

# Violation de CP induite par le mélange $B_s$ - $\bar{B}_s$ dans la désintégration $B_s \rightarrow J/\psi \phi$ dans l'expérience LHCb

- 1 - Introduction
- 2 - Mesure de  $\beta_s$
- 3 - Conclusions & perspectives

Basem KHANJI

Directeur de thèse : Renaud LE GAC

Encadrant : Olivier LEROY

CPPM, Université d'Aix-Marseille

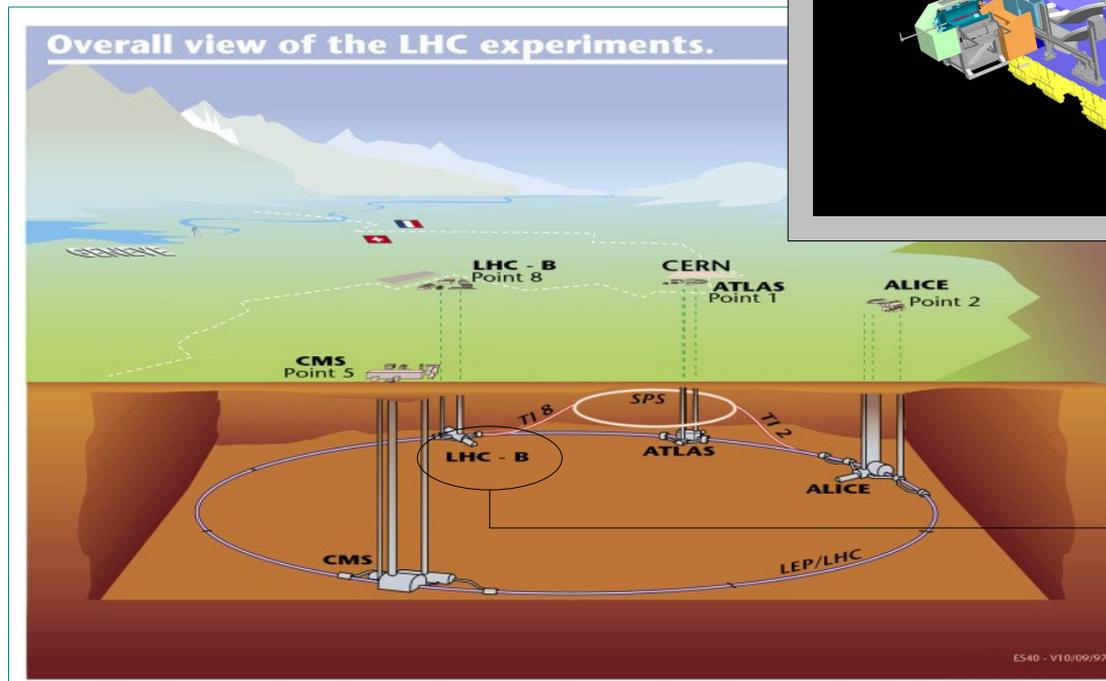
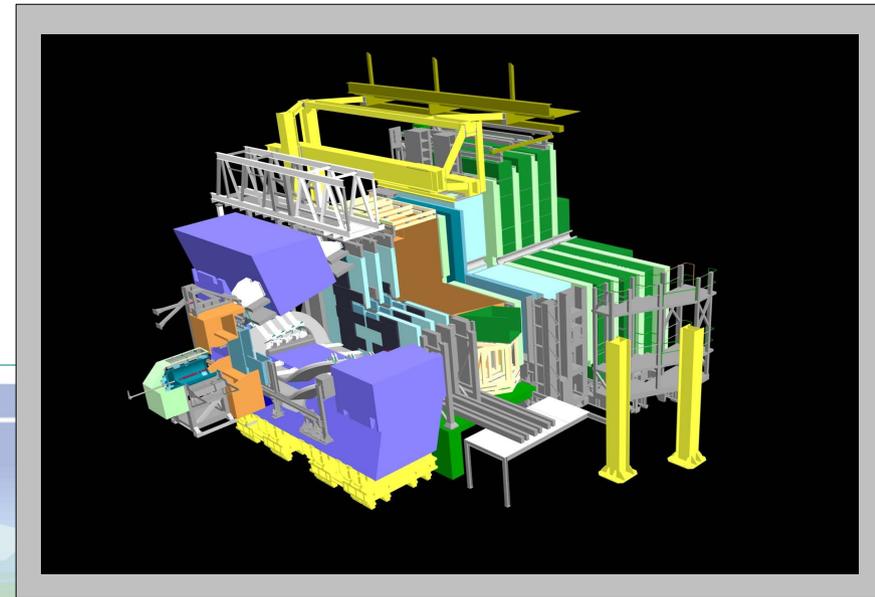
Présentation 1<sup>er</sup> année

# Modèle Standard & Violation CP

- Modèle standard rends compte de la violation de CP via matrice CKM
  - matrice  $3 \times 3$  unitaire
  - éléments décrivent la probabilité qu'un quark  $q$  se transforme en quark  $q'$
  - 3 paramètres réels et une phase complexe non-nulle (CPV)
- Violation CP du modèle standard pas suffisante pour décrire la violation de CP observée dans l'univers
  - D'autres sources de violation CP ?

# LHCb : Détecteur & Collaboration

- Description de Détecteur
- Les six mesures clés de LHCb



# Détecteur LHCb

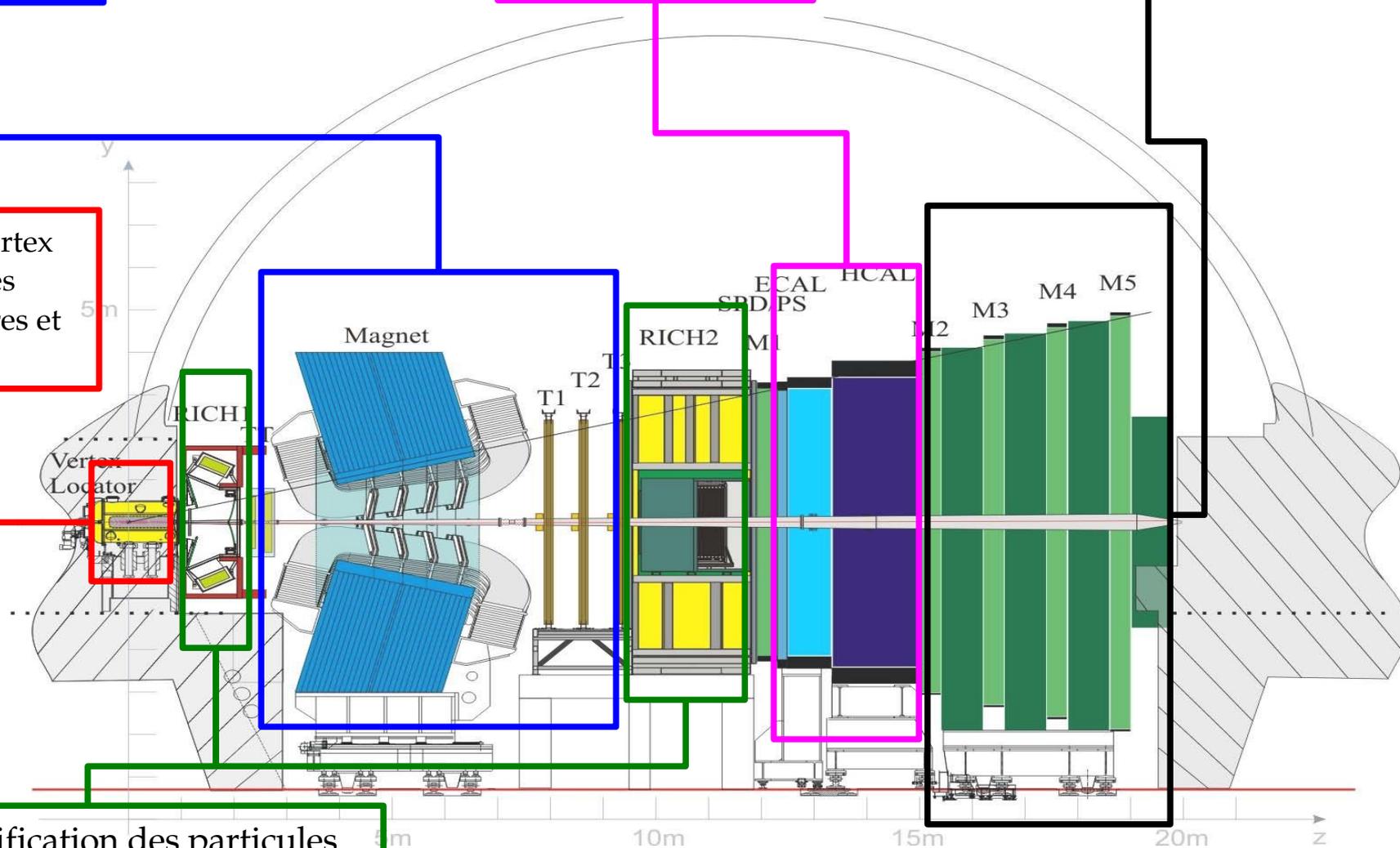
Aimant 4 Tesla  
reconstruction  
des impulsions

calorimètres  
mesures d'énergie  
des particules

Chambre à muons  
identification des muons

Détecteur à vertex  
reconstruire les  
vertex primaires et  
secondaires

RICH Identification des particules



## Les six mesures clés de LHCb

◆ LHCb : violation CP et désintégrations rares dans le domaine des hadrons b.  
Recherche de la nouvelle physique

◆ Les mesures clés :

→ Violation CP :

◆ Mesure de l'angle  $\beta_s$

◆ Mesure de l'angle  $\gamma$  dans les boucles

◆ Mesure de l'angle  $\gamma$  dans l'arbre

→ Désintégrations Rares :

◆  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$

◆  $B_d \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$

◆ Désintégration radiatives (e.g :  $B_s \rightarrow \phi \gamma$  )

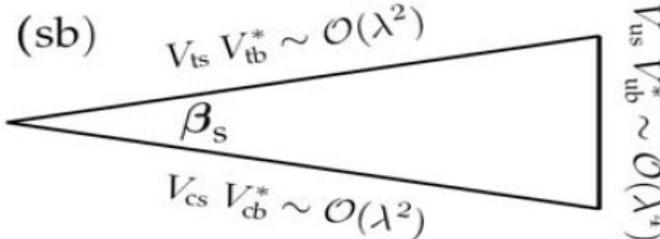
# Mesure de $\beta_s$

- Théorie
  - Système de méson de  $B_s$  & canal  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$
- Expérience
  - Sélection
  - Mesure de temps propre & angles
  - Ajustement
    - Toy MC
    - Full MC

## Introduction théorique

- La matrice CKM est une matrice  $3 \times 3$  unitaire 6 angles de unitarité

(sb)  $V_{ts} V_{tb}^* \sim \mathcal{O}(\lambda^2)$

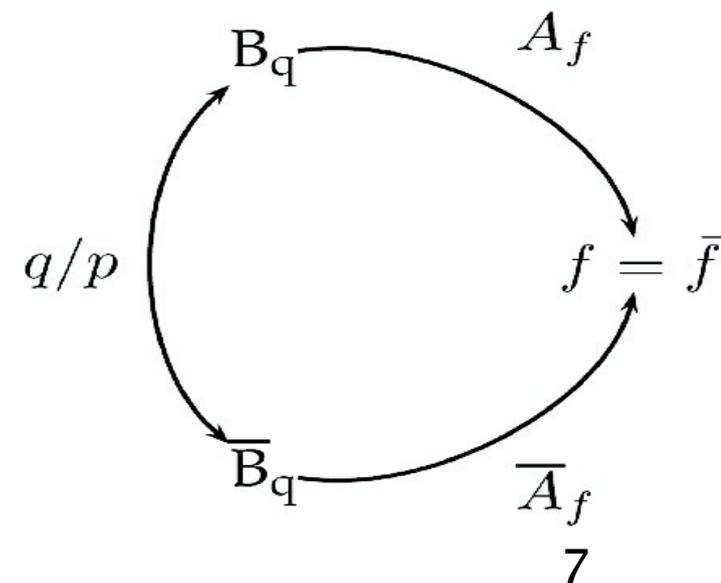


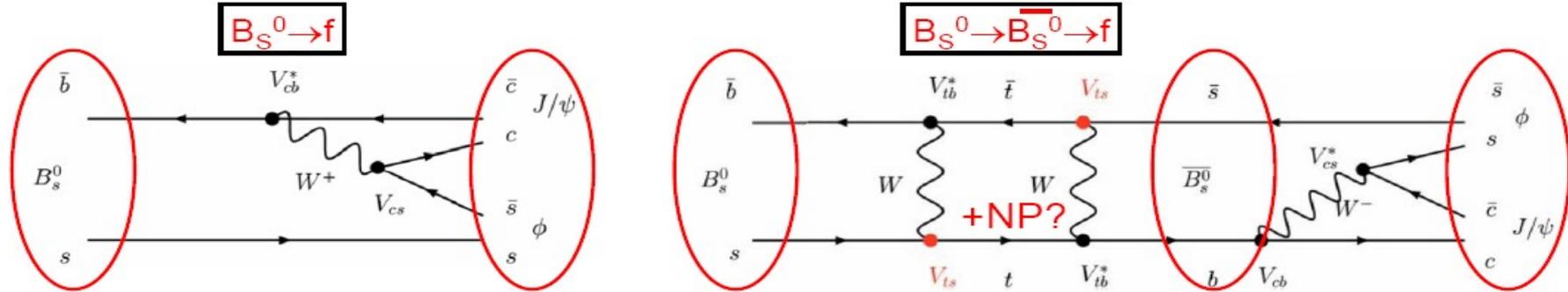
$\beta_s$

$V_{us} V_{ub}^* \sim \mathcal{O}(\lambda^4)$

$$\beta_s = \arg \left( -\frac{V_{ts} V_{tb}^*}{V_{cs} V_{cb}^*} \right)$$

- Dans le cadre de Modèle standard :  $\beta_s = 0.0368 \pm 0.0017$  rad [CKM fitter]
  - théoriquement très bien connue
- Une déviation de cette valeur implique La Nouvelle Physique !
- Dans le système de méson  $B_s$ , la transition  $B \rightarrow \bar{B}$  possible due a l'interaction faible.
- La phase  $\beta_s$  apparait dans l'interférence entre le mélange et la désintégration



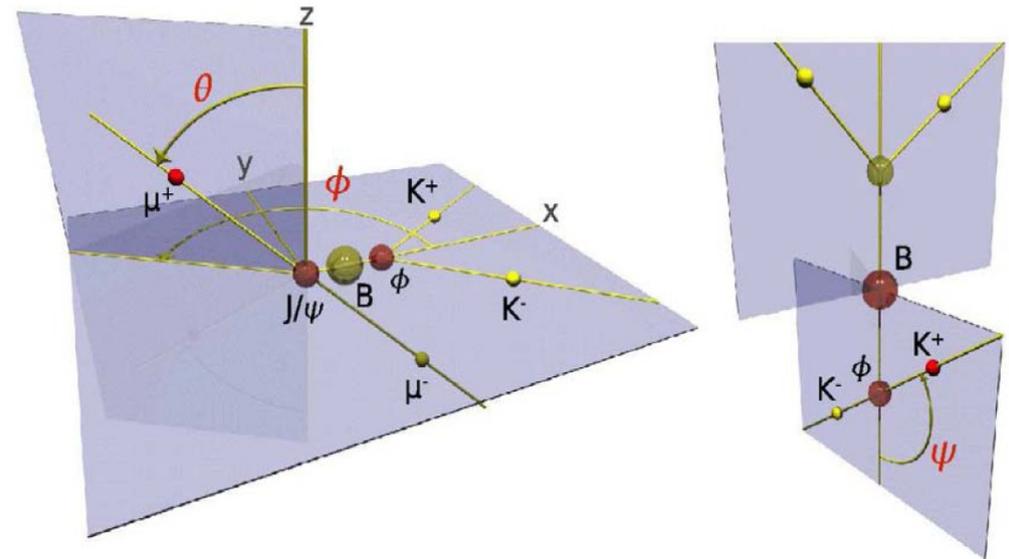
Système de méson  $B_s$  dans le canal  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$ 

