



Lyon 1



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) au CERN

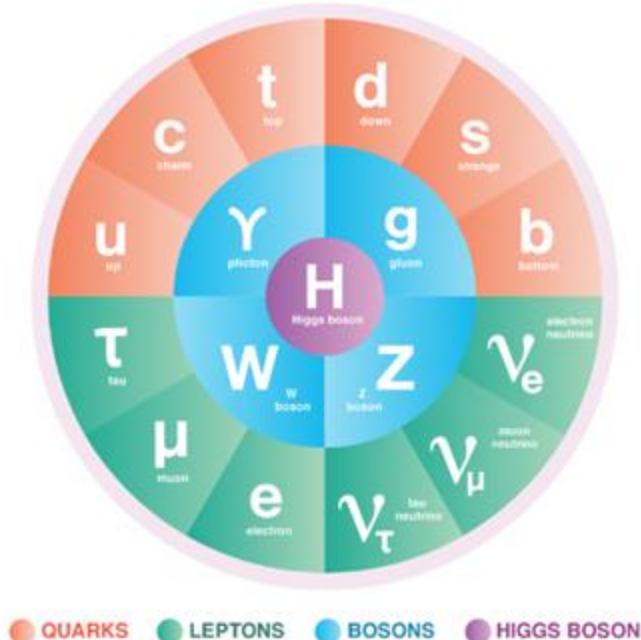


SABARD Adrien

Stage M2 IP2I
Master 2 Physique Subatomique
Université Claude Bernard Lyon 1

Projet de thèse sous la co-direction de :
BOUDOUL Gaëlle & CHANON Nicolas





Le Modèle Standard :

- Description des interactions entre les **particules élémentaires** (fermions) grâce aux **médiateurs de force** (boson)
- Propriétés identiques** des trois types ou saveurs de leptons (e , μ , τ) (à part leur masse) : on parle de **l'universalité de la saveur leptוניתque**

L'expérience LHCb du CERN :

- Anomalie** dans les **rapports de désintégration rare** des mésons B en électrons et en muons encore **non confirmée**

➤ Cela suggère une **possible violation** de l'universalité de la saveur

Le quark top

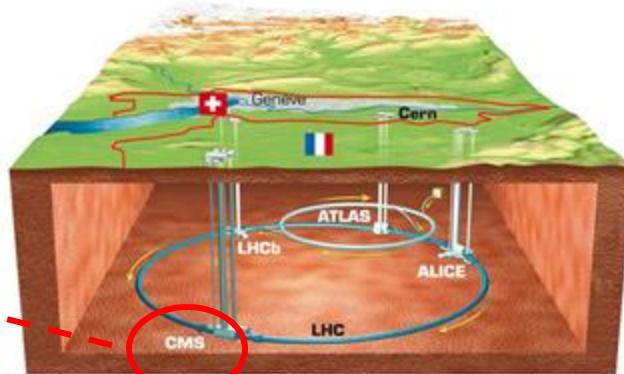
- ★ Particule élémentaire la **plus lourde**
(~ 180 Protons)
- ★ Durée de vie **extrêmement courte**
(~ 10^{-25} s)
- ★ Produit en abondance au LHC
(~centaines de millions)



CMS (*Compact Muon Solenoid*)

Le Grand collisionneur de Hadron (LHC)

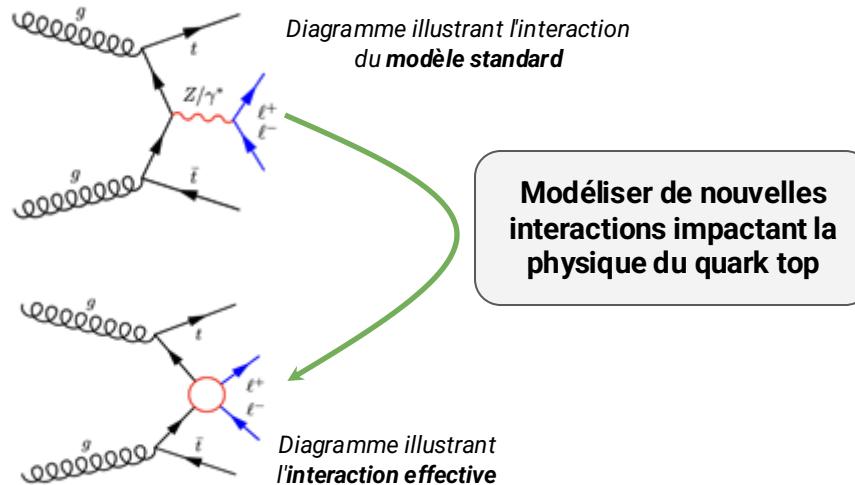
- ★ 27 km de circonférence
- ★ Collisions proton-proton à 13.6 TeV



