveelheden. Momenteel testen we de precisie die we kunnen bekomen bij verschillende leveranciers.

Via onderzoeksprojecten zijn we betrokken bij het ontwerpen en testen van de concrete uitleeselektronica die de detectormodules zullen hebben. Verschillende doctoraatsstudenten en postdocs hebben de uitleeselektronica kunnen testen nabij deeltjesbundels. Met deze ervaring kunnen we nu overgaan tot het opstellen van specifieke systemen om de componenten van de detectoren te testen zowel voor, tijdens als na de assemblage. Dit is cruciaal om het aantal niet gekwalificeerde detector modules te minimaliseren.

De partners aan de Waalse universiteiten hebben initiatief genomen om ook hun belangrijkste investering met betrekking tot de constructie infrastructuur te bestellen. De bestelling van de zogenaamde *wire bonding* machine werd gedaan, kostprijs 177k EURO (incl BTW) en levering voorzien op 16 oktober 2018. Aangezien dit toestel in een clean room operationeel moet zijn, synchroniseren we deze bestelling met het beschikbaar komen van de clean room faciliteit te Brussel. Ook de clean room aan de UCL werd besteld (zie volgende pagina).

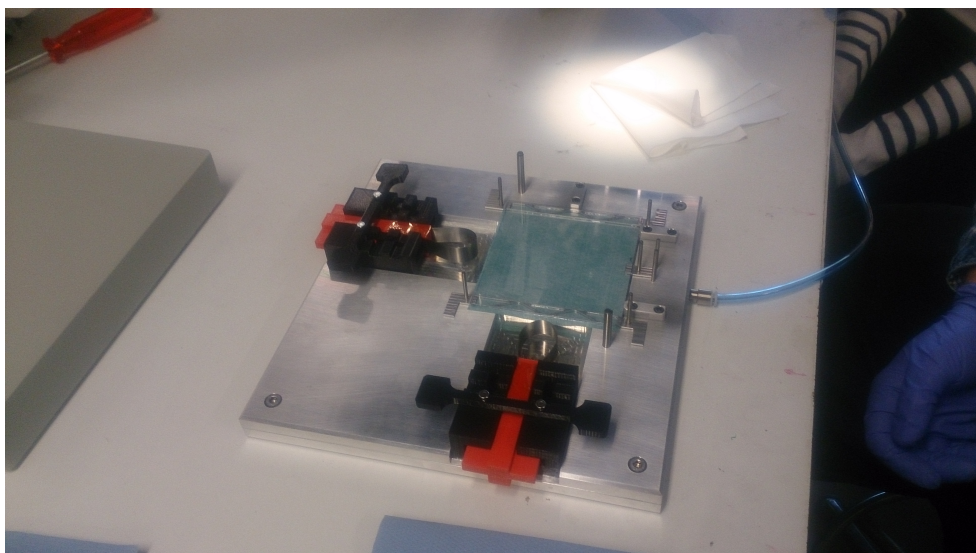
Infrastructuur en eerste prototypes

In de herfst van 2018 verwachten we de oplevering van de nieuwe clean room aan de VUB van 120 m². Deze zal de centrale en dus grootste clean room worden voor de assemblage en het testen van de detector modules. Zie enkele foto's hieronder. Ook hebben de FNRS partners, volgens de planning, het belangrijke *wire bonding* toestel aangekocht. Weldra zullen we alle meubilair aankopen voor deze centrale clean room, en kunnen we stellen dat de basis infrastructuur succesvol opgesteld is.