Canal  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$  est le canal d'or en LHCb

- Accès direct a  $\beta_\square$  via la dépendance temporelle
- Riche stats ;  $Br_{\text{vis}} = 31 \times 10^{-6}$
- Complexité  $PS \rightarrow VV$ , implique un état final mélangé
- Analyse angulaire pour séparer ces états

- Le moment orbital de l'état final est 0,1,2.
- Mélange d'états CP paires et impaire
- Différente dépendance temporelle
- Séparation via la polarisation des produits de désintégrations

• Dans le référentiel du  $J/\psi$  ou le méson  $\Phi$  va dans la direction  $x$ , l'axe  $z$  est perpendiculaire au plan de désintégration du  $\Phi$ .



le canal  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$  : taux de désintégration

$$\frac{d^4\Gamma}{dt d\Omega} \propto \sum_k^6 h^{(k)}(t) \Theta^{(k)}(\Omega)$$

| $k$ | $h(t)$                          | $\bar{h}(t)$                                | $\Theta(\theta, \psi, \varphi)$                             |
|-----|---------------------------------|---|---|
| 1   | $ A_0(t) ^2$                    | $ \bar{A}_0(t) ^2$                          | $2 \cos^2 \psi (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi)$          |
| 2   | $ A_{  }(t) ^2$                 | $ \bar{A}_{  }(t) ^2$                       | $\sin^2 \psi (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi)$            |
| 3   | $ A_{\perp}(t) ^2$              | $ \bar{A}_{\perp}(t) ^2$                    | $\sin^2 \psi \sin^2 \theta$                                 |
| 4   | $Re\{A_0^*(t)A_{  }(t)\}$       | $Re\{\bar{A}_0^*(t)\bar{A}_{  }(t)\}$       | $\frac{1}{\sqrt{2}} \sin 2\psi \sin^2 \theta \sin 2\varphi$ |
| 5   | $Im\{A_{  }^*(t)A_{\perp}(t)\}$ | $Im\{\bar{A}_{  }^*(t)\bar{A}_{\perp}(t)\}$ | $-\sin^2 \psi \sin 2\theta \sin \varphi$                    |
| 6   | $Im\{A_0^*(t)A_{\perp}(t)\}$    | $Im\{\bar{A}_0^*(t)\bar{A}_{\perp}(t)\}$    | $\frac{1}{\sqrt{2}} \sin 2\psi \sin 2\theta \cos \varphi$   |

le canal  $B_s \rightarrow J/\psi\phi$  : dépendance temporelle

$$|A_0(t)|^2 = \frac{|A_0(0)|^2}{2} e^{-\Gamma_s t} \times \left[ (1 + \cos(2\beta_s)) e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + (1 - \cos(2\beta_s)) e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} - 2 \sin(\Delta m_s t) \sin(2\beta_s) \right]$$

$$|A_{\parallel}(t)|^2 = \frac{|A_{\parallel}(0)|^2}{2} e^{-\Gamma_s t} \times \left[ (1 + \cos(2\beta_s)) e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + (1 - \cos(2\beta_s)) e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} - 2 \sin(\Delta m_s t) \sin(2\beta_s) \right]$$

$$|A_{\perp}(t)|^2 = \frac{|A_{\perp}(0)|^2}{2} e^{-\Gamma_s t} \times \left[ (1 - \cos(2\beta_s)) e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + (1 + \cos(2\beta_s)) e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + 2 \sin(\Delta m_s t) \sin(2\beta_s) \right]$$

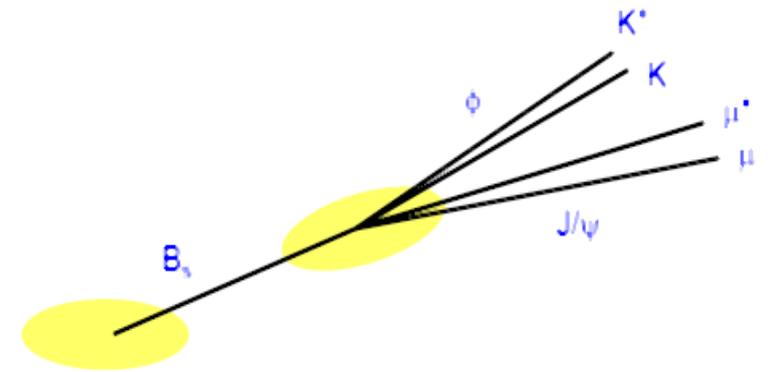
$$\text{Re}\{A_0^*(t)A_{\parallel}(t)\} = \frac{1}{2}|A_0(0)||A_{\parallel}(0)| \cos(\delta_2 - \delta_1) e^{-\Gamma_s t} \times \left[ (1 + \cos(2\beta_s)) e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + (1 - \cos(2\beta_s)) e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} - 2 \sin(\Delta m_s t) \sin(2\beta_s) \right]$$

$$\text{Im}\{A_{\parallel}^*(t)A_{\perp}(t)\} = |A_{\parallel}(0)||A_{\perp}(0)| e^{-\Gamma_s t} \times \left[ \sin \delta_1 \cos(\Delta m_s t) - \cos \delta_1 \sin(\Delta m_s t) \cos(2\beta_s) + \frac{1}{2} \left( e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} - e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} \right) \cos \delta_1 \sin(2\beta_s) \right]$$

$$\text{Im}\{A_0^*(t)A_{\perp}(t)\} = |A_0(0)||A_{\perp}(0)| e^{-\Gamma_s t} \times \left[ \sin \delta_2 \cos(\Delta m_s t) - \cos \delta_2 \sin(\Delta m_s t) \cos(2\beta_s) + \frac{1}{2} \left( e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} - e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} \right) \cos \delta_2 \sin(2\beta_s) \right]$$

## Comment mesurer $\beta_s$

- 1- Déclencher + sélectionner  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$
- 2- Mesure de temps propre
  - Résolution , acceptances , ..
- 3- Mesure des angles
  - Résolution , acceptances , ..
- 4- Étiquetage de saveur de mésons  $B_s$  produits
  - Coté opposé , coté signalé
- 5- Ajustement de fonction de vraisemblance de taux de désintégration des mésons B
  - 6 observables ( temps propre , 3 angles , saveurs , mass )
  - 8 paramètres physiques + paramètres de détecteurs
- 6- Systématiques



## Comment mesurer $\beta_s$

1- Déclencher + sélectionner  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$

2- Mesure de temps propre

- Résolution , acceptances , ..

3- Mesure des angles

- Résolution , acceptances , ..

4- Étiquetage de saveur de mésons B produits

- Coté opposé , coté signale

5- Ajustement de fonction de vraisemblance de taux de désintégration des mésons B

- 6 observables ( temps propre , 3 angles , saveurs , mass )
- 8 paramètres physiques + paramètres de détecteurs

6- Systématiques

Ma contribution !

## canal $B_s \rightarrow J/\psi \phi$ : sélection

$J/\psi$  :

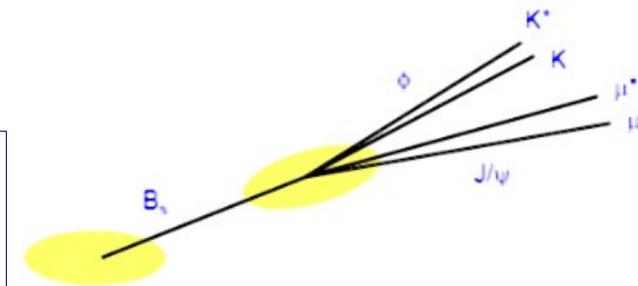
$\text{TrChi2} < 5$  ,  $\text{Pt}(\text{mus}) > 500 \text{ MeV}$  ,  $\text{DLL}(\mu-\pi) > -5$  ,  $\text{VtxChi} < 6$  ,  $\text{Pt}(J/\psi) > 1 \text{ GeV}$

$\phi$  :

$\text{DLL}(K-\pi) > 0$  ,  $\text{VtxChi2} < 10$  ,  $\text{Pt}(\phi) > 1 \text{ GeV}$  ,  $\text{MssChi2}(\text{phi}) < 9$  ,  $\text{P}(K_s) > 2 \text{ GeV}$

$B_s$  :

$(\text{SIPS} , \text{VtxChi2}) < 5$



Types de Bruits :

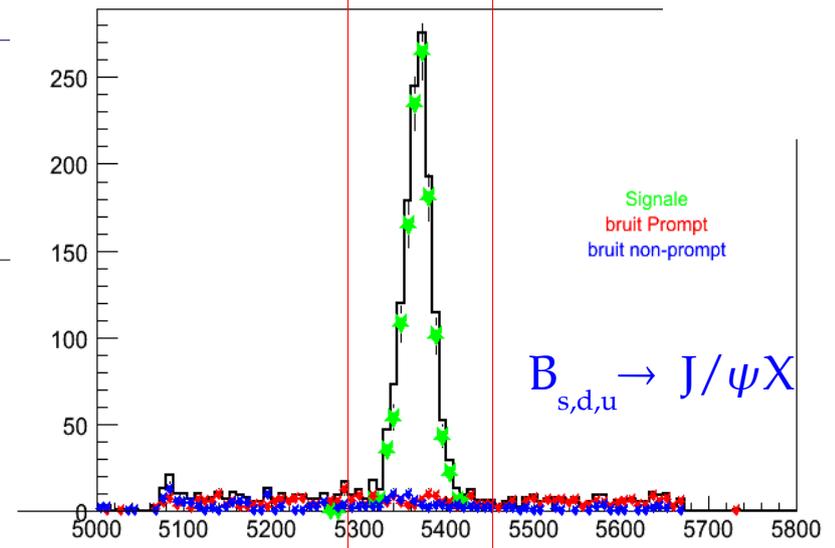
1- inclusive b (B/S = 1.5)

2- inclusive  $J/\psi$  (B/S = 1.5)

3-  $B_{s,d,u} \rightarrow J/\psi X$  (B/S = 0.4)

4- Minimum Bias

Mass Distribution



50 MeV

Sélection non-biaisé

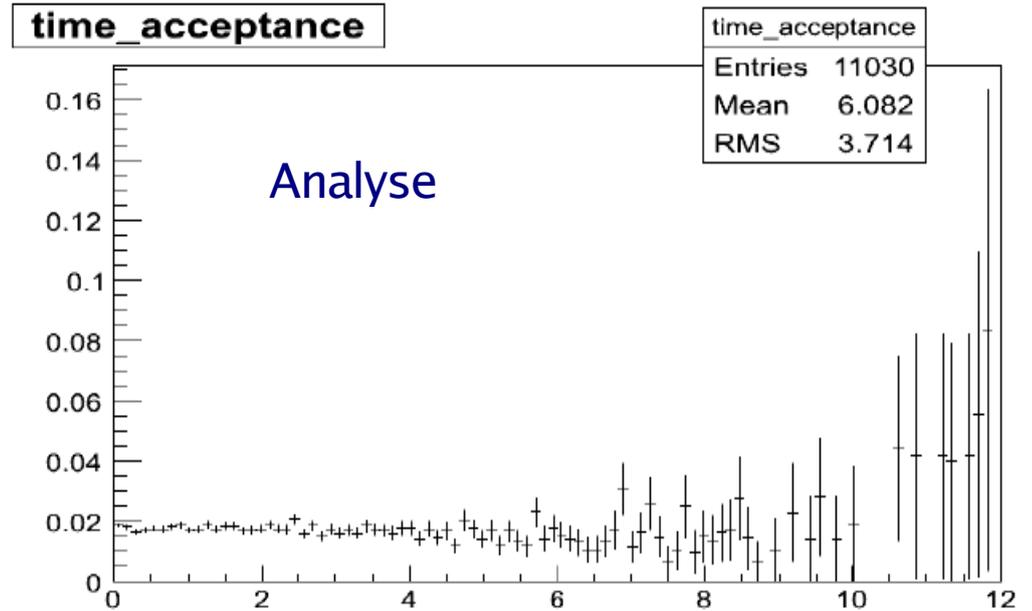
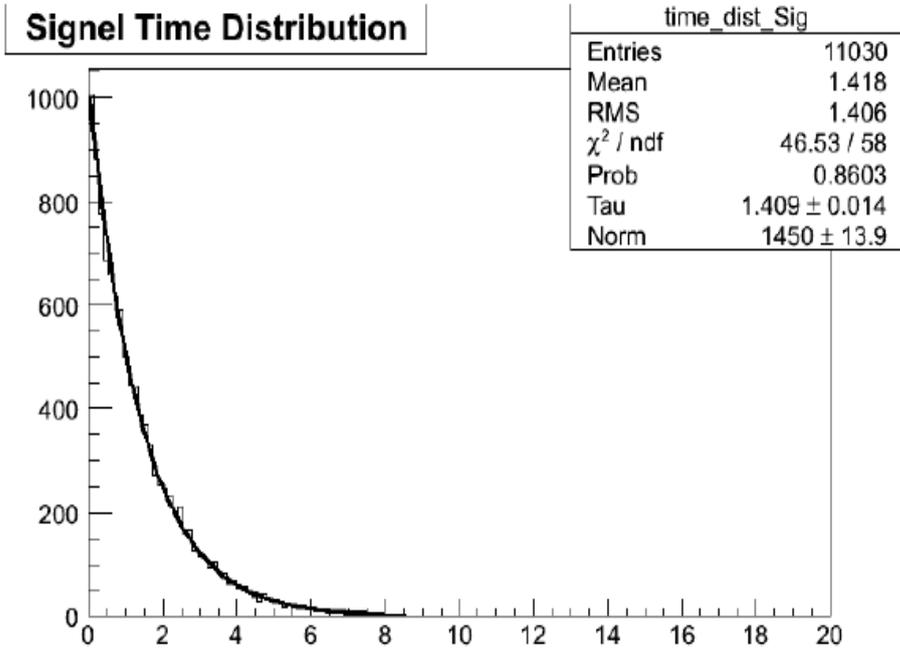
Le bruit se compose de :

1- Prompt

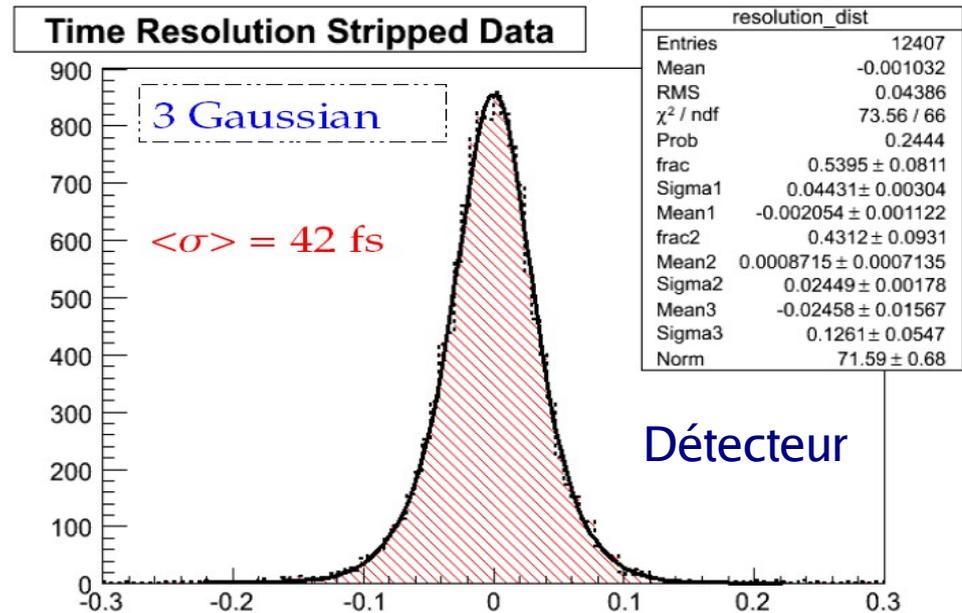
2- non-Prompt

| Echantillon | Eff (Sel) Totale % | Annual Yield | Eff (Tag) %     |
|-------------|--------------------|--------------|-----------------|
| UnStripped  | 2.1 %              | 131250       | $61.7 \pm 0.11$ |
| Stripped    | 2.4 %              | 150000       | $67.0 \pm 0.4$  |

