



PHAST
PHYSIQUE
ET ASTROPHYSIQUE
UNIVERSITÉ DE LYON



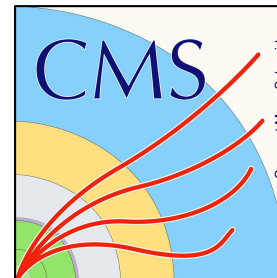
**Test de l'universalité de saveur des leptons dans le secteur
du quark top avec CMS et simulation de détecteurs de traces
pour le futur collisionneur circulaire (FCC-ee)**

Comité de suivi Individuel
20 Mai 2026



SABARD Adrien
équipe CMS IP2I

Sous la direction de :
Nicolas Chanon - Gaëlle Boudoul



Analyse de données CMS : Test de l'universalité dans le secteur du top

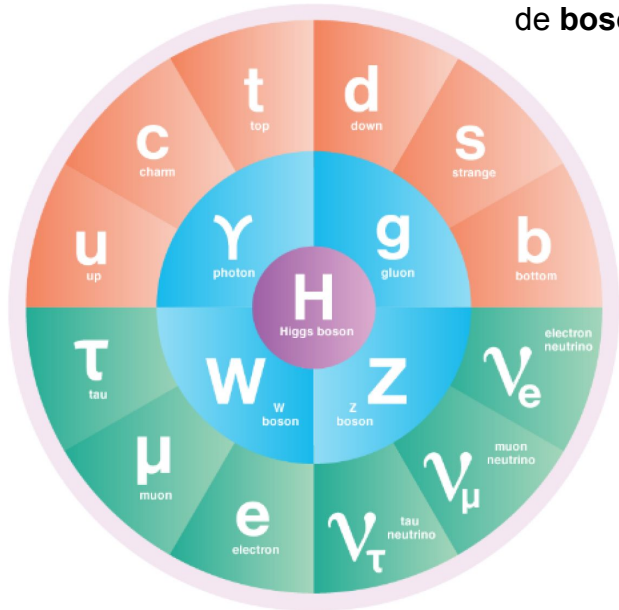
- Contexte et motivations
- Stratégie d'analyse et travail sur les jets
- Discrimination signal/fond (BDT)

FCC-ee : Simulation complète et performances

- De la physique de précision à la simulation détaillée du trajectometre
- Module de digitisation des capteurs en silicium et performances de reconstruction de traces

Formations et activités diverses

- Description des interactions entre les **particules élémentaires** (fermions) par l'intermédiaire de **bosons de jauge**



● QUARKS ● LEPTONS ● BOSONS ● HIGGS BOSON

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + \boxed{i \bar{\psi} \not{D} \psi} + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

- **Propriétés identiques** des trois types ou saveurs de leptons (**e, μ, τ**) (à part leur masse) : on parle de **l'universalité de la saveur leptonique**
- Les mesures actuelles dans les **transitions b → sℓℓ** restent un sujet d'étude actif au LHC, avec **des tensions** qui motivent des tests complémentaires.

Le secteur du quark top offre un cadre complémentaire pour ce type de test

Le quark top : sonde pour l'étude de l'universalité de saveur

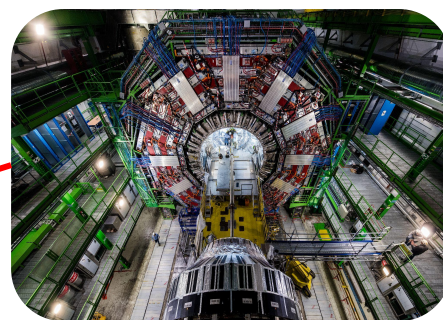
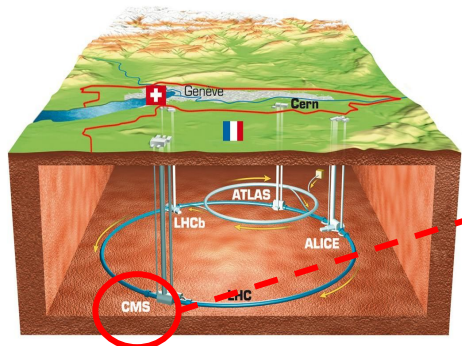
masse →	+2.3 MeV/c ²	+1.275 GeV/c ²	+173 GeV/c ²	0	+126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	0	0
	u	c	t	g	H
	up	charm	top	gluon	boson de Higgs
QUARKS					
	+1.8 MeV/c ²	+45 MeV/c ²	+4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d	s	b	γ	
	down	strange	bottom	photon	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	+91.2 GeV/c ²	
	-1/2	-1/2	-1/2	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e	μ	τ	Z	
	électron	muon	tau	boson Z ⁰	
LEPTONS				W	
	+2.2 eV/c ²	+0.17 MeV/c ²	+16.8 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	W	
	neutrino électronique	neutrino muonique	neutrino tauique	boson W [±]	
				BOSONS DE JAUGE	

- ★ Particule élémentaire la **plus lourde** (~ 180 Protons)
- ★ Durée de vie **extrêmement courte** (~ 10⁻²⁵ s)
- ★ **Produit en abondance** au LHC (~centaines de millions)

Analyse réalisée dans le cadre du run 2 du LHC avec le détecteur CMS

Le Grand collisionneur de Hadron (LHC)

- 27 km de circonférence
- Collisions proton-proton à 13,6 TeV



CMS Compact Muon Solenoid

- 14000 tonnes
- 21 mètres de long
- 15 mètres de diamètre

- ❖ **Signature étudiée** : le processus $t\bar{t}Z / \gamma^* \rightarrow l^+l^-$
 - production $t\bar{t}$ + paire de leptons de même saveur, signes opposés

- ❖ **Topologie de l'état final** :

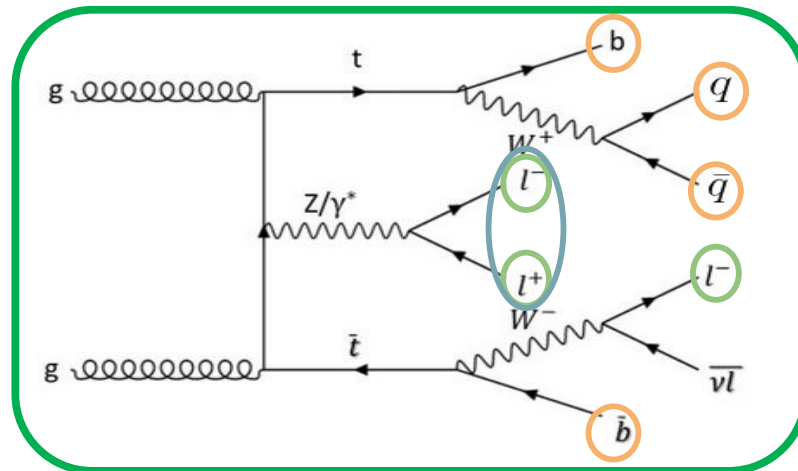
3 leptons chargés

1 paire OSSF*

* De même saveur et de signe opposé

4 jets

2 jets b



- ❖ **Observable** : ratio $R(m_{ll})$, mesuré différentiellement en masse invariante de la paire de leptons ($m_{ll} > 10$ GeV).

