

Détecteur SDHCAL pour le signal $e^+e^- \longrightarrow \nu\nu h$: Optimisation et Adaptation de l'analyse de données pour le Projet FCC

Alexia HOCINE

Étudiante en M2 Physique SUBA à l'UCBL1

Supervisé par Gérard GRENIER

Maître de Conférence - UCBL1

Enseignant-Chercheur - IP2I, CNRS, IN2P3

Membre des collaborations CALICE, CMS et ILD

Corresponsable du groupe SDHCAL au sein de la collaboration CALICE



Rapport de Stage - Master 2 Physique SUBA
Université de Claude Bernard Lyon 1

Avril-Juillet 2022

Préambule

Remerciements

Je souhaite d'abord remercier Gérard GRENIER pour m'avoir donné la chance de montrer ce que je peux faire. Et aussi pour son encadrement, son accompagnement et son temps.

Je souhaite plus largement remercier mon équipe, Gérard GRENIER, Imad LAKTINEH et Clément DEVANNE, pour l'atmosphère positive, détendue et stimulante.

Et plus largement, les employés de l'IP2I pour leur gentillesse et leur accueil.

Participation à la *Geek and Japan Touch*

Au cours de mon stage, j'ai participé à l'atelier tenu par l'IP2I à la *Geek and Japon Touch*, organisé par Stéphanie BEAUCERON (IP2I, CNRS, CMS).

Durant ce week-end, avec 2 autres chercheuses (non physiciennes), Florence BOYER et Liliane DE ARAUJO, on a tenu un débat sur le film *Don't look up : Déni Cosmique* de Adam MCKAY, sur la crédibilité du discours scientifiques.

Ensuite sur le stand, j'ai pu expliquer les bases scientifiques et des recherches menées par le CNRS et CMS, ainsi que Virgo au près du grand public.

De plus, j'ai aussi animé le stand de l'association ?? dont l'objectif est d'expliquer les principes de base de la gravité en 2D avec un drap tenu.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Physique des collisionneurs	3
1.1.1	Collisionneurs hadroniques	3
1.1.2	Collisionneurs leptoniques	3
1.2	Physique du boson de Higgs	3
1.2.1	Production du boson de Higgs	3
1.2.2	Détecteur	3
1.2.3	Collisions	4
1.3	Présentation & Objectif du Stage	4
2	ILC	5
2.1	Présentation du Projet ILC	5
2.2	Projet numérique : original	5
2.2.1	Données initiales	6
2.2.2	Conversion des fichiers initiaux en fichiers ROOT	6
2.2.3	Analyses des collisions	6
2.3	Projet numérique ilcsoft	8
2.3.1	Données	8
2.3.2	Programme : processor	8
2.3.3	Programme analysis	8
3	FCC	10
3.1	Projet FCC	10
3.1.1	Présentation	10
3.2	Développement Numérique	10
3.3	Travail de Stage	10
3.4	Comparaison avec iLCSoft	10
4	Outils Numériques	11
4.1	nnhScript	11
4.2	nnhTest	11
4.2.1	Programmes testXxCompleted.py	11
4.2.2	Programmes testXxSame.py	11
5	Exemples de Résultats Physiques	12
6	Conclusion	13
A	Résumé du travail effectué	14
A.1	Bibliographie	14
A.2	Tutoriels	14
A.3	Code initial	14
A.4	Code final	14
B	Organisation du Projet	15
B.1	Organisation initiale	15
B.2	Organisation finale	15
B.3	Le dossier NNH_HOME	15
C	Fichiers ROOT de sorties du programme processor	16

Chapitre 1

Introduction

1.1 Physique des collisionneurs

Le principe des collisionneurs est simple, on accélère des particules à des énergies cinétiques suffisantes pour provoquer des collisions inélastiques, et ainsi comprendre les interactions fondamentales et les constituants élémentaires de la physique.

On distingue 2 familles de collisionneurs en fonction des particules qui sont utilisés.

1.1.1 Collisionneurs hadroniques

Les collisionneurs hadroniques utilisent des hadrons, qui sont des particules complexes composées de 3 quarks et de gluons¹. En pratique au LHC (Large Hadron Collider) du CERN, on utilise des protons, 2 quarks up et un quark down.

