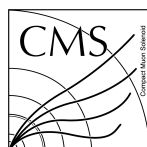

Calibration des calorimètres de CMS pour la reconstruction de flux de particules.

Résumé :

Pour reconstruire la trajectoire d'une particule, il est nécessaire de connaître son énergie. Cette énergie est estimée à partir d'un détecteur hadronique et d'un détecteur électromagnétiques, problématique de ce stage est : connaissant les dépôts d'énergie d'une particule dans ces deux calorimètres, quelle est son énergie ?

Pour répondre à ces questions, j'ai développé des algorithmes qui prennent en données d'entraînement des particules simulées et qui pour chaque couple d'énergie déposée (e_{cal}, h_{cal}) nous donne une énergie calibrée e_{calib} .

On peut alors ré-expliciter la problématique des algorithmes de la façon suivante : comment modéliser un nuage de points $(e_{cal}, h_{cal}, e_{true})$ par une surface $e_{calib} = f(h_{cal}, e_{true})$?



Mots clefs : *Calibration, Modélisation, Physique des particules*

Stage encadré par :

Colin Bernet colin.bernet@cern.ch

Bâtiment Paul Dirac

4, Rue Enrico Fermi

69622 Villeurbanne Cedex

Tél. : +33 (0) 4 72 44 84 57

Table des matières

1	Introduction	2
2	Méthodes de calibrations développées pendant le stage	2
2.1	Explications valables pour toutes les méthodes	2
2.1.1	Séparation des données	2
2.1.2	Moyenne / moyenne de la gaussienne ajustée ("gaussian fit", "gaussienne fitée") ?	2
2.1.3	Comment est fait un fit ?	3
2.2	Régression Linéaire	3
2.3	Méthode des "legos"	5
2.3.1	Principe général de l'algorithme	5
2.3.2	Résultat de la calibration	5
2.4	Méthode des plus proches voisins (KNN)	6
2.4.1	Principe général de l'algorithme	6
2.4.2	Résultat de la calibration	7
2.5	KNN Gaussian Cleaning	8
2.5.1	Principe général de l'algorithme	8
2.5.2	Efficacité du fit	9
2.5.3	Résultat de la calibration	9
2.6	KNN Gaussian Fit	10
2.6.1	Principe général de l'algorithme	10
2.6.2	Résultat de la calibration	11
3	Comparaison des méthodes	12
3.1	Méthodes basées sur KNN	12
3.2	Meilleure méthode	12
4	Partage du programme	13
5	Annexes	14
5.1	Comment créer une calibration ?	14
5.2	Fonctions utiles du programme	14

1 Introduction

Le but de ce stage est de trouver une méthode de calibration des calorimètres hadroniques et électromagnétiques de CMS, c'est à dire, pour une particule qui va laisser un dépôt d'énergie h_{cal} , e_{cal} dans chacun des calorimètres, comment approximer sa vraie énergie e_{true} ?

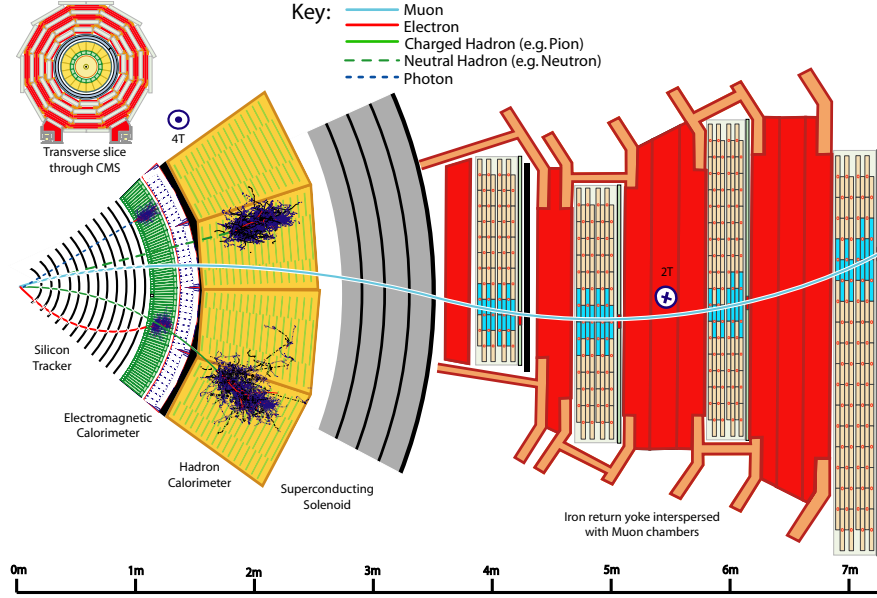


FIGURE 1 – Une esquisse des interactions spécifiques des particules dans une tranche transversale du détecteur CMS.

Cette énergie dite énergie calibrée e_{calib} sera déterminée à l'aide de particules issues d'une simulation très précise (prenant en compte les défauts des calorimètres) qui serviront de données d'entraînement aux différents algorithmes que j'ai développés durant mon stage. Le but final de cette calibration sera d'améliorer la reconstruction des flux de particules (particules flow).

2 Méthodes de calibrations développées pendant le stage

2.1 Explications valables pour toutes les méthodes

2.1.1 Séparation des données

On séparera et traitera différemment les événements qui ont $e_{cal} = 0$. Ces événements sont liés à des particules qui ont interagi avec le détecteur hadronique mais pas avec le détecteur électromagnétique (cf Fig.1).

Cette séparation se justifie par le fait que modéliser les dépôts d'énergie dans les deux calorimètres pour en conclure ce qui se passe dans le cas particulier où il n'y a des dépôts que dans un amène un biais. Ainsi, à chaque "création" de calibration, on créera en fait deux modèles.

- limite $e_{cal} + h_{cal} < 150$

2.1.2 Moyenne / moyenne de la gaussienne ajustée ("gaussian fit", "gaussienne fitée") ?

À différents moments, nous aurons besoin de calculer des moyennes. Or souvent, la moyenne classique ne serait pas représentative de ce que nous souhaitons montrer car certains points ont des valeurs e_{cal} , h_{cal} mal estimées car la simulation prend en compte les défauts des calorimètres. Il serait donc alors incorrect de les prendre en compte pour juger l'efficacité d'une calibration car ils sont

