

# Recherche de nouvelles particules chargées à longs temps de vie avec l'expérience CMS

Haeberle Raphael

Détecteur CMS — Muon : particule à long temps de vie

Sous la supervision d'Éric Chabert

# Motivation Physique

## Modèle Standard de la physique des particules

- 12 fermions (6 quarks et 6 leptons) + anti-particules
- 4 bosons de jauge + boson de Higgs



## Limitations

- N'unifie pas les interactions électrofaible et forte
- N'explique pas la matière noire
- Incompatible avec la relativité générale
- Corrections radiatives quadratiquement divergentes à la masse du Higgs
- ...

## Extensions du Modèle Standard

- Prédiction de l'existence de nouvelles particules
- Les observations de ces particules vont dépendre
  - De leur temps de vie
  - De leurs masses
  - De leurs modes de désintégrations

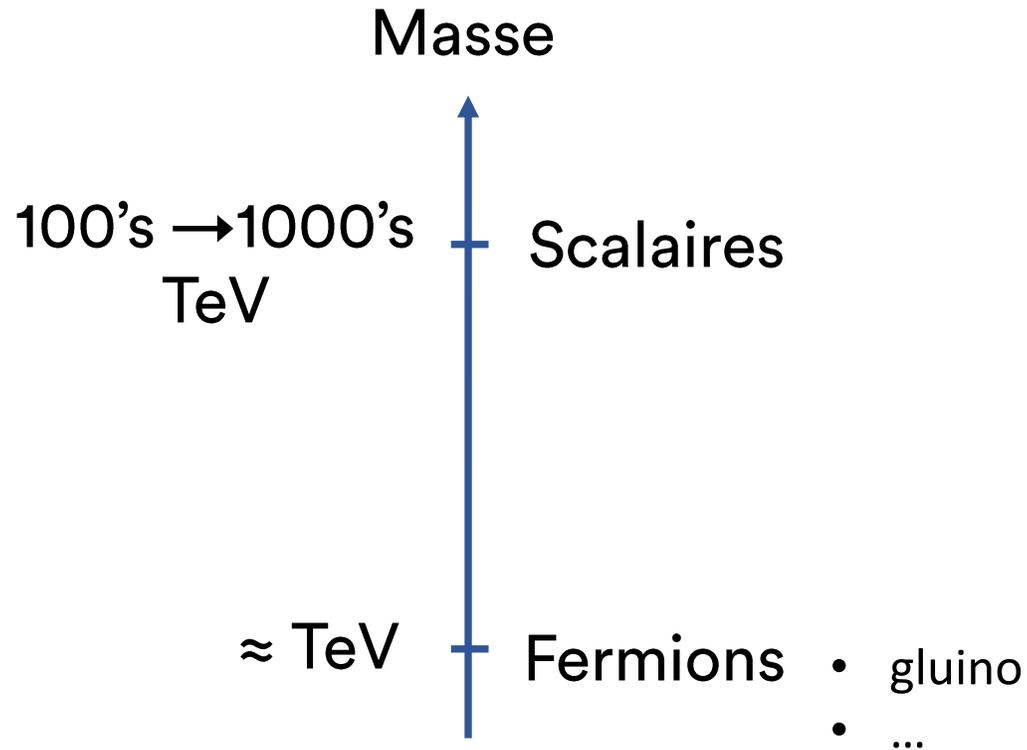
Cette étude : longs temps de vie, lourdes et chargées : HSCP

$$d = \tau * \gamma * \beta * c$$

*d* : distance de vol  
*τ* : temps de vie  
*γ* : facteur relativiste  
*c* : vitesse de la lumière  
*β* : Facteur relativiste

# Modèle supersymétrique, la split-SUSY

Spectres de masse divisés



Dans plusieurs modèles supersymétriques

Parité R conservée

$$P_R = (-1)^{3B+L+2s}$$

B = Nombre baryonique  
L = Nombre leptonique  
S = spin

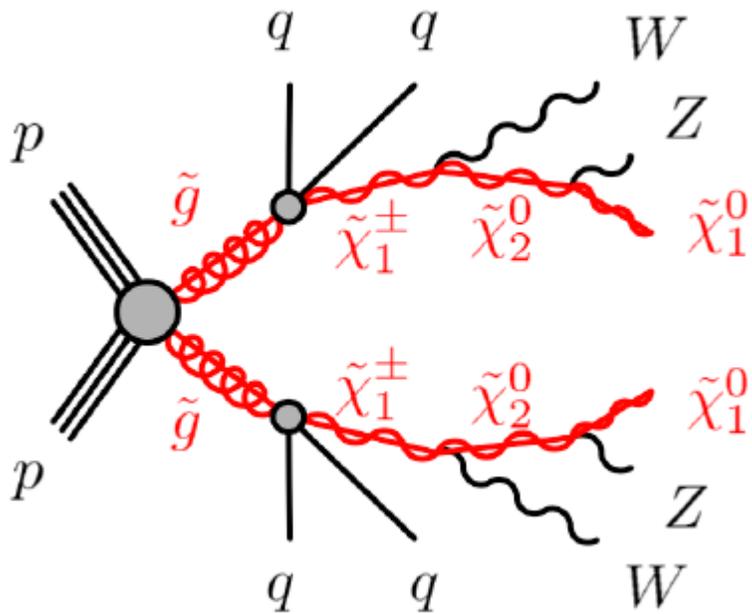
- Particules du modèle standard  $P_R = +1$
- Particules supersymétriques  $P_R = -1$



Productions par paires

# Un candidat HSCP : le gluino

- Étude focalisée sur le gluino  
(partenaire supersymétrique du gluon, boson de jauge de l'interaction forte)



- Gluinos à longs temps de vie prédits

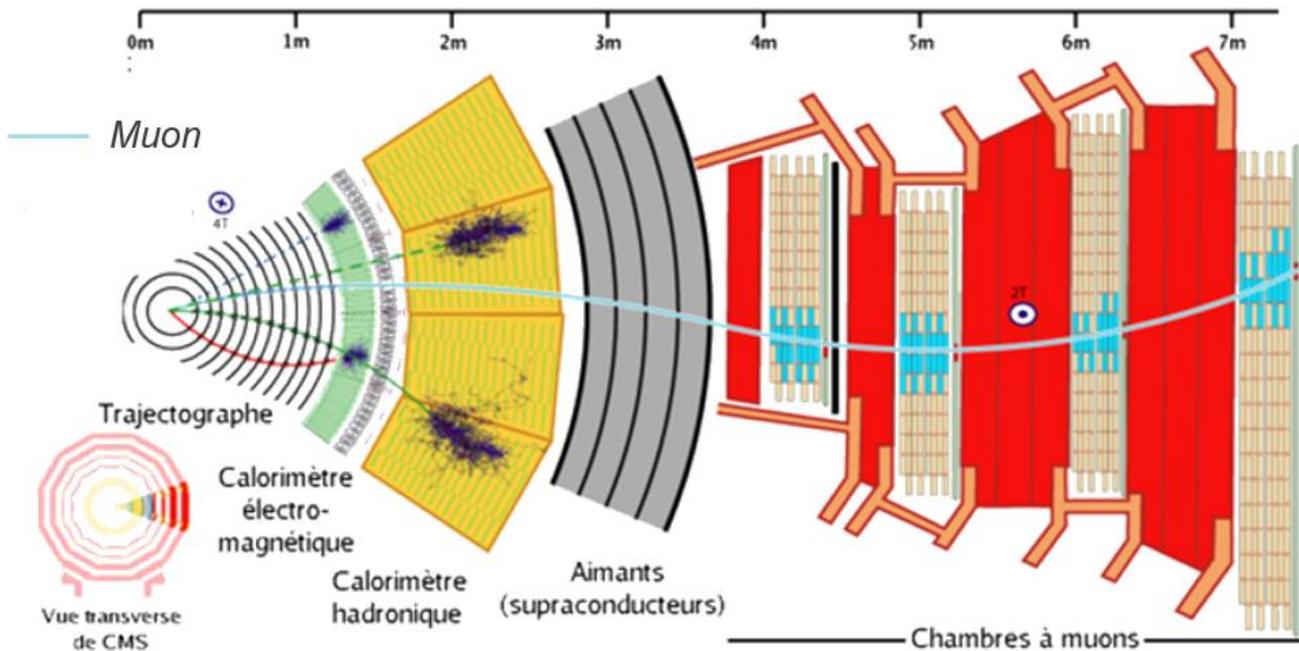
- Pas observées à ce jour → limites sur leurs masses ( $M_{\text{gluino}} > 1610 \text{ GeV}$ )

Formation d'états liés si  $\tau_{\tilde{g}} > \tau_{\text{hadr}}$  ( $10^{-24} \text{ s}$ ) :  
les **R-hadrons, chargés ou neutres**

baryons	$\tilde{g}qqq$
antibaryons	$\tilde{g}\bar{q}\bar{q}\bar{q}$
mesons	$\tilde{g}q\bar{q}$
glue-balls	$\tilde{g}g$

# Signatures Expérimentales

Solénoïde Compact pour Muons : Détecteur installé à un point d'interaction du LHC (CERN)



## Quasi-Stables

- Elles peuvent se désintégrer en dehors du détecteur :  $c\tau >$  rayon du détecteur

## Lourdes

- $M_{\text{gluino}} > 1610 \text{ GeV}$

$$\frac{p}{m} = \beta\gamma < 1$$

- $p$  = impulsion
- $m$  = masse
- $\beta = \frac{v}{c}$  vitesse réduite
- $\gamma$  = facteur relativiste

- Régime non ultra-relativiste, induit un retard de la particule  $\rightarrow$  perte de signal

## Chargées

- Interactions électromagnétiques, traces dans le détecteur

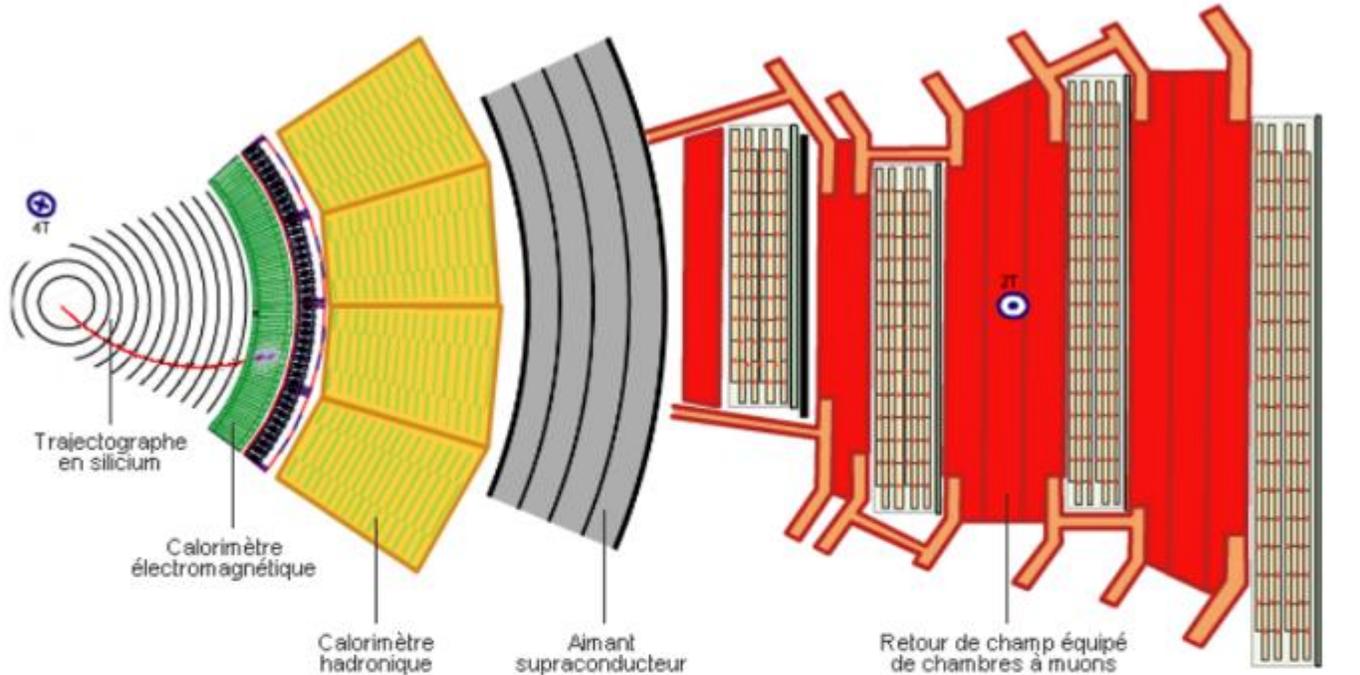
$$-\frac{dE}{dx} \approx K \frac{m^2}{p^2} + C$$