Comme il s'agit de particules composites, ce sont pas le protons qui collisionnent directement mais ces constituants, appelés partons. Chacun porte une fraction indéterminée de l'énergie du proton. Ce qui permet d'avoir des énergies de collisions inconnues en amont. C'est pourquoi, ils sont utiles pour la découverte de nouvelles particules de masse inconnue, puisqu'il permettent de balayer tout le spectre de masse sous la gamme d'énergie du collisionneur (au LHC $< 14 \text{ TeV}$)².

1.1.2 Collisionneurs leptoniques

En revanche, les collisionneurs leptoniques utilisent des leptons, qui sont des particules élémentaires. Comme le LEP (Large Electron-Positron), le prédécesseur du LHC, qui collisionnait des électrons et des positrons [3].

Cette fois-ci, chaque lepton qui collisionne, possède une énergie complète. Donc on connaît parfaitement leur énergie, puisque on peut leurs impulser une énergie choisie et ainsi augmenter la statistique pour un niveau d'énergie précis. Ces collisionneurs sont donc utilisés pour la recherche de précision.

Les prochaines générations de collisionneurs, comme ILC, CEPC, CLIC et FCC, ce sont des collisionneurs leptoniques. Leur objectif est de préciser les données du LHC, notamment sur le boson de Higgs découvert en 2012 par le LHC, qui était la pièce manquante du modèle standard des particules, car il permet aux particules d'acquérir une masse.

1.2 Physique du boson de Higgs

1.2.1 Production du boson de Higgs

Concrètement, on ne mesure pas directement le boson de Higgs mais les particules qu'il produit sous la forme de jets. Ainsi on veut améliorer la résolutions en énergie de ces jets que l'on détecte [8].

1.2.2 Détecteur

En physique des particules, on utilise des détecteurs appelés calorimètres pour mesurer l'énergie des particules. Cette énergie va être déposer par ionisation avec le matériau le long de la trajectoire des particules qui le

1. Gluon : boson médiateurs de l'interaction forte qui maintiennent les quarks ensembles.

2. D'où l'intérêt de nouveaux collisionneurs à des énergies plus élevées et donc des masses de particules produites plus lourdes.

traverse. Il faut donc des algorithmes de reconstruction pour déduire les énergies, les types de particules et les trajectoires.

Pour cela, on utilise des calorimètres à grande granularité qui permet une très bonne performance des Algorithmes de Flux de Particules (PFA) [8].

C'est dans ce cadre que la collaboration internationale CALICE, à développer le premier prototype de la famille de calorimètre granulaire SDHCAL, pour Semi-Digital Hadronic CALorimeter, qui a été développé en grande partie à l'IP2I dans l'équipe CMS, auquel j'appartiens pour ce stage.

1.2.3 Collisions

Au cours, de ce stage, je me concentrerai sur les collisions de type `nnh` pour neutrino-neutrino-higgs. D'où voici les diagrammes de Feynman :

1.3 Présentation & Objectif du Stage

Pour ce stage, j'ai récupéré les codes de Guillaume Garillot, qui les a développés en 2021 au cours de son post-doctorat à l'IP2I. Ils sont en libre accès à l'adresse <https://github.com/ggarillot/nnhAnalysis/tree/refactor>.

Ce programme `nnhAnalysis` permet l'étude de fichiers `SLCIO` pour la collision :

$$e^- e^+ \longrightarrow \nu \nu h \quad (1.1)$$

Et l'analyse des canaux de désintégration :

$$h \longrightarrow WW^* \longrightarrow qq\bar{q}\bar{q} \quad (1.2)$$

$$h \longrightarrow b\bar{b} \quad (1.3)$$

Pour cela, il a utilisé les suites logicielles de `iLCSoft`, <https://github.com/iLCSoft> (plus précisément `LCIO` et `Marlin`), qui sont les anciennes suites logicielles. Mais les nouveaux projets de collisionneurs changent de suites logicielles et passent à `Key4HEP` et `Gaudi`.

Mon objectif est double. Dans un premier temps, comprendre et optimiser les codes existants, c'est-à-dire les programmes `LCIO`, `Marlin` et ceux de `nnhAnalysis`. Puis, je vais devoir transformer `nnhAnalysis` pour qu'il puisse correspondre aux nouvelles normes `Key4HEP` et `Gaudi`.

Chapitre 2

ILC

2.1 Présentation du Projet ILC

Le projet ILC (International Linear Collider) est un collisionneur linéaire, électron-positron, de 31 km conçu pour atteindre une énergie de centre de masse de 500 GeV[1].

