Recherche des squarks et des gluinos dans DELPHI

Patrice Verdier

- **Introduction sur la supersymétrie:**
  - Phénoménologie des squarks
  - Hadronisation du stop ($\tilde{t}_1$)
- **Présentation du détecteur DELPHI**
- **Recherche des squarks à $\sqrt{s} = 189 \rightarrow 208.8$ GeV**
  - Recherche du stop: $\tilde{t}_1 \rightarrow \mathbf{c}\tilde{\chi}^0_1$
  - Recherche du sbottom: $\tilde{b}_1 \rightarrow \mathbf{b}\tilde{\chi}^0_1$
- **Un gluino ($\tilde{g}$) "lourd" LSP ?**
  - Modèles théoriques, motivations et contraintes
  - Interaction des R-hadrons avec la matière
  - Modes de production
  - Simulation du signal supersymétrique
- **Recherche d'un $\tilde{g}$ LSP dans la désintégration: $\tilde{t}_1 \rightarrow \mathbf{c}\tilde{g}$**
  - $e^+e^- \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1 \rightarrow \mathbf{c}\tilde{g}\mathbf{c}\tilde{g} \rightarrow \mathbf{cc}R^{\pm}R^{\pm}$
    $\rightarrow \mathbf{cc}R^{\circ}R^{\circ}$
- **Conclusion**

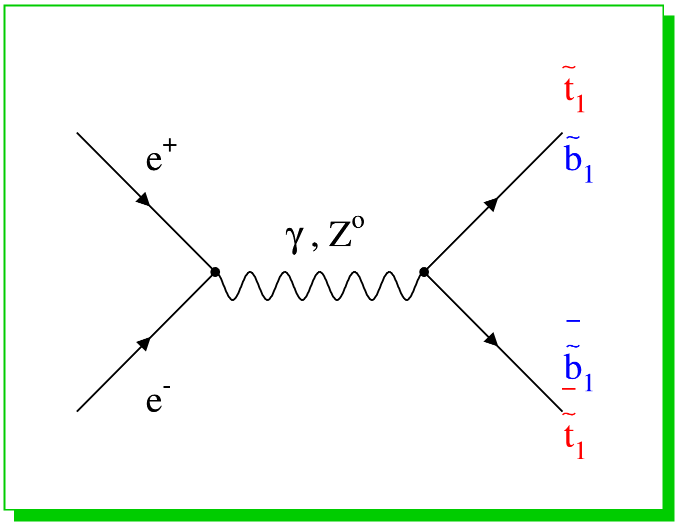
Secteur des squarks

- **Squarks (Spin 0) = partenaires supersymétriques des quarks (spin 1/2)**
- **Les squarks de troisième génération, Stop ($\tilde{t}_1$) et Sbottom ($\tilde{b}_1$) pourraient être les premières particules supersymétriques produites en collisioneurs.**

- **La R-parité est conservée → les squarks sont produits par paires et la LSP est stable.**
- **On suppose que la LSP est le neutralino le plus léger ($\tilde{\chi}_1^0$): → $\tilde{\chi}_1^0 \equiv$ Energie manquante.**

$$\mathcal{M}^2_{\tilde{q}} = \begin{pmatrix} m_{\tilde{q}_L}{}^2 & a_q m_q \\ a_q m_q & m_{\tilde{q}_R}{}^2 \end{pmatrix} \quad \begin{cases} a_u = A_u - \mu cot\beta \\ a_d = A_d - \mu \tan\beta \end{cases}$$

$$\begin{cases} \tilde{q}_1 = \tilde{q}_L \cos\theta_{\tilde{q}} + \tilde{q}_R \sin\theta_{\tilde{q}} \\ \tilde{q}_2 = -\tilde{q}_L \sin\theta_{\tilde{q}} + \tilde{q}_R \cos\theta_{\tilde{q}} \end{cases}$$



Découplage au Z^0 pour :
$\mathbf{I_3^q} \cos^2\theta_{\tilde{q}} - \mathbf{Q}_{\tilde{q}}\mathbf{sin^2}\theta_{\mathrm{W}} = 0$