$$K = 2.559 \pm 0,001 \text{ MeV cm}^{-1} \text{ c}^2$$

$$C = 2.772 \pm 0,001 \text{ MeV cm}^{-1}$$

★ Approximation de Bethe-Bloch pour  $0.4 < \beta < 0.9$

# Synchronisation de l'horloge locale

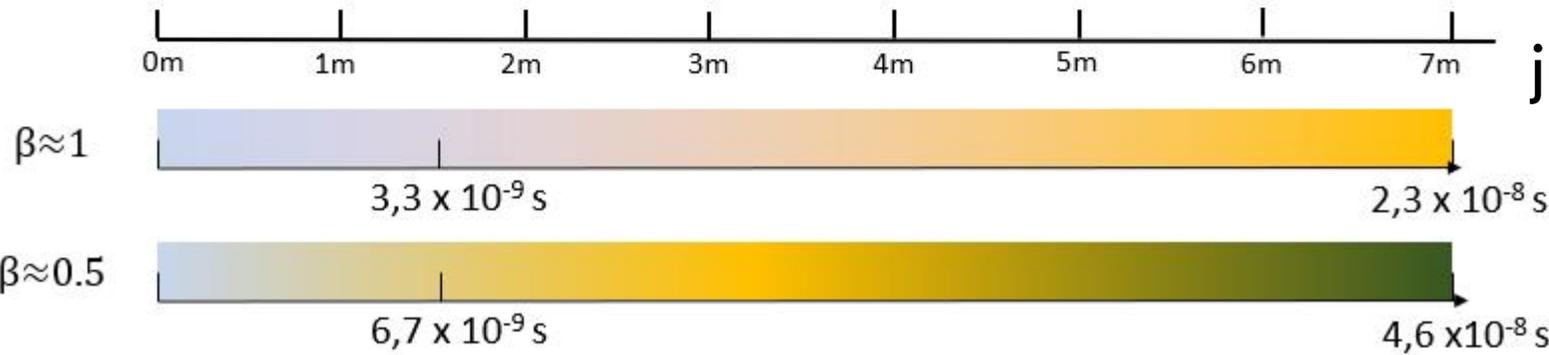


- Initialement effectuée pour des particules ultra-relativistes :

$$\frac{p}{m} = \beta\gamma \approx 1$$

(décalage  $\approx 20$  ns pour les couches externes)

- $\beta\gamma = 0.5$  : temps de parcours jusqu'aux chambres à muons : 33



ns



Détection dans l'évènement suivant

# Systemes de déclenchements

LHC Run II (2015-2018)

- ❑ Collisions proton-proton à 13 TeV
- ❑ Section efficace  $\sigma_{p-p} = 110 \text{ mb}$
- ❑ Luminosité intégrée :  $139 \text{ fb}^{-1}$

Au total :  $1.1 \times 10^{16}$  collisions

## *Production de gluinos estimée*

- ❑ Section efficace  $\sigma_{pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}(m=2\text{TeV})} \approx 1\text{fb}$

Au total  $\approx 150$  évènements

$$\frac{150}{1.1 * 10^{16}} \approx 10^{-14}$$

## 2 systemes de déclenchement

### Level-1 Trigger

Cartes électroniques  
40 MHz  $\rightarrow$  100 kHz  
(0,25%)  
Physique  
d'intérêt  
 $\leq 4 \mu\text{s}$



### High Level Trigger

Ferme de calcul  
100 kHz  $\rightarrow$  1000 Hz  
(1%)  
Reconstruction  
logicielle des traces  
 $\leq 150 \text{ ms}$



# Sélection hors-ligne

## Préselection

- Acceptance du détecteur
- Compatibilité de la trace avec le point de collision

## Sélection

- $I_{as} > 0.2$

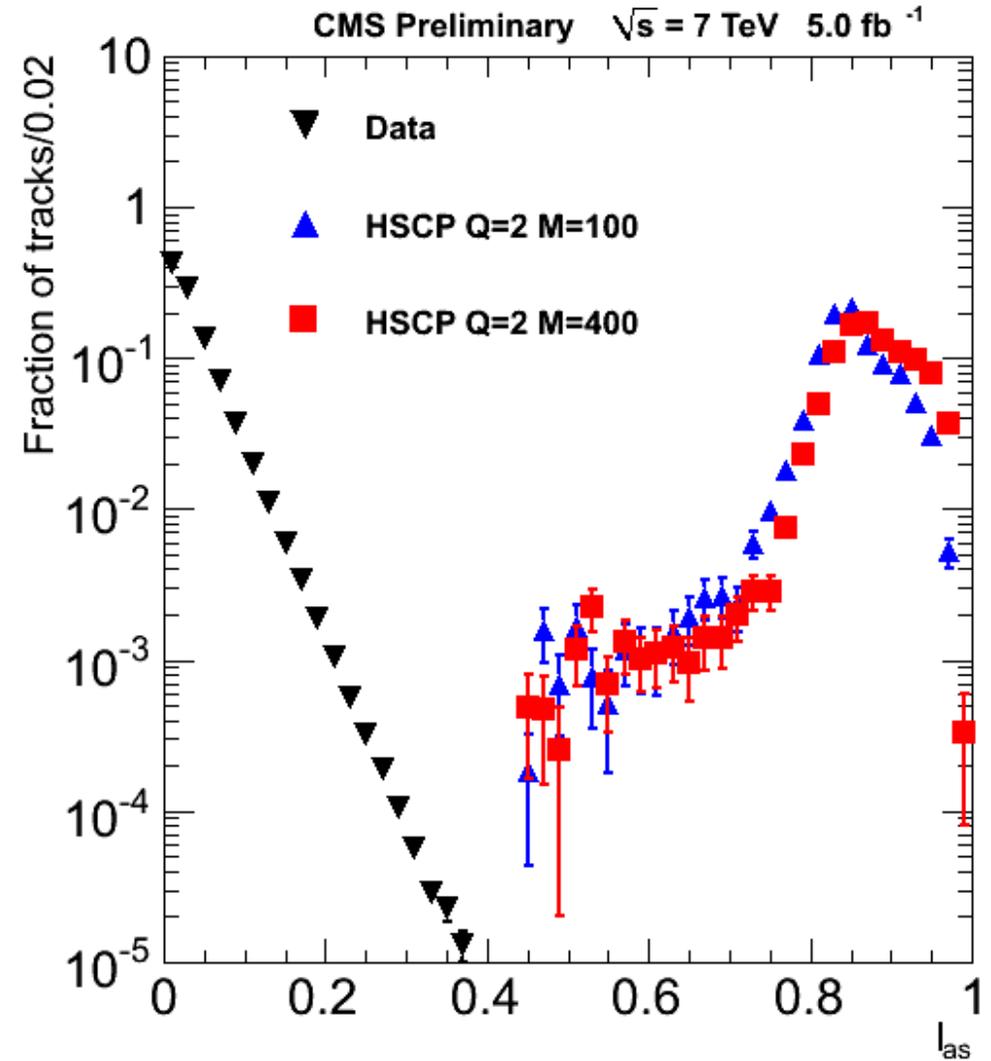
$$I_{as} = \frac{3}{N} * \left( \frac{1}{12N} + \sum_{i=0}^N [P_i * (P_i - \frac{2i-1}{2N})^2] \right)$$

$I_{as}$  = Discriminateur du dépôt d'énergie

$P_i$  = Probabilité de compatibilité avec une particule au minimum d'ionisation (régime relativiste)

$N$  = nombre de dépôts d'énergie

- $1 > I_{as} > 0$
- MIP :  $I_{as} \rightarrow 0$ , HSCP :  $I_{as} \rightarrow 1$

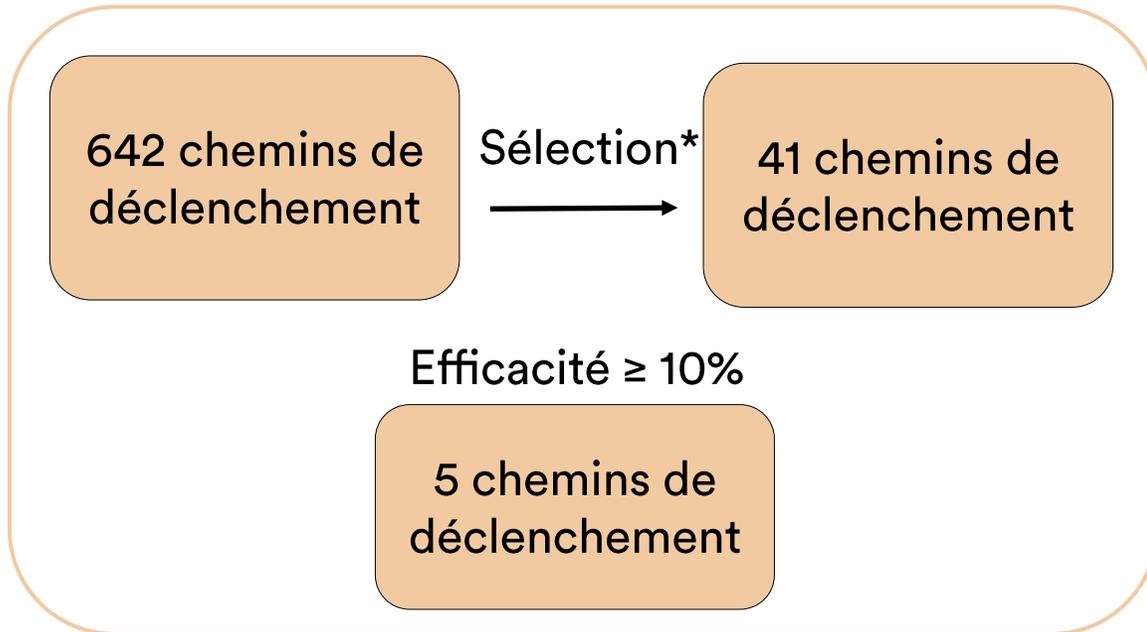


Nombre de candidats HSCP en fonction d' $I_{as}$

# Méthodologie

## Sélection des chemins de déclenchement d'intérêt

- Liste complète pour événements gluinos



\*Sélection : Ils sont présents pour tous les événements

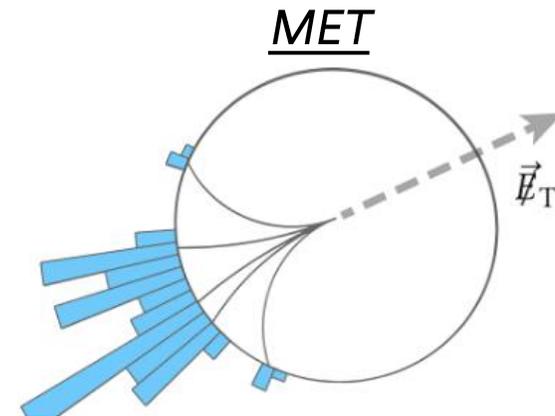
## Signatures liées aux chemins de déclenchements

Mu50 → Un muon de  $P_T > 50$  GeV a été détecté

Iso → Réfère à l'isolation requise sur la trace

MET → Signe d'énergie transverse manquante (défaut dans le bilan des impulsions dans le plan transverse)