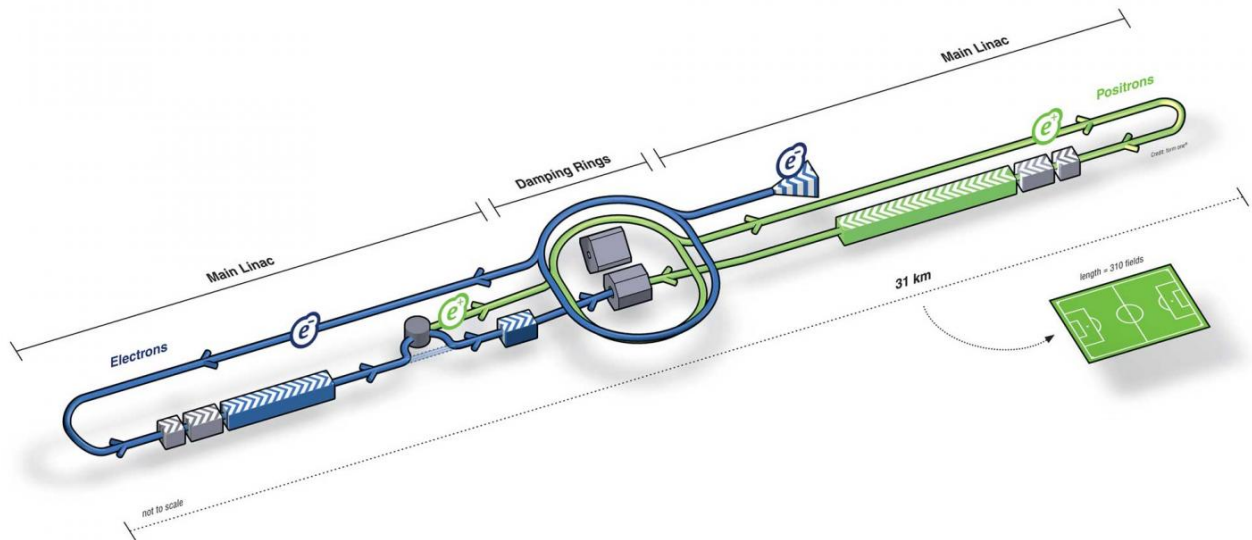


FIGURE 2.1 – Schéma ILC[1]

L'objectif de l'ILC est de produire beaucoup de boson de Higgs notamment pour découvrir s'il y en a d'autre génération du boson de Higgs. Et plus globalement pour rechercher de la nouvelle physique, par de nouveaux écarts avec le Modèle Standard.

Ce projet est toujours en attente pour commencer sa construction, probablement dans les montagnes du Nord du Japon. Et le détecteur SDHCAL est en course pour y être installé. C'est pourquoi, l'IP2I développe des programmes d'analyse en parallèle de ce détecteur.

2.2 Projet numérique : original

Pour ce stage j'ai récupéré les codes de Guillaume Garillot, qui les a développés en 2021 au cours de son post-doctorat à l'IP2I.

Son programme permet l'identification et l'analyse statistique de collision du détecteur SDHCAL.

2.2.1 Données initiales

La première étape est de récupérer les données (aujourd’hui simulées, plus tard obtenues dans le détecteur) sur le serveur distant où elles sont stockées, grâce au programme `miniDSTMaker`.

Mais pour le temps du stage je n’ai pas obtenu l’accès à ce serveur donc je n’ai pas pu utilisé cette partie de code. Je l’ai donc pas réutilisé dans ma propre version.

Initialement, on m’a mis à disposition certains de ces fichiers `SLCIO`, ceux des collisions de 250 GeV. Chaque fichier est rangés dans un des 66 dossiers (Figure 2.9), qui correspond au code du type de processus.

```
/gridgroup/ilc/nnhAnalysisFiles/AHCAL
(base) [ ] AHCAL$ ls
402001 402007 402013 500006 500066 500078 500090 500101 500107 500115 500122
402002 402008 402014 500008 500068 500080 500092 500102 500108 500116 500124
402003 402009 402173 500010 500070 500082 500094 500103 500110 500117 500125
402004 402010 402176 500012 500072 500084 500096 500104 500112 500118 500126
402005 402011 402182 500062 500074 500086 500098 500105 500113 500119 500127
402006 402012 402185 500064 500076 500088 500100 500106 500114 500120 500128
```

FIGURE 2.2 – Les noms des dossiers qui correspondent aux numéros de processus

Ce dossier a été placé sur le serveur local de l’IP2I : `/gridgroup/ilc/nnhAnalysisFiles/AHCAL`.