- $\theta_{\tilde{t}} = \mathbf{56°}$
- $\theta_{\tilde{b}} = \mathbf{68°}$

$\sim$ **section efficace minimale**

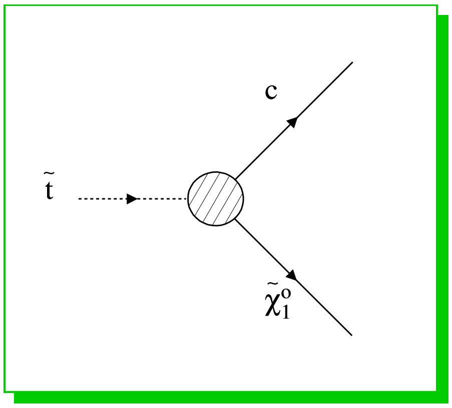
Hadronisation du stop

- La masse du top mesurée au TEVATRON (175 GeV) rend la désintégration du stop $\tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}^0_1$ impossible à LEP.
- La désintégration $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}^\pm$ est défavorisée compte tenu des limites actuelles sur la masse du chargino.

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}^0_1 \text{ et } \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}^0_1}$$

topologie 2 jets acoplanaires+énergie manquante



- La désintégration $\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}^0_1$ intervient par correction radiative :

$$\Gamma(\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}^0_1) = \frac{\alpha_{em}}{4}|\epsilon|^2|F|^2 m^2_{\tilde{t}_1}\left(1 - \frac{m^2_{\tilde{\chi}^0_1}}{m^2_{\tilde{t}_1}}\right)$$

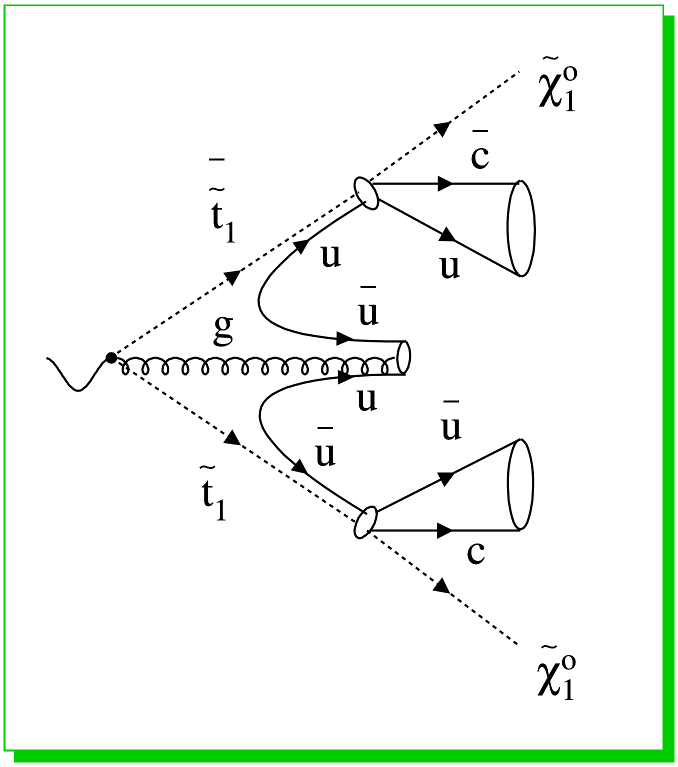
avec $\epsilon \sim 10^{-4}$, $\tau_{\tilde{t}_1} \sim 10^{-16} \gg \tau_{QCD}$

$\Longrightarrow$ Le stop s'hadronise avant de se désintégrer.

On a besoin d'un générateur d'évènements Monte-Carlo tenant compte de l'hadronisation du stop:

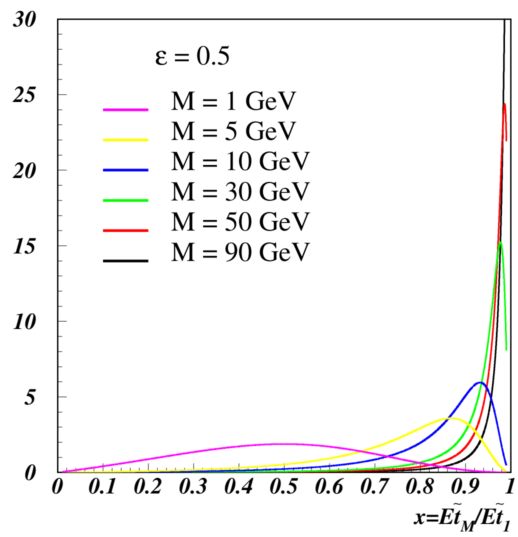
- pour la simulation du signal à rechercher
- pour étudier les systématiques dûes à la simulation de l'hadronisation.