MHT → Manière différente de calculer la MET



$$E_T^{miss} = - \sum_i |\vec{p}_T(i)|$$

# Efficacités des chemins de déclenchements

## Efficacité

$$\epsilon_i = \frac{N_i^{selection}}{N^{selection}}$$

**Problème** : très faibles

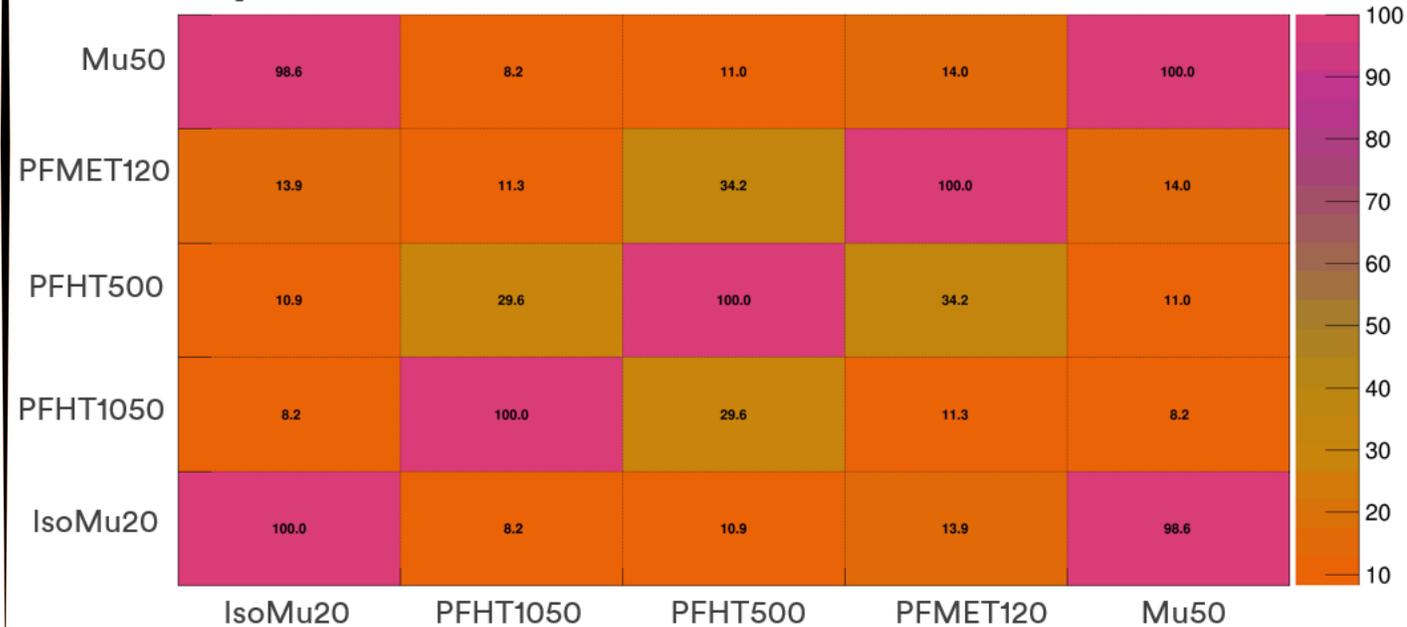
Présélection	Efficacité (%)
<i>IsoMu20</i>	<i>18.7 ± 0.3</i>
<i>Mu50</i>	<i>18.8 ± 0.3</i>
<b>PFMET120</b>	<b>34.3 ± 0.5</b>
PFHT500 + MET100	13.1 ± 0.3
PFHT1050	10.3 ± 0.4

*Efficacités des chemins de déclenchement*

## Corrélation

$$C_{ij} = \frac{N_{i\&j}^{selection}}{N_{i||j}^{selection}}$$

$m_{\text{gluino}} = 1600 \text{ GeV}$ , Présélection



*Corrélations entre les chemins de déclenchements*

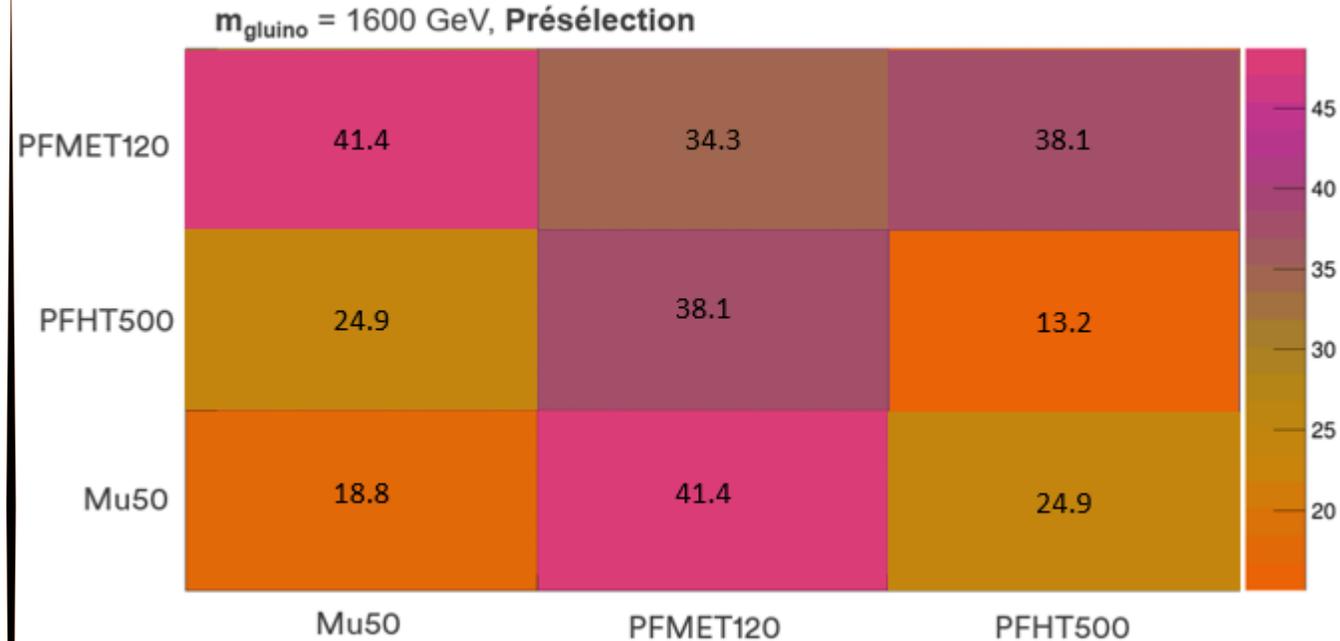
# Combinaisons des chemins de déclenchements

Solution : Combiner les chemins de déclenchement

## Combinaison

$$O_{ij} = \frac{N_{i||j}^{selection}}{N^{selection}}$$

□ Gain d'efficacité maximal : 8%



Suite : Combiner les 3 chemins de déclenchement

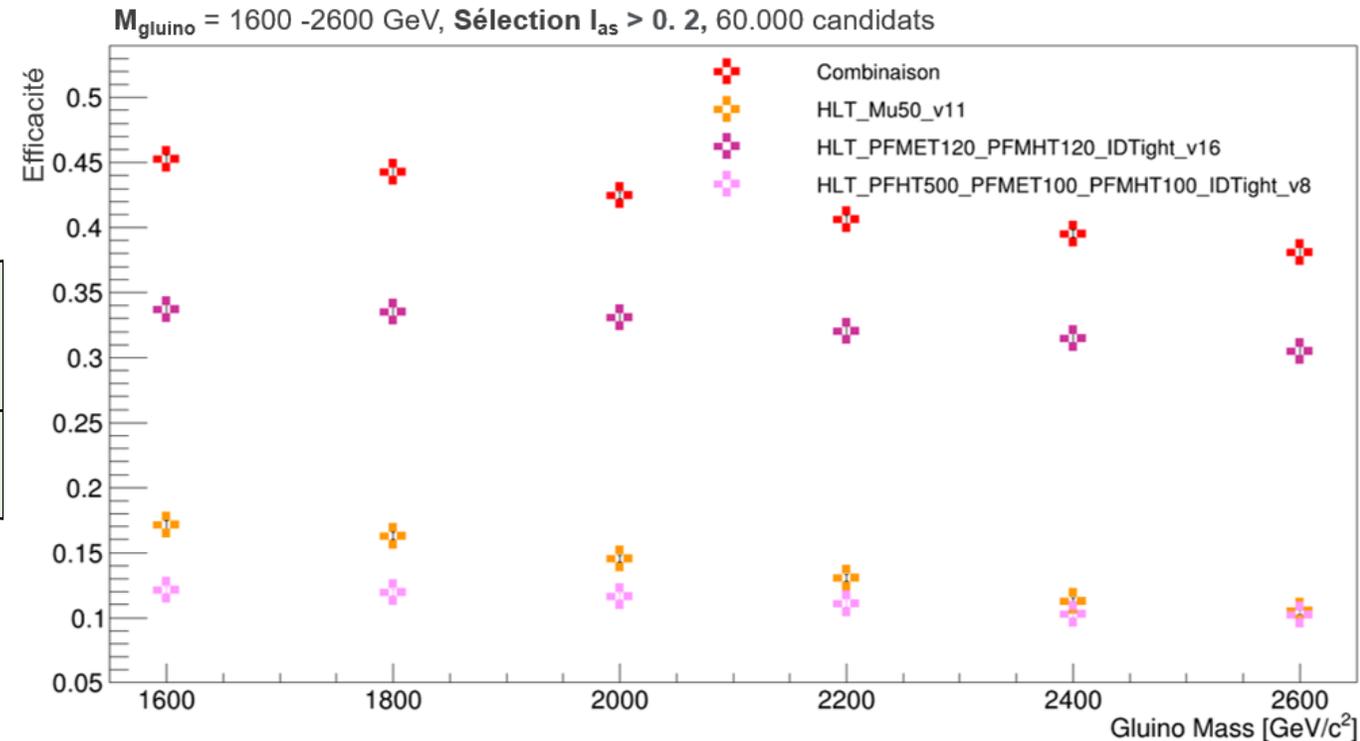
# Efficacités en fonction de la masse

- Étude effectuée selon différents critères de sélection du signal

Masse du Gluino (GeV/c <sup>2</sup> )	Présélection	$I_{as} > 0,1$	$I_{as} > 0,2$
1600	49.1 ± 0.4	44.1 ± 0.3	45.1 ± 0.3

Efficacités (%) de la combinaison des déclencheurs en fonction des critères de sélection

- Mauvaise identification par les muons
- Meilleure capacité à obtenir du signal par la MET



*Efficacités des chemins de déclenchements seuls, et combinés*

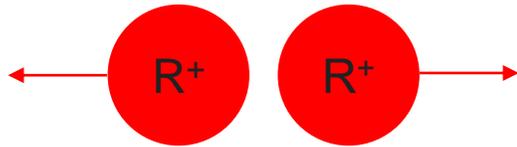
- Efficacité diminue avec la masse



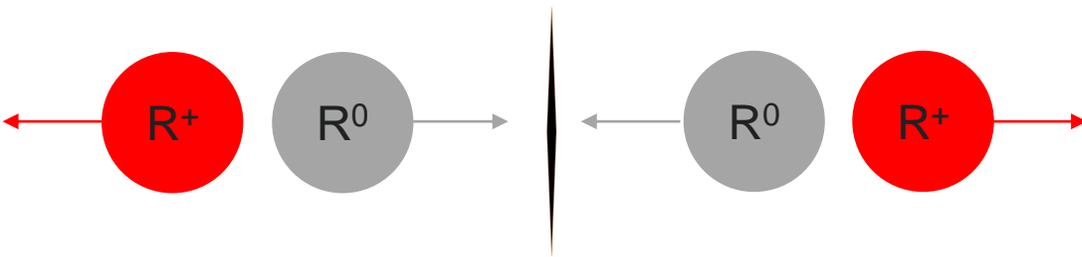
# Différents scénarios

Paire de gluinos dans des directions opposées, formants des R-hadrons

chargé-chargé



neutre-chargé



neutre-neutre



Méthodes d'association trace-gluino

❑ Particules associées à des identifiants

- 100027 : gluino

❑ Les gluinos peuvent former des R-hadrons

- 1009213 :  $R^+_{\tilde{g}u\bar{d}}$
- 1000993 :  $R^0_{\tilde{g}g^-}$
- ...