2.2.2 Conversion des fichiers initiaux en fichiers ROOT

Grâce au programme `processor` on va pouvoir convertir les fichiers initiaux `SLCIO` en fichiers `ROOT` standards, afin de pouvoir les analyser.

On obtient ainsi pour chaque dossier de fichier de donnée `SLCIO` un fichier `ROOT` en sortie, c’est-à-dire que l’on obtiendra un arbre `ROOT` par type de processus.

Ce programme doit être robuste et donc à partir des mêmes fichiers toujours générer les fichiers `ROOT` strictement identiques.

2.2.3 Analyses des collisions

Étape 1

Avant de commencer l’analyse des fichiers `ROOT` générés précédemment, on va terminer ce que le programme `processor` avait commencé, et fusionner l’intégralité de ces fichiers en un seul gros fichier `DATA.root`, grâce à la commande `hadd`. Cette commande a été développée par le CERN et elle fusionne tous les histogrammes de différents fichiers en un seul.

Donc là aussi tous les fichiers `DATA.root` doivent être strictement identique.

Étape 2

Pour la deuxième étape de ce programme `analysis` on va de nouveau séparer nos données en 4 fichiers distincts. Mais au lieu de les séparer par leur numéro de processus, qui est un critère numérique, on va les diviser par le type de particules produit par le boson de Higgs, soit $b\bar{b}$, soit WW^* , et par la polarisation de particules incidentes, c’est-à-dire l’électron et le positron avec une polarisation de -0,8 et 0,3 soit nulles. Ce qui va nous créer les 4 fichiers suivants :

```
split_bb_e-0.8_p+0.3.root
split_bb_e+0_p+0.root
split_ww_e-0.8_p+0.3.root
split_ww_e+0_p+0.root
```

FIGURE 2.3 – Fichiers où les événements sont séparés en fonction des caractéristiques des polarisations des particules incidentes et des types de particules résultantes.

Dans chacun de ces fichiers les arbres `ROOT`, `TTree`, auront les variables suivantes :

`isSignal` variable booléen qui indique si on considère l’évènement comme du signal ou du bruit de fond.

channelType c'est un entier qui représente le type de canaux de l'évènement :

- 2 fermions leptoniques ou hadronique
- 4 fermions leptoniques ou semi-leptonique ou hadroniques
- une autre type de résultat avec un boson de Higgs

isTrain booléen qui confirme si l'évènement a été entraîné ou testé par la BDT.

preSelected booléen, si l'évènement a été pré-sélectionné par la BDT.

weight nombre flottant qui est le poids de l'évènement en fb^{-1} de la luminosité intégrée.

Pour trier les données du fichier `DATA.root`, on va utiliser des arbres de décision, BDT pour *Boosted Decision Tree*.

Il s'agit d'une structure de donnée numérique binaire, qui permet de déterminer la nature des particules en répondant à des questions booléennes (FIGURE 2.4).