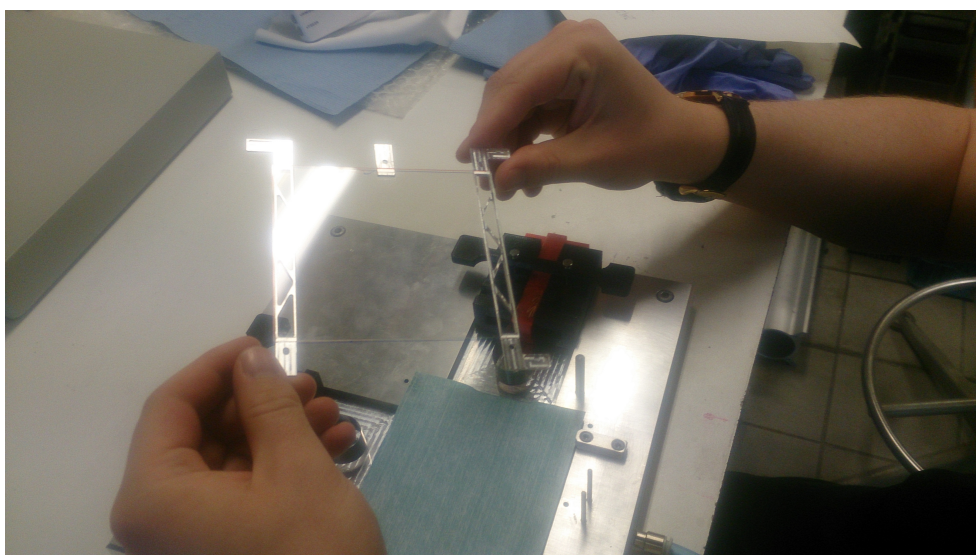


Ook de clean room aan UCL van in totaal 81 m² werd besteld, en men verwacht de oplevering begin 2019. De UGent clean room (40 m²) werd opgeleverd in juni 2017.

Eind 2018 verwachten we de infrastructuur en de componenten klaar te hebben voor de assemblage van een eerste reeks elektrisch functionele prototypes. Met deze oefening kunnen we de assemblage procedures verder perfectioneren. Hieronder enkele foto's genomen tijdens een eerste assemblage van *dummy* onderdelen, i.e. onderdelen met dezelfde geometrie en precisie als de reële onderdelen, maar zonder hun specifieke functionaliteit.



Voorlopige assemblage jig hier gebruikt voor onderdelen van een *dummy module*.



Resultaat van het assembleren van onderdelen van een *dummy module*.

Actualisatie van de financiële planning

Er is geen verandering in de kost van het project zoals voorzien in de overeenkomst. De totale enveloppe van het project blijft binnen de voorziene kost, i.e. 5 189 900 EURO vanuit Vlaamse instanties en 4 987 800 EURO vanuit Waalse instanties.

Hieronder een kleine en pragmatische verschuiving tussen budgetten:

De installatie van de nieuwe clean rooms werd voorzien binnen het Hercules budget, en was een van de eerste items om te realiseren in het project. Voor het succes van het project, kon de start van deze installatie niet wachten tot het ondertekenen van de finale overeenkomst. De universiteiten en onderzoeksgroepen hebben pragmatisch besloten deze kost op zich te nemen binnen de financieringsmogelijkheden van hun onderzoek specifieke programma's (die eerder voor het ontwikkelen van prototypes zouden dienen). De verschuiving van deze kost tussen Hercules en universiteit, geeft binnen de voorziene enveloppe een heroriëntering van de clean room kost binnen het Hercules budget naar een equivalent budget voor prototypes, en uiteraard nog steeds integraal deel van het voorziene constructie project. Buiten een pragmatische verschuiving van kosten, heeft dit geen enkele invloed op de totale financiering van het project.

De voorziene clean room kost was 106k EURO per installatie aan de UGent en VUB. Deze kost (die in realiteit veel hoger bleek) hebben de onderzoeksgroepen met steun van hun universiteiten opgenomen. Dit moet nu toelaten binnen het project om de kost te dragen voor de prototypes in de pre-constructie fase van het project om onze productiemethoden te kwalificeren. Deze kost is vergelijkbaar en valt binnen dezelfde categorie als de kost voor de clean rooms, i.e. aanpassingen die we moeten verrichten aan onze installaties alvorens de effectieve constructie van de instrumenten kan aanvangen. Typisch maakt men ongeveer 1% proto-types in de pre-constructie fase, en voor onze assemblage lijn zal dit 20 stuks zijn. Met de huidige prijzen opgegeven door de leverancier van de componenten komen we tot een kost van 10k EURO per prototype (of ongeveer 11k CHF). Voor 20 stuks geeft dit een kost die (modulo schommelingen in o.a. de koerswissel tussen CHF en EURO) equivalent is aan de voorziene kost voor de installatie van de clean rooms. Hiermee zitten we inderdaad nog steeds binnen de enveloppe van het voorziene budget in de overeenkomst, en is er enkel sprake van een verschuiving van budgetten uit deze overeenkomst met matching funds van de deelnemende universiteiten.