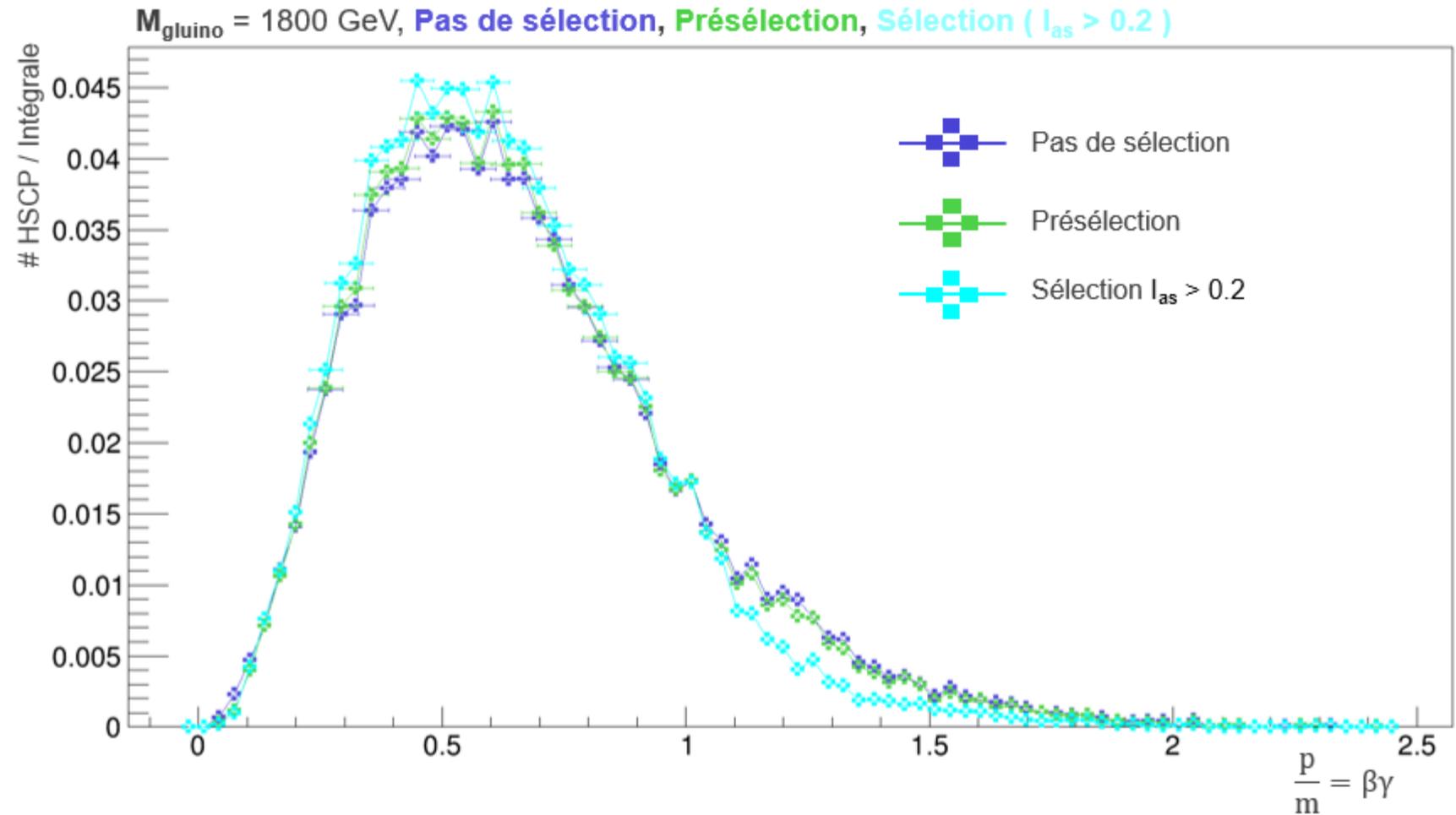


Association entre trace reconstruite et particule

$$\Delta R = \sqrt{\eta^2 + \phi^2} < 0.3$$

# Étude de la distribution de $p/m$

$M = 1800 \text{ GeV}$	Valeur moyenne de $\frac{p}{m} = \beta\gamma$
<i>Pas de sélection</i>	$0.684 \pm 0,003$
<i>Présélection</i>	$0.678 \pm 0,004$
<i>Sélection <math>I_{as} &gt; 0.2</math></i>	$0.629 \pm 0,006$

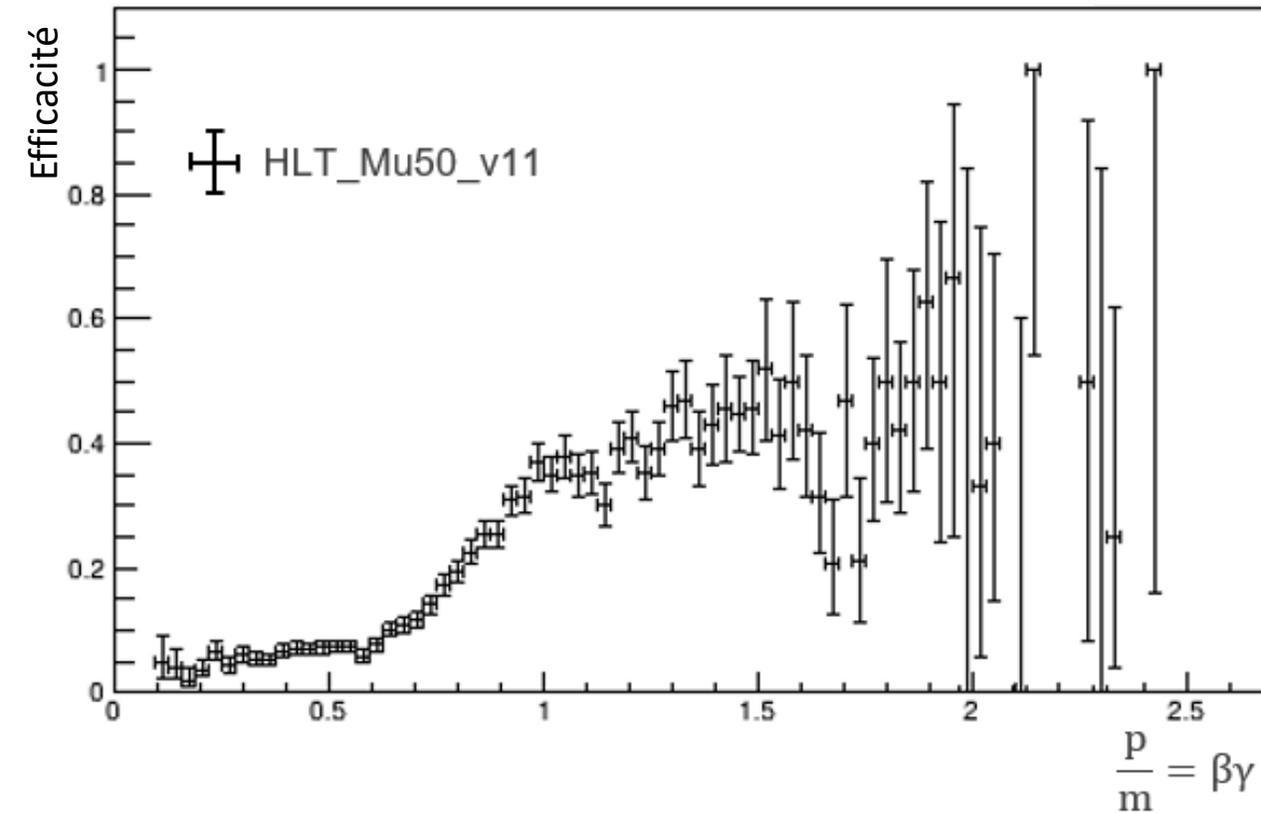


- Queue de distribution coupée après sélection

# Éfficacités en fonction de $\beta\gamma$

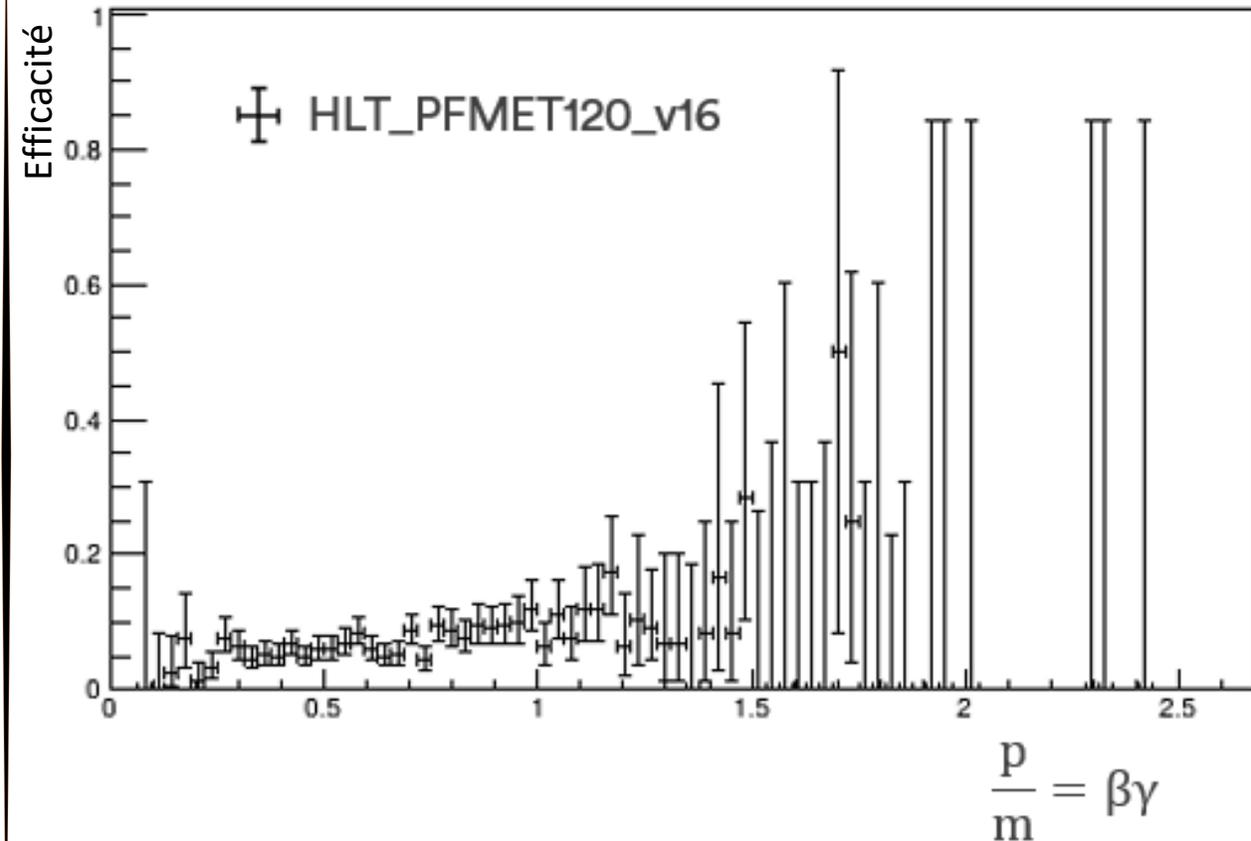
*chargé-chargé (32%)*

$M_{\text{gluino}} = 1800 \text{ GeV}$ , Sélection ( $I_{\text{as}} > 0.2$ )



- Chemin de déclenchement inopérant, plus efficace pour  $\beta\gamma > 1$ , mais régime ultra-relativiste

$M_{\text{gluino}} = 1800 \text{ GeV}$ , Sélection ( $I_{\text{as}} > 0.2$ )