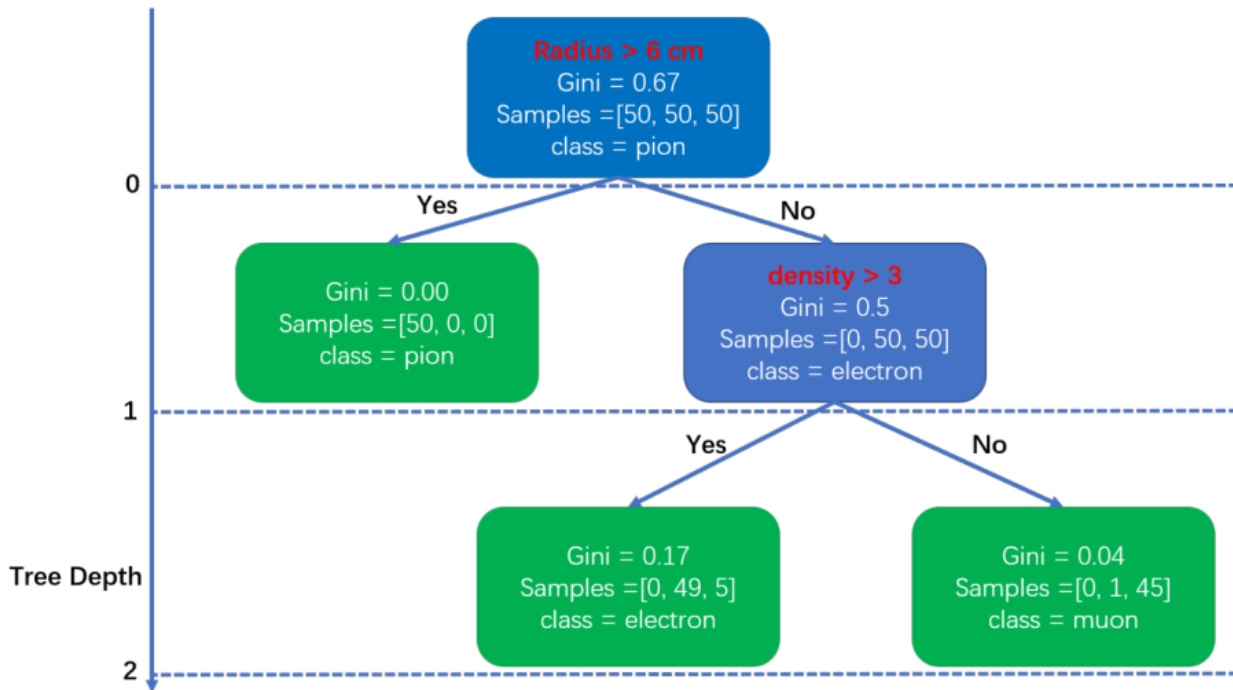


FIGURE 2.4 – Exemple de BDT [8]. Ici, elle permet de déterminer de le type d'une particule

Une fois encore l'API du CERN, nous aura été très utile. En effet, il existe déjà des méthodes (expliquées avec des tutoriels).

Mais cette fois-ci les fichiers créés sont équivalents mais pas identique. Car les BDT utilisent la génération de nombre aléatoire, ce qui engendre des variations dans les entraînements.

Étape 3

Et pour terminer, on peut effectuer l'analyse à proprement parlé de nos données à partir des fichiers `split_XX.root` (FIGURE ??).

```
model_bb_e-0.8_p+0.3.joblib
model_ww_e-0.8_p+0.3.joblib
```

FIGURE 2.5 – Fichiers du model de la BDT

Et même si cette analyse sera toujours la même quelque soit les fichiers `split_XX.root`, ces derniers étant légèrement différent d'un entraînement à l'autre les résultats statistiques seront, là encore, légèrement différent mais doivent rester équivalents.


```
scores_bb_e-0.8_p+0.3.root
scores_ww_e-0.8_p+0.3.root
```

FIGURE 2.6 – Les fichiers scores ont la réponse de la BDT : 2 variables pour chaque évènement, un booléen pour savoir s'il est sélectionné et la valeur retournée par la BDT

```
bestSelection_bb_e-0.8_p+0.3.root
bestSelection_ww_e-0.8_p+0.3.root
```

FIGURE 2.7 – Ce fichier ROOT contient tous les arbres TTree sélectionnés par la BDT comme un évènement $\nu\bar{\nu}h\text{donne}bb\bar{b}WW^*$

```
stats_bb_e-0.8_p+0.3.joblib
stats_ww_e-0.8_p+0.3.joblib
```

FIGURE 2.8 – Statistiques.

2.3 Projet numérique ilcsoft

2.3.1 Données

Initialement, on m'a mis à disposition des fichiers SLCIO, qui sera le format de fichier du détecteur. Chaque fichier est rangés dans un des 66 dossiers (Figure 2.9), qui correspond au code du type de processus.

```
/gridgroup/ilc/nnhAnalysisFiles/AHCAL
(base) [redacted AHCAL]$ ls
402001 402007 402013 500006 500066 500078 500090 500101 500107 500115 500122
402002 402008 402014 500008 500068 500080 500092 500102 500108 500116 500124
402003 402009 402173 500010 500070 500082 500094 500103 500110 500117 500125
402004 402010 402176 500012 500072 500084 500096 500104 500112 500118 500126
402005 402011 402182 500062 500074 500086 500098 500105 500113 500119 500127
402006 402012 402185 500064 500076 500088 500100 500106 500114 500120 500128
```

FIGURE 2.9 – Les noms des dossiers qui correspondent aux numéros de processus

2.3.2 Programme : processor

Méthodes

On cherche à convertir ces fichiers SLCIO en arbre ROOT par processus.