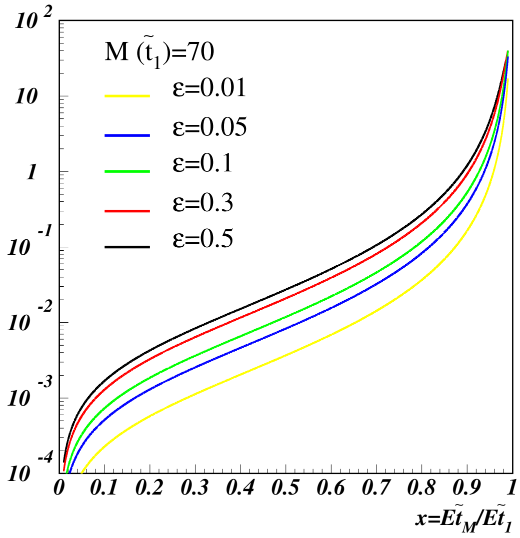
STOPGEN



- **Emission de gluon dur** des $\tilde{t}_1$: cut-off entre $e^+e^-\to\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ et $e^+e^-\to\tilde{t}_1\tilde{t}_1 g$
- **Hadronisation non perturbative** "a la Peterson": Les jets de fragmentation sont traités comme des quarks "up"
- **Mouvement de Fermi** des quarks spectateurs
- **Interface avec JETSET**

$$\mathbf{D}_{\tilde{t}}(\mathbf{x},\epsilon) = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{N}}\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{x}(\mathbf{1}-\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{x}}-\frac{\epsilon_{\tilde{t}}}{\mathbf{1-x}})^{\mathbf{2}}}\ \text{, avec } \epsilon_{\tilde{t}} = \frac{\epsilon}{\mathbf{m}^2_{\tilde{t}_1}}$$