$$R(m_{ll}) = \frac{\frac{d\sigma}{dm_{ll}}(t\bar{t}Z \setminus \gamma^* \rightarrow ee)}{\frac{d\sigma}{dm_{ll}}(t\bar{t}Z \setminus \gamma^* \rightarrow \mu\mu)}$$

Définition des objets

Critères sur les objets au niveau reconstruit

Sélection des événements

Définition des régions de signal et de contrôle

Discrimination du signal

Définition des variables discriminantes

Unfolding

Reconstruction de la distribution au niveau particule

Section efficace différentielle

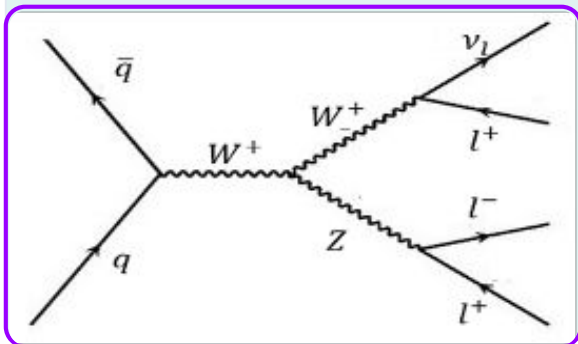
Mesure de la section efficace en intervalles de $m(\ell\ell)$ séparément pour les électrons et les muons

Rapport de sections efficaces

$$R(t\bar{t}Z/\gamma^*, Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell) = \frac{\frac{d\sigma}{dm(\mu\mu)}(t\bar{t}Z/\gamma^*, Z/\gamma^* \rightarrow \mu\mu)}{\frac{d\sigma}{dm(ee)}(t\bar{t}Z/\gamma^*, Z/\gamma^* \rightarrow ee)}$$

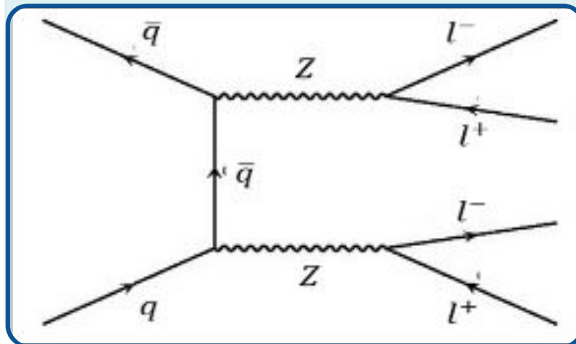
Processus WZ

$\sigma(pp \rightarrow WZ) = 50.6 \text{ pb}$
 ~33% de contribution totale



Processus ZZ

$\sigma(pp \rightarrow ZZ) = 17.1 \text{ pb}$
 ~28% de contribution totale



Fond Non-Prompt

Méthode Data-driven

- ★ Hadrons mal identifiés comme des leptons
- ★ Leptons provenant de sources non-prompts
 - ❑ hadrons lourds (b,c)
lepton secondaire ($b \rightarrow l + X$)
 - ❑ jet hadronique \rightarrow faux lepton
jet $\rightarrow l \text{ misID}$

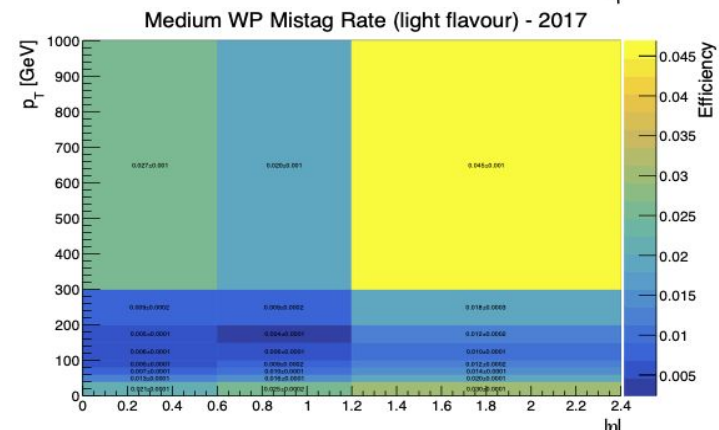
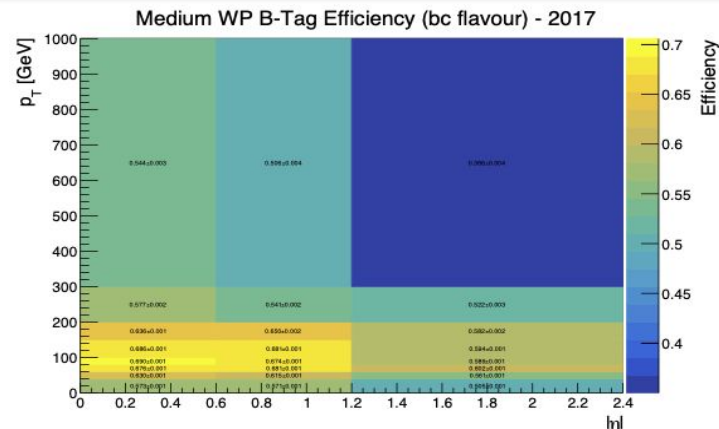
❖ Bruits de fond prompts (**WZ**, **ZZ**) contraints par des régions de contrôle dédiées ; fond **non-prompt** estimé par méthode *data-driven* (fake-rate).

Selection	ZZ CR	WZ CR	3L SR
N_{Leptons}	4	3	3
Lepton p_T [GeV]	> 40, 10, 10, 10	> 40, 20, 10	> 40, 20, 10
OSSF pairs	2	1	1
$M(l^+l^-)$ (> 10 GeV)	$M_Z \pm 20$	$M_Z \pm 10$	-
Jets	-	$N_{\text{bjets}} = 0$	$N_{\text{bjets}} = 0, N_{\text{jets}} > 0$ or $N_{\text{bjets}} > 0, N_{\text{jets}} > 1$

- ❖ Reprise d'un framework d'analyse développé par un précédent doctorant. Phases d'appropriation et de validation systématiques, ayant révélé plusieurs aspects à corriger