Étude du quark top dans le **canal $t\bar{t}l^+l^-$** : 2 quarks top et 2 leptons
sous le prisme de théories effectives (EFT)

$$\mathcal{L}_{eff}^{(6)} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_i \frac{C_i^{(6)}}{\Lambda_i^2} O_i^{(6)} + h.c.$$

Lagrangien effectif



Mon travail de thèse :

➤ **Discriminer le signal** (interactions exotiques) du **bruit de fond** (interactions du Modèle Standard)

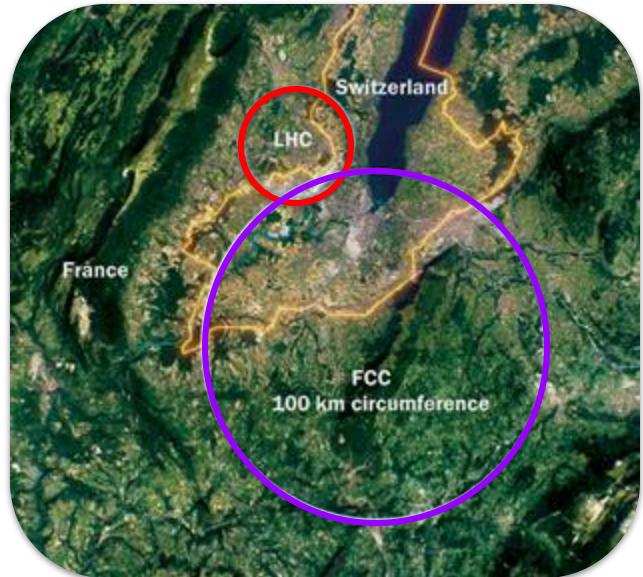
1. Définition et génération d'échantillons de signaux EFT
2. Mesure des coefficients EFT associés avec les données enregistrées par CMS lors de la 2^{ème} phase d'exploitation du LHC (2015-2018)
3. Adapter et compléter l'analyse avec les données de la 3^{ème} phase d'exploitation (2022-2026)

Le LHC ne permet pas de sonder l'ensemble de l'espace des phases, en particulier les régions associées à des couplages faibles comme celui de l'électron au boson de Higgs

Le FCC-ee

- De toutes nouvelles infrastructures, incluant un tunnel de **~91 kms**
- Collisionneur **électron - positron** de très haute précision
- **Statistique record** : $\sim 10^{12}$ bosons Z, 3 ordres de grandeur de plus que le LHC

- ★ **2025** : Publication du rapport de l'étude de faisabilité du FCC
- ★ **~2028/2030** : Phase de validation
- ★ **~2045** : Première phase d'exploitation



➤ Les **exigences** en termes de **R&D** et les **contraintes technologiques** imposent un effort de R&D important pour concevoir les détecteurs du FCC-ee

Deuxième partie de mon projet de thèse :