Financiële planning

De eerste schijven, oorspronkelijk voorzien in 2017 en 2018, kunnen nu voorzien worden in het laatste semester van het kalenderjaar 2018. De tweede schijf kan nu gepland worden in 2019. De overige schijven zouden een jaar doorschuiven ten opzichte van de informatie in de subsidieovereenkomst. Gezien de levering van de elementen binnen de internationale context van de CMS collaboratie ook een vertraging heeft, zal dit de uiteindelijke constructie niet in gedrang brengen, alsook zal de installatie van het toestel in het geheel van de CMS detector nog steeds tijdig kunnen gebeuren.

Hieronder de jaarlijkse budgeten voorzien in het project voor elke Vlaamse partner instelling, alsook een overzicht van het totaal.

Eligible costs (in Euro) for VUB	Schijf 1 (2 ^{de} sem 2018)	Schijf 2 (2019)	Schijf 3 (2020)	Schijf 4 (2021)	Schijf 5 (2022)
A2. Costs of components for the construction of the intended research infrastructure	79.463	438.325	648.421	268.828	165.597
A4. Costs of modifications to buildings and connection costs of research infrastructure	158.380	19.416	15.183	13.490	12.530
Total per Year	237.843	457.741	663.604	282.318	178.127

Eligible costs (in Euro) for UAntwerpen	Schijf 1 (2 ^{de} sem 2018)	Schijf 2 (2019)	Schijf 3 (2020)	Schijf 4 (2021)	Schijf 5 (2022)
A2. Costs of components for the construction of the intended research infrastructure	79.463	438.325	648.421	268.828	165.596
Total per Year	79.463	438.325	648.421	268.828	165.596

Eligible costs (in Euro) for UGent	Schijf 1 (2 ^{de} sem 2018)	Schijf 2 (2019)	Schijf 3 (2020)	Schijf 4 (2021)	Schijf 5 (2022)
A2. Costs of components for the construction of the intended research infrastructure	79.464	438.324	648.420	268.828	165.596
A4. Costs of modifications to buildings and connection costs of research infrastructure	122.220	14.984	11.717	10.410	9.670
Total per Year	201.684	453.308	660.137	279.238	175.266

Total eligible costs (in Euro) VUB+UAntwerpen+UGent	Schijf 1 (2 ^{de} sem 2018)	Schijf 2 (2019)	Schijf 3 (2020)	Schijf 4 (2021)	Schijf 5 (2022)
Total per Year	518.990	1.349.374	1.972.162	830.384	518.989

Gedetailleerde financiële planning

Tijdens het beoordelingsproces van de Hercules commissie werd initiële informatie voorzien betreffende de kost van specifieke detector elementen zoals die gekend waren in 2015. Op volgende pagina de tabel die het toen aangevraagde budget illustreert en op basis waarvan de commissie een vast budget toegekend heeft aan het consortium.

Sinds 2015 is de totale kost behouden, maar is de spreiding over de jaren minimaal aangepast om aan de tabellen op de vorige pagina's te komen. Wanneer deze elementen effectief besteld zullen worden door het internationaal consortium van de CMS collaboratie, zal er uiteraard een actualisatie nodig zijn van deze kosten. Het is steeds de bedoeling om binnen het initieel goedgekeurde budget te blijven voor het afleveren van een Silicon Tracker Endcap. In het extreme kan dit gebeuren door middel van het verschuiven van bijdragen van internationale partner instellingen binnen het volledige kader van de CMS detector (er zijn ongeveer 230 instellingen uit 50 landen binnen de CMS collaboratie), bijvoorbeeld door het verschuiven van een budget voorzien voor andere onderdelen van de CMS detector naar de Silicon Tracker Endcap.