Élément	Problèmes observés	Actions menées	Impact
Normalisation des simulations (sections efficaces, datasets)	Valeurs incohérentes selon les processus et datasets manquants	Vérification et correction systématiques	Rapport entre simulation et données plus correct
Etalonnage de l'énergie des jets	Corrections résiduelles mal appliquées entre les données et la simulation	Recalcul complet pour les 4 années du Run 2	Cinématique des jets correctement reconstruite (impact sur les variables d'analyse)
Identification des jets issus de quark b	Mêmes seuils utilisés pour toutes les années, sans distinction	Seuils ajustés année par année selon les recommandations officielles CMS	Sélection conforme aux standards de la collaboration
Efficacités d'identification des jets b	Cartes d'efficacité manquantes ou obsolètes	Calculées par année et par saveur (lourde et légère)	Facteurs correctifs appliqués correctement
Classificateur signal/bruit (BDT)	Version existante obsolète	Réentraînement complet (XGBoost + optimisation)	Meilleure séparation signal/bruit (validation statistique en cours)

- Migration de *DeepCSV* à *DeepJet*
 - Algorithme recommandé par CMS pour le Run2
 - Meilleur rejet light/c (~30-40%) à efficacité b équivalente
- Working Point Medium
 - Seuils calibrés par ère/année :
0.260 (2016pre) / 0.249 (2016post) / 0.304 (2017) / 0.278 (2018)
- Cartes d'efficacité
 - $\epsilon(p_T, \eta)$ par année et par saveur (lourde b/c, légère)



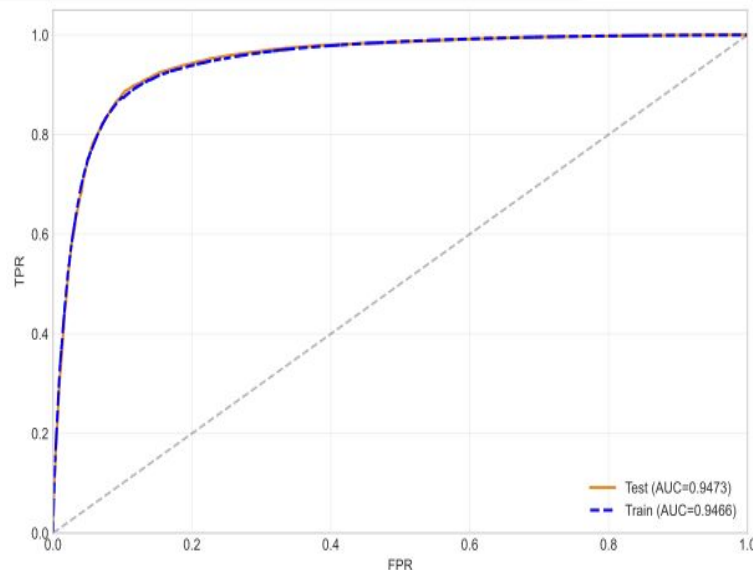
Cartes d'efficacité obtenues pour l'année 2017 pour les saveurs lourdes et légères

❖ Point de départ : version ancienne du code. BDT repris et redéveloppé intégralement.

- ★ Données utilisées : **l'ensemble du Run 2** (4 années)
- ★ Restreint à la région de signal et les **leptons non-prompt exclus**
- ★ **Retrait de 3 variables corrélées**
- ★ **Optimisation des hyperparamètres** à l'aide d'Optuna

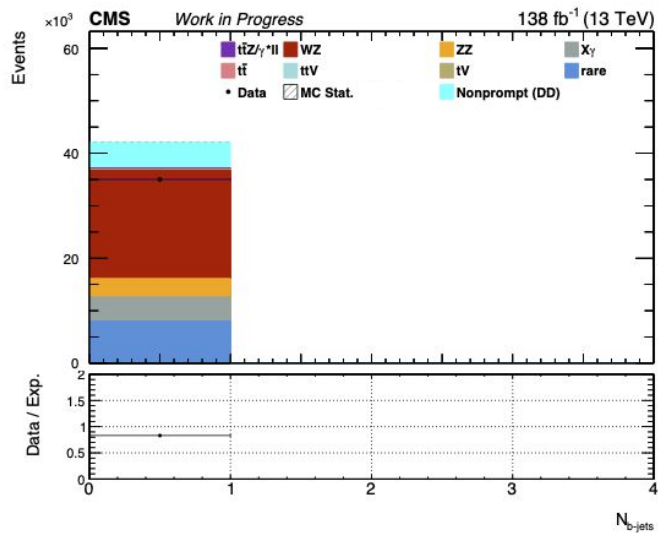
➤ **Performance et validation :**

- **Bonne séparation** signal/fond, distributions train et test bien superposées
- **AUC élevée** sur les deux échantillons :
0.9466 (train) / 0.9473 (test)
- **Aucun signe d'overtraining** : $\Delta AUC = -7e^{-4}$
- **Modèle robuste**, utilisé, par la suite, comme discriminant dans la région de signal

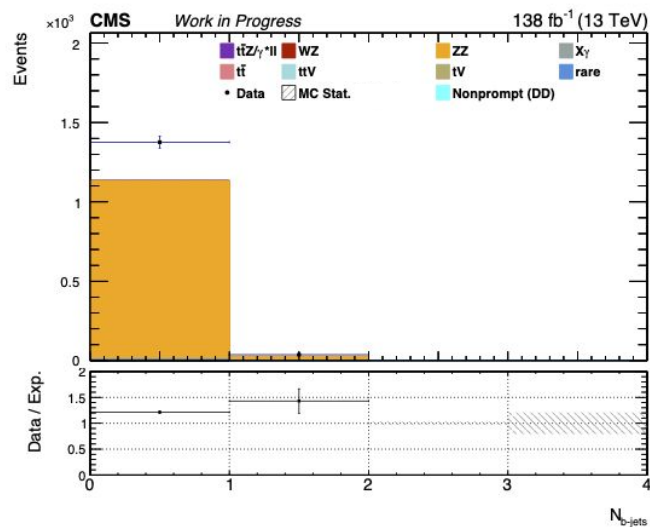


Courbe ROC – Train (pointillés) et Test (ligne)

Accord MC/data - Nombre de b-jets dans la région de contrôle WZ (Run2 complet)



Accord MC/data - Nombre de b-jets dans la région de contrôle ZZ (Run2 complet)



- **Désaccord résiduel de ~20%** dans la région WZ et dans la région ZZ
- **Pistes en cours d'investigation :**
 - Redéfinition éventuelle des régions
 - Affinement de la méthode fake-rate
 - Contamination possible par des évènements non-prompts (notamment Z+Jets)

Réalisé :

- **Reprise et consolidation du framework** : corrections JEC, datasets, sections efficaces, maps d'efficacité et BDT reconstruit.
- **Note d'analyse** : ~60 pages rédigées (datasets, objets, sélection, BDT et Régions).

Prochaines étapes :

- **Premiers résultats** : passage à l'extraction statistique du ratio R sur l'ensemble du Run 2.
- **Investigation WZ/ZZ** : résolution du désaccord pour garantir la robustesse du résultat.
- **Finalisation de la note d'analyse** : rédaction des sections Systématiques et Résultats.

