

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

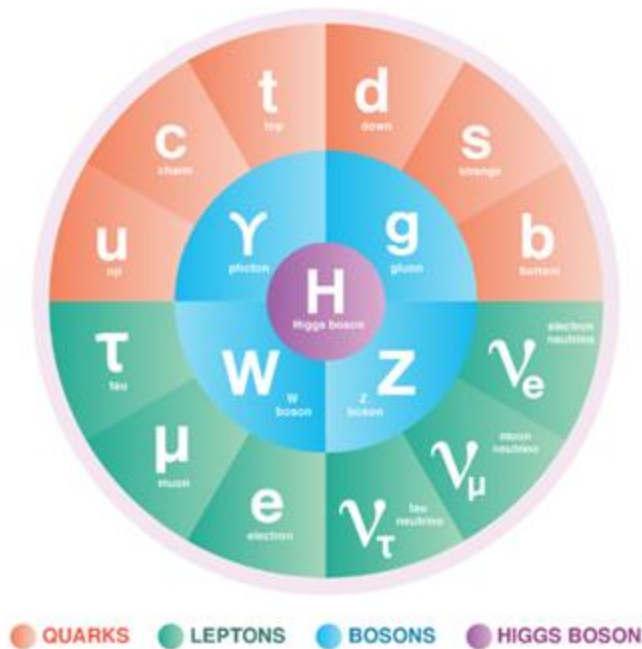


SABARD Adrien

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 leptonique**

L'expérience **LHCb** du CERN :

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

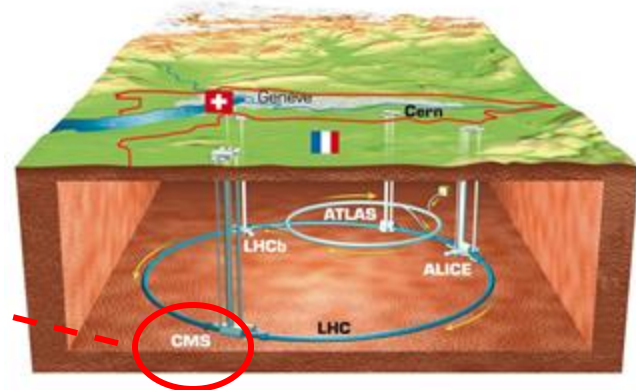
➤ Cela suggère une **possible violation** de l'universalité de la saveur

Le quark **top**

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

Le Grand collisionneur de Hadron (LHC)

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

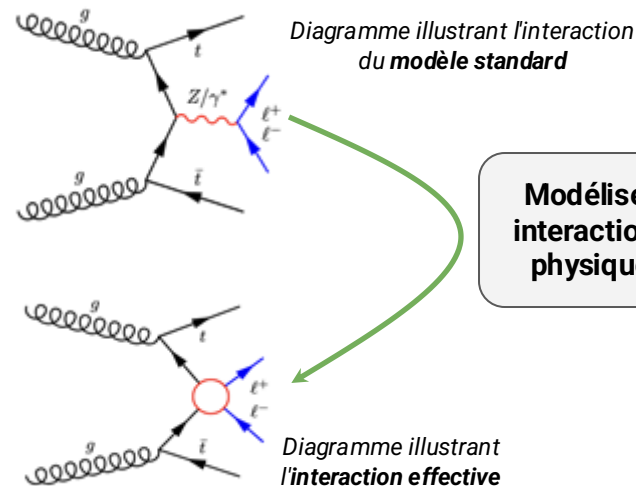


CMS (Compact Muon Solenoid)

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



Modéliser de nouvelles interactions impactant la physique du quark top

Mon travail de thèse :