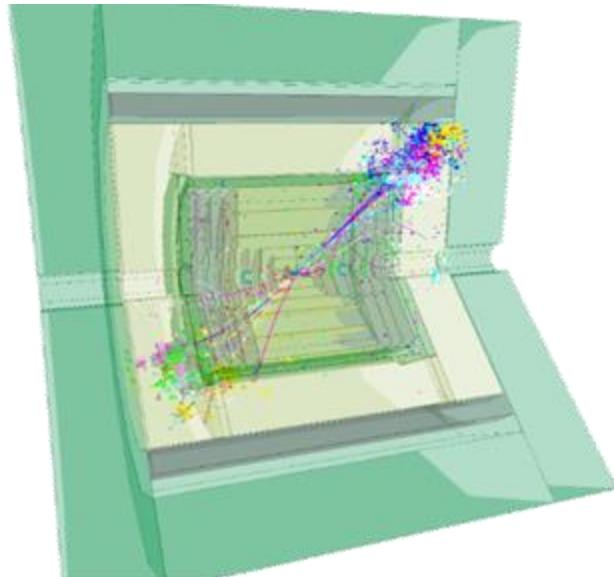
Conception d'un détecteur de traces dans le cadre d'un projet de développement instrumental.

Objectif : Fournir une simulation de **trajectographe** (détecteur de traces) réaliste et optimisée

- Implémentation de géométries
- Modélisation de réponse du détecteur
- Reconstruction des trajectoires

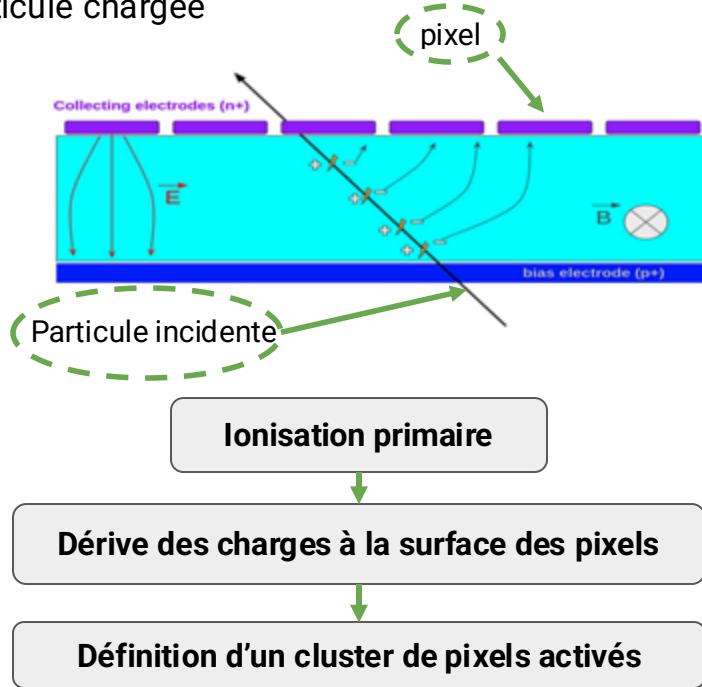
L'intérêt **double** de la simulation :

- ★ Étude des **performances** de canaux de physiques avec les concepts proposés
- ★ **Prise en compte des contraintes** technologiques



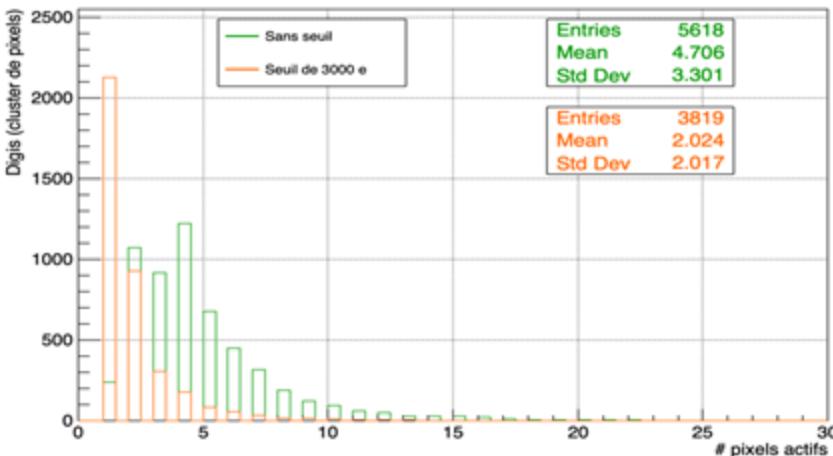
Détecteur CLD, concept pour FCC-ee
(N. Bacchetta, 2019)