Code disponible $\Longrightarrow$ http://home.cern.ch/verdier/

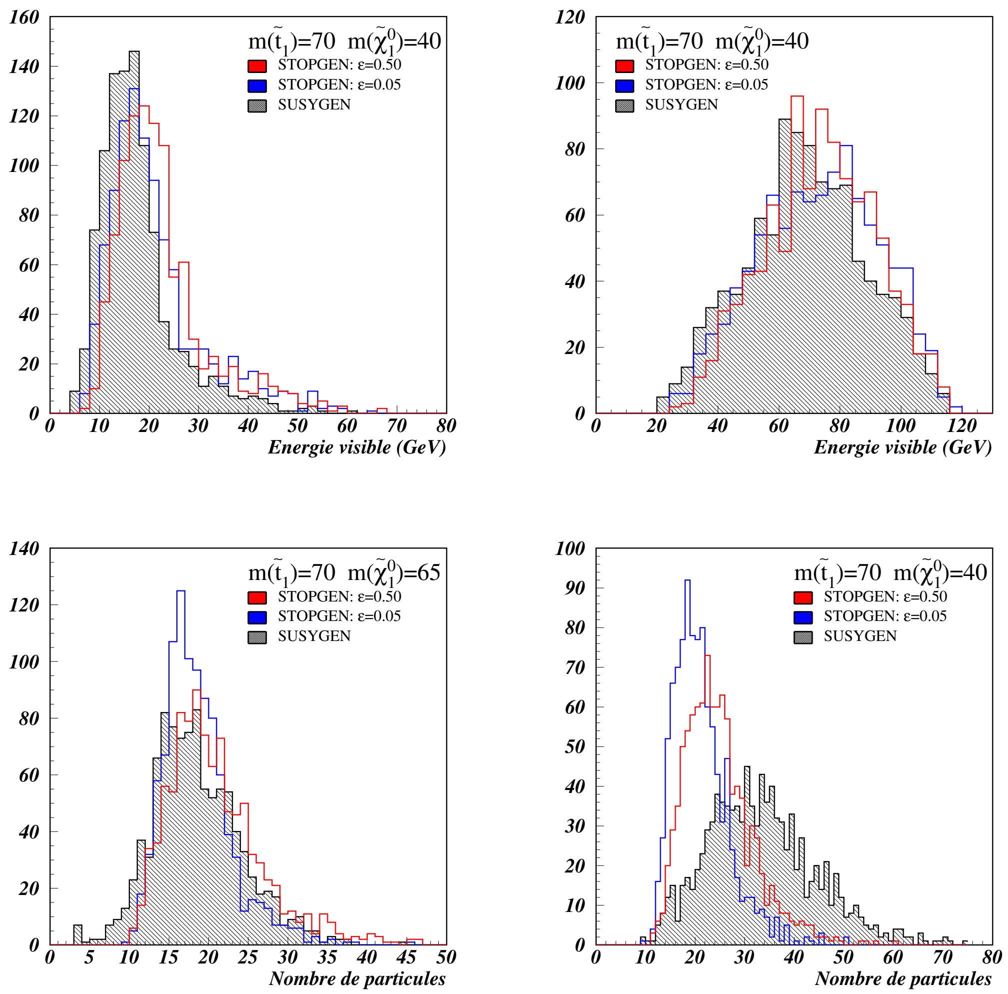
STOPGEN

Un paramètre variable: ϵ (entre 0. et 0.5 $(\mathrm{GeV/c^2})^2$)