# Mesurer le temps propre et les angles

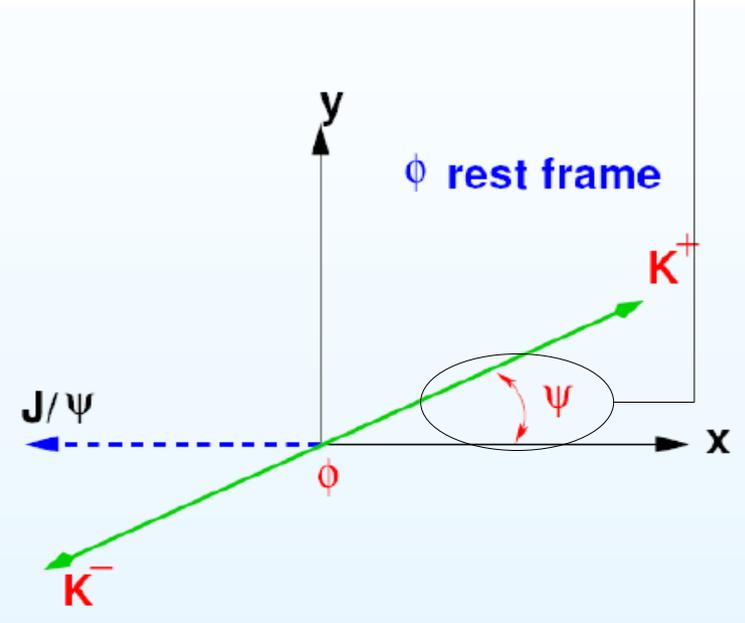
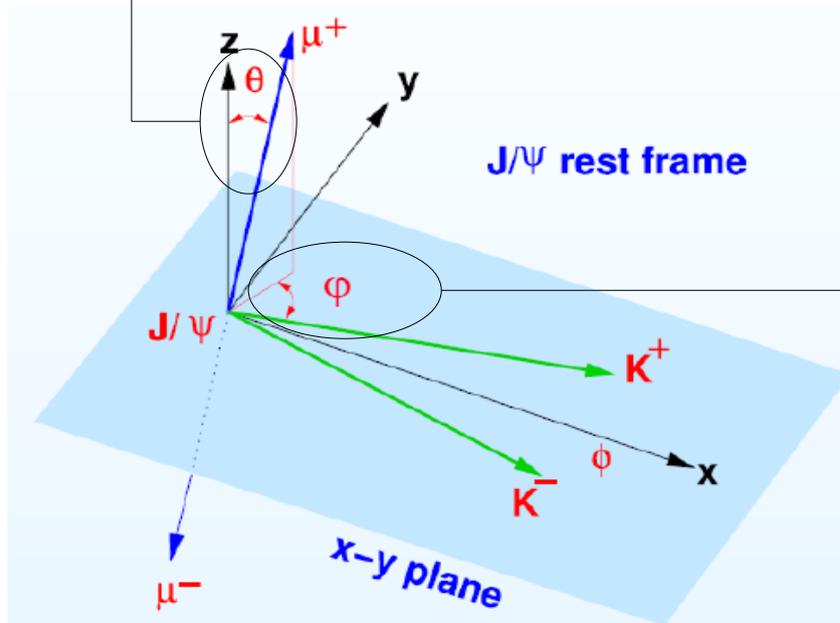
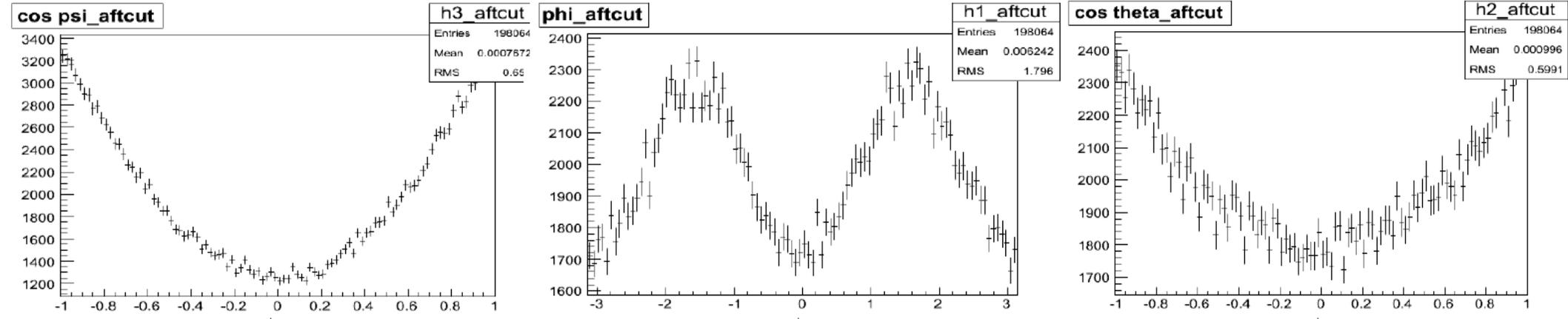


Acceptance sur le temps de vie plate  
Excellente résolution en temps

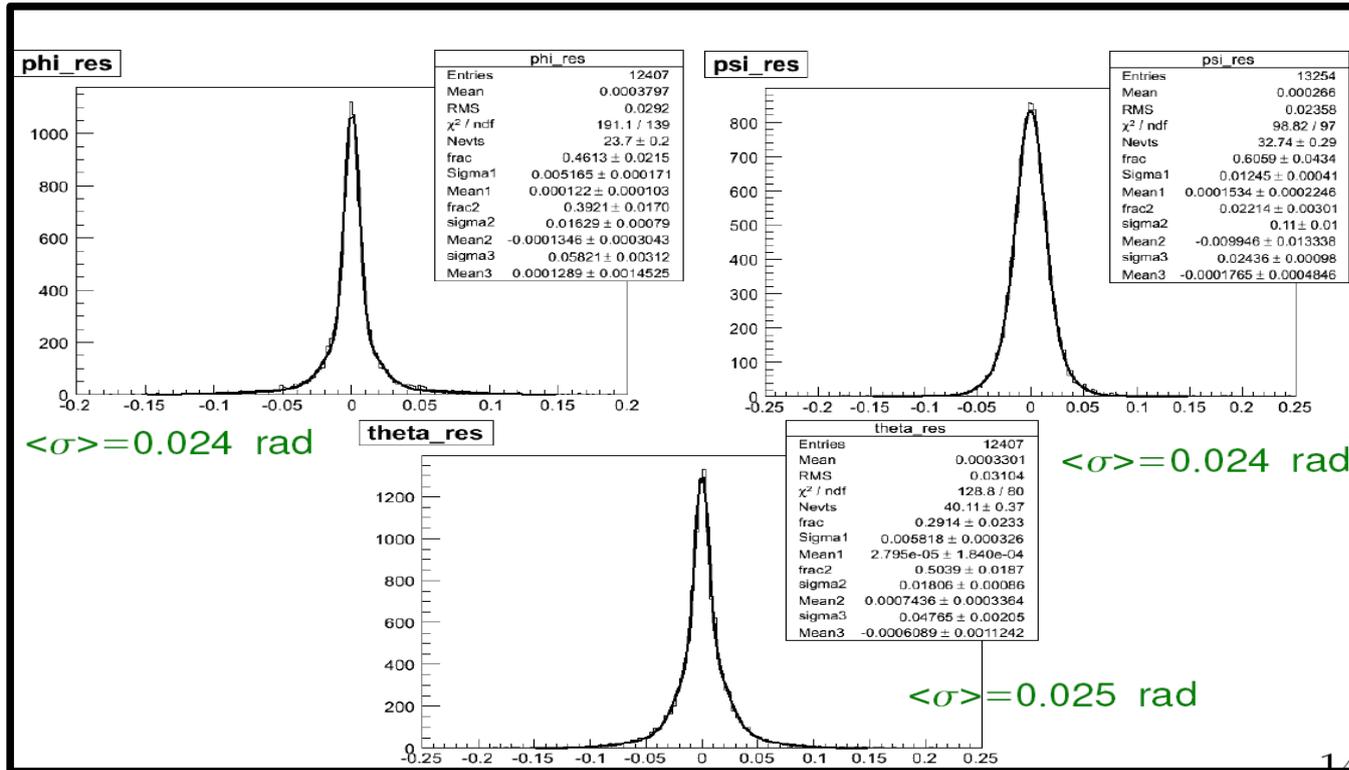


- Resolution = mesuré - vraie
- Acceptance = apres Coupures / theorie

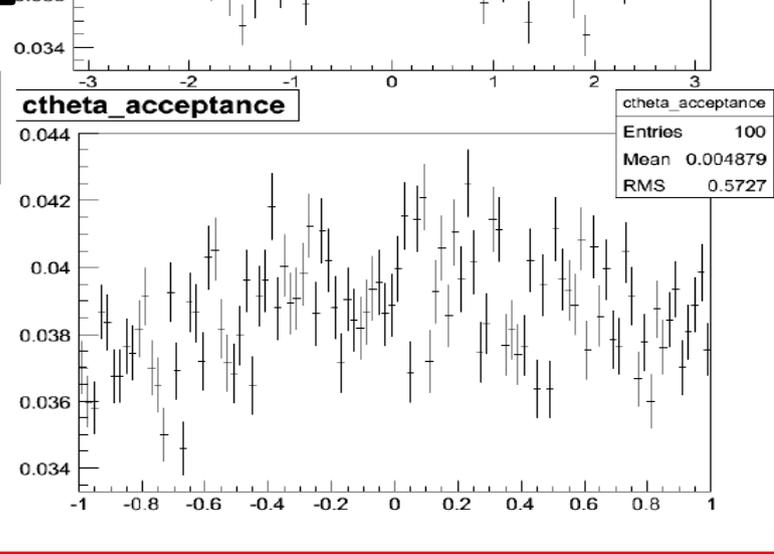
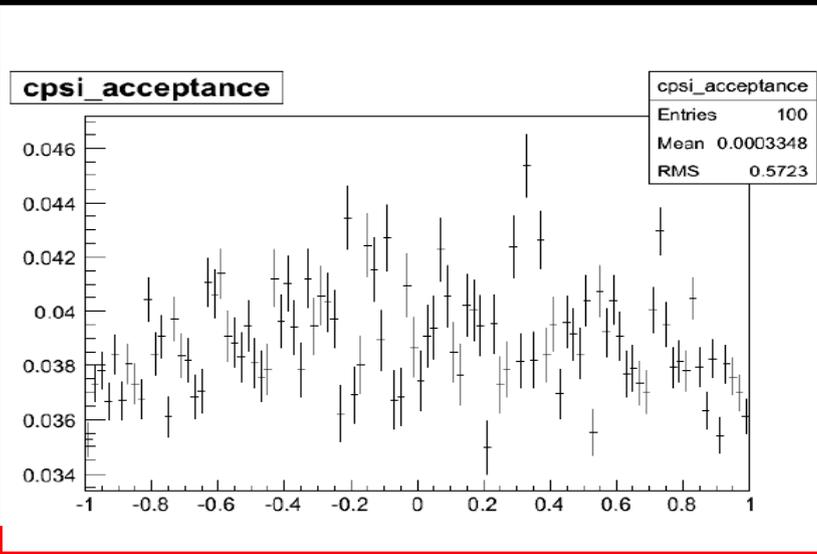
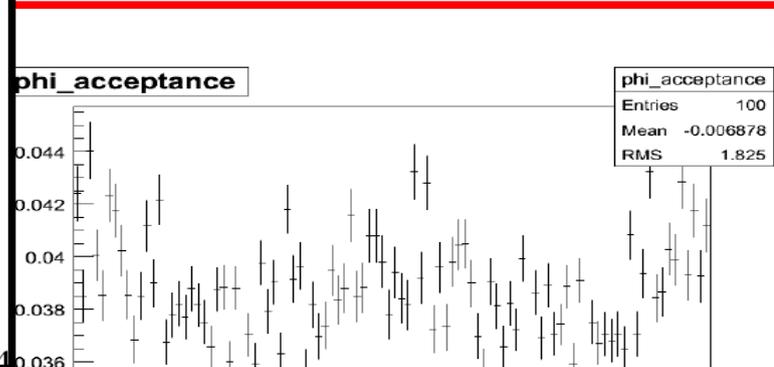
# Mesurer le temps propre et les angles



# Mesurer le temps propre et les angles



Bonne résolution



Acceptances pas plates

- Tester la sensibilité aux paramètres physiques
- Mesurer les effets de détecteurs et sélection sur ces sensibilité
- Appliquer des Testes statistiques ( biais , goodness-of-the-fit,...)