Perspectives :

- **Intégration des données du Run 3** pendant la deuxième année de thèse
- **Interprétations EFT** lors de la troisième année de thèse

❖ Le projet :

- Tunnel de ~91 km au CERN, infrastructure partagée
- Phase d'opération ~2045-2060
- Étude de faisabilité conclue le 31 mars 2025
- Décision attendue du Conseil du CERN en 2028

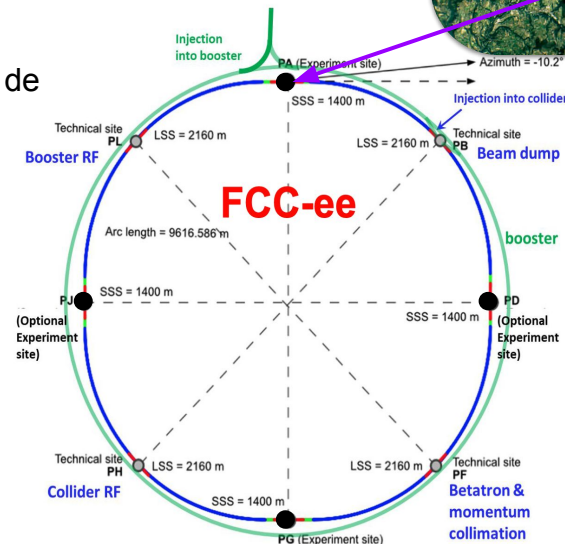
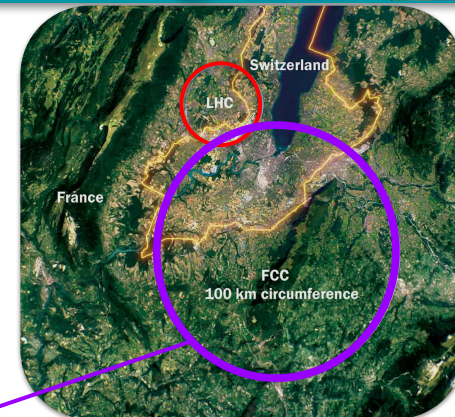
❖ Pourquoi un collisionneurs e^+e^- :

- État initial bien défini → mesures de précisions
- 4 points d'interaction
- Statistique record au pôle du Z : $\sim 10^{12}$ Z, 3 ordres de grandeurs au-dessus du LHC

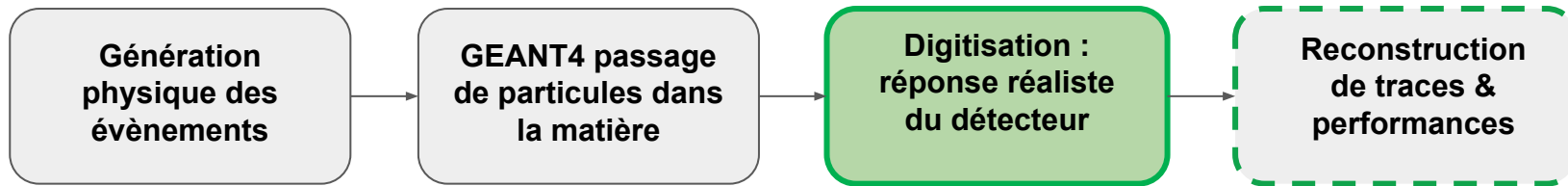
❖ Programme de physique multi-énergies :

- ★ Pôle Z (88–94 GeV)
- ★ Seuil WW (157–163 GeV)
- ★ ZH (240 GeV)
- ★ Seuil tt (340–365 GeV)

Michael BENEDIKT. *Future Circular Collider Feasibility Study report Volume 1 : Physics and Experiments.*



➤ Schéma de la chaîne de simulation complète



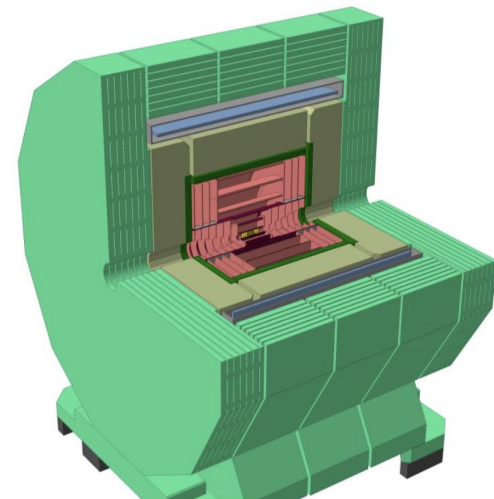
- La **digitisation** traduit l'énergie déposée dans le silicium en signaux électroniques réalistes. C'est l'étape qui détermine la fidélité de la simulation aux performances réelles attendues d'un capteur

★ Mon travail de thèse :

- Développer la **simulation complète** , notamment par la conception d'une **digitisation détaillée** pour les capteurs silicium des *tracker* du FCC-ee, et évaluer l'impact sur les performances.

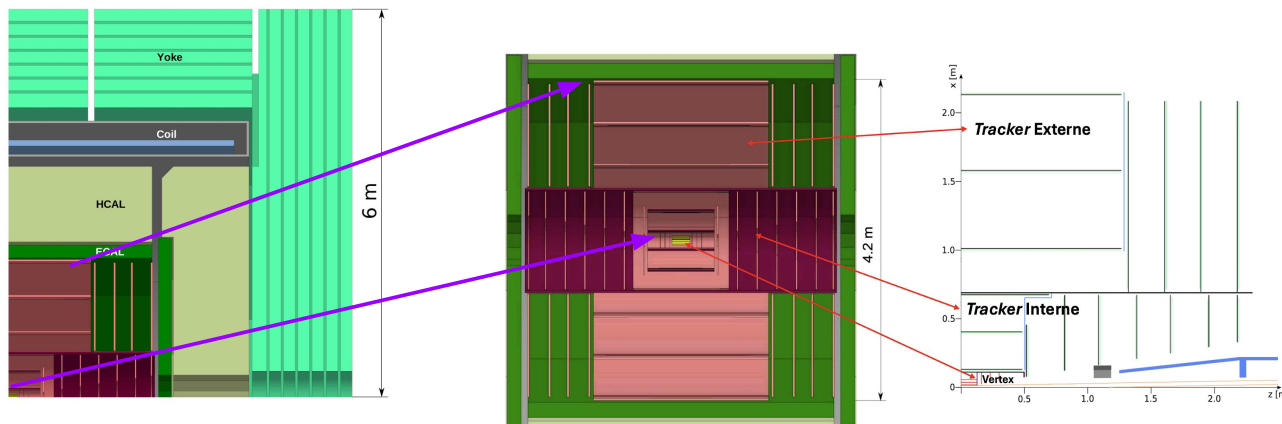
★ Pourquoi CLD ?