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



- Obtention de clusters plus réalistes à l'aide de l'introduction du **seuil de détection**

Nombre de pixels actifs par digis en fonction du seuil



Résultats présentés dans un workshop international :
FCC-ee workshop: Tracking Detectors and Software, USA,
May 2025

- Cette approche permet d'accéder à un paramètre essentiel à la mise au point des détecteurs : l'**occupation (# pixels actifs / cm² / événements)**

Un projet de thèse en physique des particules expérimentales, mené dans le cadre de grandes collaborations internationales au CERN

Expérience CMS du LHC



Analyse de données visant à tester
l'universalité de saveur telle que prédicté
par le modèle standard

Projet du FCC-ee



Développement de simulations complètes des
détecteurs envisagés
(axe initié lors de mon stage de Master 2)

Merci pour votre attention !

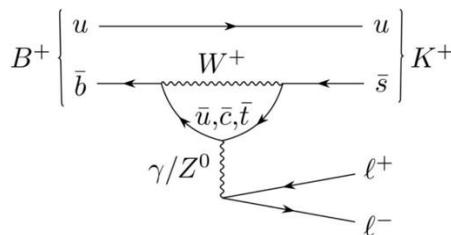
Backup Slides

Informations diverses sur le quark top :

- Produit en abondance au LHC
(mettre la section efficace 791 pb pour la creation de paire)
- Et celle du processus en asso avec Z gamm de 0,99 pb

Rappels sur LHCb

Désintégration du hadron beau chargé en kaon chargé



$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}$$

Rapport des taux de branchement

- Une théorie effective permet d'étudier la physique dans un certain domaine de validité en paramétrant les effets produits à une gamme d'énergie plus élevée.
- ~ Modifier le lagrangien pour prendre en considération la contribution de particules massives à des énergies plus basses mesurables au LHC

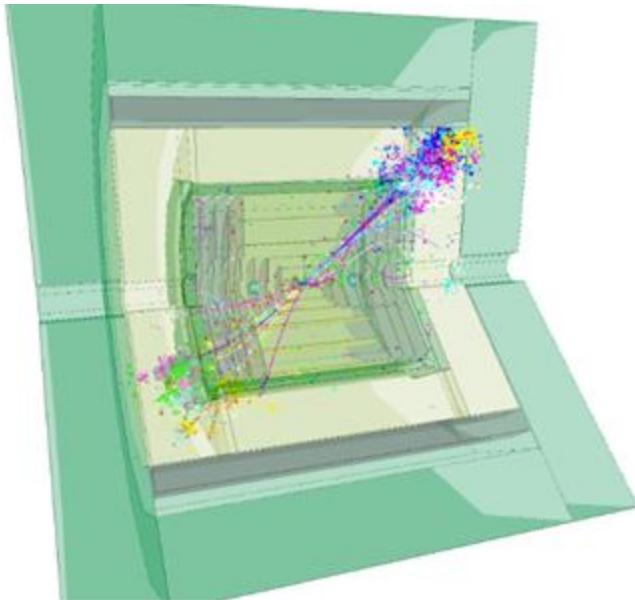
Pour étudier la violation de l'universalité de saveur leptonique on ne s'intéresse qu'aux opérateurs modifiant les couplages 2 quarks – 2 leptons

Ajouter ici tableau et source et graphique des échelles d'énergies

SLIDES de Brouillon

- ★ La deuxième partie de mon projet de thèse est consacrée à la conception d'un détecteur de traces dans le cadre d'un projet de développement instrumental.

- Mon implication portera principalement sur **la simulation complète** des concepts de détecteurs en développement, en collaboration avec l'équipe de l'IP2I dédiée à la conception des futurs détecteurs de traces.