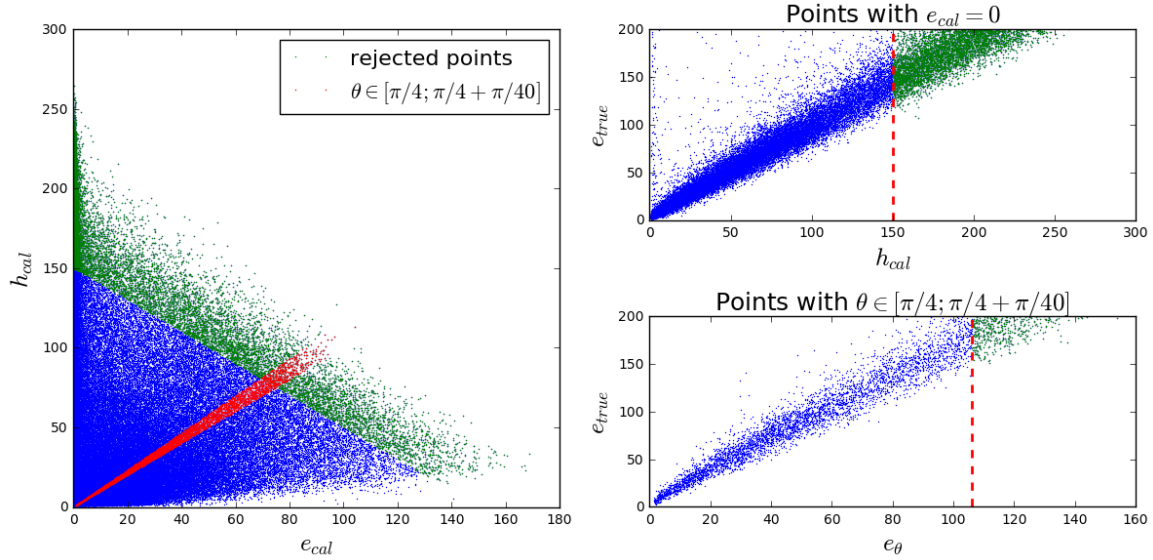
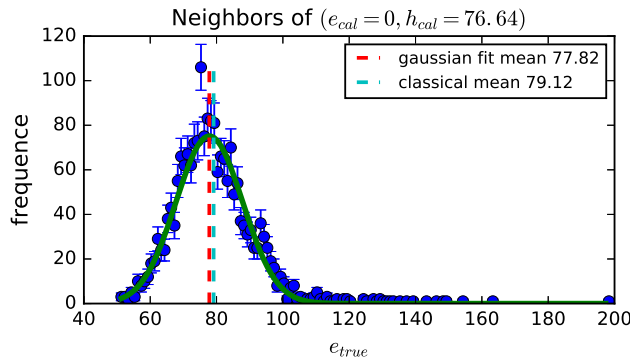


FIGURE 2 – On place une limite à $e_{cal} + h_{cal} = 150$. À gauche, ..., en haut à droite, ..., en bas à droite, ...

complètement incohérents.

Pour résoudre ce problème, nous allons ajuster une gaussienne de la distribution des points à moyenner et choisir considérer que la moyenne à prendre en compte est la moyenne de la gaussienne. Ainsi, les points aberrants totalement écarté du centre de la distribution ne perturberont pas le calcul de la moyenne alors que dans le cas d'une moyenne classique, ils peuvent fortement attirer la moyenne vers eux.

Ces points aberrants peuvent également venir d'une particule qui se serait décomposée avant le calorimètre. Ainsi on trouve près de l'origine, des points à fort e_{true} et pour de faibles valeurs de e_{cal} et h_{cal} , et ces points ne sont pas du tout représentatif de l'efficacité d'une calibration.



Ici, on peut voir sur cet exemple que si nous prenons la moyenne classique de e_{true} , on obtient 79.12, or la moyenne de la gaussienne fitée est de 77.82, au vu de ce que nous avons dit précédemment, nous considérerons que la seconde est plus judicieuse.

2.1.3 Comment est fait un fit ?

expliquer :

- barre d'erreur
- minimisation du χ^2
- un bon χ^2 réduit ?

2.2 Régression Linéaire

Pour s'entraîner à l'utilisation de *SciKit Learn*, j'ai d'abord utilisé la régression linéaire. Il s'agit alors de représenter les relations entre les énergies par :

$$e_{true} = a_1 e_{cal} + a_2 h_{cal} + b \quad (1)$$

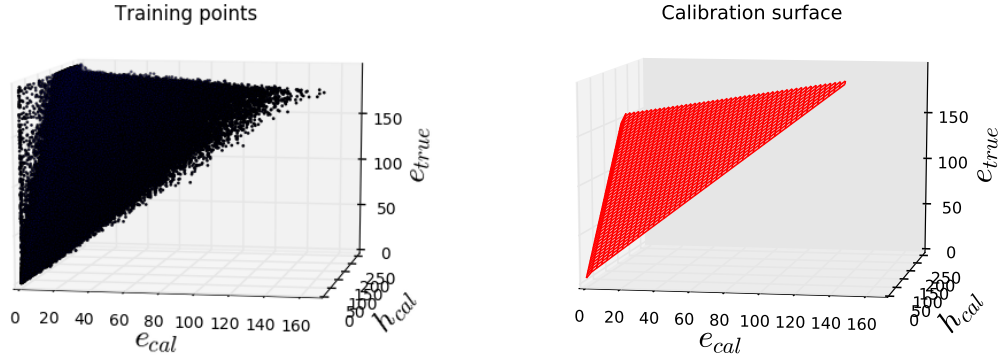


FIGURE 3 – Le nuage de points modélisé (à gauche) par un plan (à droite).

Nous avons ainsi modélisé le nuage de point par un plan, pour voir si cela était réaliste, nous allons d'abord regarder ce qui se passe dans le plan $e_{cal} = 0$:

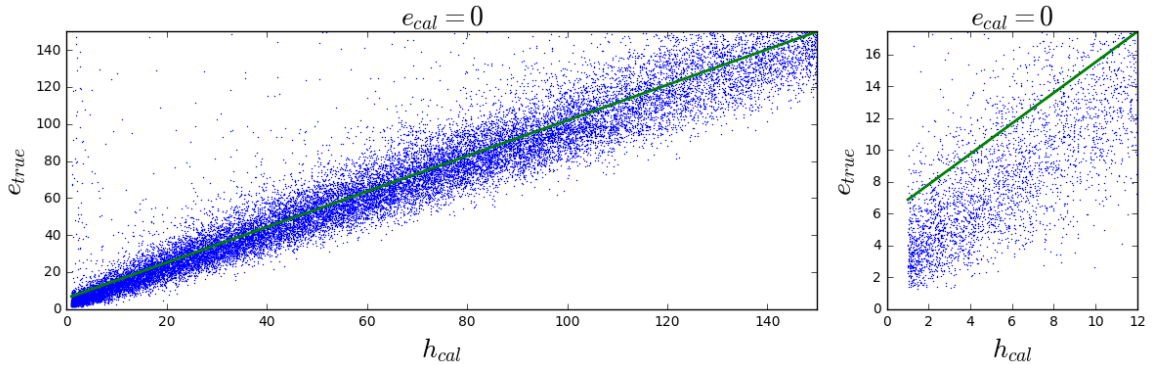
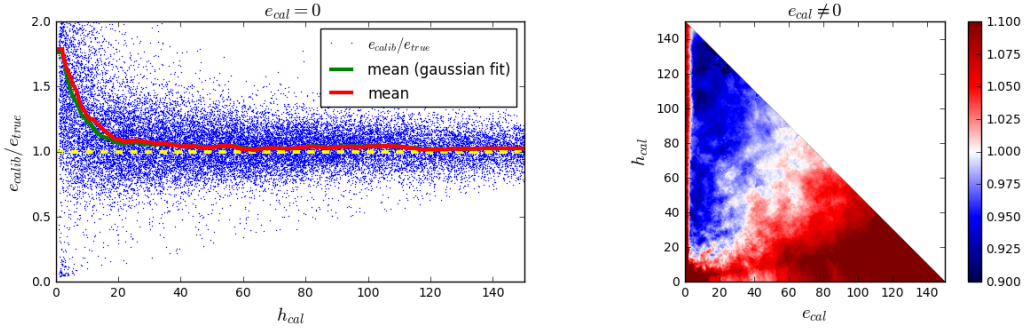
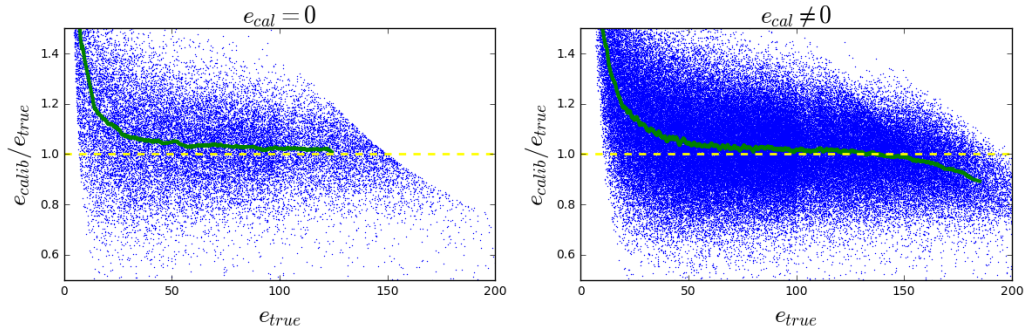