Toy MC : (7 paramètres , 5 variables) [Analyse angulaire complet ]

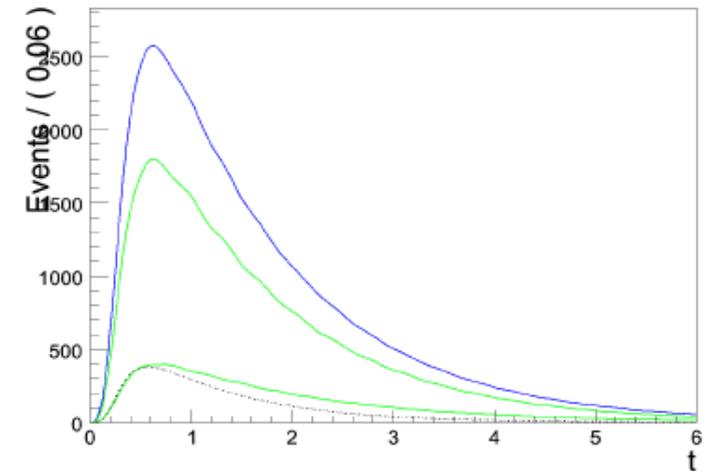
›Cas Idéal (Signale)

›Cas Résolution

(signale  $\otimes$  Gaussienne)

›Cas Bruit (Signal + bruit (B/S=0.12) )

A RooPlot of "t"



Modèle simple

| Parameters     | parameter at input | Ideal  | Resolution | Bruit  |
|----------------|--------------------|--------|------------|--------|
| $\delta_1$     | 0,000              | 0.071  | 0.08       | 0.083  |
| $\delta_2$     | 3,140              | 0.064  | 0,068      | 0.075  |
| $\Delta\Gamma$ | 0.1                | 0.0074 | 0,008      | 0.0079 |
| $\Gamma$       | 0,680              | 0,0025 | 0,026      | 0.0027 |
| $2\beta_s$     | -0.04              | 0.019  | 0.022      | 0.022  |
| $R_\perp$      | 0,200              | 0,0032 | 0,003      | 0.0035 |
| $R_0$          | 0,600              | 0,0025 | 0,003      | 0.0027 |

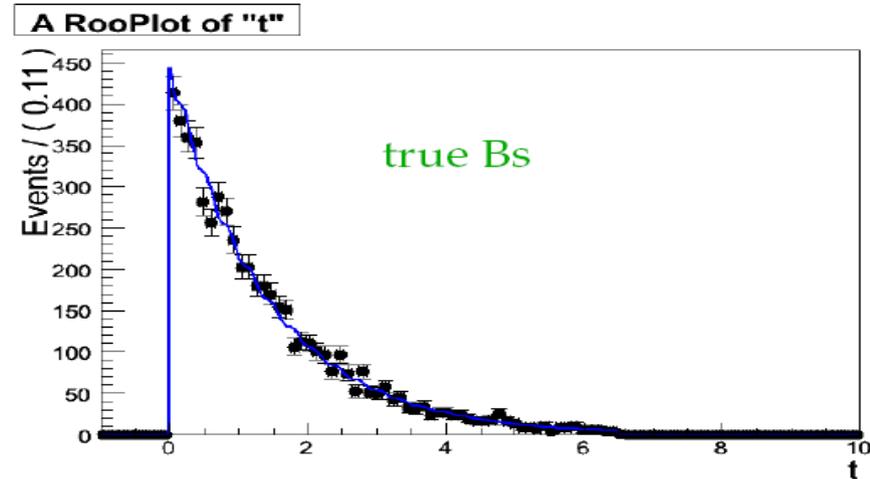
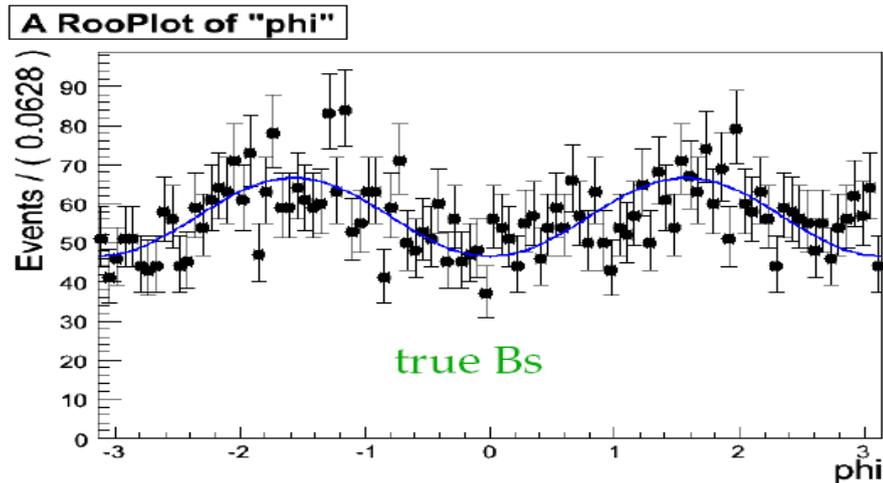
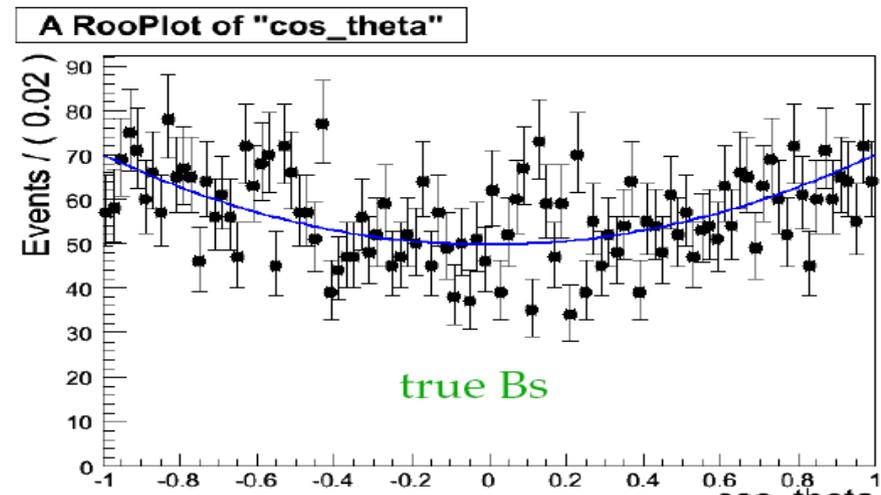
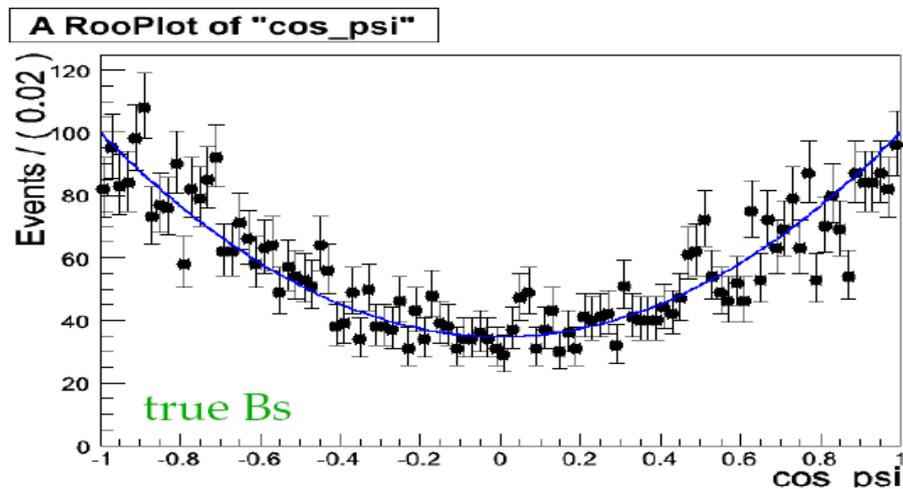
$$\sigma(2\beta_s) = 0.022 \text{ rad}$$

- 800 expériences
- $2 \text{ fb}^{-1}$  (131k) = une année nominale de prise de données

## Ajustement : Full MC

L'estimation d'erreur utilisant la **simulation complète** (DC06)

- La vérité MC
- Sans Bruit
- 12k après sélection  $\sim 0.2 \text{ fb}^{-1}$



## Ajustement : Full MC

| Parameters     | parameter at input | output  | errors | sigma |
|----------------|--------------------|---------|--------|-------|
| $\delta_1$     | -2,670             | -2,6400 | 0,050  | 0,600 |
| $\delta_2$     | -0,170             | -0,1930 | 0,050  | 0,400 |
| $\Delta\Gamma$ | 0,069              | 0,0076  | 0,046  | 1,300 |
| $\Gamma$       | 0,685              | 0,0700  | 0,014  | 1,700 |
| $2\beta_s$     | 0.04               | -0,0520 | 0,018  | 5,000 |
| $R_{\perp}$    | 0,160              | 0,1800  | 0,012  | 1,800 |
| $R_0$          | 0,600              | 0,5600  | 0,009  | 4,300 |

L'acceptance angulaire affecte l'estimation sur les parametres  $\beta_s$  et  $R_0$

Études en cours.

## Conclusion

- Travail effectuée:
  - Sélection de  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$  dans la simulation complète
  - Pas de biais sur le temps de vie
  - Distributions angulaires biaisées
  - Ajustement de  $\beta_s$  par une analyse angulaire dépendante du temps
    - Au niveau toy MC et simulation complète
    - Difficulté liées aux grand nombre d'observables (5) et paramètres (7)
      - Chaque observable affectée différemment par la sélection
      - Ça marche !!
- LHCb commence la prise de données cet été
  - On attend:  $0.5 \text{ fb}^{-1}$  fin 2009
- Mesure de  $\beta_s$  une des mesure clé dans LHCb
- CDF+D0 fin du run II:  $\sigma(2\beta_s) = 0.14 \text{ rad}$ 
  - LHCb  $2 \text{ fb}^{-1}$ :  $\sigma(2\beta_s) = 0.022 \text{ rad}$ 
    - Si  $\beta_s = 0.57$ (D0), LHCb la mesure avec  $0.1 \text{ fb}^{-1}$

## Perspectives

- Estimation de sensibilité sur les paramètres de VCP, notamment  $\beta_s$
- Améliorer l'analyse (Étiquetage événement par événement, résolution événement par événement,..)
- Étudier une sélection alternative en autorisant des coupures sur le paramètres d'impact des traces
- D'autres canaux de CP ( $B_s \rightarrow D_s D_s$ ,  $B_s \rightarrow \phi \phi$ ,  $B_s \rightarrow \eta \phi$ ,...)

Backups .....

## Resultats de CDF et D0

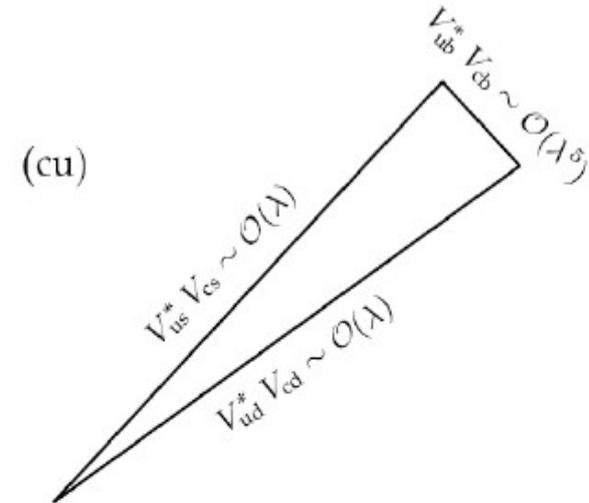
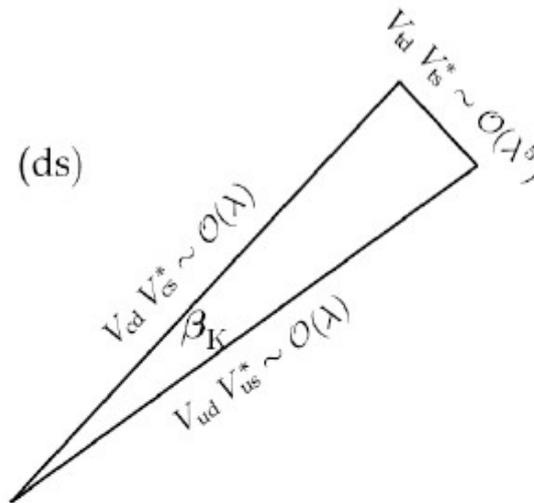
|                                  | CDF                 | D0                    |
|----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Integrated lumi                  | 1,35                | 2,8                   |
| Selection                        | Nnet                | cut Based             |
| S/B                              | ~1                  | ~1/4                  |
| $\epsilon_{\text{tag}} (1-2w)^2$ | 4,81%               | 4,68%                 |
| $2\beta_s$                       | [0.32,2.82] @68 %cl | $0.57^{+0.24}_{-0.3}$ |

## Comparaison de sensibilité sur $\beta_s$ de entre les expériences LHC

|                   | Atlas | CMS  | LHCb |
|-------------------|-------|------|------|
| lumi integre      | 2,5   | 2,5  | 0,5  |
| N.evets           | 23K   | 27K  | 131K |
| Res.temps         | 83    | 77   | 36   |
| B/S               | 0,3   | 0,33 | 0,12 |
| etiquetage        | 4,6   | 0    | 6,6  |
| $\sigma(\beta_s)$ | 0,16  | 0,18 | 0,04 |

# Les Triangles d'unitarité

$$\begin{aligned}
 \text{(ds)} \quad & V_{ud}V_{us}^* + V_{cd}V_{cs}^* + V_{td}V_{ts}^* = 0 \\
 \text{(sb)} \quad & V_{us}V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* = 0 \\
 \text{(db)} \quad & V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \\
 \text{(cu)} \quad & V_{ud}^*V_{cd} + V_{us}^*V_{cs} + V_{ub}^*V_{cb} = 0 \\
 \text{(tc)} \quad & V_{cd}^*V_{td} + V_{cs}^*V_{ts} + V_{cb}^*V_{tb} = 0 \\
 \text{(tu)} \quad & V_{ud}^*V_{td} + V_{us}^*V_{ts} + V_{ub}^*V_{tb} = 0
 \end{aligned}$$

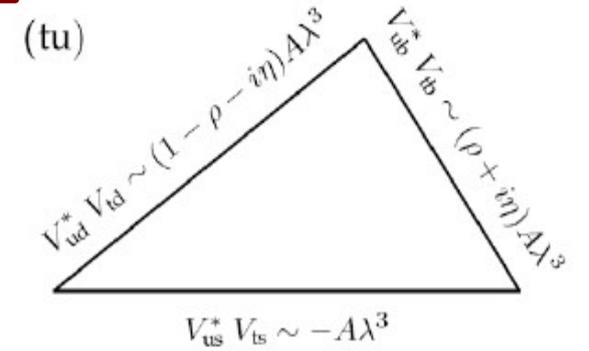
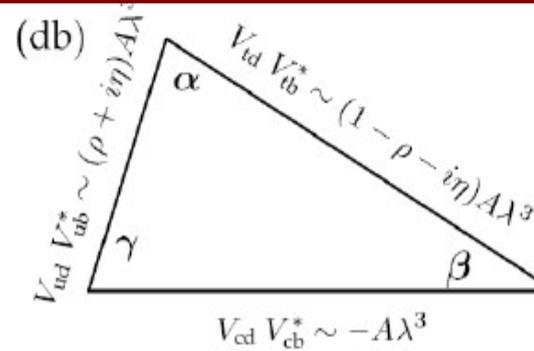
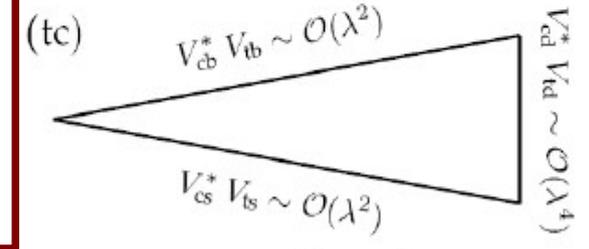
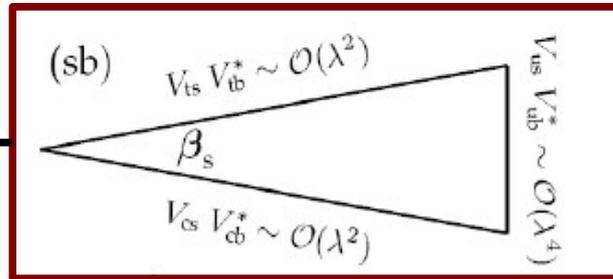


$$\gamma = \arg\left(-\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*}\right)$$

$$\beta = \arg\left(-\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right)$$

$$\beta_s = \arg\left(-\frac{V_{ts}V_{tb}^*}{V_{cs}V_{cb}^*}\right)$$

$$\beta_K = \arg\left(-\frac{V_{us}V_{ud}^*}{V_{cs}V_{cd}^*}\right)$$



## Echantillon de bruit

| Echantillon UnStripped     | N Events (AC) | Eff (Sel) Totale % | Eff (Tag) % |
|----------------------------|---------------|--------------------|-------------|
| inclusive bb               | 2             | ~0.001             | 50          |
| inclusive $J/\psi$         | 649           | 0.04               | 39          |
| $B_s \rightarrow J/\psi X$ | 2928          | 0.05               | 65.1        |
| $B_d \rightarrow J/\psi X$ | 1351          | 0.05               | 72.7        |
| $B_u \rightarrow J/\psi X$ | 1411          | 0.045              | 74          |
| Minimum Bais               | 0             | 0.                 | 0.          |