(N. Bacchetta, 2019) Détecteur CLD, concept pour FCC-ee

★ **Objectif de thèse :** Fournir une simulation de **trajectographe** (détecteur de traces) qui soit **réaliste** et **optimisée**

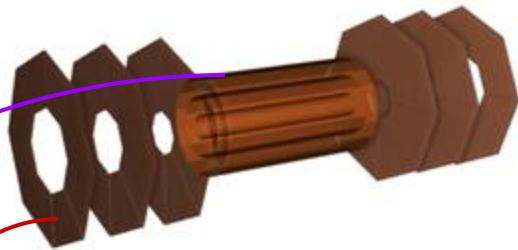
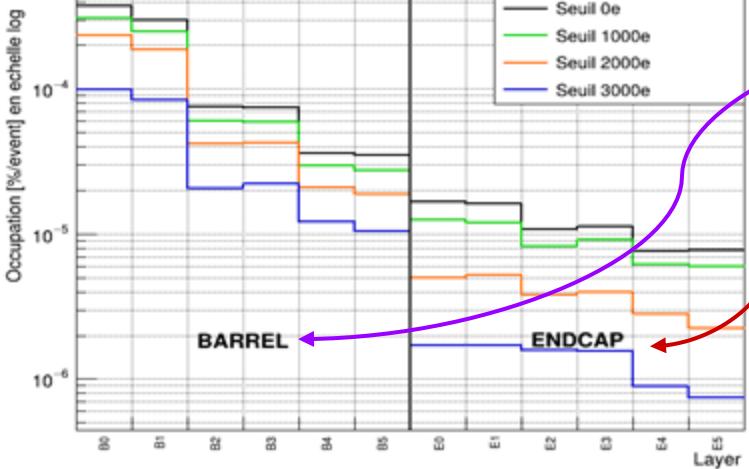
- Implémentation de **différentes géométries** (formes, dimensions, matériaux)
 - Logiciel commun à la communauté mondiale de la physique des hautes énergies : **DD4HEP**
- Modélisation de la **réponse du détecteur** suite aux interactions des particules à chaque croisement de faisceaux
 - Logiciel **GEANT4** interfacé aux outils de la communauté FCC
- Reconstruction des **trajectoires** à partir des signaux simulés
- Etudes des **performances** de canaux de physiques avec les concepts proposés

L'intérêt **double** de la simulation :

- ★ **Évaluer** précisément **les performances** des différents concepts de détecteurs
- ★ **Prendre en compte** **les contraintes** technologiques

- Calcul de la densité de hits (en hits/cm²)
- Etudes préliminaires d'occupation

Vertex (CLD) Occupation Pixels Actifs par Layer pour 1000 μ^- (10 GeV)



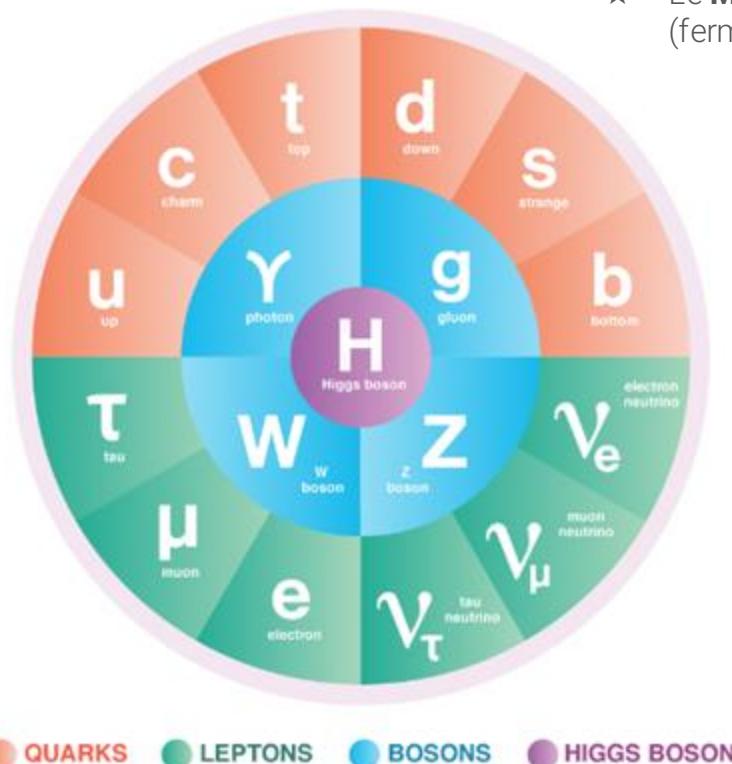
Sous-détecteur Vertex (VTX) de CLD, un concept pour le FCC-ee

- ★ On cherche à évaluer la fraction de pixels activés lors d'un événement par couche de détecteur et par unité de surface

- Le taux d'occupation obtenu constitue un point de départ pour les échanges avec les équipes en charge de l'électronique et de la mécanique.