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

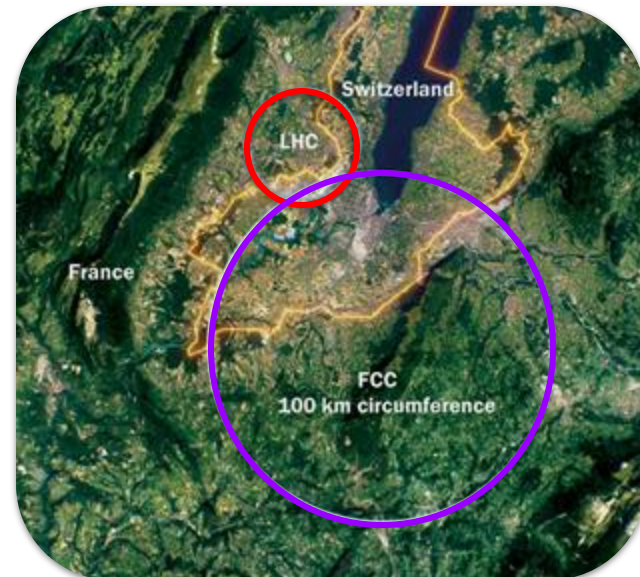
1. **Définition et génération d'échantillons** de **signaux EFT**
2. **Mesure des coefficients EFT associés** avec les données enregistrées par CMS lors de la 2^{ème} phase d'exploitation du LHC (2015-2018)
3. **Adapter et compléter** l'analyse avec les données de la 3^{ème} phase d'exploitation (2022-2026)

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 **résolution** 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 :

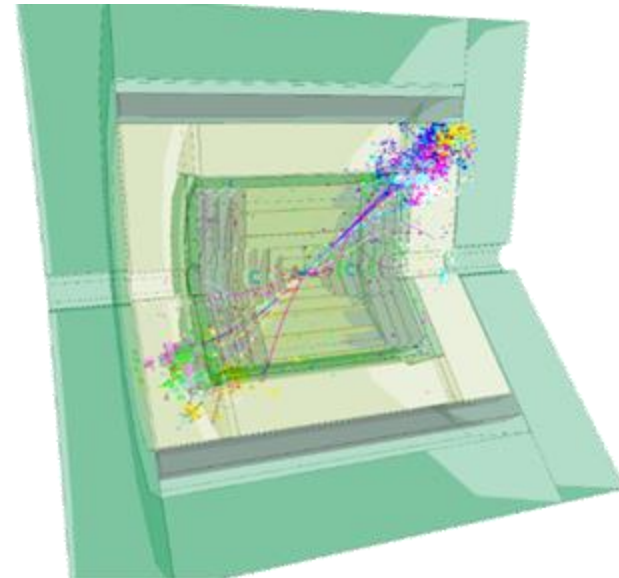
Conception d'un détecteur de traces dans le cadre d'un projet de développement instrumental.

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

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

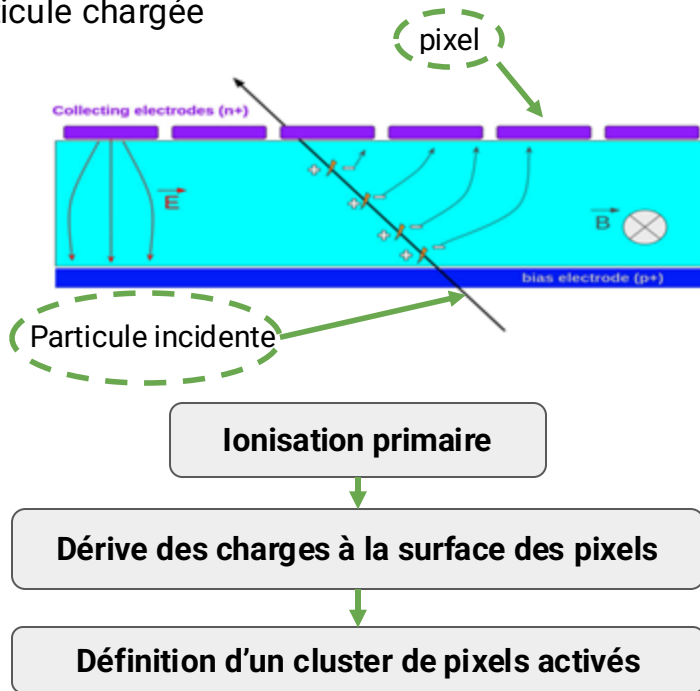
L'intérêt **double** de la simulation :