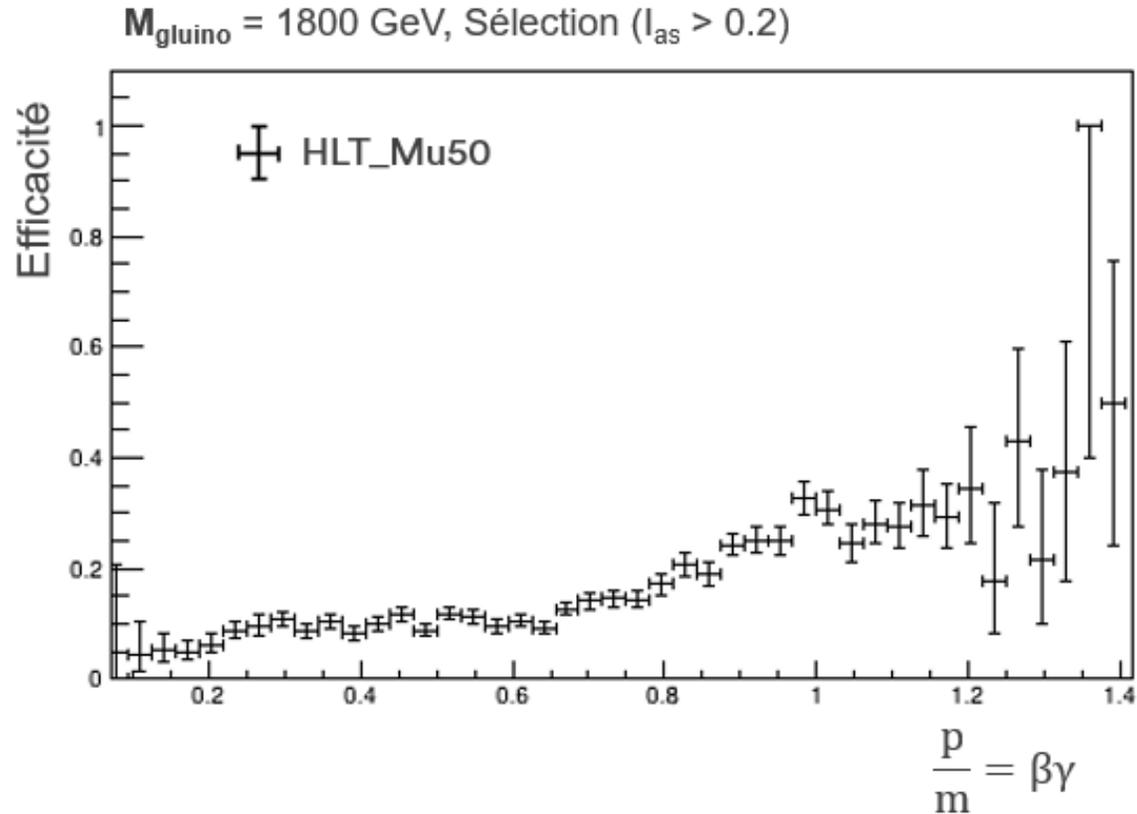


- Efficacité de déclenchement par la MET est basse

# Éfficacités en fonction de $\beta\gamma$

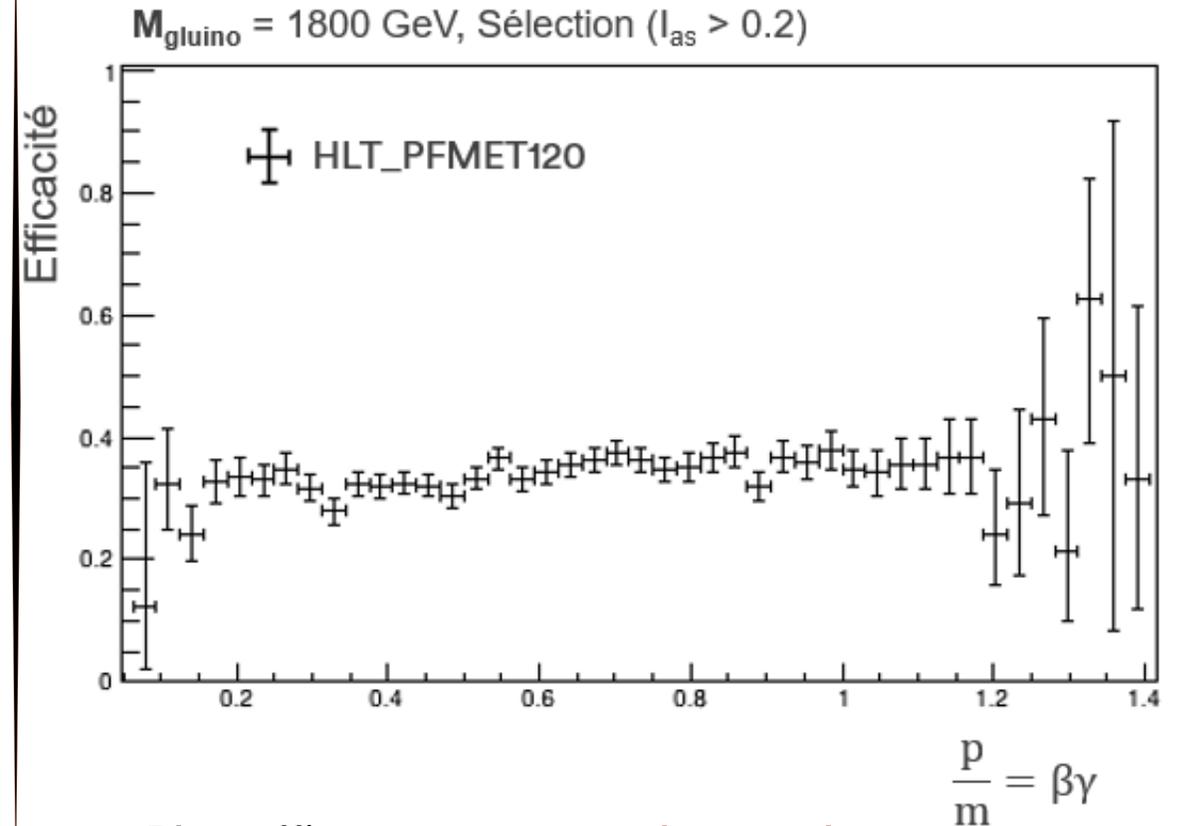
*chargé-neutre (60%)*

MUON



- $\approx 2$  x moins efficace que pour **chargé-chargé**, même tendance

MET



- Plus efficace que pour **chargé-chargé**
- Si l'un des deux candidats est neutre  $\rightarrow$  la MET augmente

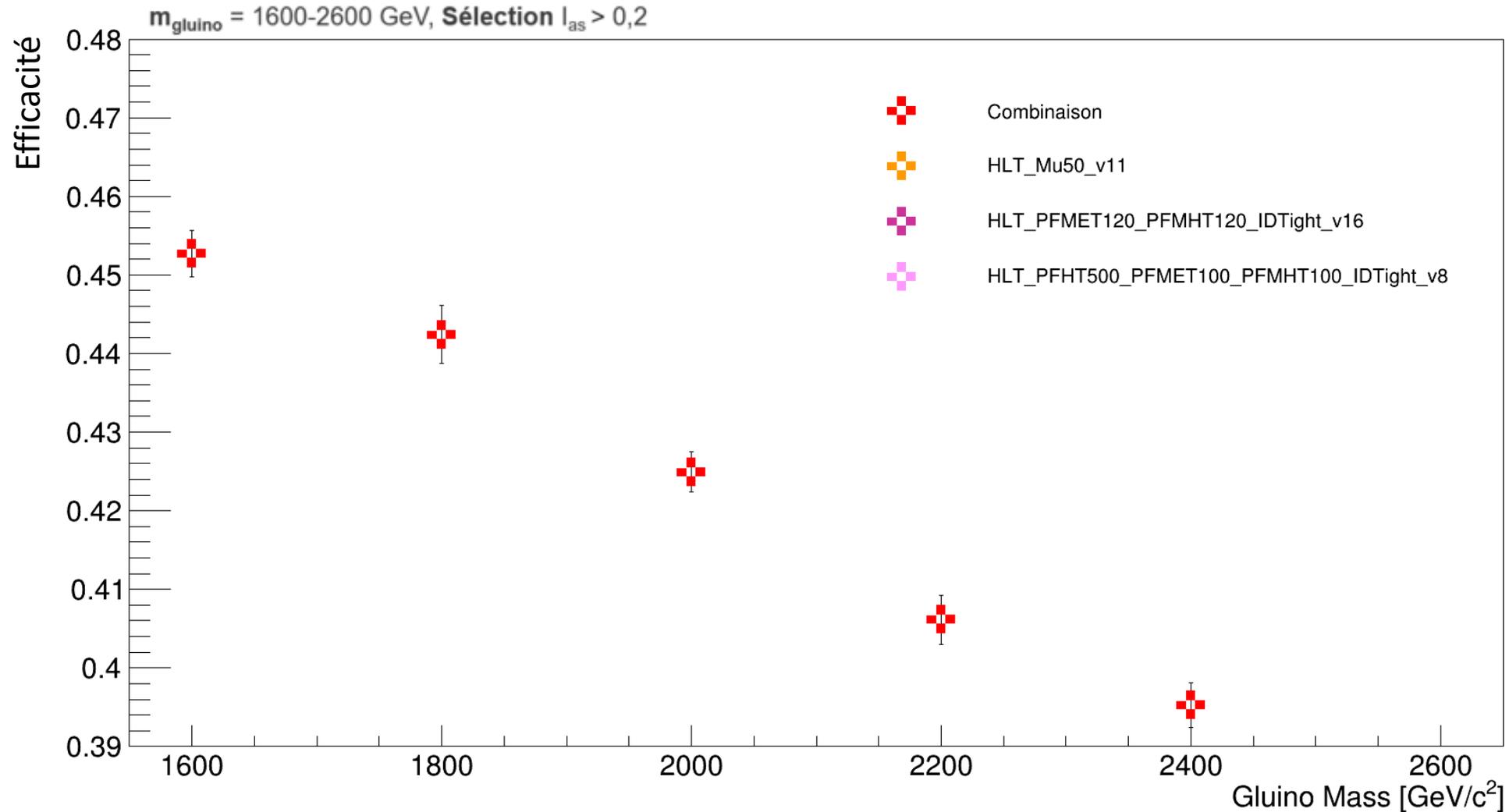
# Conclusion

- ❑ Évaluation des efficacités de déclenchement pour les signaux recherchés ( HSCP )
- ❑ Observations :
  - Efficacités inférieures à 35%
  - Décroissance de l'efficacité en fonction de la masse
- ❑ Étude des efficacités de déclenchement en fonction de  $\beta\gamma$ 
  - Efficacités différentes en fonction des scénarios
- ❑ Conclusion de l'étude : combinaison de 3 chemins de déclenchement permet de passer de 35% à 45% d'efficacité

# ***Pour aller plus loin***

- ❑ Nécessité d'améliorer ces efficacités pour observer de tels signaux dans le futur
  - Identifier l'origine de ces inefficacités
  
- ❑ Proposer de nouveaux chemins de déclenchement pour la prochaine prise de données
  - Augmentation **significative** de l'efficacité
  - Pas d'augmentation de la **bande passante** / **temps de calcul**