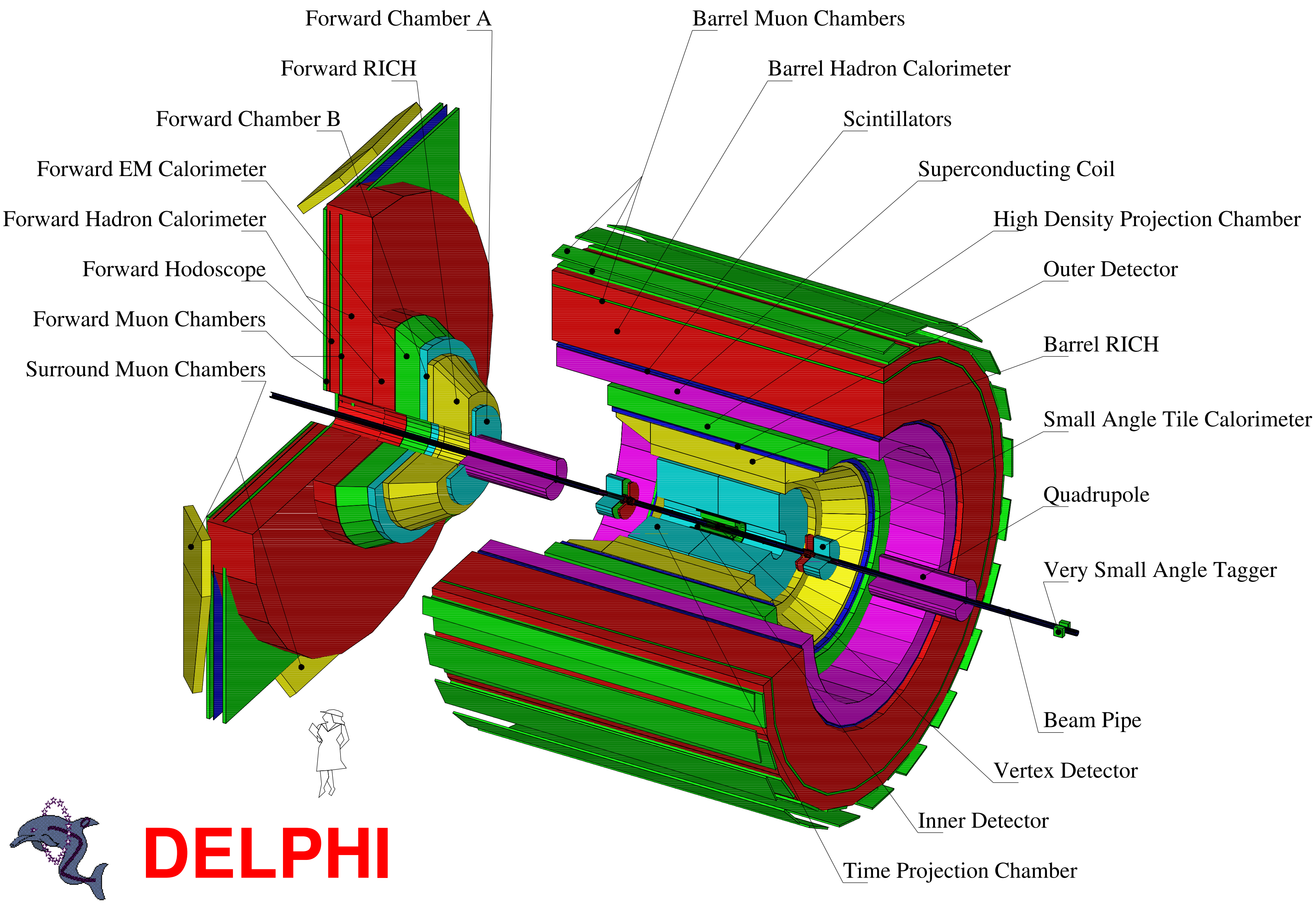
- **si $\epsilon \to 0$: modèle sans hadronisation.**
- **si $\epsilon \nearrow$: l'énergie visible augmente.**