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

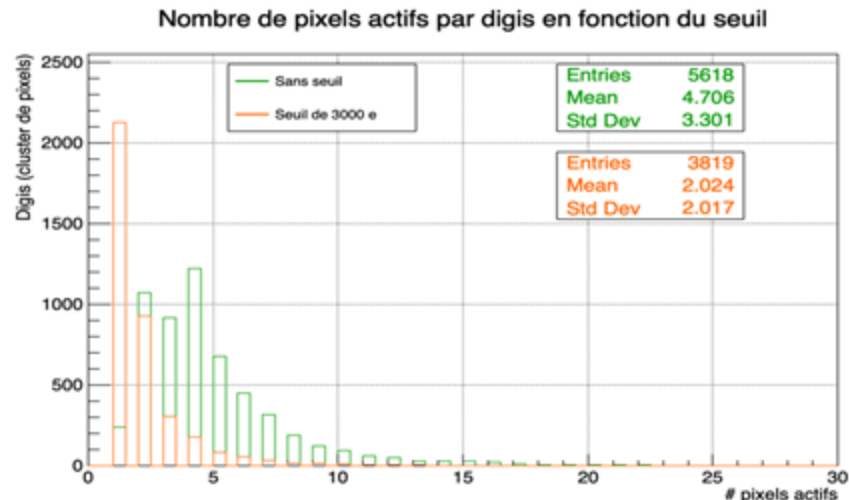


Détecteur CLD, concept pour FCC-ee
(N. Bacchetta, 2019)

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**



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 prédite
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 !

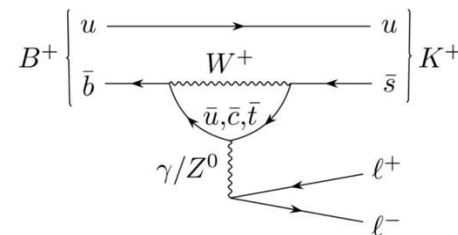
Backup Slides

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

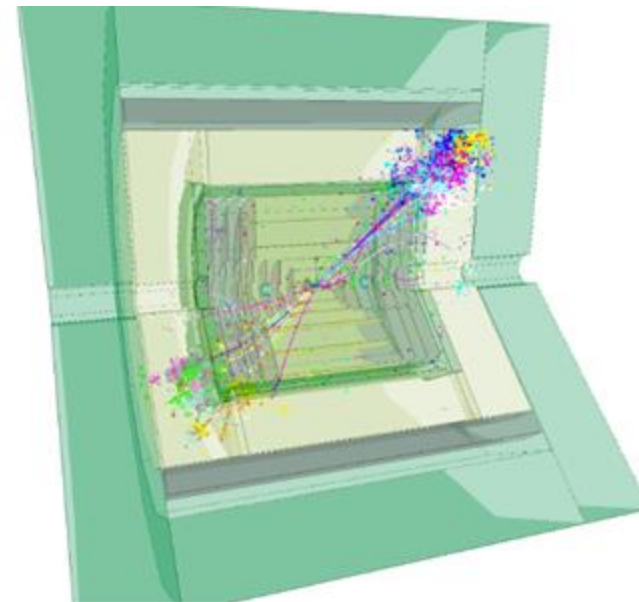
- Une théorie effective permet d'étudier la physique dans un certain domaine de validité en paramétrant les effets produits à une gamme d'énergie plus élevée.
- ~ Modifier le lagrangien pour prendre en considération la contribution de particules massives à des énergies plus basses mesurables au LHC