Résultats

Chaque dossier de fichier de donnée SLCIO produira un fichier ROOT en sortie, c'est-à-dire que l'on obtiendra un arbre ROOT par processus.

Interprétation

2.3.3 Programme analysis

Données

On récupère les fichiers ROOT du programme `processor` précédent.
`hadd` qui va créer le fichier DATA.root

Méthodes

BDT Entraînement

L'analyse

Résultats

Vérification des résultats Comparaison entre les différents séries d'analyse, basée sur les même fichiers ROOT, mais un autre entraînement de BDT.

Interprétation

Chapitre 3

FCC

3.1 Projet FCC

3.1.1 Présentation

Le FCC (Futur Collisionneur Circulaire) est le projet du CERN pour remplacer leur collisionneur actuelle, le LHC (Large Hadronic Collider). Dont la fin de l'exploitation est prévu en 2040 [4]

Pour le FCC, on prévoit un anneau de 100 km, contre 27 km pour le LEP et le LHC (comme montrer Figure 3.1). Ce qui devrait nous permettra d'atteindre une énergie de 100 TeV contre 13 TeV actuellement pour le LHC.

L'objectif est de rechercher d'une nouvelle physique, en mettant au jour de déviation avec le modèle standard.

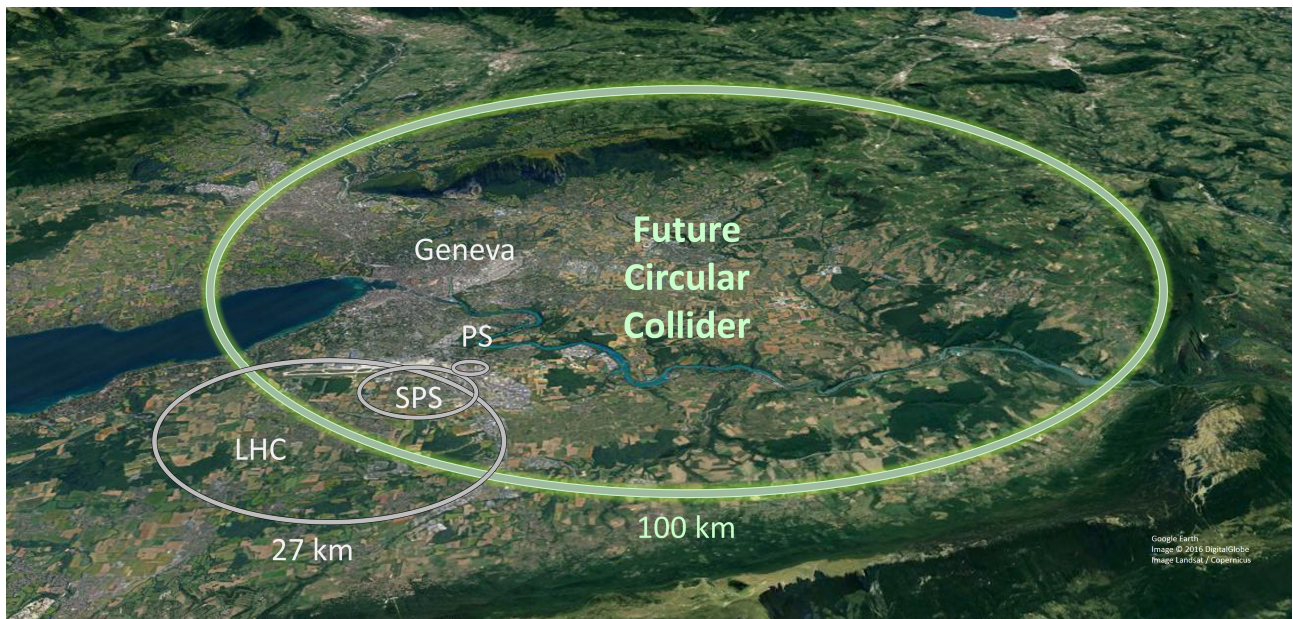


FIGURE 3.1 – <https://cds.cern.ch/images/OPEN-PHO-ACCEL-2019-001-2>

3.2 Développement Numérique

Mon objectif dans ce stage est de transformer les codes développés par Guillaume GARILLOT lors de son post-doctorat pour le projet ILC pour ce projet qui n'utilise pas les mêmes suites logiciels.