FIGURE 4 – Courbe de calibration pour $e_{cal} = 0$.

Nous constatons alors que la courbe ne passe pas par le coeur du nuage de point à faible énergie. Pour avoir une vue d'ensemble, nous allons tracer e_{calib}/e_{true} qui doit être proche de 1 si la calibration est bonne.

En regardant la figure de droite, nous constatons que comme prévu la régression linéaire est mauvaise à faible énergie car en moyenne, e_{calib}/e_{true} n'est pas proche de 1. Plus intéressant, la figure de droite met en avant les non-linéarités du nuage de point.

Ici nous constatons que à faible et haut e_{true} , la calibration ne donne pas de bons résultats. En effet, la courbe de la moyenne (fit gaussien) s'écarte très fortement d'une constante égale à 1.

FIGURE 5 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{cal} et h_{cal} .FIGURE 6 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{true} .

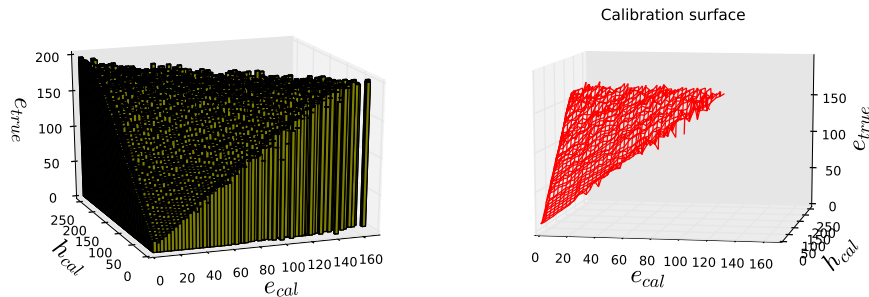
2.3 Méthode des "legos"

2.3.1 Principe général de l'algorithme

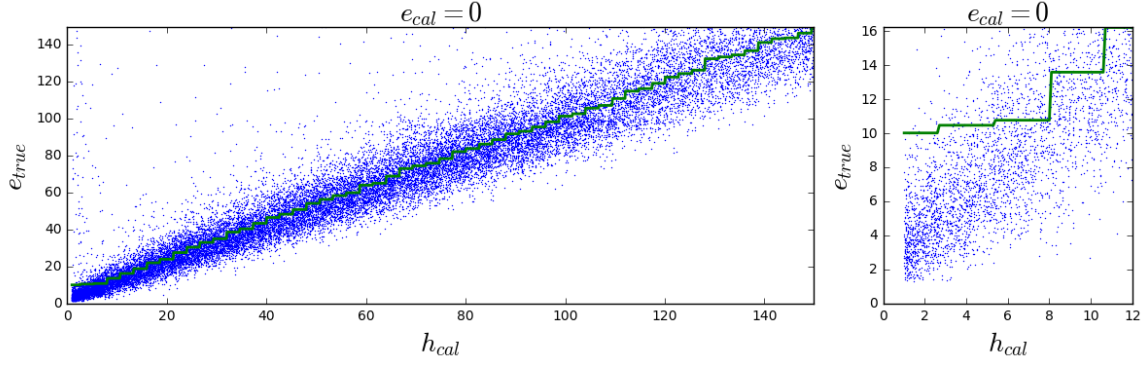
Comme nous l'avons vu précédemment, il faut une calibration qui prenne en compte les non-linéarité. Ici, l'idée est de découper le plan (e_{cal}, h_{cal}) en carré et de calculer la moyenne des e_{true} dans chaque carré qui sera la valeur e_{calib} .

Ainsi pour prédire une énergie de e_{calib}^i pour un point (e_{cal}^i, h_{cal}^i) , nous allons regarder dans quel carré il se trouve et retourner la valeur d'énergie calibrée correspondante, faisant apparaître ainsi des "legos".

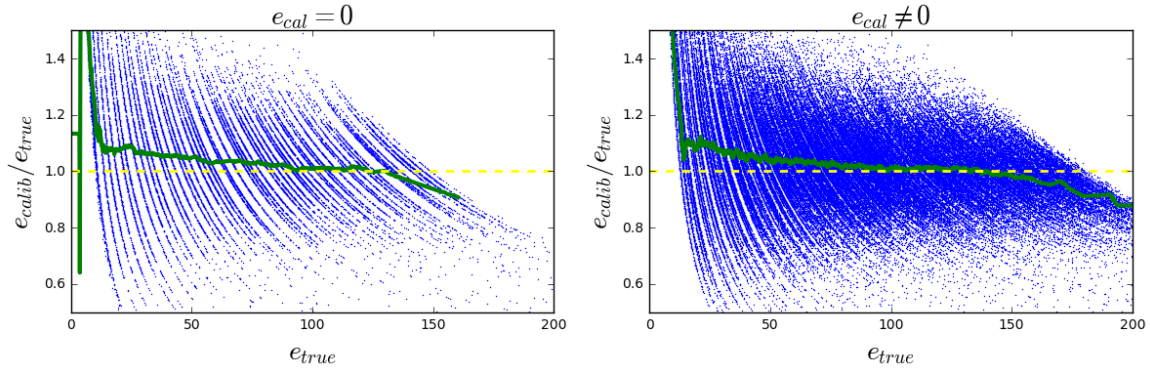
2.3.2 Résultat de la calibration

FIGURE 7 – Le nuage de points modélisé par des legos (à gauche) ainsi que la surface correspondante (à droite). 100×100 legos.