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

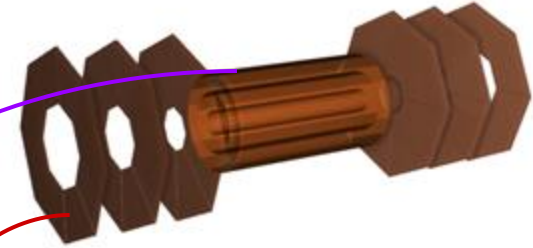
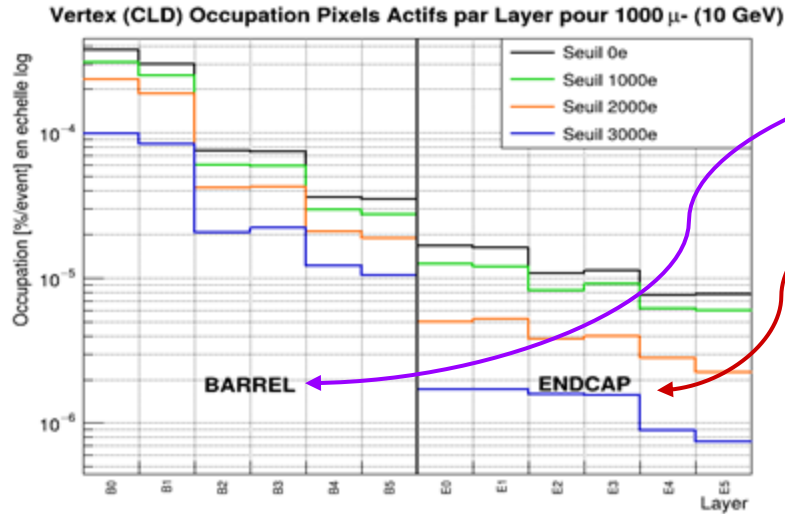
- ★ **Objectif de thèse** : Fournir une simulation de **trajectographe (détecteur de traces)** qui soit **réaliste** et **optimisée**
 - Implémentation de **différentes géométries** (formes, dimensions, matériaux)
 - Logiciel commun à la communauté mondiale de la physique des hautes énergies : **DD4HEP**
 - 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**

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



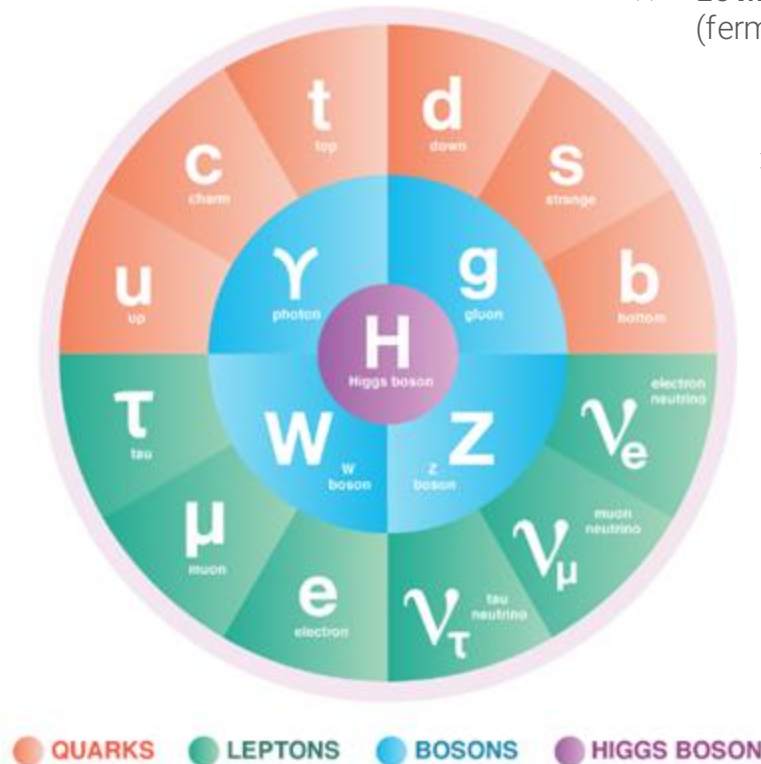
Sous-détecteur Vertex (VTX) de CLD, un concept pour le FCC-ee

- 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 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 leptonique**

- ★ 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**

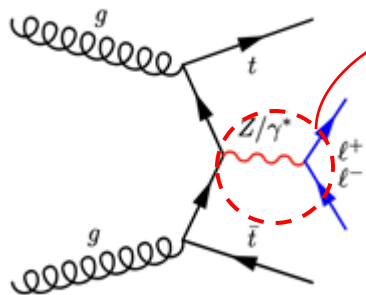


Diagramme illustrant l'interaction du modèle standard

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

Modéliser de nouvelles interactions impactant la physique du quark top

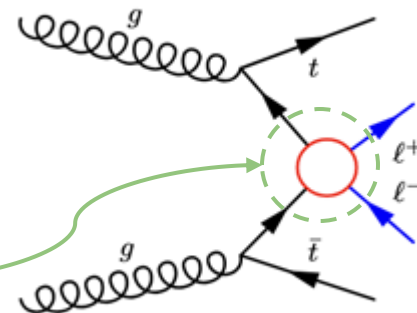


Diagramme illustrant l'interaction effective en considérant la violation de saveur