Gaudi
EDM4hep

3.3 Travail de Stage

3.4 Comparaison avec iLCSoft

Chapitre 4

Outils Numériques

4.1 nnhScript

<https://github.com/alexhxia/nnhAnalysis/tree/main/nnhScript>

4.2 nnhTest

Pour tester les programmes générés avec `nnhProgram`, j'ai développé 4 programmes en python :

•	Processus	Analysis
Completed	<code>testProcessorCompleted.py</code>	<code>testAnalysisCompleted.py</code>
Same	<code>testProcessorSame.py</code>	<code>testAnalysisSame.py</code>

FIGURE 4.1 – Tableau récapitulatif des fonctions de tests

4.2.1 Programmes `testXxCompleted.py`

L'objectif de ce type de programme est de tester si tous les fichiers ont été générés.

Programmes `testProcessorCompleted.py`

Le processus est complet si tous les dossiers de

Programmes `testAnalysisCompleted.py`

4.2.2 Programmes `testXxSame.py`

Programmes `testProcessorSame.py`

Programmes `testAnalysisSame.py`

<https://github.com/alexhxia/nnhAnalysis/tree/main/nnhTest>

Chapitre 5

Exemples de Résultats Physiques

Chapitre 6

Conclusion

Annexe A

Résumé du travail effectué

A.1 Bibliographie

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03405418>

— Étude du calorimètre hadronique semi-digital et étude du canal physique

$$e^-e^+ \longrightarrow \nu\nu h \ (H \longrightarrow WW \longrightarrow qq\bar{q}\bar{q})$$

au collisionneur circulaire électron positon (CEPC)

— Bing Liu, IP2I

— 2020

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02141420>

— Étude des gerbes hadroniques dans un calorimètre à grande granularité et étude du canal

$$e^-e^+ \longrightarrow HZ \ (Z \longrightarrow q\bar{q})$$

dans les futurs collisionneurs leptoniques

— Guillaume Garillot, IPNL

— 2019

A.2 Tutoriels

LCIO <https://github.com/iLCSoft/LCIO>

ILDConfig <https://github.com/iLCSoft/ILDConfig>

Marlin <https://github.com/iLCSoft/Marlin>

key4hep <https://github.com/key4hep/k4MarlinWrapper>

A.3 Code initial

<https://github.com/ggarillot/nnhAnalysis/tree/refactor>

A.4 Code final

<https://github.com/alexhxia/nnhAnalysis>

Annexe B

Organisation du Projet

B.1 Organisation initiale

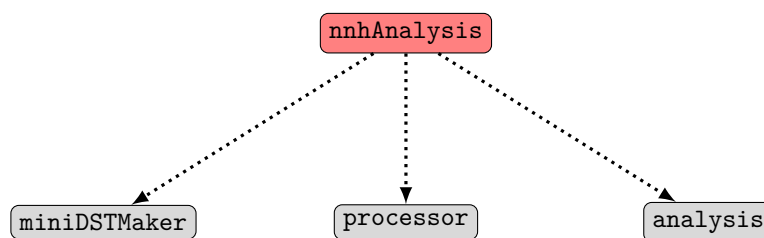


FIGURE B.1 – Organisation des dossiers de mon Projet - <https://github.com/ggarillot/nnhAnalysis/tree/refactor>

B.2 Organisation finale

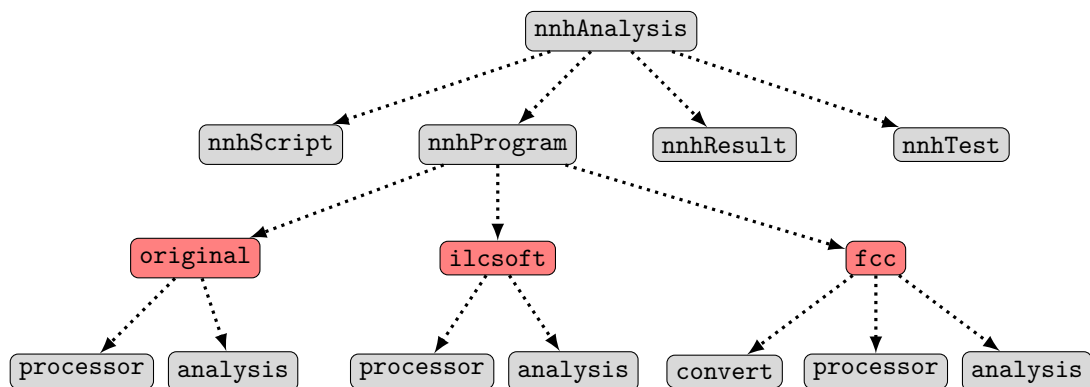


FIGURE B.2 – Organisation des dossiers de mon Projet - <https://github.com/alexhxia/nnhAnalysis>

B.3 Le dossier NNH_HOME

Pour s'exécuter, le projet a besoin de la variable d'environnement NNH_HOME qui est le chemin du programme que vous souhaitez exécuter, mis en avant en rouge dans les Figure B.1 et Figure B.2.