La Pdf de canal  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$  (B)

$$|\bar{A}_0(t)|^2 = \frac{|A_0(0)|^2}{2} e^{-\Gamma_s t} \times \left[ (1 + \cos(2\beta_s)) e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + (1 - \cos(2\beta_s)) e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + 2 \sin(\Delta m_s t) \sin(2\beta_s) \right]$$

$$|\bar{A}_\parallel(t)|^2 = \frac{|A_\parallel(0)|^2}{2} e^{-\Gamma_s t} \times \left[ (1 + \cos(2\beta_s)) e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + (1 - \cos(2\beta_s)) e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + 2 \sin(\Delta m_s t) \sin(2\beta_s) \right]$$

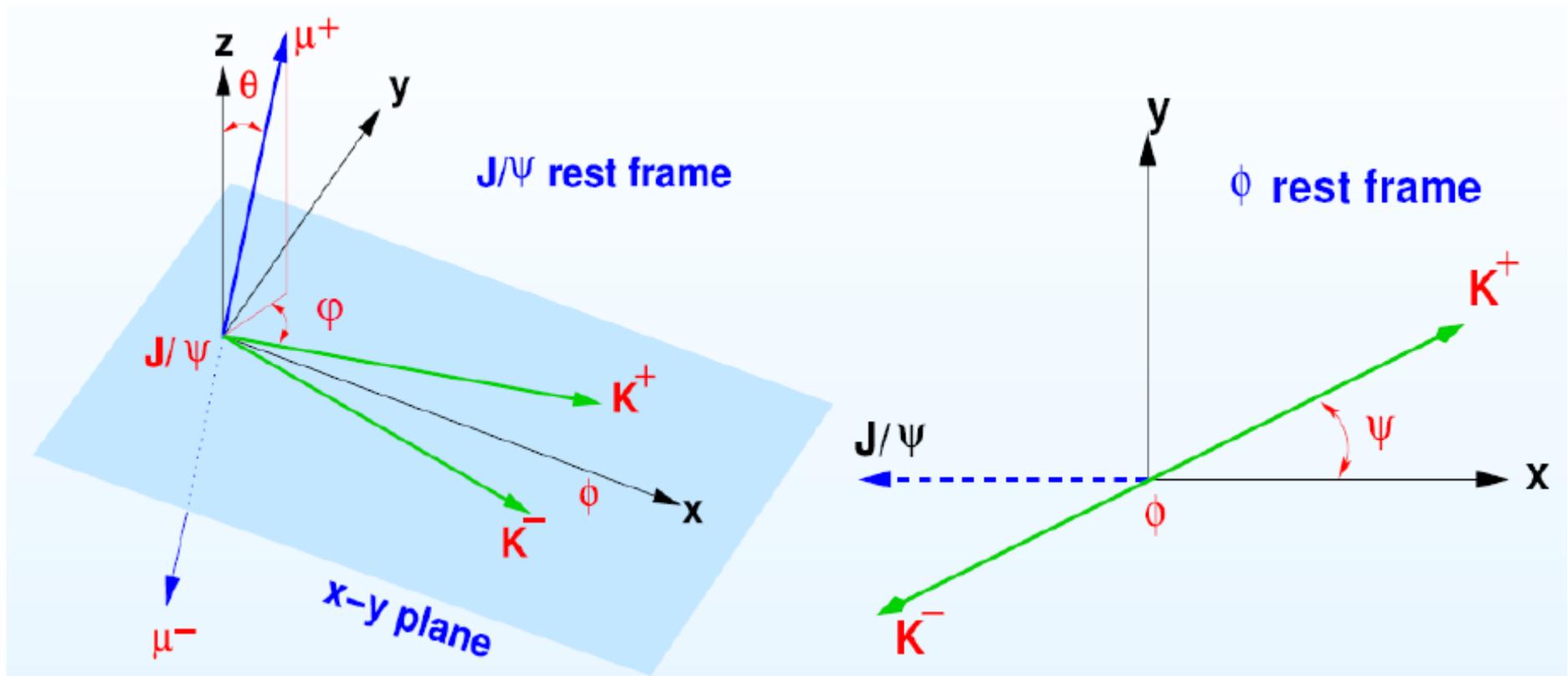
$$|\bar{A}_\perp(t)|^2 = \frac{|A_\perp(0)|^2}{2} e^{-\Gamma_s t} \times \left[ (1 - \cos(2\beta_s)) e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + (1 + \cos(2\beta_s)) e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} - 2 \sin(\Delta m_s t) \sin(2\beta_s) \right]$$

$$\text{Re}\{\bar{A}_0^*(t)\bar{A}_\parallel(t)\} = \frac{1}{2} |A_0(0)||A_\parallel(0)| \cos(\delta_2 - \delta_1) e^{-\Gamma_s t} \times \left[ (1 + \cos(2\beta_s)) e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + (1 - \cos(2\beta_s)) e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} + 2 \sin(\Delta m_s t) \sin(2\beta_s) \right]$$

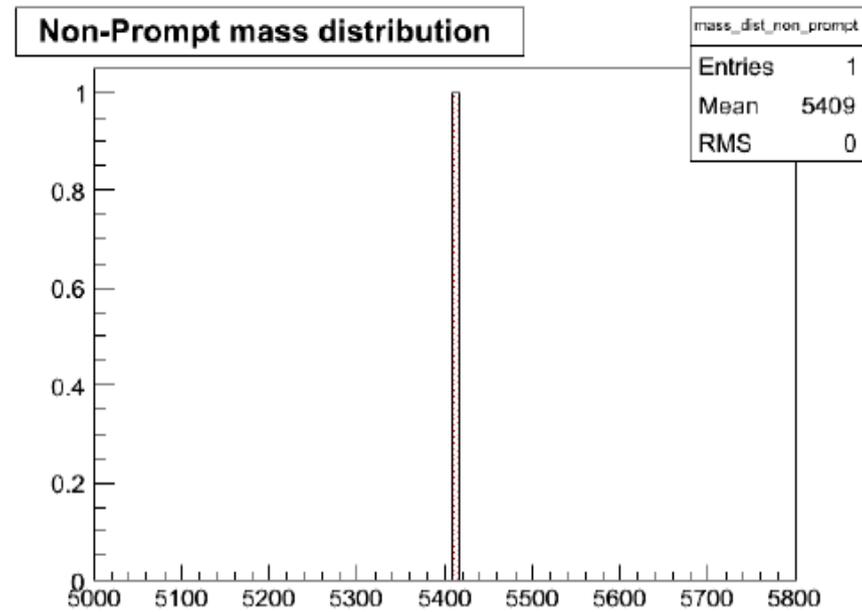
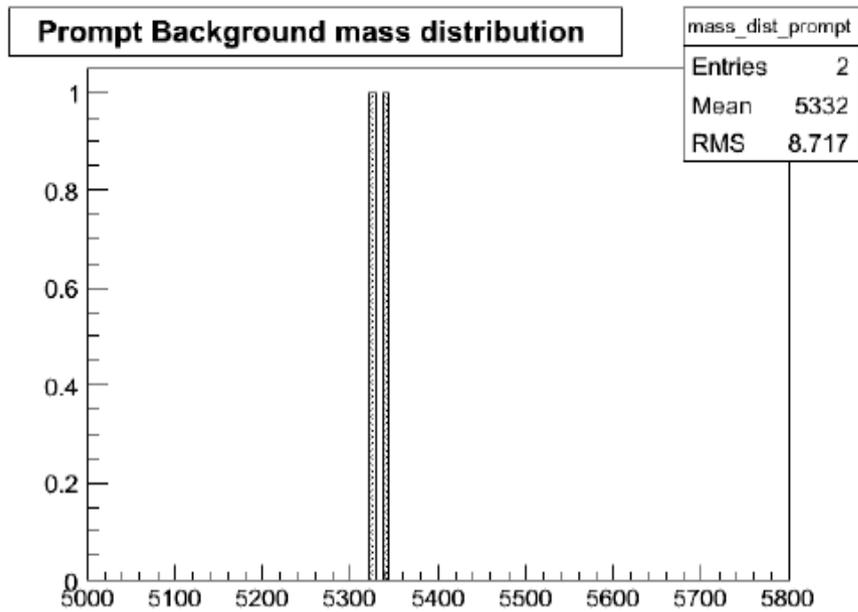
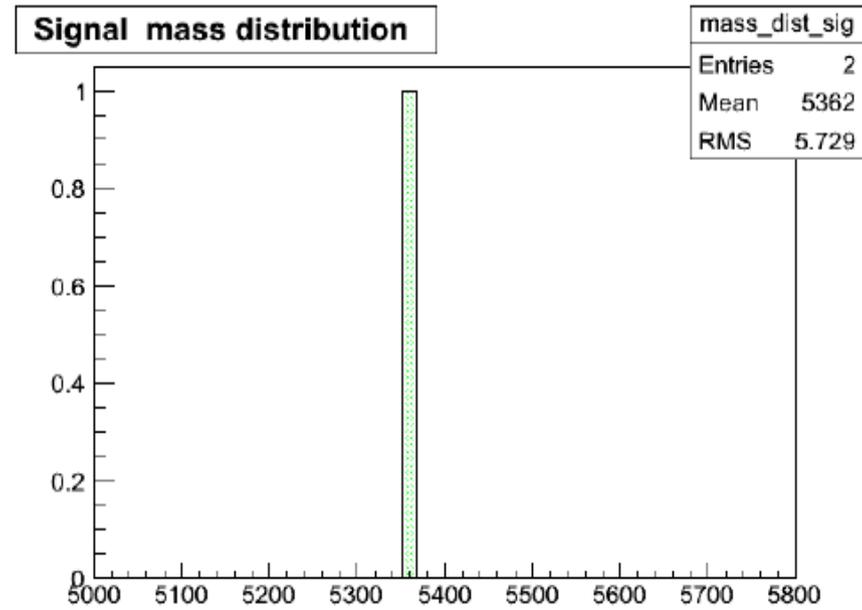
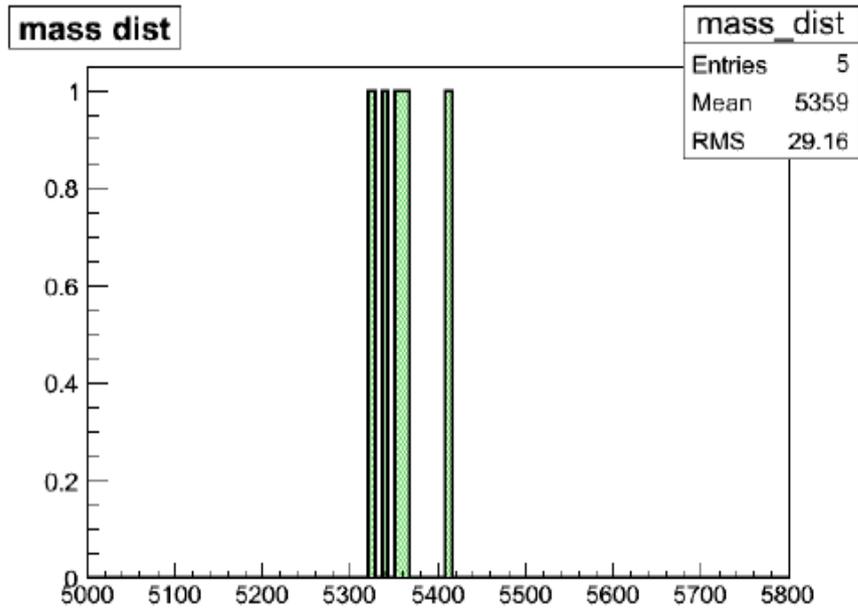
$$\text{Im}\{\bar{A}_\parallel^*(t)\bar{A}_\perp(t)\} = |A_\parallel(0)||A_\perp(0)| e^{-\Gamma_s t} \times \left[ -\sin \delta_1 \cos(\Delta m_s t) + \cos \delta_1 \sin(\Delta m_s t) \cos(2\beta_s) + \frac{1}{2} \left( e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} - e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} \right) \cos \delta_1 \sin(2\beta_s) \right]$$

$$\text{Im}\{\bar{A}_0^*(t)\bar{A}_\perp(t)\} = |A_0(0)||A_\perp(0)| e^{-\Gamma_s t} \times \left[ -\sin \delta_2 \cos(\Delta m_s t) + \cos \delta_2 \sin(\Delta m_s t) \cos(2\beta_s) + \frac{1}{2} \left( e^{\frac{\Delta\Gamma}{2}t} - e^{-\frac{\Delta\Gamma}{2}t} \right) \cos \delta_2 \sin(2\beta_s) \right]$$