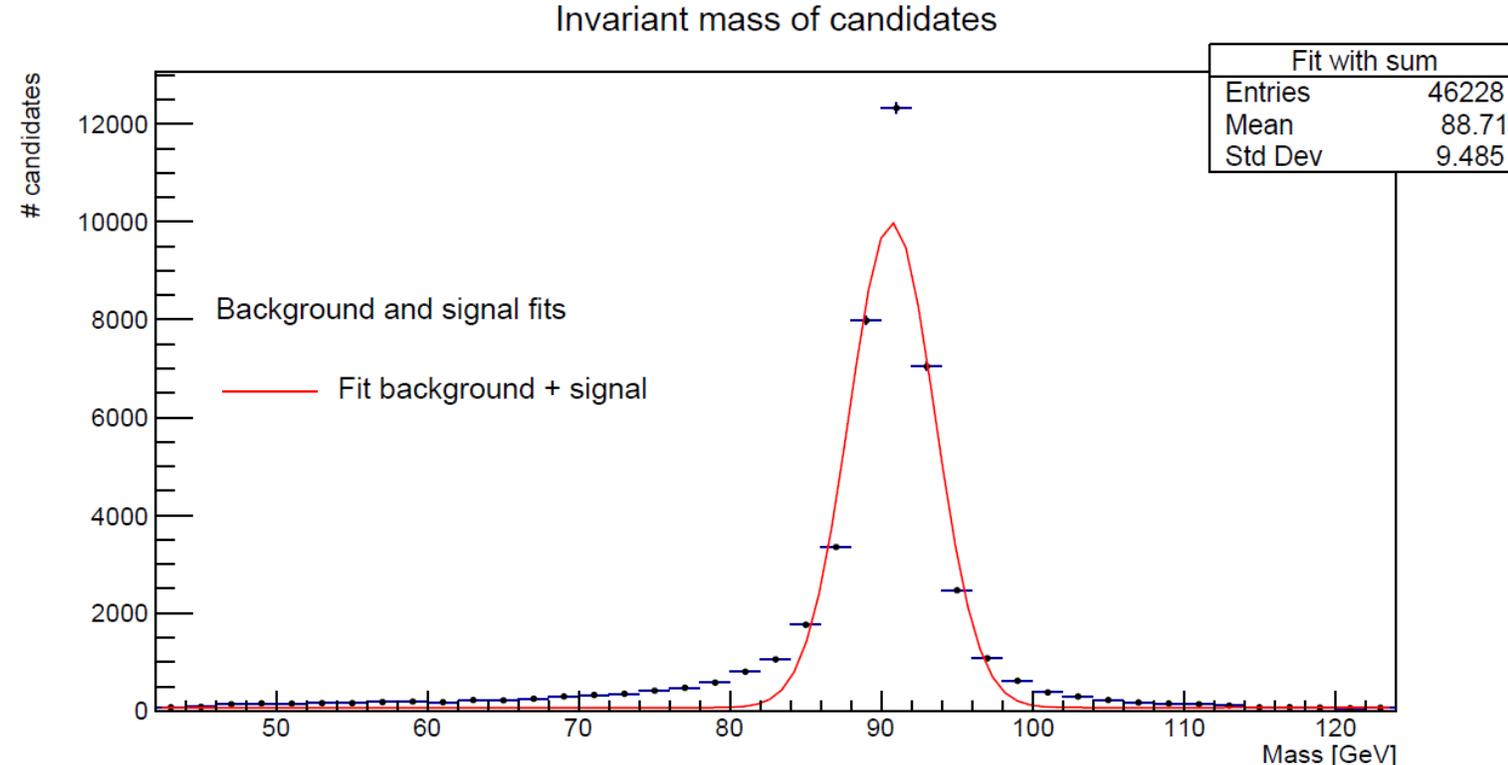
# Zoom sur l'efficacité de la combinaison des chemins de déclenchement



# Efficacité de détection sur des données

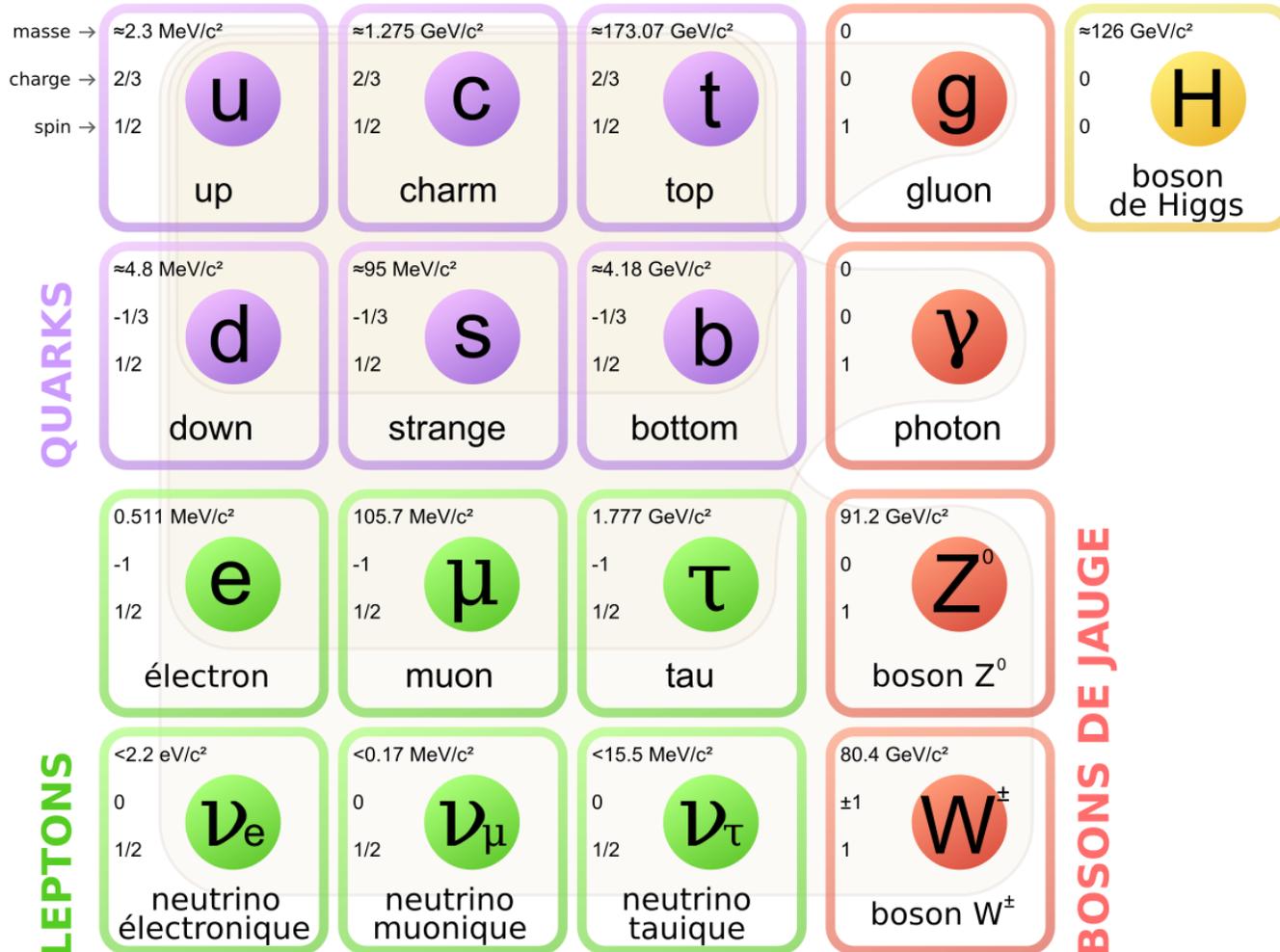
- Paire lepton-antilepton produites dans 10% des désintégrations du boson Z
- 4 To de données à analyser, présélections appliquées
  - $p_T$  des muons  $> 10$  GeV
  - Deux leptons de même saveur de charge opposée
  - Nombre de dépôts d'énergie (5), qualité des traces reconstruites
- Efficacités chemins de déclenchements [muon]  $> 90\%$

Avant coupure 4 To  
[/opt/sbg/cms/ui3\\_data1/dapparu/HSCP/Production/prodMay2021\\_CMSSW\\_10\\_6\\_2/SingleMuon/SingleMuon\\_UL2017B/](/opt/sbg/cms/ui3_data1/dapparu/HSCP/Production/prodMay2021_CMSSW_10_6_2/SingleMuon/SingleMuon_UL2017B/)  
Après coupure 180 Go  
[/opt/sbg/cms/safe1/cms/rhaeberl/CMSSW\\_10\\_6\\_2/src/HSCPtriggerStudies](/opt/sbg/cms/safe1/cms/rhaeberl/CMSSW_10_6_2/src/HSCPtriggerStudies)



# BACKUP 1

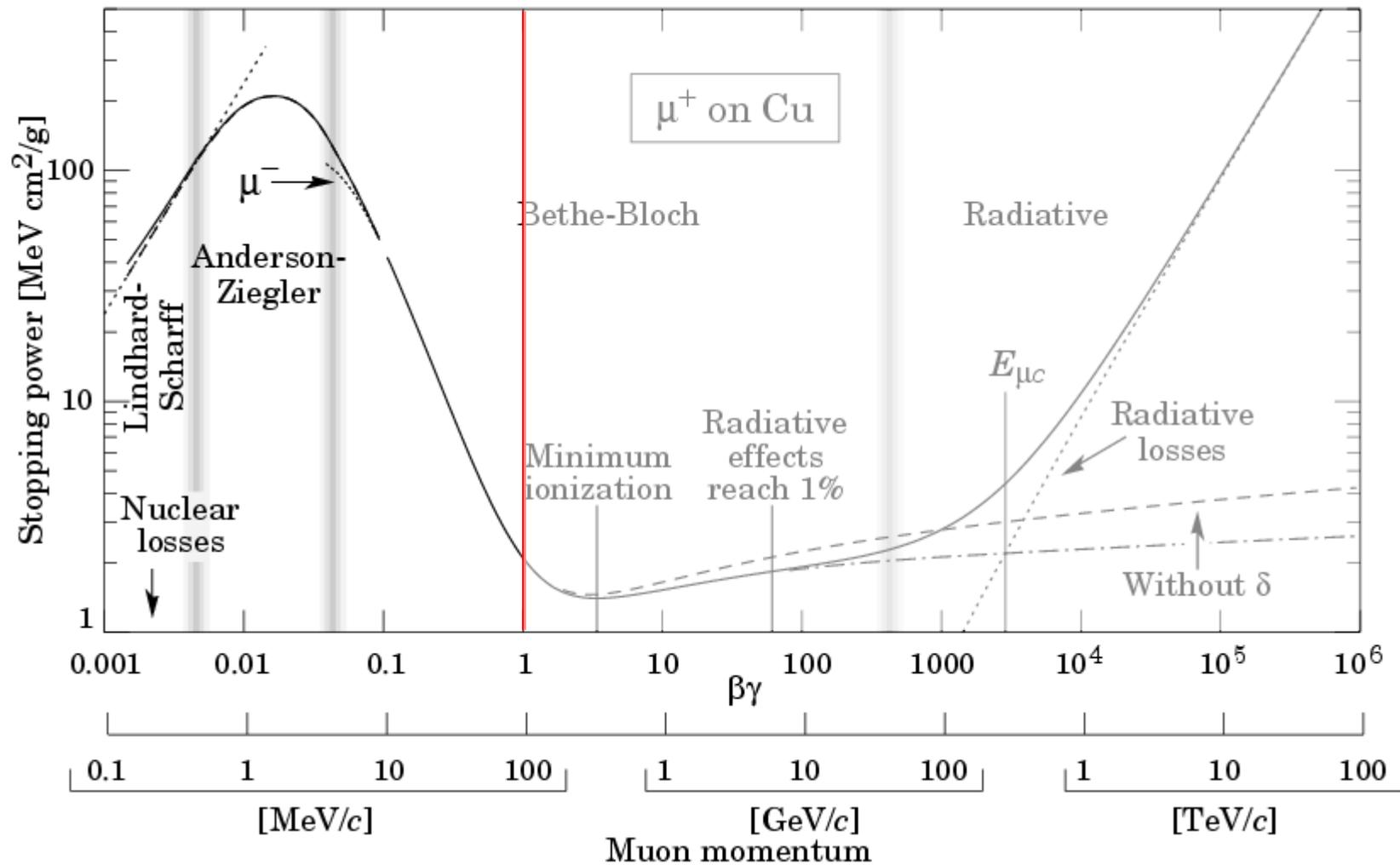
# Le Modèle Standard



- 4 forces fondamentales
- Théorie quantique des champs pour décrire les interactions
- 12 fermions + anti-particules