❖ Mon travail de thèse :

- **Est intégré** à de grandes collaborations internationales au CERN, et plus particulièrement dans l'expérience **CMS** du LHC. Je serai impliqué dans **l'analyse de données** visant à **tester l'universalité de la saveur** telle que prédite par le modèle standard
- **S'inscrit** également dans une perspective de **recherche à long terme**, à travers le **développement de simulations complètes** des détecteurs envisagés dans le cadre du projet de **Futur Collisionneur (FCC-ee)**, un axe auquel j'ai déjà pu contribuer de manière significative lors de mon stage de Master 2.



★ Le **Modèle Standard** décrit les interactions entre les **particules élémentaires** (fermions) grâce aux **médiateurs de force** (boson)

- Dans le Modèle Standard , **les propriétés** des trois types ou saveurs de leptons (**e, μ , τ**) sont **identiques**, à part leur masse : on parle de **l'universalité de la saveur leptונית**
- ★ L'expérience **LHCb**, au CERN, a mesuré une **anomalie** dans **les rapports de désintégration rare** des **mésons B** en **électrons** et en **muons** encore non confirmée
 - Cela suggère une **possible violation** de l'universalité de la saveur

- ★ Recherche de la violation de l'universalité de saveur sous le prisme de théories effectives (EFT) au travers d'interactions impliquant **2 quarks top** et **2 leptons**

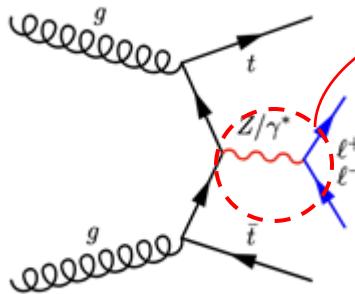


Diagramme illustrant l'interaction du modèle standard

$$\mathcal{L}_{eff}^{(6)} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_i \frac{C_i^{(6)}}{\Lambda_i^2} O_i^{(6)} + h.c.$$

Modéliser de nouvelles interactions impactant la physique du quark top

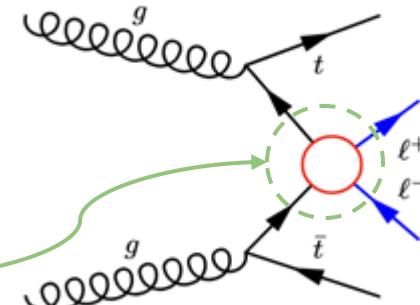


Diagramme illustrant l'interaction effective en considérant la violation de saveur

- ★ Discriminer le **signal** (interactions exotiques) du **bruit de fond** (interactions du Modèle Standard)

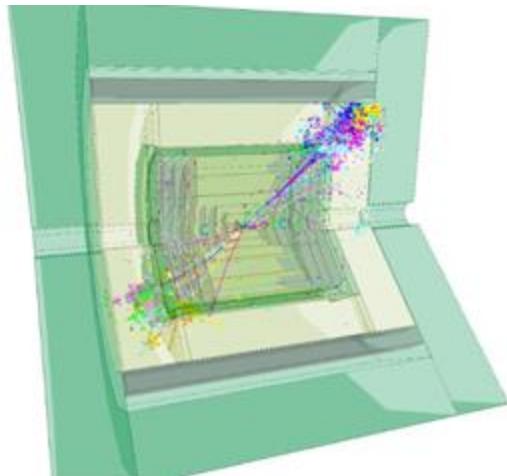
➤ Mon travail de thèse :

1. Définition et génération d'échantillons de signaux EFT
1. Mesure des coefficients EFT associés avec les données enregistrées par CMS lors de la 2^{ème} phase d'exploitation du LHC (2015-2018)
1. Adapter et compléter l'analyse avec les données de la 3^{ème} phase d'exploitation (2022-2026)