De gedetailleerde technische gegevens werden verzameld in het Technical Design Report (TDR) document getiteld "*The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker*" (CERN-LHCC-2017-009). Dit document legt de finale modaliteiten vast voor de constructie van het gehele toestel, en werd mogelijk gemaakt nadat alle betrokken instellingen een garantie opgaven over hun budgettaire inbreng. Voor Vlaanderen is dit de bekomen financiering via de oproep zware infrastructuur van de Hercules stichting.

Overzicht kosten voor de detector modules

Hieronder de tabel zoals meegegeven aan de Hercules commissie ter motivatie van de projectkost. Deze tabel geeft in de eerste twee kolommen een gedetailleerd overzicht van de kosten gerelateerd aan elk van de componenten. De spreiding over de jaren zoals weergegeven in deze tabel is niet meer relevant, gezien de concrete en overeengekomen spreiding vandaag opgenomen is in de subsidieovereenkomst. De uitgebreide wetenschappelijke verantwoording voor de elementen kan men terugvinden in de bovenvermelde TDR zoals goedgekeurd door de internationale wetenschappelijke gemeenschap en alle betrokken agentschappen, inclusief Vlaanderen gerepresenteerd door het FWO. Een wisselkoers EURO/CHF van 1.04 werd gehanteerd, i.e. de waarde in 2015.

Totaal project	Kost k CHF	2017 fractie	2018 fractie	2019 fractie	2020 fractie	2017 k CHF	2018 k CHF	2019 k CHF	2020 k CHF
2S modules									
Sensors & FE hybrids	3962	0,05	0,36	0,32	0,28	198	1407	1261	1095
Si Wafers	2893	0,05	0,29	0,29	0,38	145	827	827	1095
CBC wafers	248	0,05	0,67	0,28	0,00	12	165	70	0
Concentrator wafers	29	0,05	0,67	0,28	0,00	1	19	8	0
FE hybrid + assembly	792	0,05	0,50	0,45	0,00	40	396	356	0
Service hybrid	686	0,05	0,33	0,42	0,20	34	224	289	139
LP-GBT	119	0,05	0,50	0,45	0,00	6	60	54	0
DC/DC	59	0,05	0,50	0,45	0,00	3	30	27	0
VTRx	112	0,05	0,50	0,45	0,00	6	56	50	0
Board + assembly	396	0,05	0,20	0,40	0,35	20	79	158	139
Cooling and mechanics	417	0,05	0,33	0,62	0,00	21	139	257	0
Long sensor spacers	165	0,05	0,33	0,62	0,00	8	55	102	0
Small spacer and tabs	124	0,05	0,33	0,62	0,00	6	41	76	0
Other mechanics	69	0,05	0,33	0,62	0,00	3	23	43	0
Preparation/assembly work	59	0,05	0,33	0,62	0,00	3	20	36	0
PS modules									
Sensors & FE hybrids	2494	0,05	0,35	0,45	0,15	125	878	1113	378
Si wafers PS-strip	511	0,05	0,14	0,29	0,52	26	73	146	266
Si wafers PS-pixel	511	0,05	0,50	0,45	0,00	26	256	230	0
MPA/SSA wafers	632	0,05	0,50	0,45	0,00	32	316	284	0
Bump bonding	280	0,05	0,33	0,62	0,00	14	93	173	0
Board + assembly	560	0,05	0,25	0,50	0,20	28	140	280	112
Service hybrids	625	0,05	0,08	0,50	0,37	31	51	313	230
LP-GBT	84	0,05	0,25	0,50	0,20	4	21	42	17
DC/DC	42	0,05	0,25	0,50	0,20	2	11	21	8
VTRx	79	0,05	0,25	0,50	0,20	4	20	40	16
Board + assembly	420	0,05	0,00	0,50	0,45	21	0	210	189
Cooling and mechanics	454	0,05	0,03	0,66	0,26	23	14	301	117
Long spacers	328	0,05	0,00	0,67	0,28	16	0	219	93
Other mechanics	84	0,05	0,00	0,67	0,28	4	0	56	24
Preparation/assembly work	42	0,05	0,33	0,62	0,00	2	14	26	0
Mechanics									
Structures and cooling	1154	0,00	0,00	0,33	0,67	0	0	385	769
Subdetector structures	700	0,00	0,00	0,33	0,67	0	0	233	467
Cooling contacts	154	0,00	0,00	0,33	0,67	0	0	51	103
Preparation/assembly work	300	0,00	0,00	0,33	0,67	0	0	100	200
	9792	0,04	0,28	0,40	0,28	432	2714	3918	2728
Euro/CHF = 1,04						415,3	2609,2	3767,6	2623,4
Hercules (51%)						211,8	1330,7	1921,5	1337,9