# BACKUP 2

# Signatures Expérimentales



$$\frac{p}{m} = \beta\gamma \quad \searrow$$



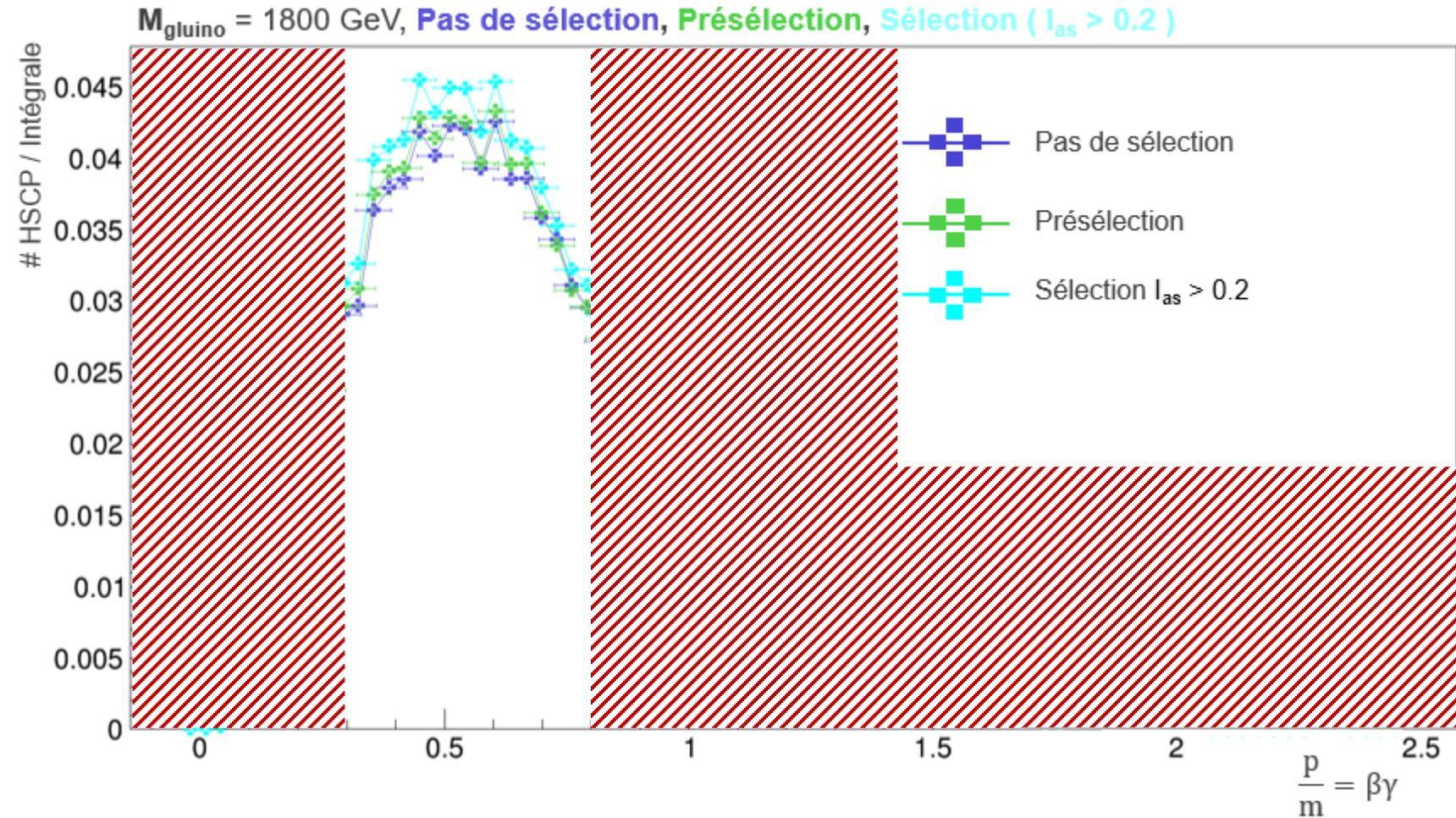
$$-\frac{dE}{dx} \approx \frac{1}{\beta^2} \quad \nearrow$$

# BACKUP 3

# Étude de la distribution de $p/m$

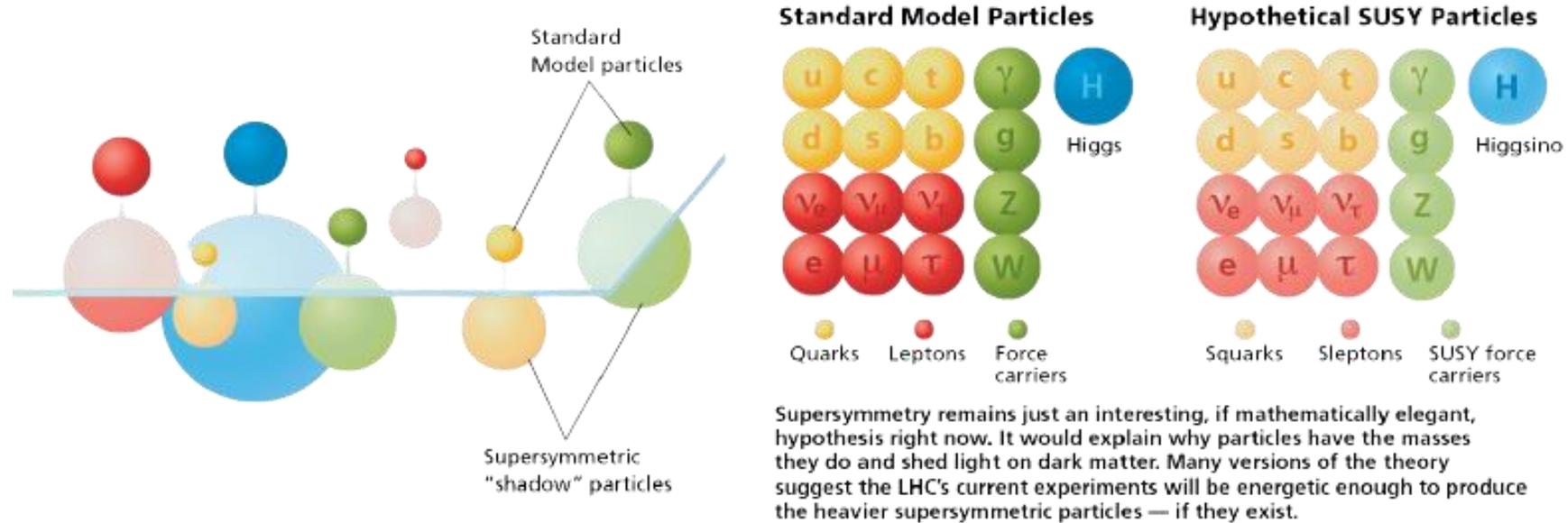
Coupure sur  $\beta\gamma \notin [0.3 - 0.8]$

$M = 1800$ GeV	% de candidats dans l'intervalle [0.3,0.8]
<i>Pas de sélection</i>	<i>72.6</i>
<i>Présélection</i>	<i>73.8</i>
<i>Sélection <math>I_{as} &gt; 0.2</math></i>	<i>77.3</i>



# BACKUP 4

# La Supersymétrie



Extension au modèle standard, rajoutant une symétrie de spin

- Divergences à la masse du higgs peuvent être corrigées
- Un candidat pour la matière noire : Particule supersymétrique la plus légère et stable (neutralino)
- Unification des interactions au-delà d'une échelle  $10^{16}$  GeV

# BACKUP 3

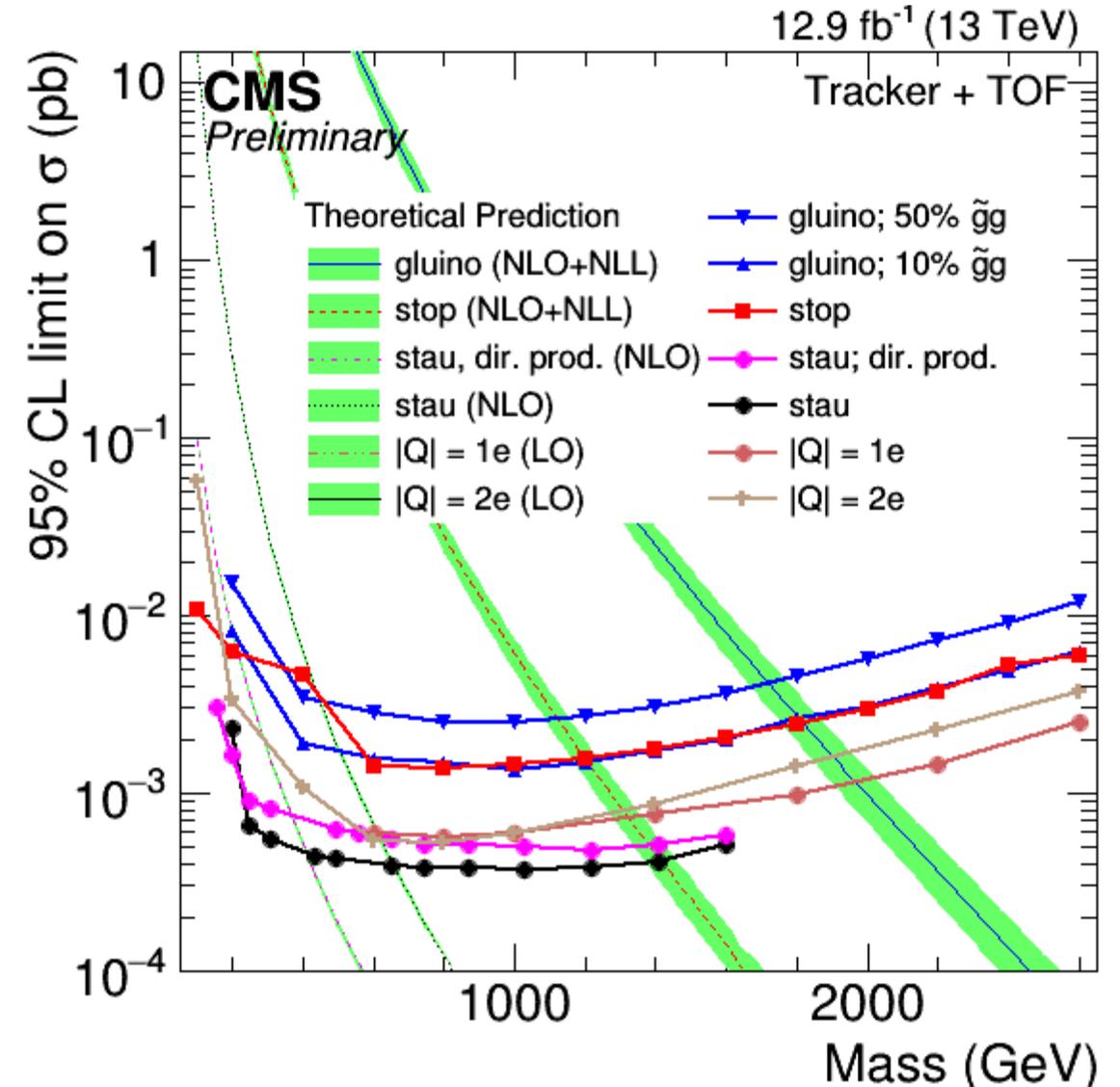
## Limites HSCP

Temps de vie des gluinos pouvant aller jusqu'à 100 secondes

SPLIT  $\rightarrow$  squarks très lourds :

- Un gluino peut se désintégrer en squark et quark mais très rarement (du aux masses élevées)