Bien que cette méthode prenne en compte les linéarité, nous pouvons voir sur les figures ci-dessus

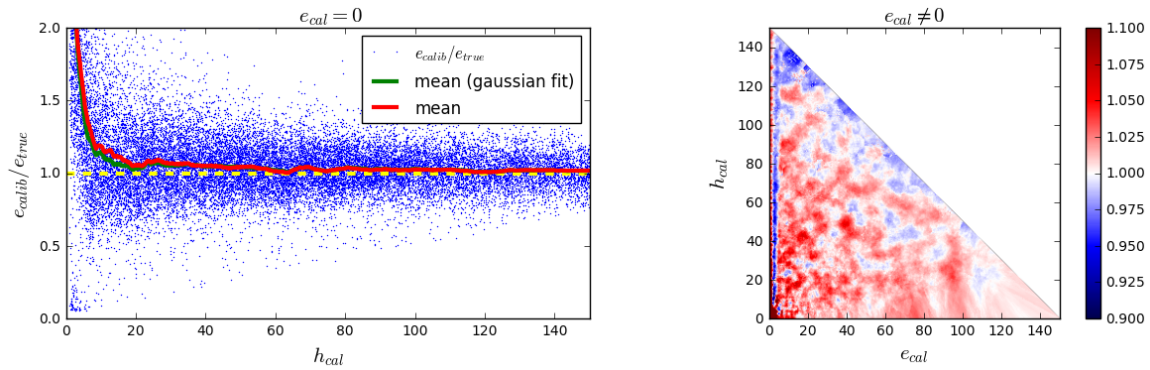
FIGURE 8 – Courbe de calibration pour $e_{cal} = 0$.

qu'il y a un effet de pas, ce qui n'est pas bon car beaucoup trop d'événements ont le même e_{calib} et la courbe de calibration ne suit pas bien le cœur de distribution, surtout à faible énergie.

FIGURE 9 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{true} .

Cet effet de pas se retrouve également si l'on trace e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{true} (Fig. 9) et nous y voyons alors une structure (des hyperboles) liée aux points qui ont la même énergie de calibration (contrairement à la régression linéaire Fig. 6).

Cet illustration montre à nouveau que nous sommes loin d'une répartition des points autour de $e_{calib}/e_{true} = 1$.

FIGURE 10 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{cal} et h_{cal} .

Ici nous constatons malgré tout que nous avons mieux pris en compte la non-linéarité, mais que en

majorité, l'énergie calibrée est sur-estimée.

2.4 Méthode des plus proches voisins (KNN)

2.4.1 Principe général de l'algorithme

Nous utilisons encore des données simulées pour effectuer une calibration, chaque particule simulée i est vue comme un point d'un espace tridimensionnel possédant des coordonnées $(e_{cal}^i, h_{cal}^i, e_{true}^i)$, correspondant respectivement à l'énergie déposée dans le calorimètre électromagnétique, dans le calorimètre hadronique et l'énergie vraie.

Pour trouver l'énergie calibrée d'un point de coordonnées (e_{cal}^0, h_{cal}^0) :

- on recherche ses k plus proches voisins dans le plan $(e_{cal}, h_{cal}) \rightarrow (e_{cal}^i, h_{cal}^i), i \in [1, \dots, k]$

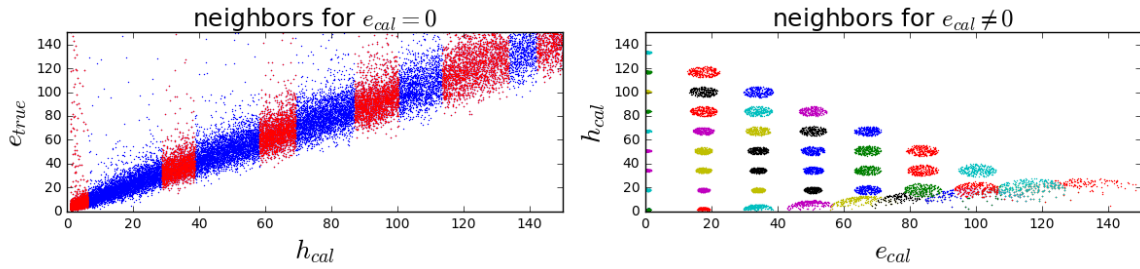


FIGURE 11 – $n_{voisins} = 2000$ pour $e_{cal} = 0$, $n_{voisins} = 250$ pour $e_{cal} \neq 0$

- on effectue une moyenne pondérée une moyenne pondérée de l'énergie vraie de ces plus proches voisins $\rightarrow e_{calib}^0$: l'énergie calibrée

La moyenne pondérée va donc s'exprimer ainsi :

$$e_{calib}^0 = \frac{\sum_{i=1}^k g(e_{cal}^i, h_{cal}^i) \times e_{true}^i}{\sum_{i=1}^k g(e_{cal}^i, h_{cal}^i)} \quad (2)$$

Dans notre cas nous avons pris pour g la distribution gaussienne $g(\vec{x}) = \exp -\frac{1}{2}(\frac{(\vec{x}-\vec{x}^0)^2}{\sigma^2})$, pour donner plus d'importance aux plus proches des k plus proches voisins.

2.4.2 Résultat de la calibration

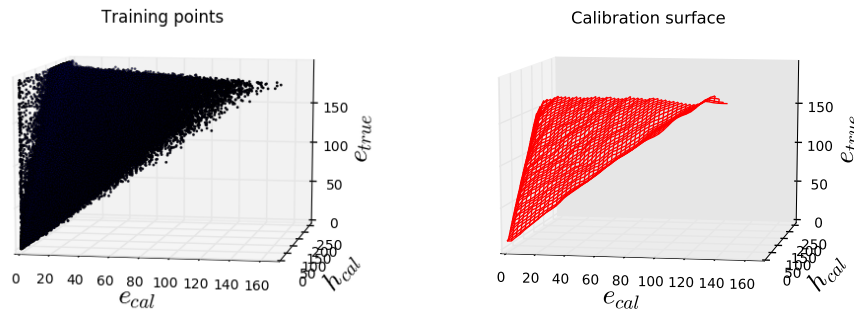


FIGURE 12 – Le nuage de points modélisé (à gauche) par une surface (à droite).

Nous constatons ici que la surface est beaucoup plus lisse que pour la méthode précédente, mais en regardant le cas particulier de $e_{cal} = 0$, nous constatons encore une fois que à faible énergie, la

courbe de calibration ne passe pas par le coeur de la distribution. Cela vient du fait qu'il y a des points aberrants qui ont une forte énergie vraie mais qui ont une très faible énergie détectée par les calorimètres.

Il nous faut donc un moyen pour ne plus les prendre en compte pour avoir une courbe de calibration plus réaliste.