- Le concept **CLD - CLIC- like detector** - repose sur un **trajectographe 100% silicium**, ce qui en fait un support naturel pour développer et valider notre chaîne ⇒ **Méthode généralisable à terme aux autres concepts**



Ref : [CLD Detector Concept](#)

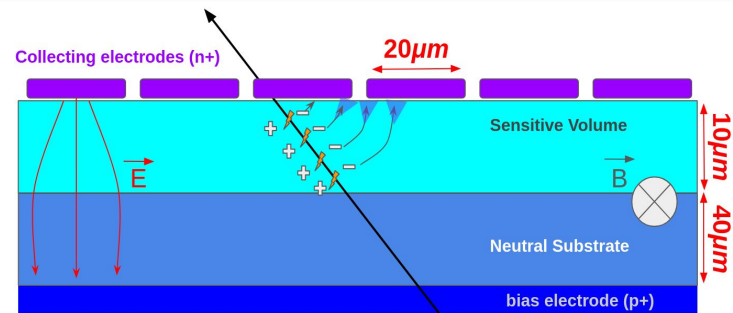
- **CLD = CLIC-like detector**, un des concepts à l'étude pour le FCC-ee
 - Hérité des études **CLIC : Solénoïde supraconducteur (2T)** : positionné à l'extérieur du système calorimétrique
 - **Trajectographe 100 % Silicium** (Vertex, Interne et externe)



Sous-système	Technologie	Résolution
Vertex	Pixels MAPS 25x25 μm^2	$\sim 3 \mu\text{m}$
Trajectographe interne exception du premier bouchon	Bandes Si (pitch 50 μm) Pixels MAPS 50x50 μm^2	$\sim 7 \times 90 \mu\text{m}$ $\sim 5 \times 5 \mu\text{m}$
Trajectographe externe	Bandes Si (pitch 50 μm)	$\sim 7 \times 90 \mu\text{m}$

❖ Modifications apportées au détecteur de vertex * :

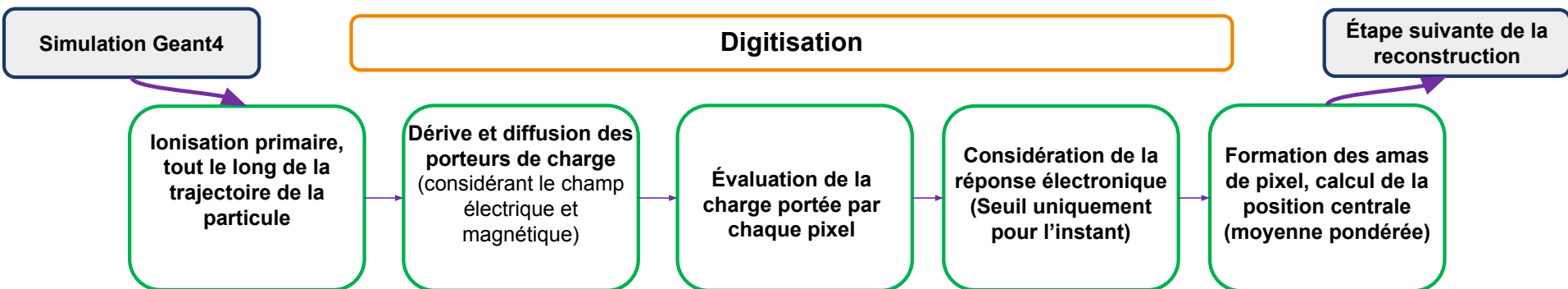
- Pixels : $25 \times 25 \mu\text{m}^2 \rightarrow 20 \times 20 \mu\text{m}^2$ (paramétrable dans le module)
- Couche sensible : $50 \mu\text{m} \rightarrow 10 \mu\text{m}$ d'épaisseur
- Objectif : Représenter avec plus de fidélité un capteur MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor)



*([Répertoire Github CLD_o2_v07](#))

❖ Réponse du capteur (module *VTXDigiDetailed*, développé à l'IP2I) :

→ Modéliser les charges qui sont collectées à la surface d'un senseur en silicium traversé par une particule chargée



- ◆ **Objectif** : Quantifier l'apport d'une digitisation réaliste sur les performances de reconstruction, en comparant directement avec l'approche paramétrique de référence.

Approche de base (référence) - *Smearing gaussien*

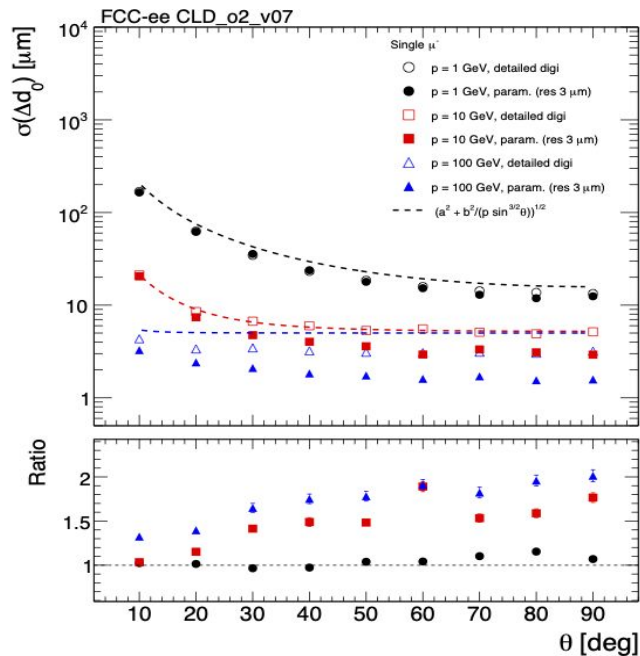
- Position du hit étalée selon une gaussienne de largeur fixe
- Rapide, mais indépendant de la physique du capteur

Approche détaillée (notre modèle) - *VTXdigitizerDetailed*

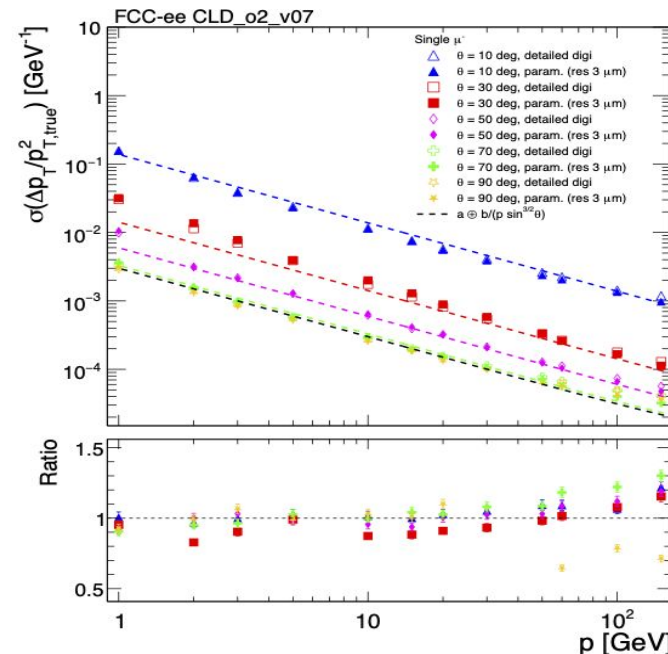
- Modélisation des processus physiques I
- Plus réaliste, sensible à la géométrie et aux paramètres du capteur