Donc dans le projet initial, il s'agissait de NNH_HOME=\nnhAnalysis et dans le nouveau projet :

- NNH_HOME = \nnhAnalysis\nnhProgram\original
- NNH_HOME = \nnhAnalysis\nnhProgram\ilcsoft
- NNH_HOME = \nnhAnalysis\nnhProgram\fcc

Annexe C

Fichiers ROOT de sorties du programme processor

On a vu précédemment que `processor` converti une série de fichier `SLCIO` en fichiers `ROOT`.
Il considère deux canaux de désintégration du Higgs :

$$h \longrightarrow b\bar{b} \tag{C.1}$$

$$h \longrightarrow WW^* \longrightarrow qqqq \tag{C.2}$$

La première équation (C.1) sera mesuré par le détecteur sous la forme de 2 jets reconstruit et identifié comme 2 quark `b`.

Alors que la seconde équation (C.2) sera reconstruit comme 4 jets, 2 par boson `W`¹.

1. `W` sur couche de masse, `Wstar` hors couche de masse

Table des figures

2.1	Schéma ILC[1]	5
2.2	Les noms des dossiers qui correspondent aux numéros de processus	6
2.3	Fichiers où les évènements sont séparés en fonction des caractéristiques des polarisations des particules incidentes et des types de particules résultantes.	6
2.4	Exemple de BDT [8]. Ici, elle permet de déterminer de le type d'une particule	7
2.5	Fichiers du model de la BDT	7
2.6	Les fichiers scores ont la réponse de la BDT : 2 variables pour chaque évènement, un booléen pour savoir s'il est sélectionné et la valeur retournée par la BDT	8
2.7	Ce fichier ROOT contient tous les arbres TTree sélectionnés par la BDT comme un évènement $\nu\nu h d o n n e b \bar{b}$ ou $W W^*$	8
2.8	Statistiques.	8
2.9	Les noms des dossiers qui correspondent aux numéros de processus	8
3.1	https://cds.cern.ch/images/OPEN-PHO-ACCEL-2019-001-2	10
4.1	Tableau récapitulatif des fonctions de tests	11
B.1	Organisation des dossiers de mon Projet - https://github.com/ggarillot/nnhAnalysis/tree/refactor	15
B.2	Organisation des dossiers de mon Projet - https://github.com/alexhxia/nnhAnalysis	15

Bibliographie

- [1] CERN. International linear collider ready for construction, jun 2013. <https://home.web.cern.ch/news/news/accelerators/international-linear-collider-ready-construction>.
- [2] CERN. Grand collisionneur de hadrons, juin 2022. <https://home.cern/fr/science/accelerators/large-hadron-collider>.
- [3] CERN. The large electron-positron collider, juin 2022. <https://home.cern/science/accelerators/large-electron-positron-collider>.
- [4] CERN. Le futur collisionneur circulaire, jun 2022. <https://home.cern/fr/science/accelerators/future-circular-collider>.
- [5] Nicolas Chadeau. Étude sur la mesure de la constante de couplage g_{hw} dans le cadre de l'expérience ilc à 250 gev. Master's thesis, UCBL1, 2021.
- [6] Frank Gaede, Ties Behnke, Norman Graf, and Tony Johnson. Lcio : A persistency framework for linear collider simulation studies. *eConf*, C0303241 :TUKT001, 2003.
- [7] Guillaume Garillot. *Étude des gerbes hadroniques dans un calorimètre à grande granularité et étude du canal $e+e- \rightarrow HZ$ ($Z \rightarrow qq$) dans les futurs collisionneurs leptoniques*. Theses, Université de Lyon, February 2019.
- [8] Bing Liu. *Etude du calorimètre hadronique semi-digital et étude du canal physique $e+e- \rightarrow H \nu \nu$ ($H \rightarrow WW \rightarrow qq qq$) au collisionneur circulaire electron positon (CEPC)*. Theses, Université de Lyon ; Shanghai Jiao Tong University, November 2020.