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

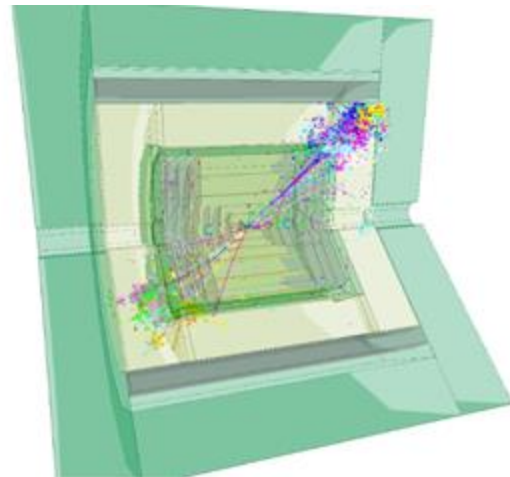
➤ Mon travail de thèse :

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

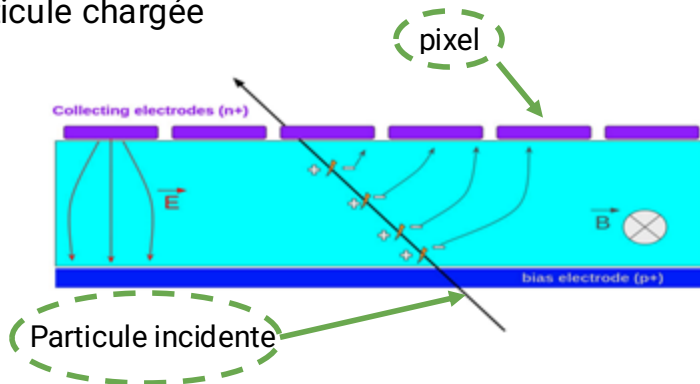


Détecteur CLD, concept pour FCC-ee
(N. Bacchetta, 2019)

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

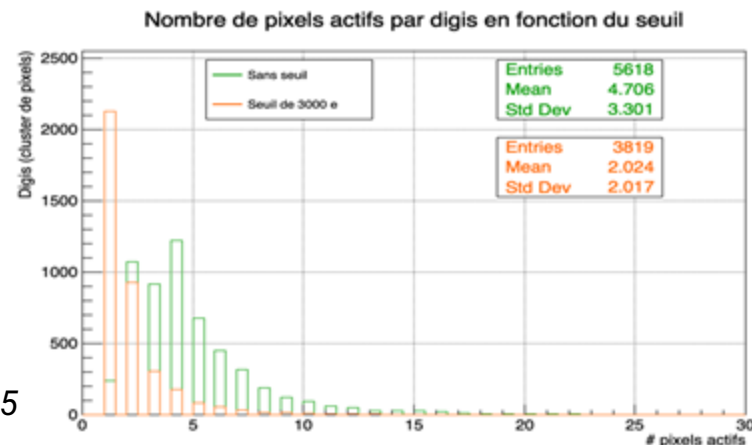
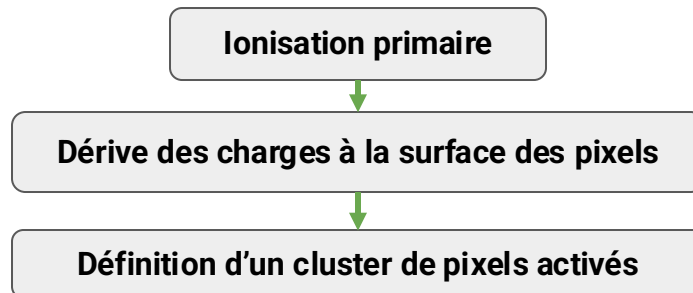
- ★ Etudes des **performances** de canaux de physiques avec les concepts proposés
- ★ **Prendre en compte les contraintes** technologiques

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)