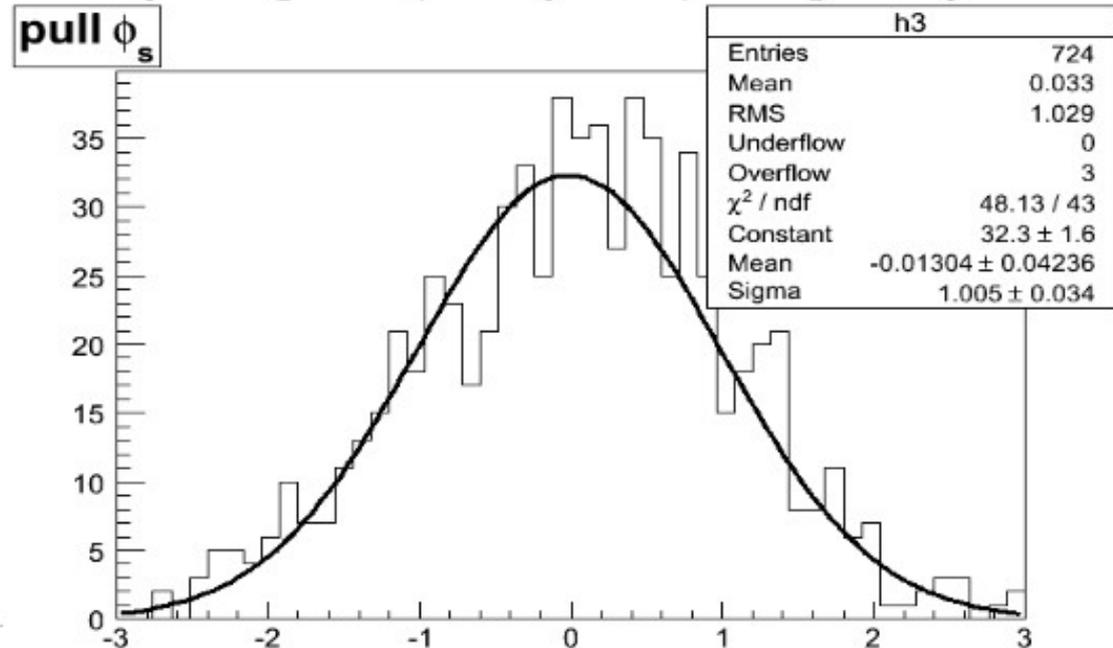
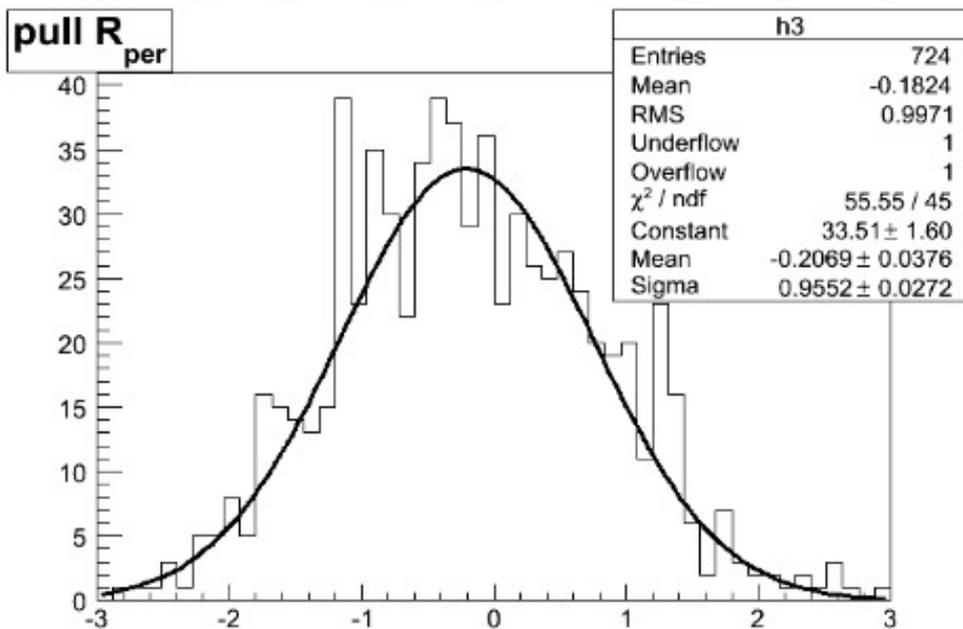
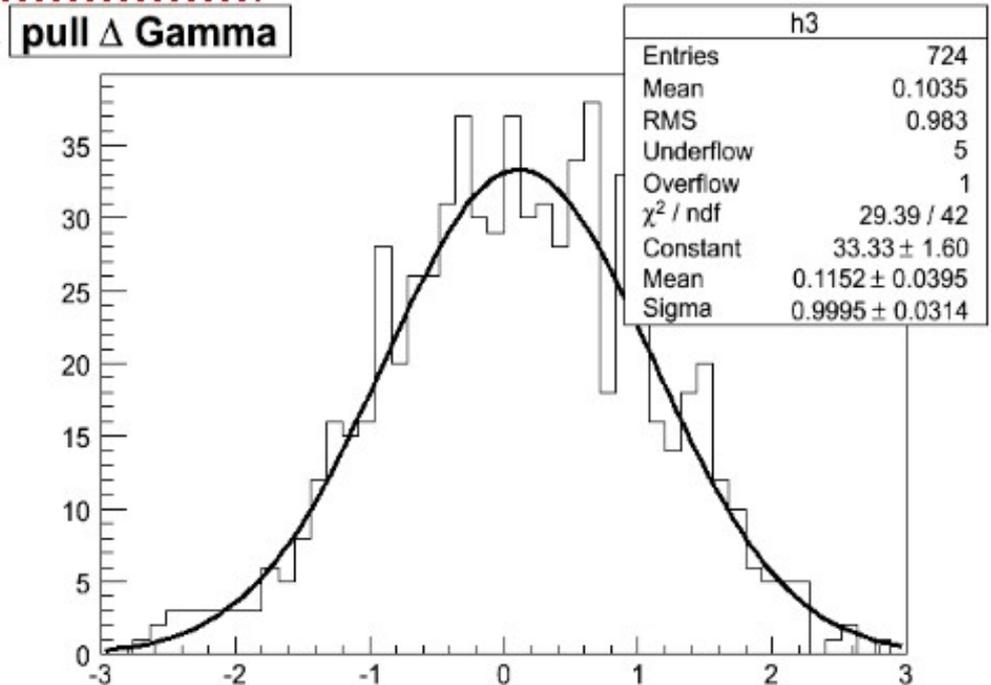
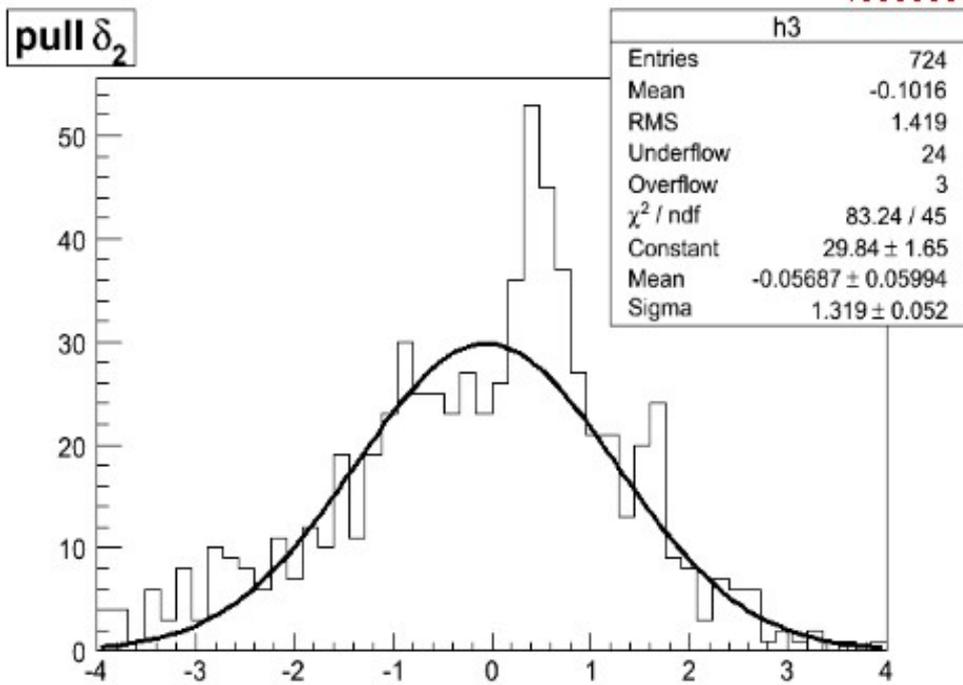
# Définitions des angles de transversité



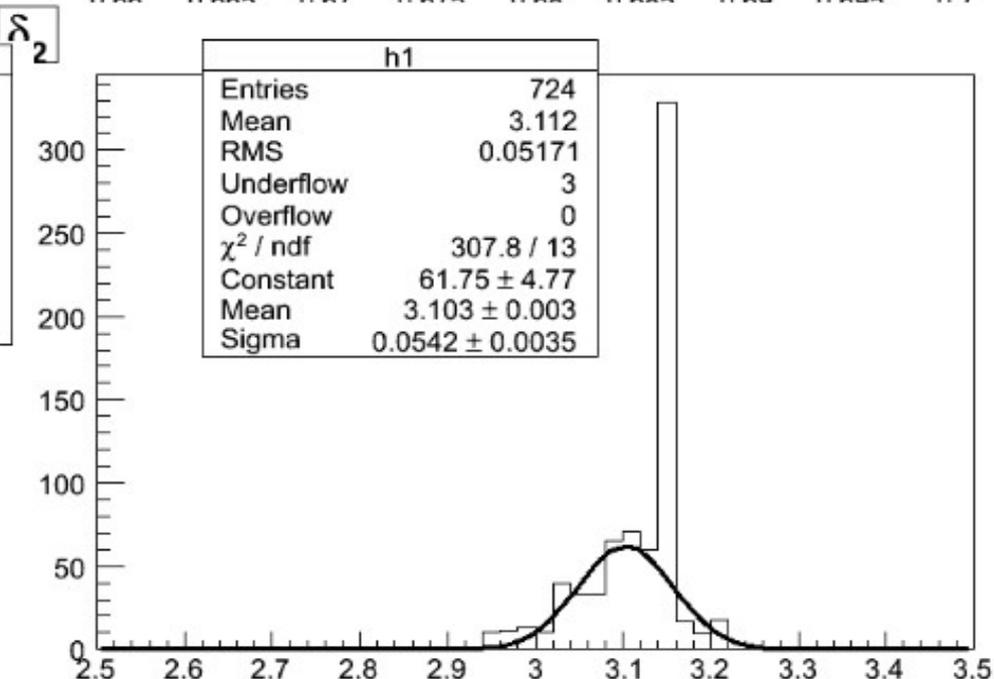
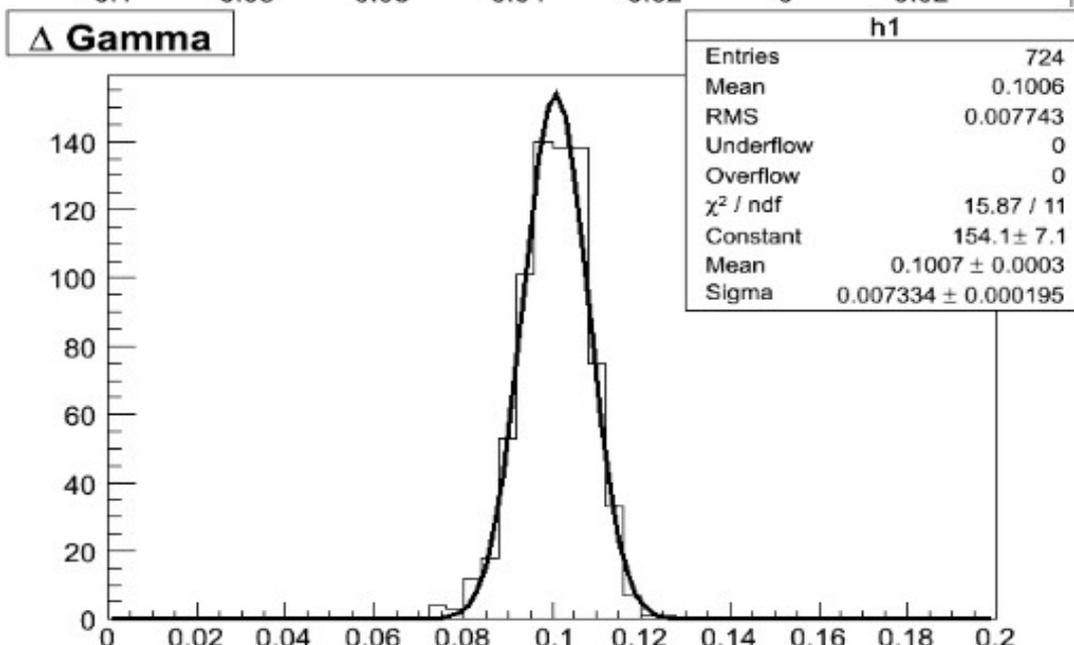
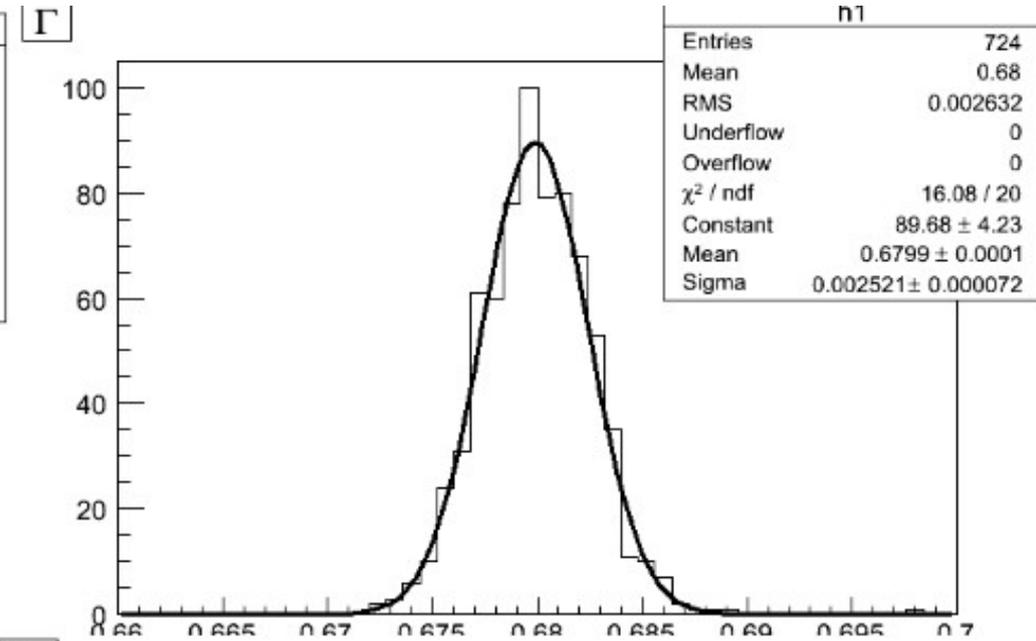
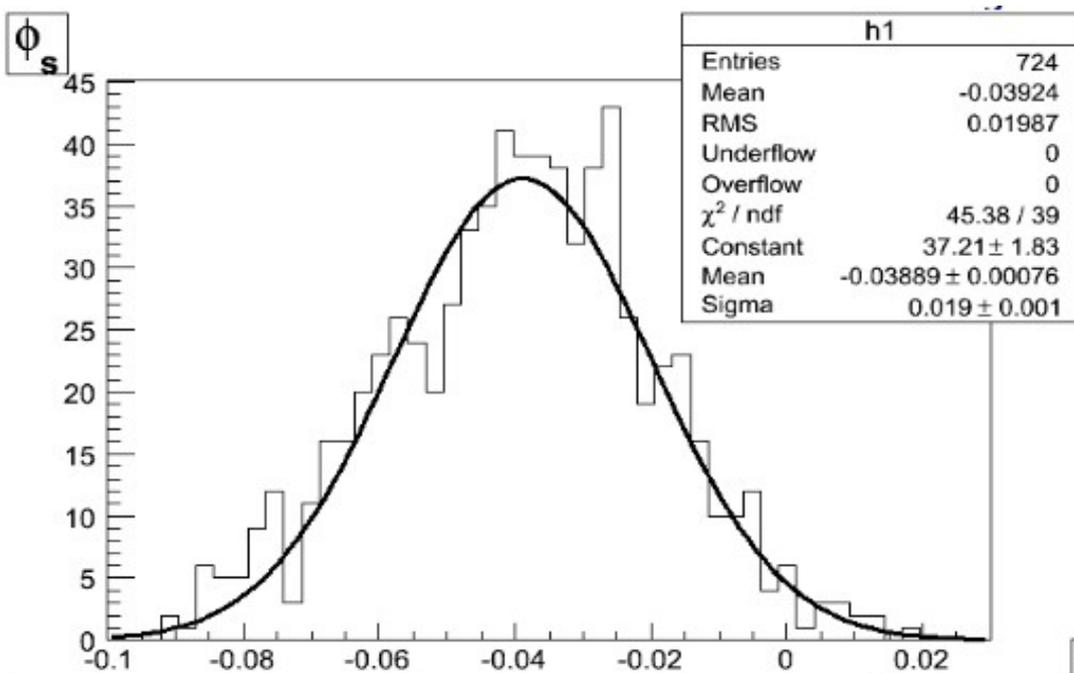
# Inclusive b (Masse)