Overzicht kosten voor de constructie

Hieronder de tabel zoals meegegeven aan de Hercules commissie ter motivatie van de projectkost. Deze tabel geeft in het meest linkse deel een gedetailleerd overzicht van de constructie kosten. De spreiding over de jaren zoals weergegeven in deze tabel is niet meer relevant, gezien de concrete en overeengekomen spreiding vandaag opgenomen is in de subsidieovereenkomst. Rekening houdend met andere bekomen budgetten verbonden aan dit project, zal zoals beschreven het Vlaamse budget voorzien voor de clean rooms gebruikt worden voor de aankoop van de onderdelen van proto-type detector modules.

	Kost k Euro	Hercules	Third Parties	total cost	2016 fractie	2017 fractie	2018 fractie	2019 fractie	2020 fractie	2021 fractie	2016 k Euro	2017 k Euro	2018 k Euro	2019 k Euro	2020 k Euro	2021 k Euro	
cleanroom	105,9	2	1	317,7	1,00						211,8						
cleanroom onderhoud	44,3	2	1	132,9			0,25	0,25	0,25	0,25			22,2	22,2	22,2	22,2	
transport boxes	6,5	0,5	0,5	6,5		1,00						3,3					
transport cost	23,8	0,5	0,5	23,8		0,05	0,40	0,40	0,15			0,6	4,8	4,8	1,8		
Dee transport	5	0,5	0,5	5			1,00						2,5				
module test setup	30	0	5	150	0,20	0,80					0,0	0,0					
CO2 cooling	50	1	1	100		1,00						50,0					
assembly tools	10	2	1	30		0,75	0,25					15,0	5,0				
				765,9													
											k Euro	211,8	68,8	34,4	26,9	23,9	22,2
																	388,1

De aankoop van het *wire bonding* toestel ter waarde van 177k EURO voorzien door de FNRS partners was nog niet weergegeven in deze tabel, en is bijgevolg een extra budget dat beschikbaar gesteld werd door het FNRS.

Gedetailleerde contact informatie

Vrije Universiteit Brussel – contact Prof. Jorgen D’Hondt – woordvoerder

Pleinlaan 2, 1050 Brussel

✉ jodhondt@vub.ac.be

☎ 02/6293483 & 0496/704865

Universiteit Antwerpen – contact Prof. Pierre Van Mechelen

Groenenborglaan 171, 2020 Antwerpen

✉ Pierre.VanMechelen@ua.ac.be

☎ 03/2653573

Universiteit Gent – contact Dr. Michael Tytgat

Proeftuinstraat 86, 9000 Gent

✉ michael.tytgat@ugent.be

☎ 09/2646544

Université Libre de Bruxelles – contact Prof. Pascal Vanlaer

Boulevard du Triomphe, 1050 Bruxelles

✉ Pascal.Vanlaer@ulb.ac.be

☎ 02/6293898

Université Catholique de Louvain – contact Prof. Vincent Lemaitre

Chemin du Cyclotron 2, 1348 Louvain-la-Neuve

✉ Vincent.Lemaitre@cern.ch

☎ 010/473241