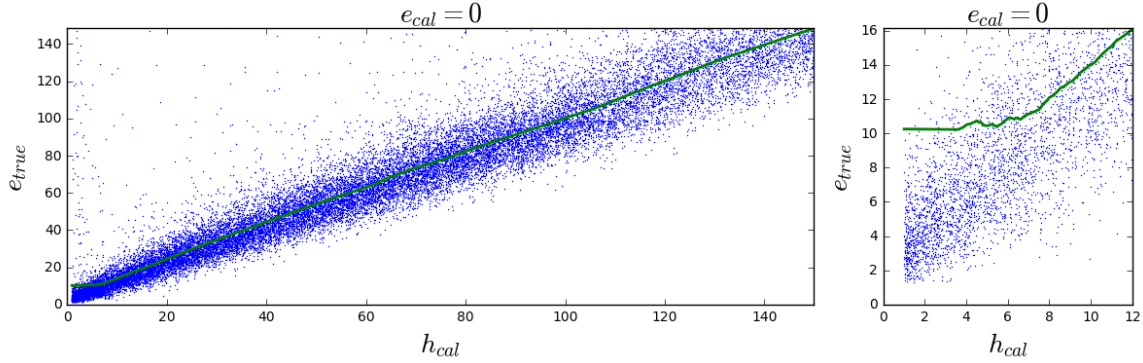


FIGURE 13 – Courbe de calibration pour $e_{cal} = 0$.

Malgré tout, en regardant la Fig. 14, nous constatons que les points sont mieux répartis autour de $e_{calib}/e_{true} = 1$.

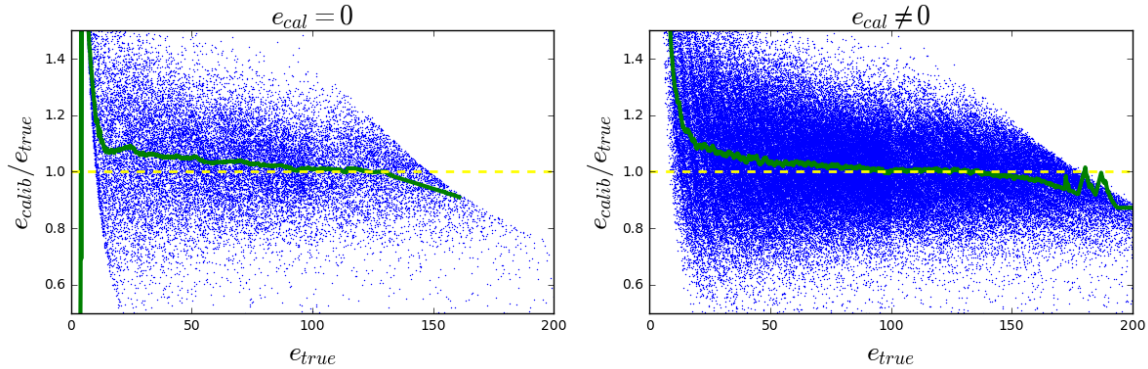


FIGURE 14 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{true} .

Nous prenons également en compte les non-linéarité dans ce cas mais nous sur-estimons encore la valeur de l'énergie calibrée (encore une fois, à cause de ces points à fort e_{true}).

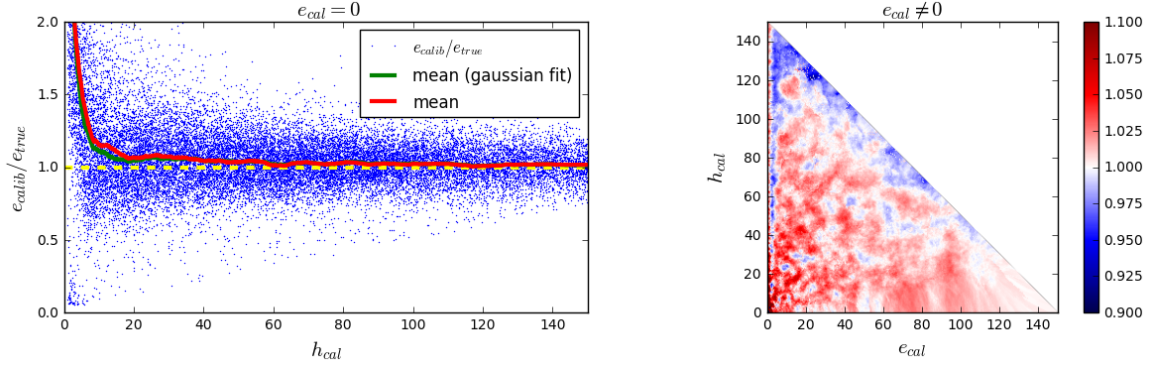
2.5 KNN Gaussian Cleaning

2.5.1 Principe général de l'algorithme

Cette méthode est assez similaires à la précédente. Elle se base sur la constatation que la distribution en énergie vraie des paquets de plus proches voisins est une distribution gaussienne. Nous allons donc en utilisant la méthode des moindres carrés trouver les paramètres de la gaussienne en question et ne prendre en compte les plus proches voisins dont l'énergie vraie est $\mu - c\sigma \leq e_{true}^i \leq \mu + c\sigma$ (nous prenons par défaut $c = 2$), avec μ, σ la moyenne et l'écart type de la distribution gaussienne.

Principe de l'algorithme :

- on considère des points $(e_{cal}^{0,j}, h_{cal}^{0,j})$ où nous allons évaluer l'énergie calibrée.
- pour chaque $(e_{cal}^{0,j}, h_{cal}^{0,j})$:

FIGURE 15 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{cal} et h_{cal} .

- on recherche ses k plus proches voisins dans le plan $(e_{cal}, h_{cal}) \rightarrow (e_{cal}^i, h_{cal}^i), i \in [1, \dots, k]$
- on trouve la gaussienne correspondante $\mu - c\sigma \leq e_{true}^i \leq \mu + c\sigma$
- on ne conserve que les voisins dont : $\mu - c\sigma \leq e_{true}^i \leq \mu + c\sigma$
- on effectue une moyenne pondérée de l'énergie vraie de ces plus proches voisins $\rightarrow e_{calib}^0$: l'énergie calibrée
- on effectue une interpolation pour donner une valeur d'énergie calibrée quelque soit (e_{cal}^0, h_{cal}^0)