Deuxième partie de mon projet de thèse : **conception d'un détecteur de traces dans le cadre d'un projet de développement instrumental.**

★ **Objectif :** Fournir une simulation de **trajectographe (détecteur de traces)** réaliste et optimisée

- Implémentation de **différentes géométries** (formes, dimensions, matériaux)
 - Logiciel commun à la communauté mondiale de la physique des hautes énergies : **DD4HEP**
- Modélisation de la **réponse du détecteur** suite aux interactions des particules à chaque croisement de faisceaux
 - Logiciel **GEANT4** interfacé aux outils de la communauté FCC
- Reconstruction des **trajectoires** à partir des signaux simulés

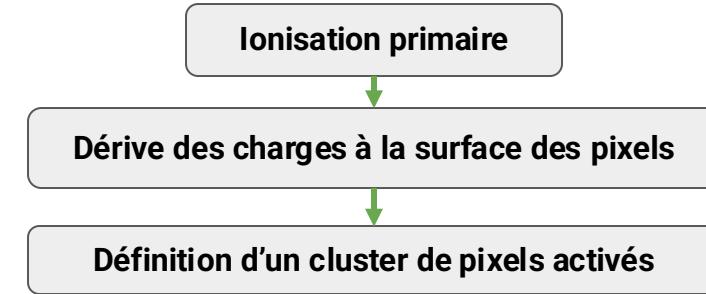
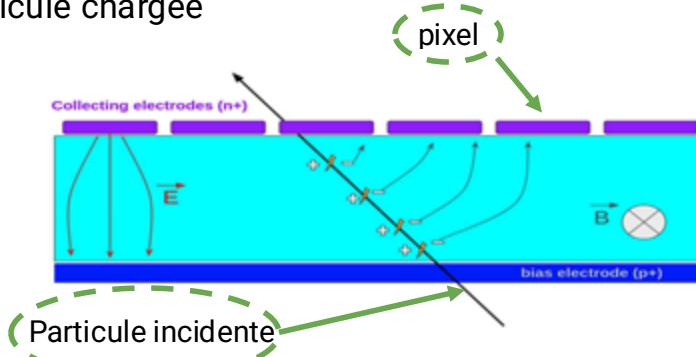


Détecteur CLD, concept pour FCC-ee
(N. Bacchetta, 2019)

L'intérêt **double** de la simulation :

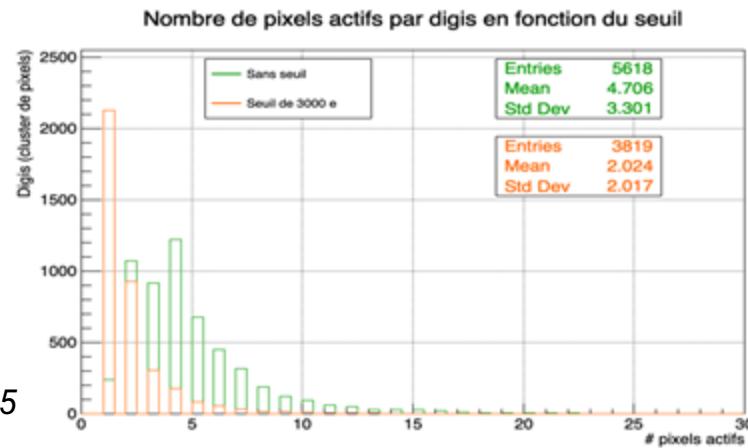
- ★ Etudes des **performances** de canaux de physiques avec les concepts proposés
- ★ **Prendre en compte les contraintes** technologiques

Modéliser correctement **les charges** qui sont **collectées à la surface** d'un senseur **en silicium** lorsqu'il est traversé par une particule chargée



- Obtention de clusters plus réalistes à l'aide de l'introduction du **seuil de détection**

- Résultats présentés dans un workshop international :
FCC-ee workshop: Tracking Detectors and Software, USA, May 2025



- Cette approche permet d'accéder à un paramètre essentiel à la mise au point des détecteurs :
l'occupation (# pixels actifs / cm² / événements)