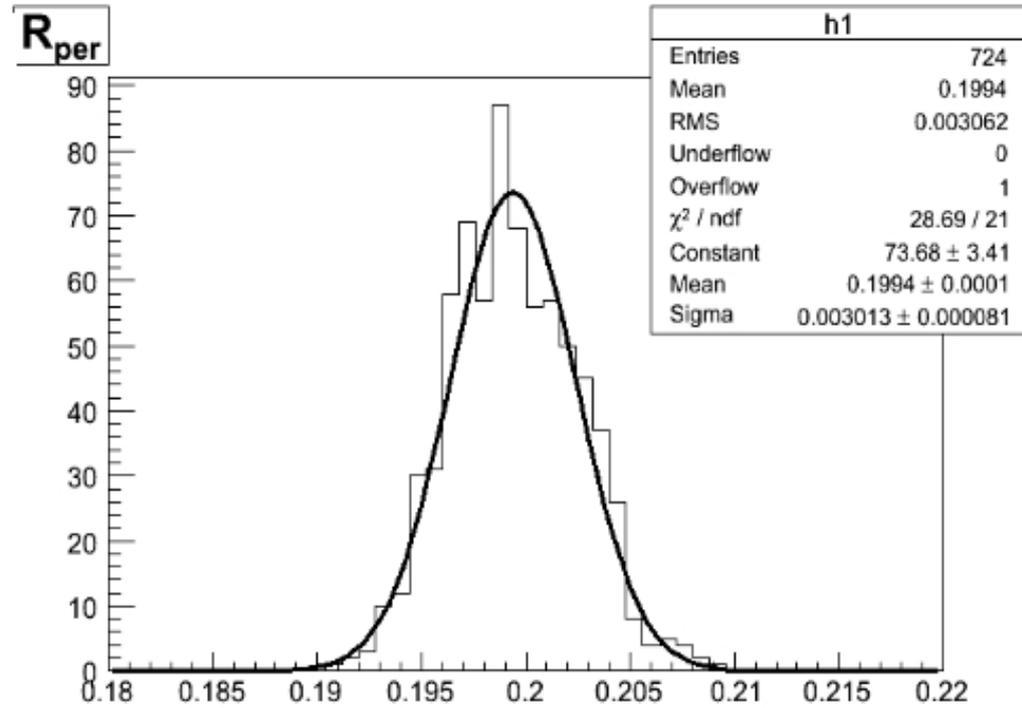
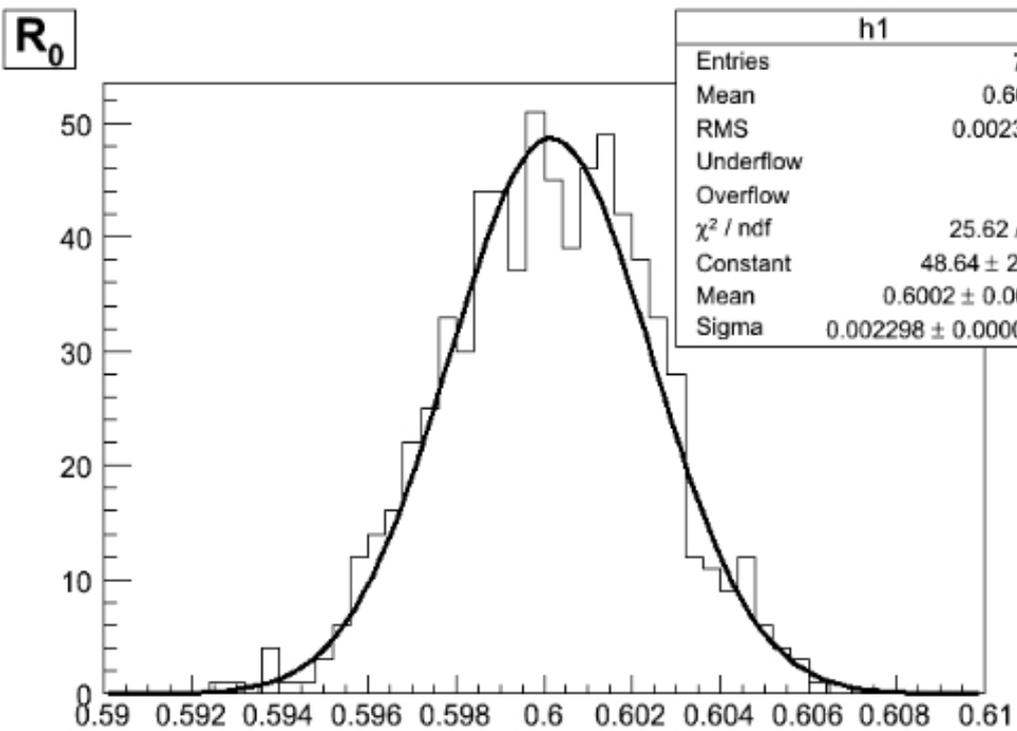
# Les Pulls



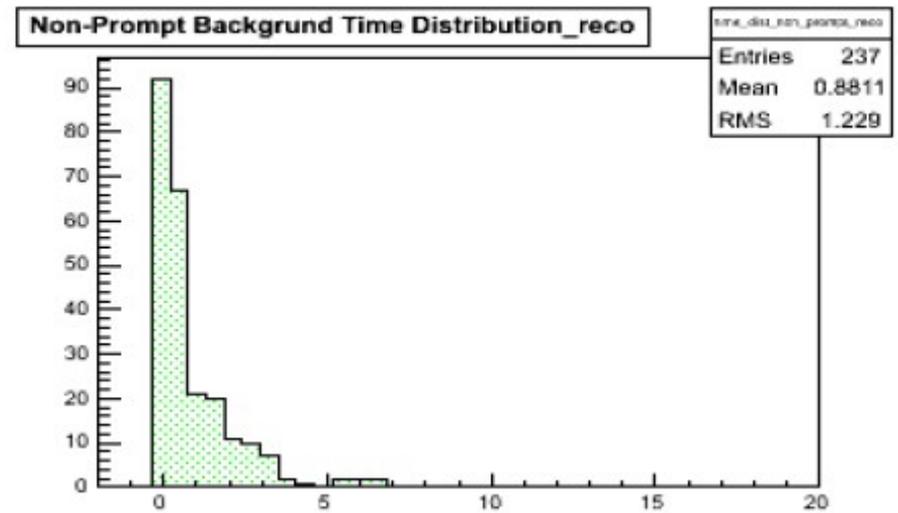
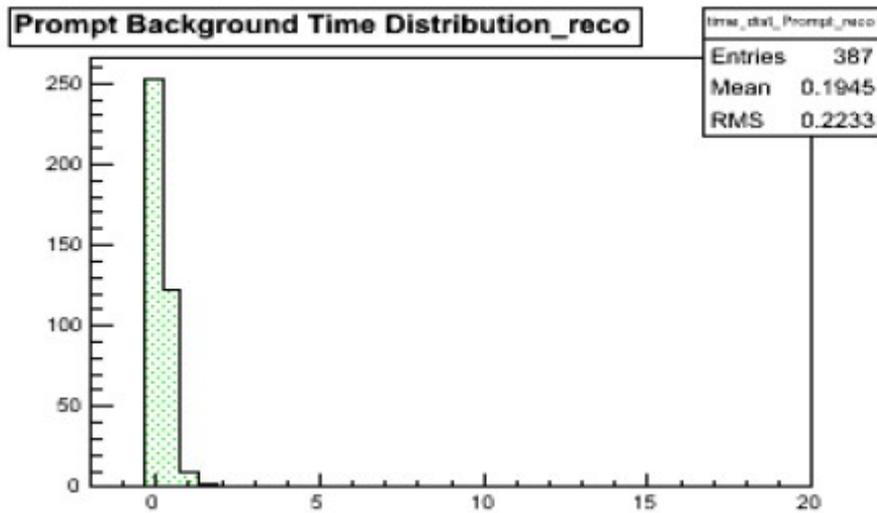
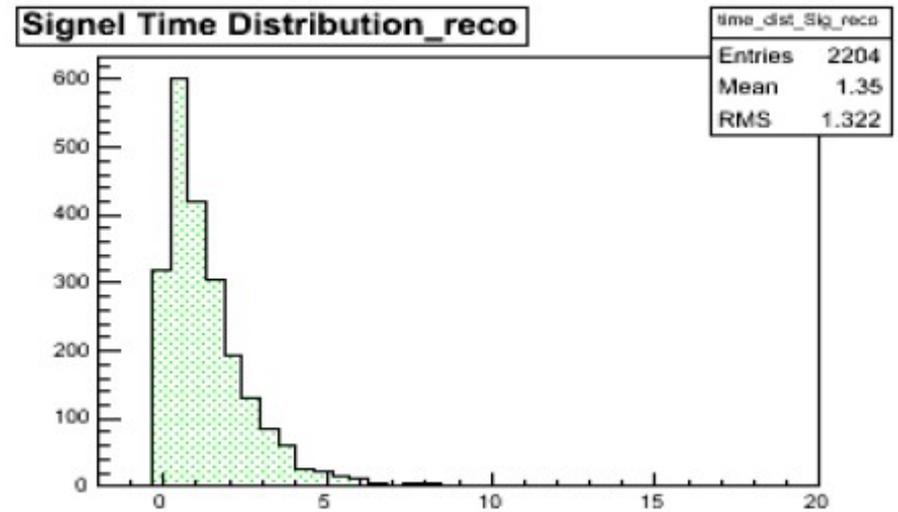
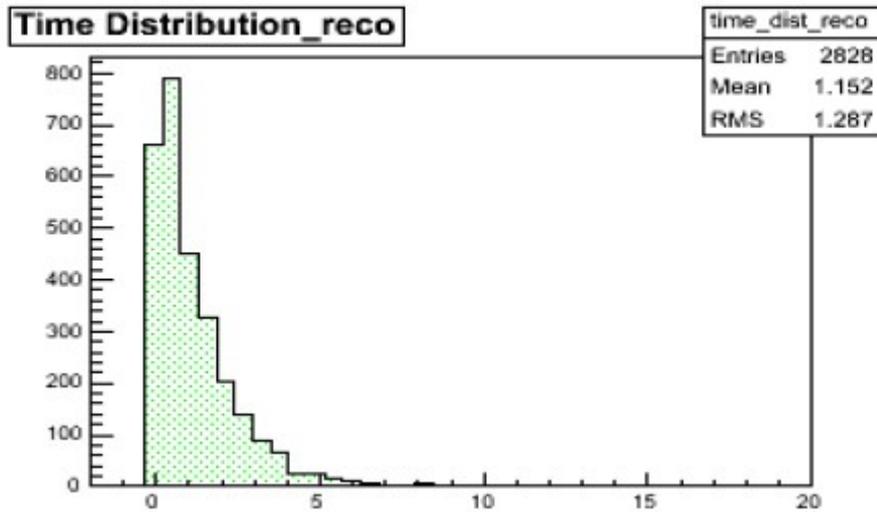
# Pulls ..



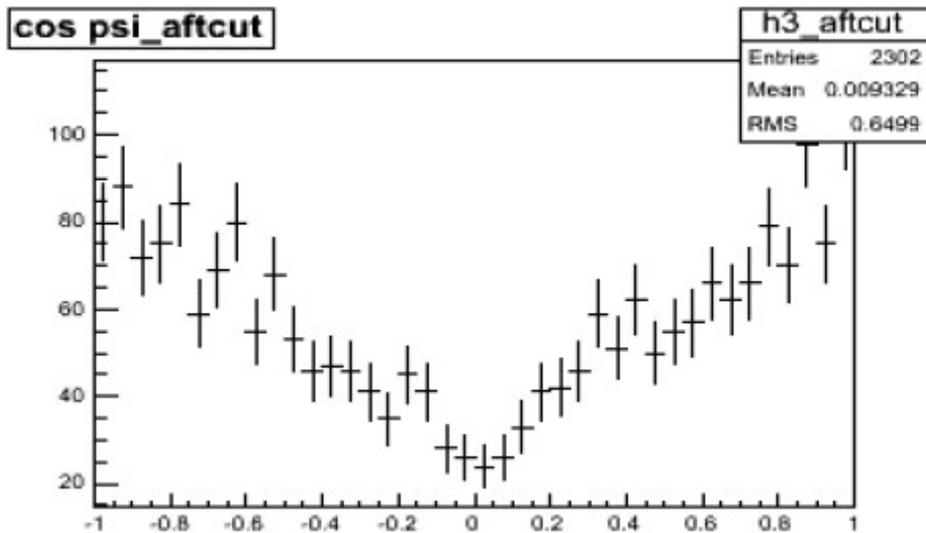
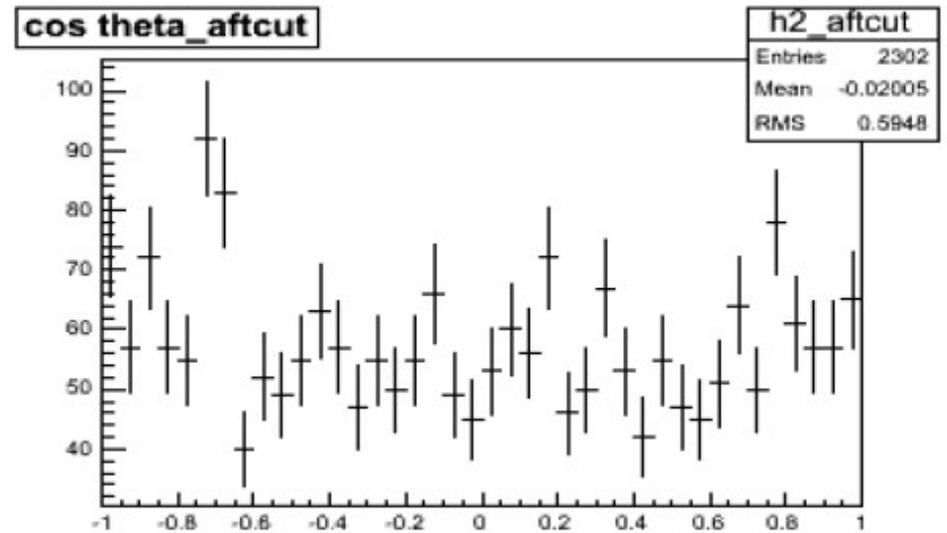
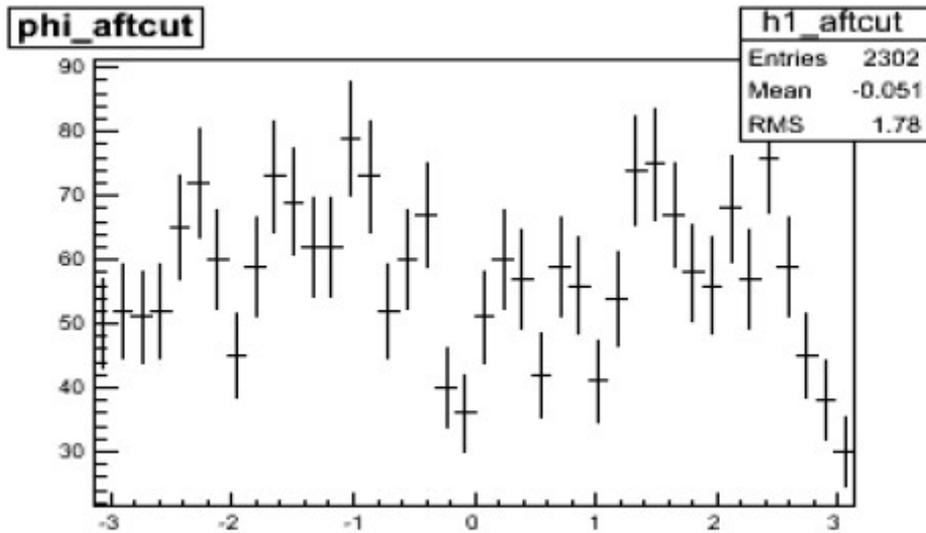
Pulls ..