2.5.2 Efficacité du fit

2.5.3 Résultat de la calibration

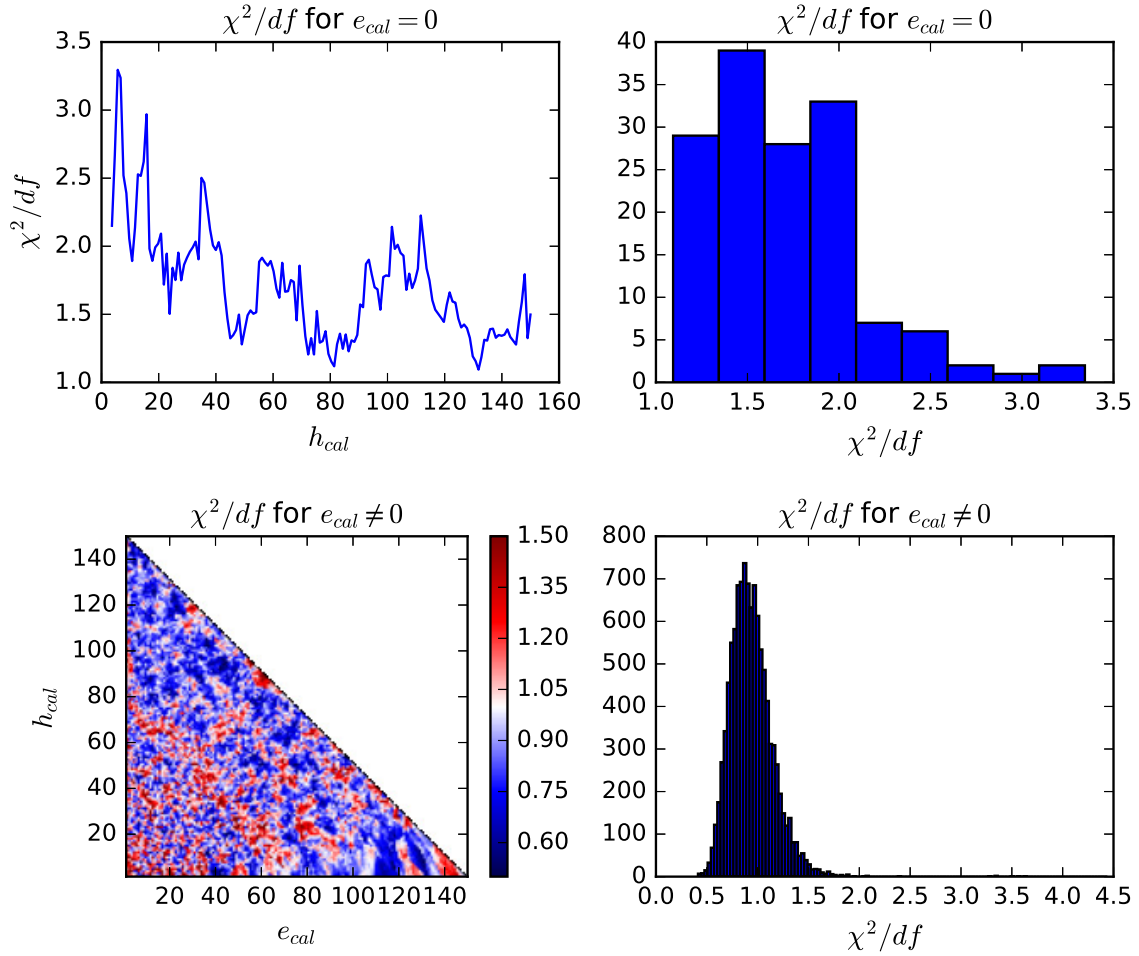
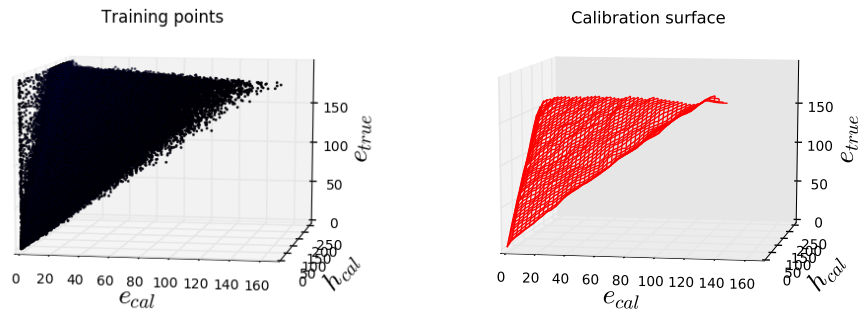
FIGURE 16 – Le χ^2 réduit pour chaque fit effectué.

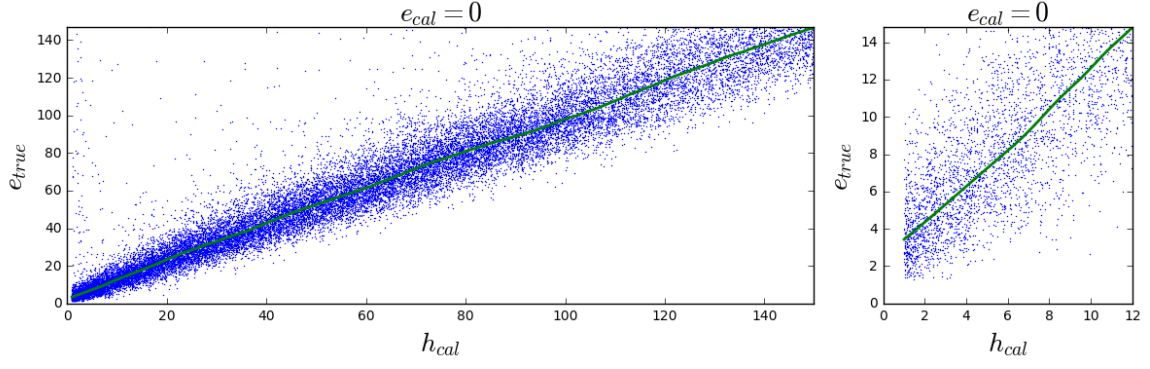
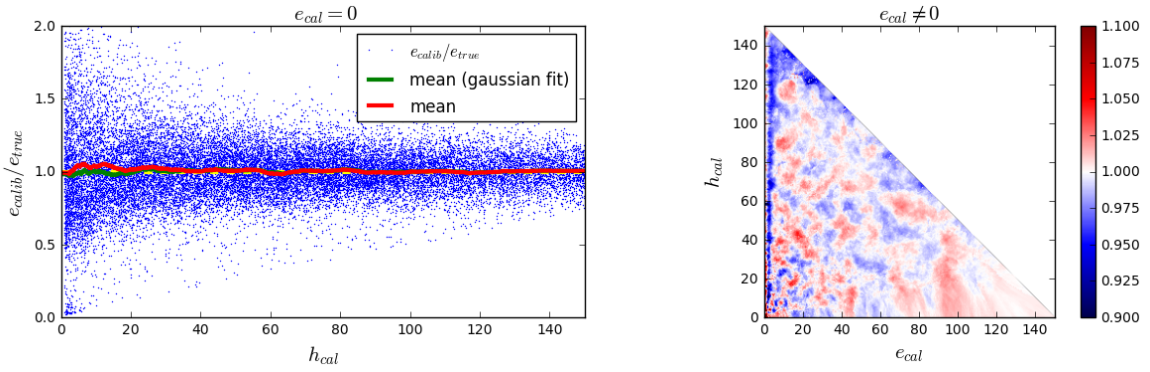
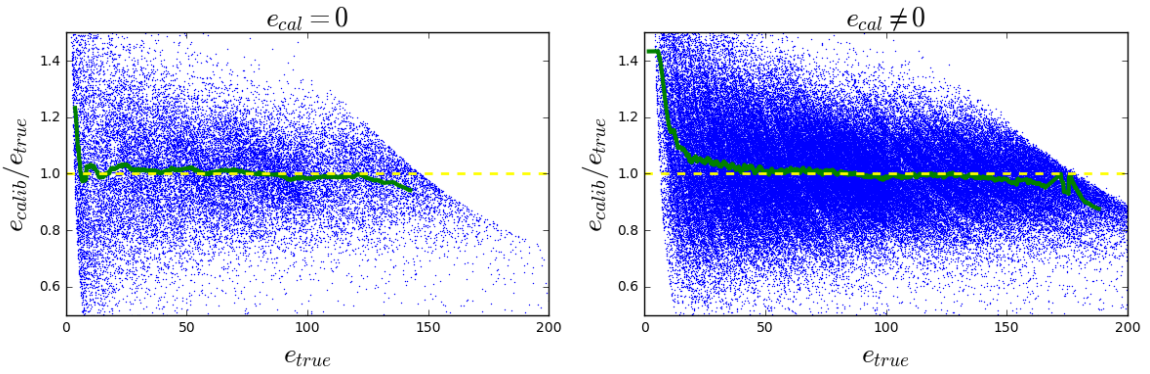
FIGURE 17 – Le nuage de points modélisé (à gauche) par une surface (à droite).