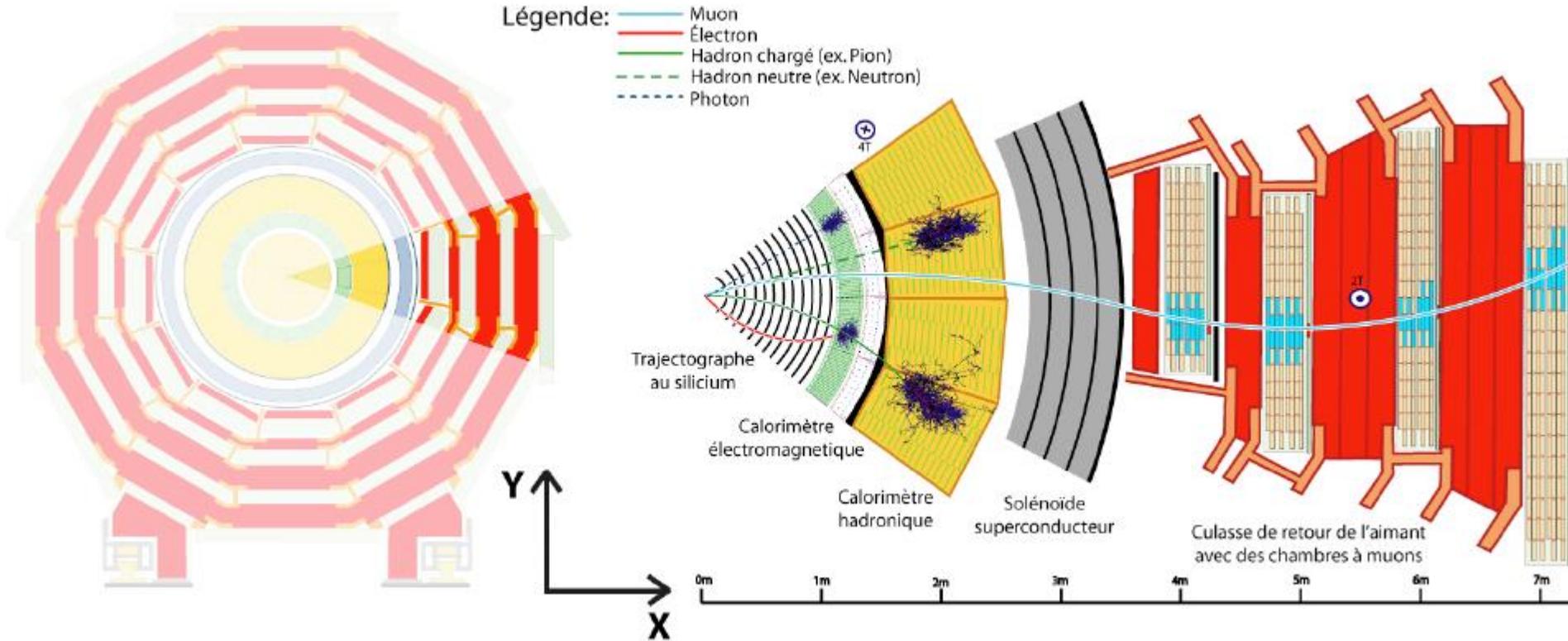
Prédictions sur les masses des gluinos pour différents types



# BACKUP 4

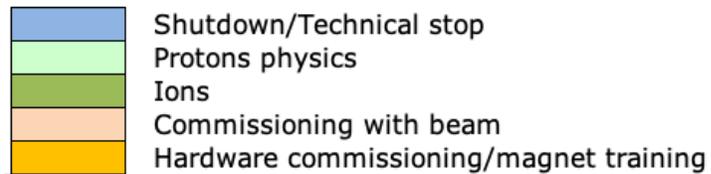
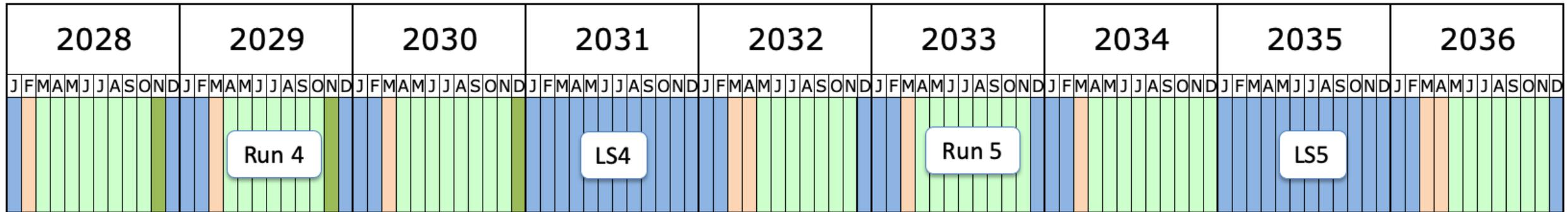
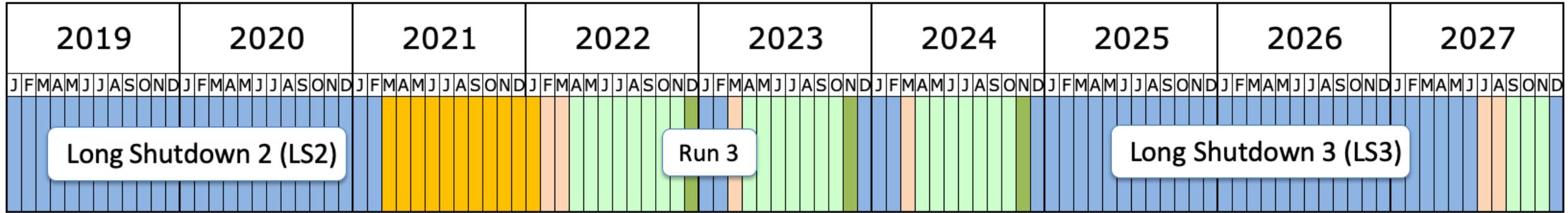
# Le détecteur CMS

- 21m x 15m
- 14 000 tonnes
- Champ magnétique jusqu'à 4 T



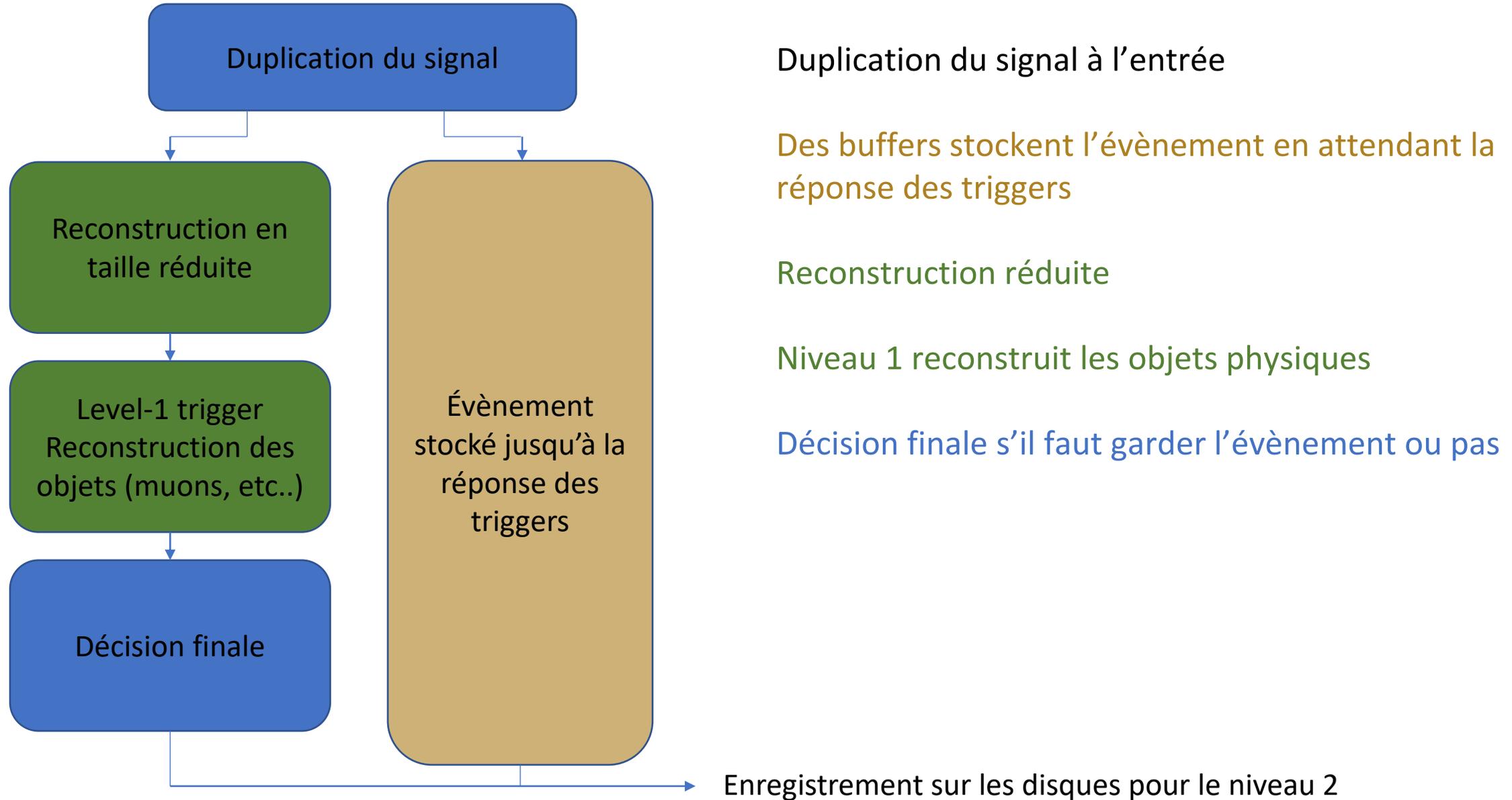
# BACKUP 5

# Calendrier LHC



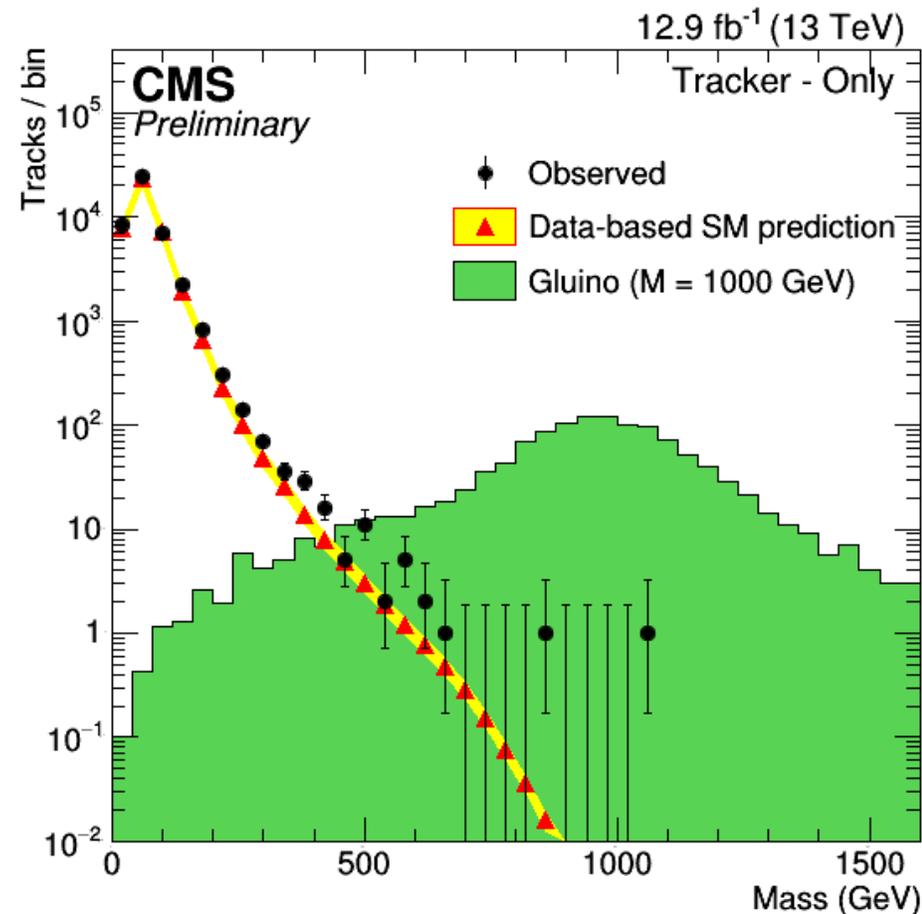
# BACKUP 6

# CMS Level-1 trigger



# Un candidat HSCP : le gluino

- ❑ Étude focalisée sur le gluino  
(partenaire supersymétrique du gluon,  
boson de jauge de l'interaction forte)
- ❑ Gluinos à longs temps de vie prédits
- ❑ Pas observées à ce jour → limites sur  
leurs masses (  $M_{\text{gluino}} \gg 100 \text{ GeV}$  )



Données étudiées

Étude sur des simulations Monte-Carlo de Gluinos entre 1600 et 2600 GeV

## Répartition des scénarios

Autre (neutre-neutre, pas de bonne reconstruction )	Chargé-Neutre (31%)	Chargé-Chargé (27%)	Total
6720	4960	4320	16104