- **J'ai repris et entièrement mis à jour les [TrackerPerformanceScripts](#)** - scripts d'analyse de performances hérités des travaux de [G. Sadowski IPHC IN2P3](#)
- **J'ai mis en place la chaîne de simulation complète** — balayage en angle polaire ($10^\circ \rightarrow 90^\circ$) et en impulsion ($1 \rightarrow 100$ GeV), 2000 muons générés par *particle gun*.
- **J'ai automatisé toute la chaîne sur HTCondor** → un balayage complet (θ, p) passe d'environ **1 semaine en local à 1 journée sur le cluster**. *Gain : itération rapide entre configurations.*
- **Développement en cours** d'un nouveau script "**Scénario**" pour faciliter les comparaisons que l'on souhaite menées (modification de la géométrie, de paramètres comme le champ magnétique etc.,)

- **Résolutions** sur le paramètre d'impact transverse $\sigma(d_0)$ et sur l'impulsion transverse comparées entre module détaillée, de base et le modèle analytique CLD ([CLD Detector Concept](#))



- le **ratio** correspond à la division des données du module IP2I par celles du module de base



- **Bon accord** avec le modèle analytique de CLD
- **Écart** entre les deux modules : attendu, le module détaillé intègre des effets réalistes que le module de base ignore.

- On observe des performances équivalentes entre les deux modules sur la résolution en impulsion

Réalisé :

- **Co-développement** d'un module de digitisation réaliste pour capteurs silicium — **intégré à Key4Hep**, disponible pour toute la communauté FCC
- Une chaîne de simulation et d'évaluation des performances de tracking **opérationnelle et validée** sur le tracker de CLD

Prochaines étapes :

- **Généraliser** la chaîne : autres types de particules, autres concepts de détecteurs (ALPHA)
- **Élargir** le périmètre physique : intégration du bruit de fond faisceau, vers un framework complet *simulation + conditions réalistes*
- **Préparer la physique** : exploiter ce framework pour les canaux sensibles au tracker — notamment les particules à long temps de vie (**LLPs**)

Perspectives :

- Mes travaux s'inscrivent dans le **projet R&D LIFT de l'IP2I**, récemment lancé, qui vise à intégrer une couche de *timing* autour du trajectographe silicium

Formations transversales

MOOC - Éthique le recherche	15H
MOOC - Intégrité scientifique	15H
TOTAL	30 H / 60 H

Formations scientifiques

Ecole de GIF 2025 - Strasbourg	25H
School of Statistics 2026 - Aussois (JUN 2026)	30H
TOTAL	55 H / 60 H

⇒ **BNL/CERN School On Physics at Future Colliders (août/sept 26)** : candidature déposée, réponse attendue pour fin mai 2026 (+30H)

Présentations :

- **29/04/26 - Réunion du FCC-PED du Cern, groupe Full Simulation (FCC)** : présentation de mes résultats de performances de tracking (*Detailed vertex digitization studies: Progress and Outlook*)
- **04/07/26 Jamboree FCC - France** : Présentation plus générale de mes résultats de thèse, événement rassemblant les étudiants de France travaillant sur les futurs collisionneurs.
- **FCC France - Marseille** : (Agenda en préparation, possibilité de talk) rassemblant la communauté française et invités internationaux - FCC

Tâches de service - collaboration CMS

Mars. → Mai 2026 : formation aux shifts de surveillance du détecteur (système de contrôle, *DCS*) — théorie et pratique

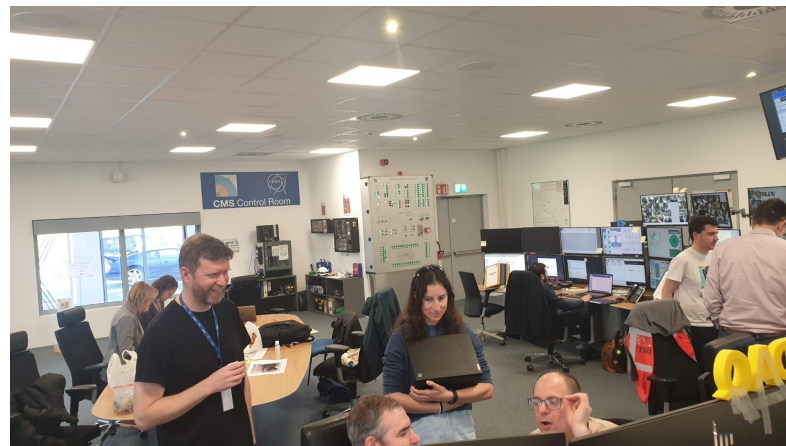
↳ Mars : formations générales

↳ 6-7 Mai : 2 séances d'observation (*shadow shifts*)

Juin/Juillet 2026 : Nouvelles formations pour être *shifter* pendant l'arrêt technique du LHC (*LS3*)

Conférence :

- **26-27/05/2026 Workshop national Top LHC France, Paris**





Merci pour votre attention !

BACKUP

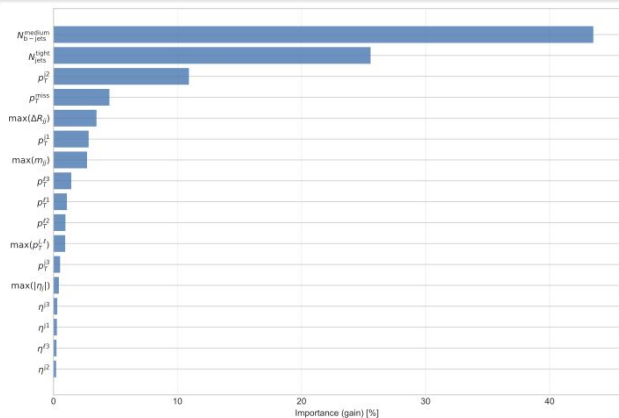
Variable	Description
N_{jets}	Number of selected jets in the event
$N_{\text{B-jets}}$	Number of selected b-tagged jets
$p_T^{1\text{st lep}}$	Transverse momentum of the highest- p_T lepton
$p_T^{2\text{nd lep}}$	Transverse momentum of the second-highest- p_T lepton
$p_T^{3\text{rd lep}}$	Transverse momentum of the third lepton
$\eta^{3\text{rd lep}}$	Pseudorapidity of the third lepton
p_T^{MET}	Magnitude of the corrected missing transverse momentum
$m(\ell^+\ell^-)$	Invariant mass of the OSSF lepton pair
$\Delta R(\ell\ell)$	ΔR between the two leptons forming the OSSF pair
$\max(\Delta R(\ell\ell))$	Maximum ΔR between any pair of leptons
$\max(\Delta R(jj))$	Maximum ΔR between any pair of jets
$\max(\eta^{\text{jets}})$	Maximum pseudorapidity among all selected jets
$\max(m(jj))$	Largest dijet invariant mass from all jet pairs
$\max p_T^{\text{jetLep}}$	Maximum p_T among all jets and leptons
$p_T^{1\text{st jet}}$	p_T of the leading jet
$p_T^{2\text{nd jet}}$	p_T of the second-highest p_T jet
$p_T^{\text{last jet}}$	p_T of the trailing-highest p_T jet
$\eta^{1\text{st jet}}$	Pseudorapidity of the leading jet
$\eta^{2\text{nd jet}}$	Pseudorapidity of the second jet
$\eta^{\text{last jet}}$	Pseudorapidity of the third jet