2.6 KNN Gaussian Fit

2.6.1 Principe général de l'algorithme

Ici, il s'agit du même principe que précédemment mais nous allons considérer que la valeur de e_{calib} est la moyenne de la gaussienne. Principe de l'algorithme :

- on considère des points $(e_{cal}^{0,j}, h_{cal}^{0,j})$ où nous allons évaluer l'énergie calibrée.
- pour chaque $(e_{cal}^{0,j}, h_{cal}^{0,j})$:
 - on recherche ses k plus proches voisins dans le plan $(e_{cal}, h_{cal}) \rightarrow (e_{cal}^i, h_{cal}^i), i \in [1, \dots, k]$

FIGURE 18 – Courbe de calibration pour $e_{cal} = 0$.FIGURE 19 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{cal} et h_{cal} .FIGURE 20 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{true} .

- on trouve la gaussienne correspondante $\rightarrow \sigma, \mu$
- $\rightarrow e_{calib}^0 = \mu$
- on effectue une interpolation pour donner une valeur d'énergie calibrée quelque soit (e_{cal}^0, h_{cal}^0)

2.6.2 Résultat de la calibration

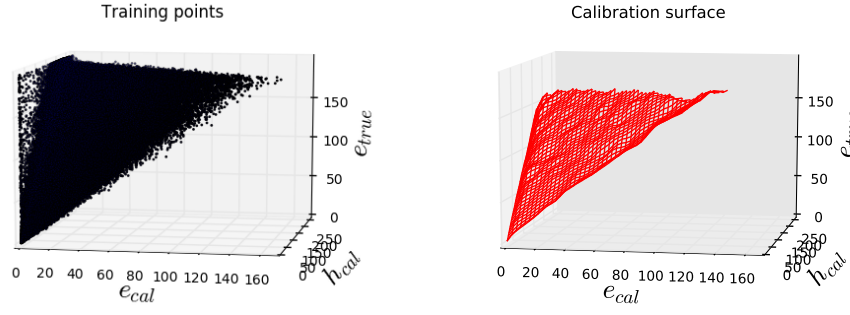
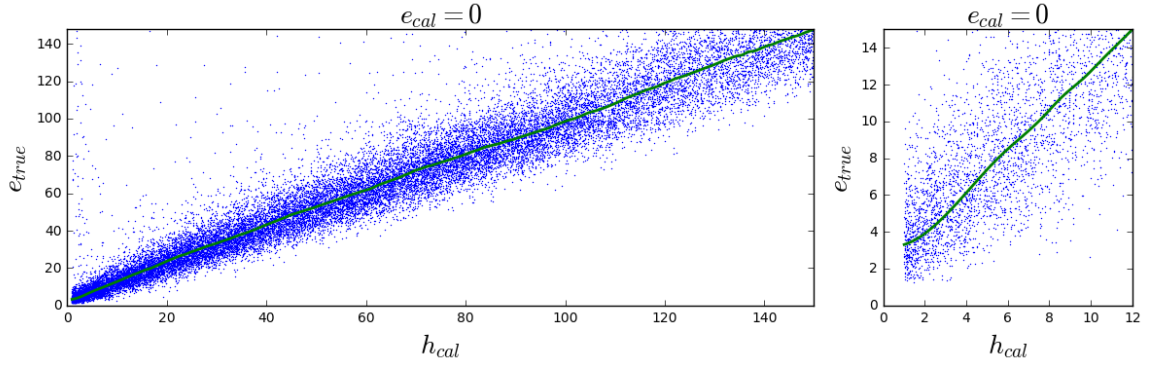
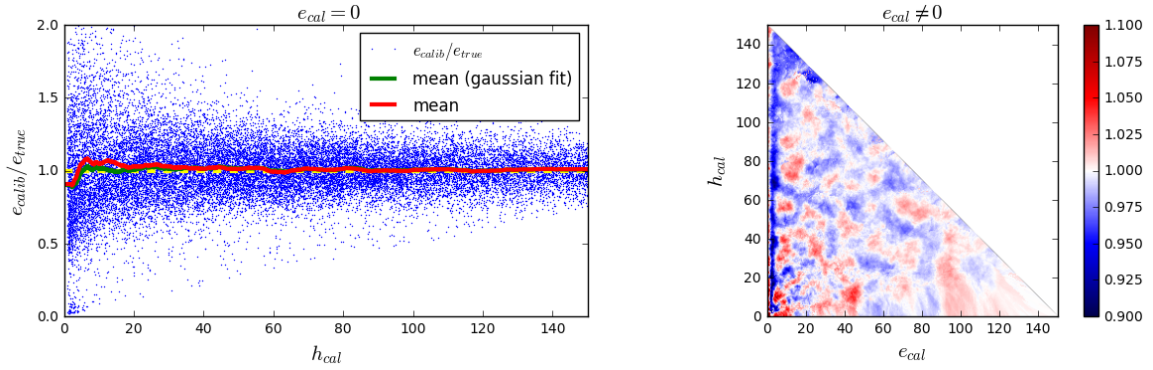