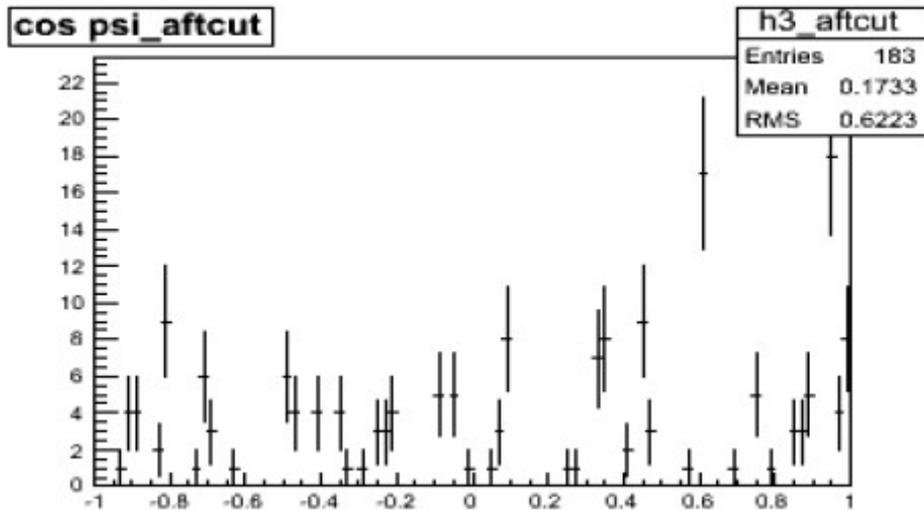
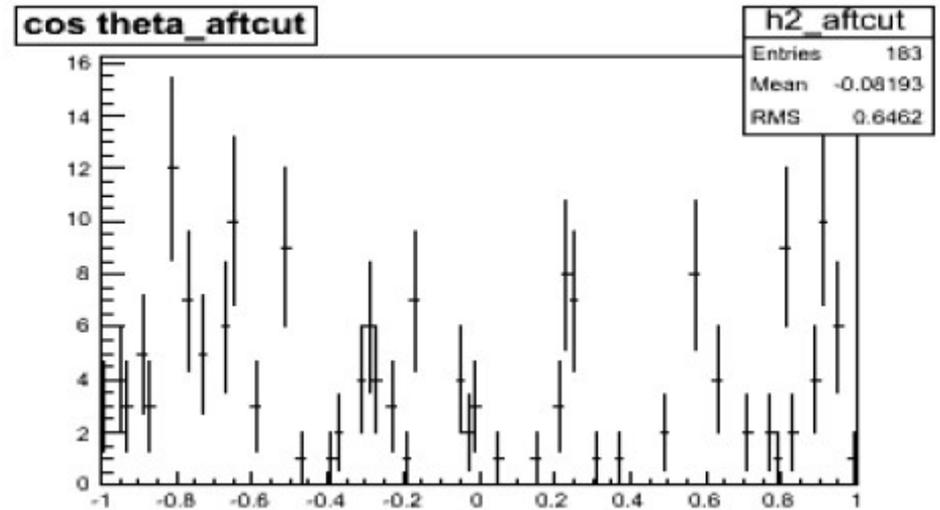
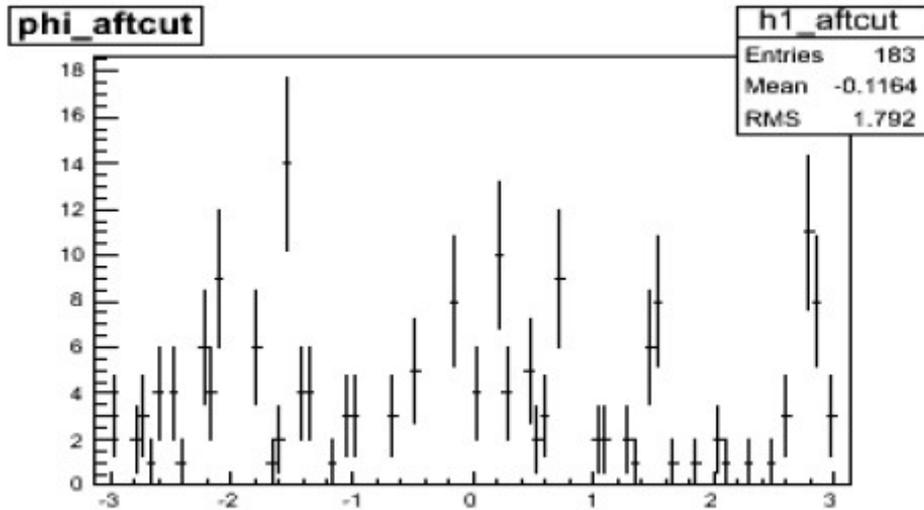
# Distribution de temps propre de bruit $B_{s,d,u} \rightarrow J/\psi X$



# Distribution des angles de bruit $B_{s,d,u} \rightarrow J/\psi X$

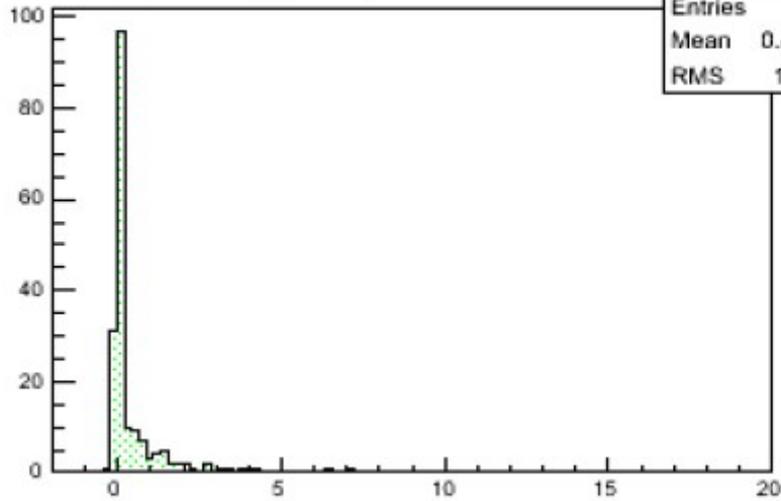


# Distribution des angles de bruit inclusive $J/\psi$

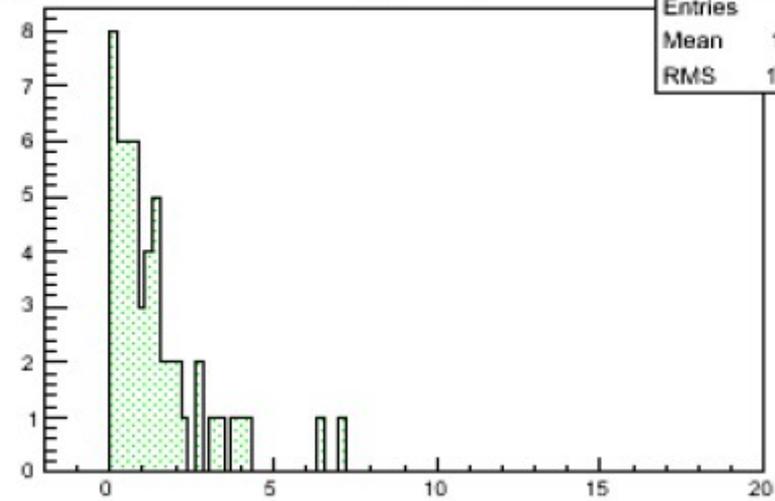


# Distribution de temps propre inclusive $J/\psi$

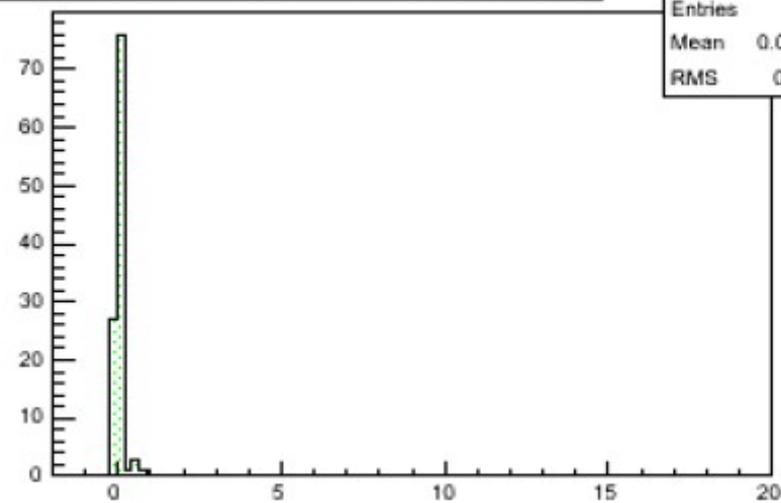
**Time Distribution\_reco**



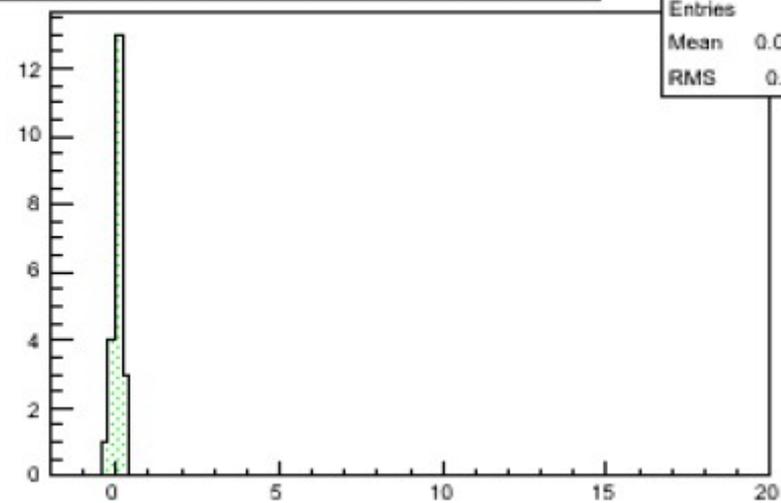
**Signal Time Distribution\_reco**



**Prompt Background Time Distribution\_reco**



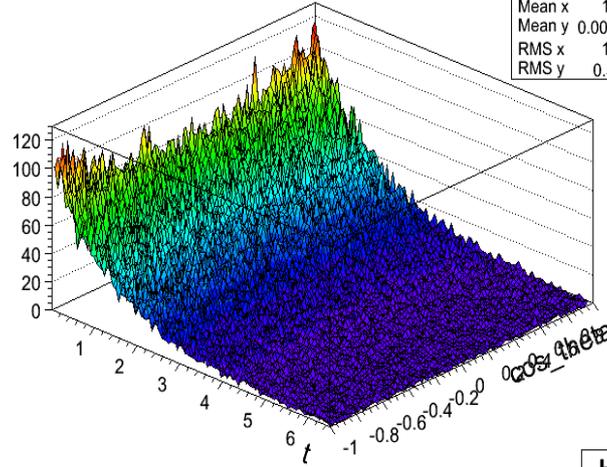
**Non-Prompt Background Time Distribution\_reco**



canal  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$  : sélection non-biaisé

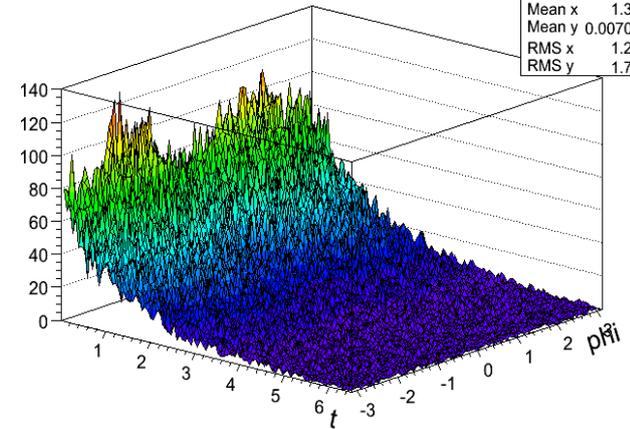
Histogram of t\_t\_cos\_theta

| t_t_cos_theta |          |
|---------------|----------|
| Entries       | 182472   |
| Mean x        | 1.334    |
| Mean y        | 0.001531 |
| RMS x         | 1.239    |
| RMS y         | 0.5993   |



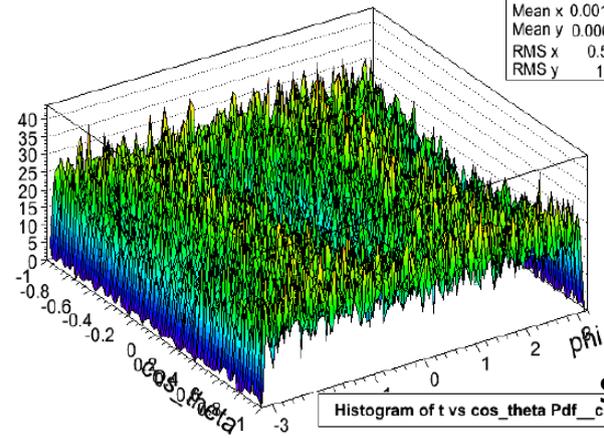
Histogram of t vs cos\_theta\_t\_phi

| t vs cos_theta_t_phi |          |
|----------------------|----------|
| Entries              | 182472   |
| Mean x               | 1.334    |
| Mean y               | 0.007098 |
| RMS x                | 1.239    |
| RMS y                | 1.794    |



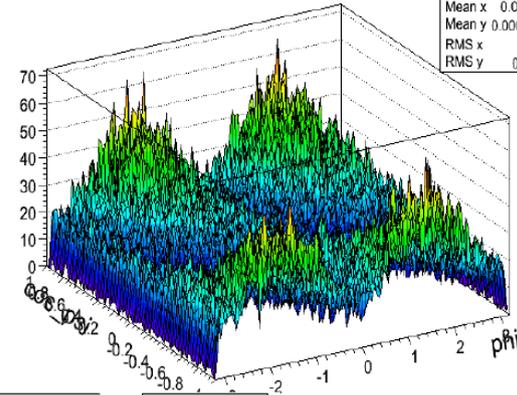
Histogram of t vs cos\_theta Pdf\_cos\_theta\_phi

| t vs cos_theta Pdf_cos_theta_phi |          |
|----------------------------------|----------|
| Entries                          | 188699   |
| Mean x                           | 0.001392 |
| Mean y                           | 0.006531 |
| RMS x                            | 0.5992   |
| RMS y                            | 1.795    |



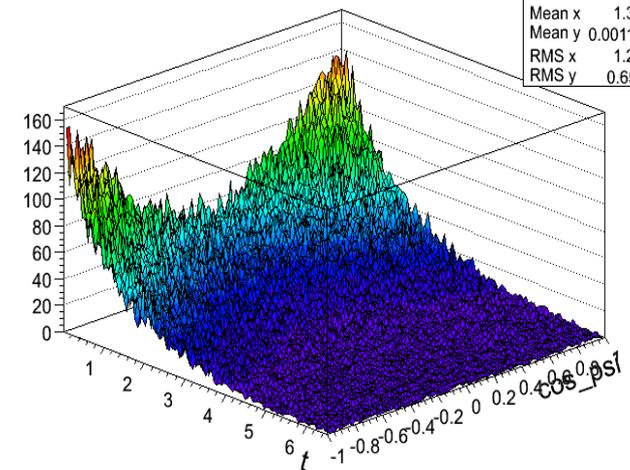
Histogram

| Histogram |           |
|-----------|-----------|
| Entries   | 188699    |
| Mean x    | 0.006531  |
| Mean y    | 0.0007498 |
| RMS x     | 1.795     |
| RMS y     | 0.6525    |



Histogram of t vs cos\_theta\_t\_cos\_psi

| t vs cos_theta_t_cos_psi |          |
|--------------------------|----------|
| Entries                  | 182472   |
| Mean x                   | 1.334    |
| Mean y                   | 0.001125 |
| RMS x                    | 1.239    |
| RMS y                    | 0.6521   |



Histogram of t vs cos\_theta Pdf\_cos\_psi\_cos\_theta

| t vs cos_theta Pdf_cos_psi_cos_theta |           |
|--------------------------------------|-----------|
| Entries                              | 188699    |
| Mean x                               | 0.0007498 |
| Mean y                               | 0.001392  |
| RMS x                                | 0.6525    |
| RMS y                                | 0.5992    |