Table 20: Input variables used for the BDT training in the 3-lepton signal region.

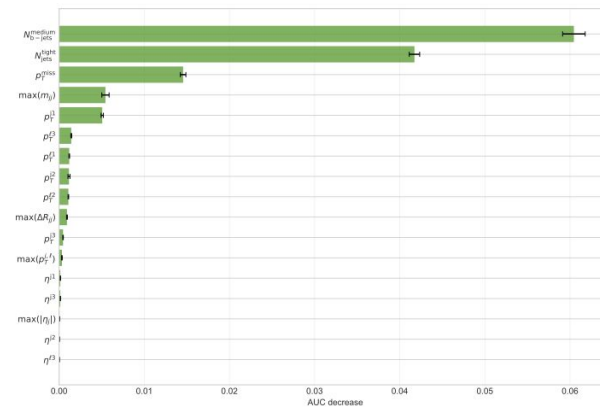
Variables d'input utilisées pour l'entraînement du BDT

Hyperparameter	Value
max_depth	4
n_estimators	500
learning_rate	0.05
gamma	1.5
min_child_weight	8
subsample	0.80
colsample_bytree	0.80
reg_alpha	0.5
reg_lambda	1.0
objective	binary:logistic

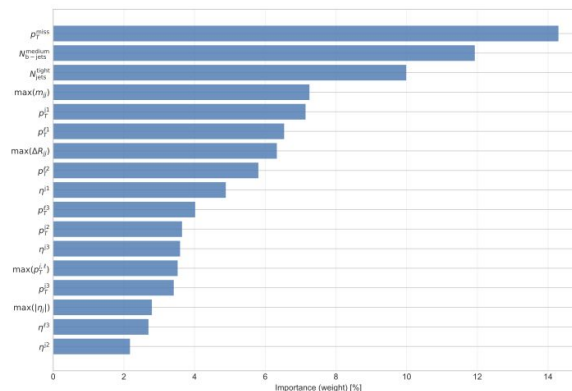
Hyperparamètres obtenu après optimisation



Métrique Gain : Mesure l'amélioration moyenne de la fonction de perte. Évalue le « pouvoir » discriminant de la variable

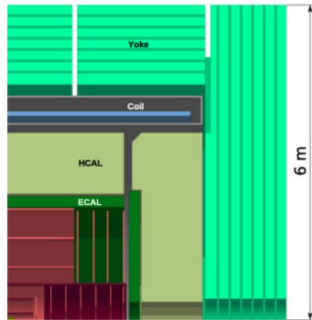


Importance par Permutation : Mesure la baisse de l'AUC après un mélange aléatoire de la variable. Offre une estimation indépendante du modèle sur des données non vues.



Métrique Poids (Weight): Compte la fréquence d'utilisation de la variable pour diviser les nœuds. Évalue son rôle dans la structure de décision

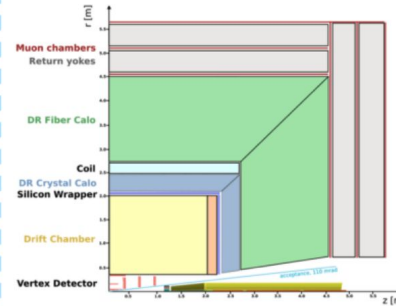
CLD



- Well established design
 - ILC -> CLIC detector -> CLD
- Full Si VTX + tracker
- CALICE-like calorimetry – very high granularity
- Coil outside calorimetry, muon system
- Possible detector optimizations
 - Improved σ_p/p , σ_E/E
 - PID: precise timing and RICH

[arXiv:1911.12230](https://arxiv.org/abs/1911.12230)

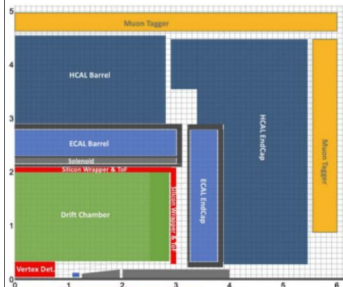
IDEA



- Design developed specifically for FCC-ee and CEPC
- Si VTX detector; ultra-light drift chamber with powerful PID
- Crystal ECAL w. dual readout
- Compact, light coil;
- Dual readout fibre calorimeter
- Muon system

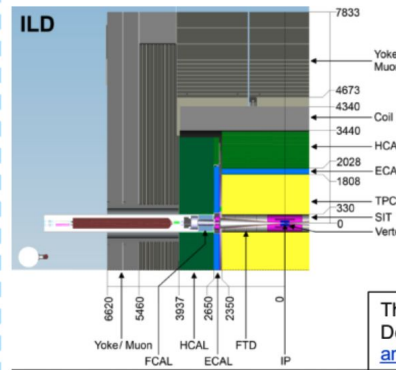
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.21223>

Allegro



- Still in early design phase
- Design centred around High granularity **Noble Liquid ECAL**
 - Pb+LAr (or denser W+LKr)
- Si VTX detector
- Tracker: Drift chamber, straws, or Si
- Steel-scintillator HCAL
- Coil outside ECAL in same cryostat
- Muon system

[Eur.Phys.J.Plus 136 \(2021\) 10, 1066, arXiv:2109.00391](https://arxiv.org/abs/2109.00391)