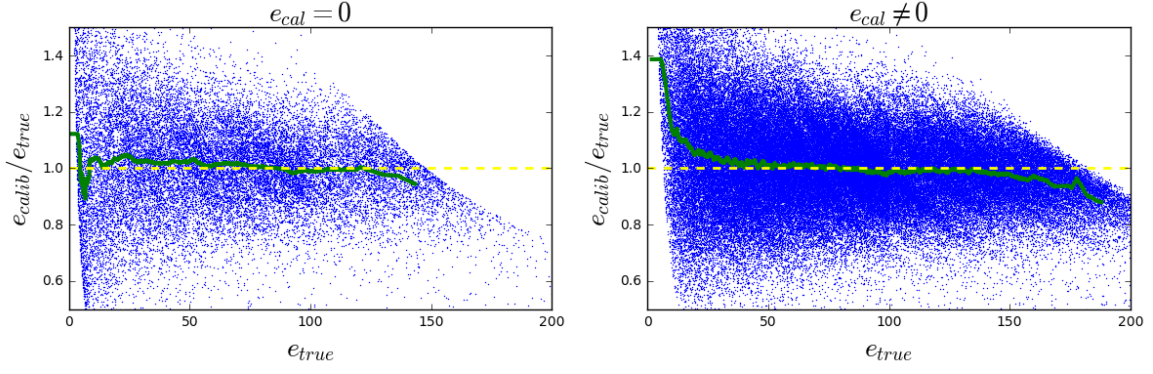
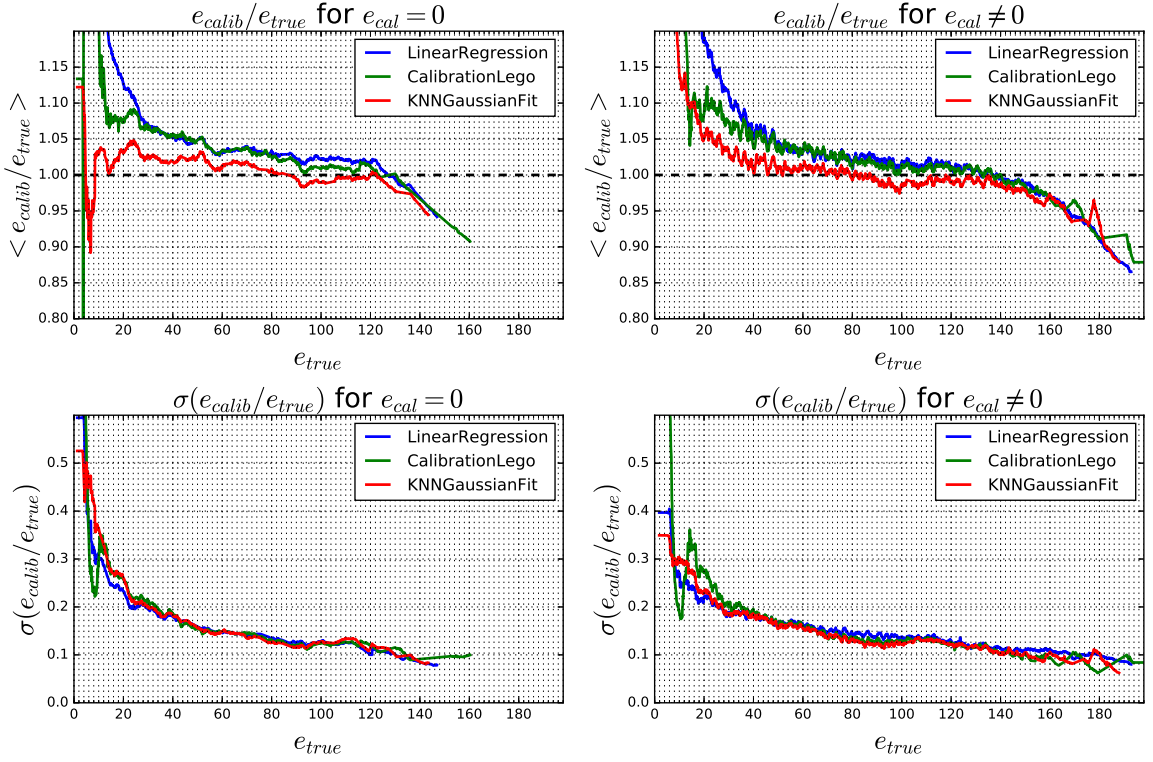
FIGURE 21 – Le nuage de points modélisé (à gauche) par une surface (à droite).

FIGURE 22 – Courbe de calibration pour $e_{cal} = 0$.FIGURE 23 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{cal} et h_{cal} .

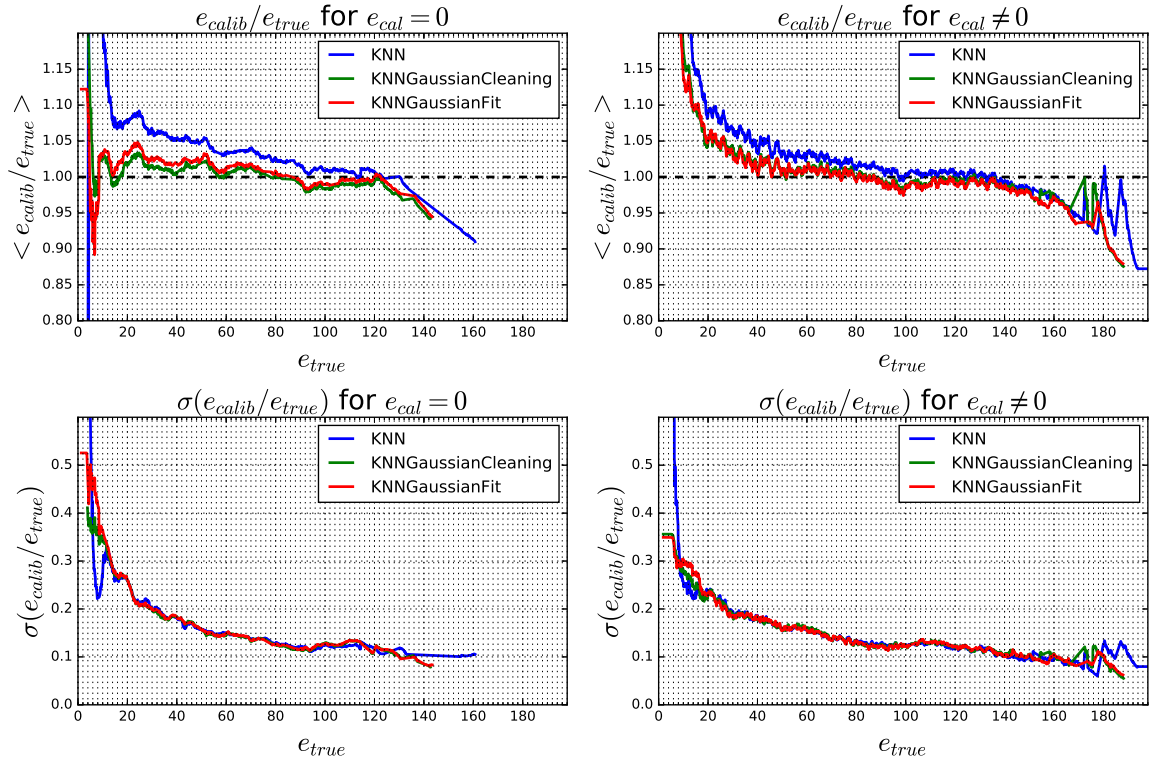
3 Comparaison des méthodes

3.1 Méthodes basées sur KNN

3.2 Meilleure méthode

FIGURE 24 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{true} .FIGURE 25 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{true} .

4 Partage du programme

FIGURE 26 – e_{calib}/e_{true} en fonction de e_{true} .

5 Annexes

5.1 Comment créer une calibration ?

5.2 Fonctions utiles du programme