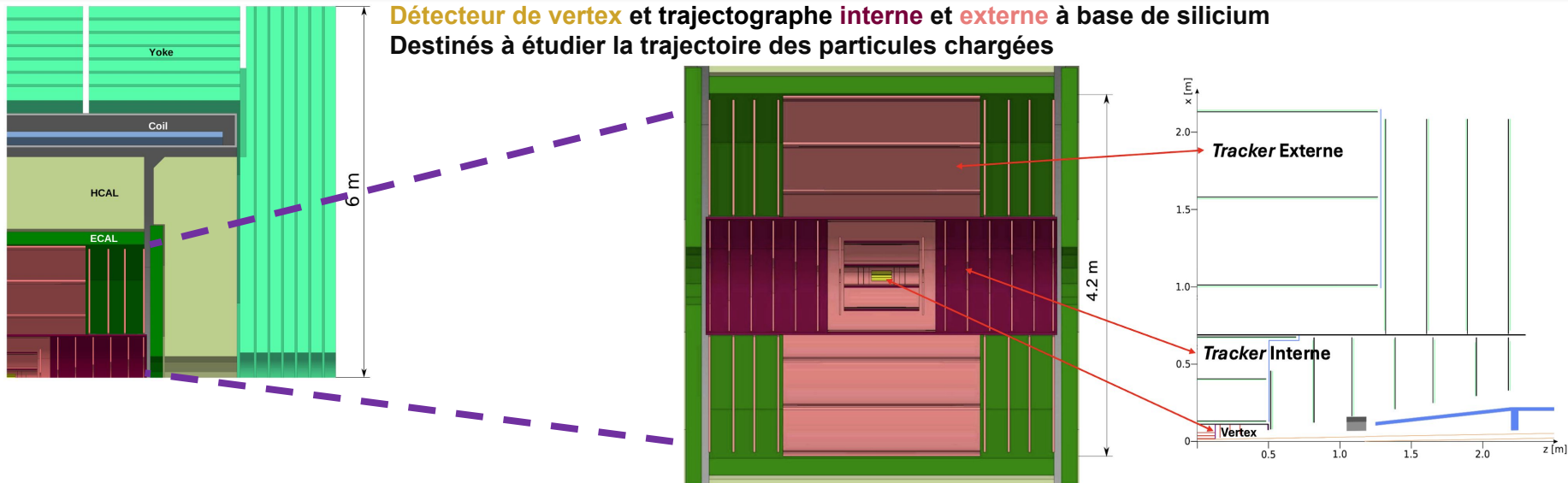


- Designed originally for operation at the ILC
- Together with SiD, ancestor of CLD.
- Main difference and signature element:
 - Large-volume time projection chamber (TPC)

The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors
[arXiv:1306.6329](https://arxiv.org/abs/1306.6329)

Mogens Dam, *Detectors for FCC-ee – status and next steps*, FCC Week 2025

Détecteur de vertex et trajectographe interne et externe à base de silicium Destinés à étudier la trajectoire des particules chargées



Trajectographe interne :

- 3 tonneaux à doubles couches
- 7 bouchons à doubles disques
- **Bandes de silicium : pitch $50 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$ de longueur, $100 \mu\text{m}$ d'épaisseur**
- Résolution attendue de $7 \times 90 \mu\text{m}$
- Exception pour le premier disque du premier bouchon, **pixel de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ résolution attendue de $5 \times 5 \mu\text{m}$**

Trajectographe externe :

- 3 tonneaux à doubles couches
- 4 bouchons à doubles disques
- **Bandes de silicium : pitch $50 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$ de longueur, $100 \mu\text{m}$ d'épaisseur**
- Résolution attendue de $7 \times 90 \mu\text{m}$

Détecteur de Vertex :

- 3 tonneaux à double couche
- 3 bouchons à doubles disques
- **Pixels $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, $50 \mu\text{m}$ d'épaisseur**
- Résolution attendue de $3 \mu\text{m}$

➤ **Courbes de résolutions $\sigma(d_0)$ le paramètre d'impact**

$$\sigma(d_0) = \sqrt{a^2 + \frac{b^2 \cdot \text{GeV}^2}{p^2 \sin^3(\theta)}}$$

- **a ~ résolution intrinsèque**
- **b ~ terme associé à la diffusion multiple**

➤ **Courbes de résolution en impulsion**

$$\sigma\left(\frac{\Delta p_T}{p_T^2}\right) = a \oplus \frac{b}{p \sin^{3/2} \theta}$$

θ (°)	a	b
10	7.4×10^{-5}	0.010
30	1.8×10^{-5}	0.005
50	9.2×10^{-6}	0.004
70	8.3×10^{-6}	0.003
89	8.6×10^{-6}	0.003

1. David AMRAM. *Study of the fundamental symmetries of the Standard Model : test of Lepton Flavor Universality in the top quark sector with CMS and constraints on Lorentz Invariance Violation from LHC Run 2 data*. PhD Thesis. 2025. url : <https://theses.hal.science/tel-05614021>
2. CMS Collaboration. *Measurement of top quark pair production in association with a Z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*. 2020. [DOI : 10.48550/arXiv.1907.11270](https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11270)
3. CMS Collaboration. *Search for physics beyond the standard model in top quark production with additional leptons in the context of effective field theory*. 2024. [DOI : 10.1007/arXiv.2307.15761](https://doi.org/10.1007/arXiv.2307.15761)
4. Takuya Akiba, et al. *Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework*. 2019. [DOI : 10.48550/arXiv.1907.10902](https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.10902)
5. B. Grzadkowski et al.,. *Six Terms in the Standard Model Lagrangian*. 2017. [DOI : 10.48550/arXiv.10084884](https://doi.org/10.48550/arXiv.10084884)

1. Michael BENEDIKT. *Future Circular Collider Feasibility Study report Volume 1 : Physics and Experiments*. Rapp. Tech. CERN Document Server, mars 2025. DOI : 10.17181/CERN.9DKX.TDH9
2. N.Bacchetta et al. *CLD – A Detector Concept for the FCC-ee*. Déc 2019. DOI : 10.4855/arXiv.1911.12230
3. Jessy Daniel. “Towards realistic digitization of silicon tracking detectors for the FCC”. In : 9th FCC Physics Workshop. Munich. 2026. url : https://indico.cern.ch/event/1588696/contributions/6869431/attachments/3207238/5711372/9th_FCC_Physics_SiliconTracking_270126.pdf
4. Mogens Dam. “Detector Concepts Overview : current ideas and challenges ahead”. In : FCC Week 2025. CERN. 2025. url : <https://indico.cern.ch/event/1408515/contributions/>.
5. Adrien Sabard Gaele Boudoul Jessy Daniel. “Detailed digitization for silicon based sensors”. In : FCC-ee Workshop : Tracking Detectors and Software. FCC. 2025. url : <https://indico.cern.ch/event/1516157/contributions/6445378/>.
6. Gaëlle Sadowski. « k4DetPerformance: A Framework for Tracking Performance Studies in Full Simulation Environments ». In : The Third ECFA workshop. Paris. 2024. url : https://indico.in2p3.fr/event/32629/contributions/142944/attachments/87747/132482/k4DetPerf_poster_GaelleSadowski.pdf