$\longrightarrow$ Etude des systématiques dûes à la simulation de l'hadronisation du stop

- **Les effets de l'hadronisation sont plus importants pour les faibles ΔM ($=m_{\tilde{t}_1}$- $m_{\tilde{\chi}_1^0}$)**

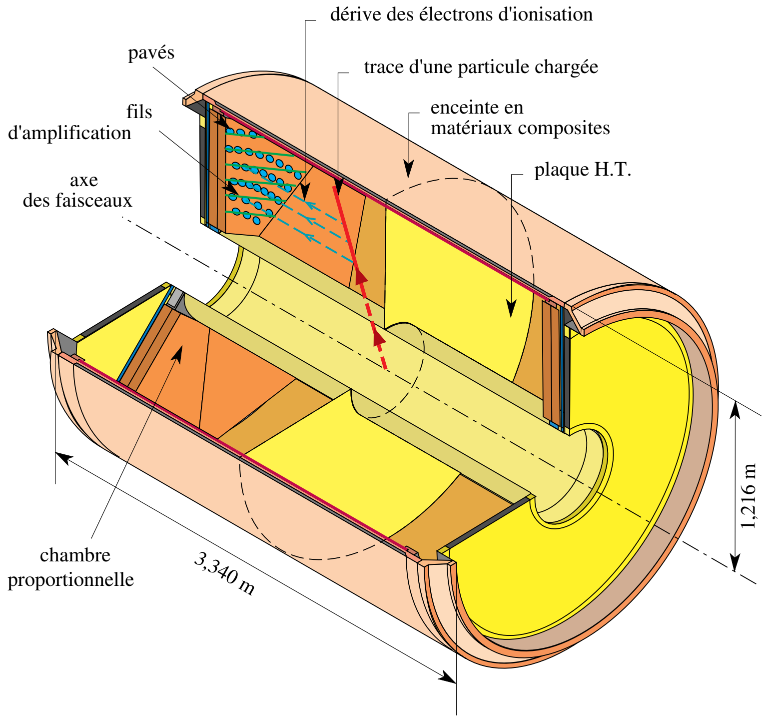


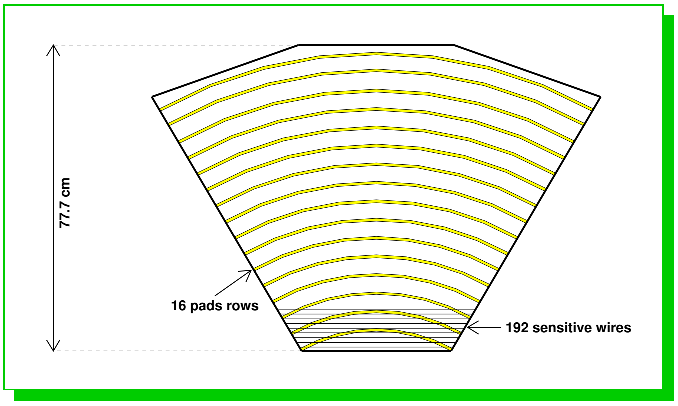
Le détecteur DELPHI

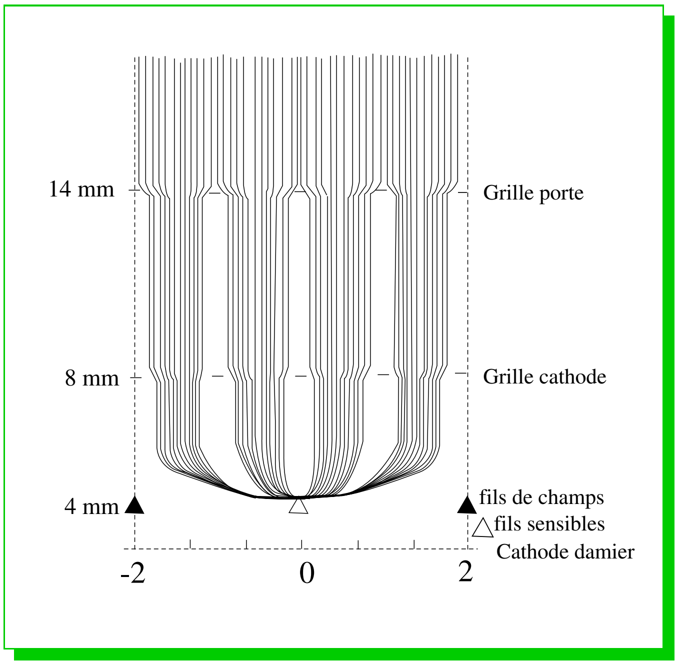


DELPHI

La TPC







- **Reconstruction à 3 dimensions des traces chargées.**
- **Mesure du dE/dx à l'aide des signaux récoltés par les 192 fils sensibles**

Recherche des squarks

• Préselection:

Préselection commune aux analyses stop et sbottom:

- **Sélection d'évènements hadroniques.**
- **Réduire le fond $\gamma\gamma \rightarrow$ hadrons à basse énergie.**

Les évènements sont alors clusterisés en 2 jets avec l'algorithme Durham.

• Analyse en fenêtre de masse: $\Delta M = m_{\tilde{t}_1} - m_{\tilde{\chi}^0_1}$

- $\Delta M > 30$**:** $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(n\gamma)$ **et 4-fermions**
- $10 < \Delta M < 30$**:** $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(n\gamma)$**, 4-fermions et interactions** $\gamma\gamma \rightarrow$ **hadrons**

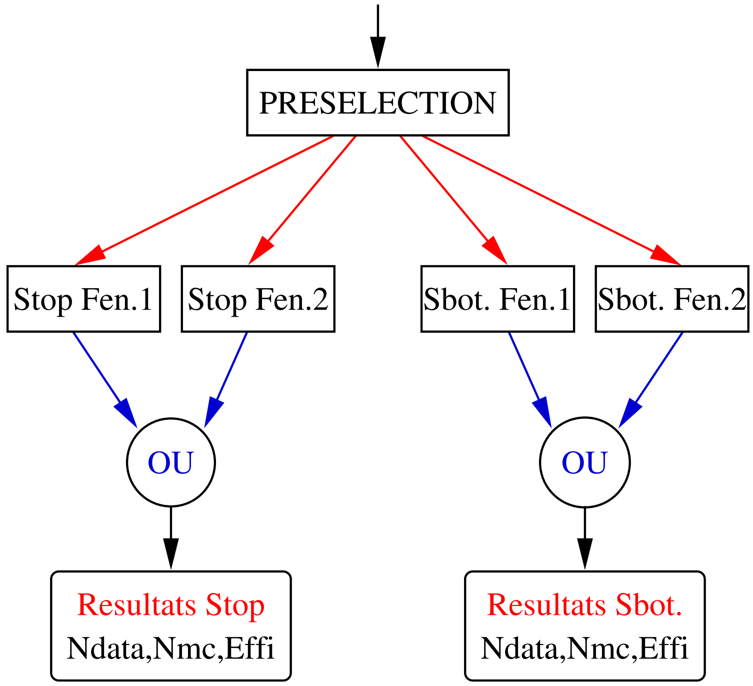
La sélection finale est effectuée sur les sorties de réseaux de neurones:

- **Un réseaux par fenêtre d'analyse (pour le $\tilde{t}_1$ et le $\tilde{b}_1$)**
- **Structure des réseaux: (10,10,3)**
- **Même structure et mêmes entrées pour tous les réseaux.**

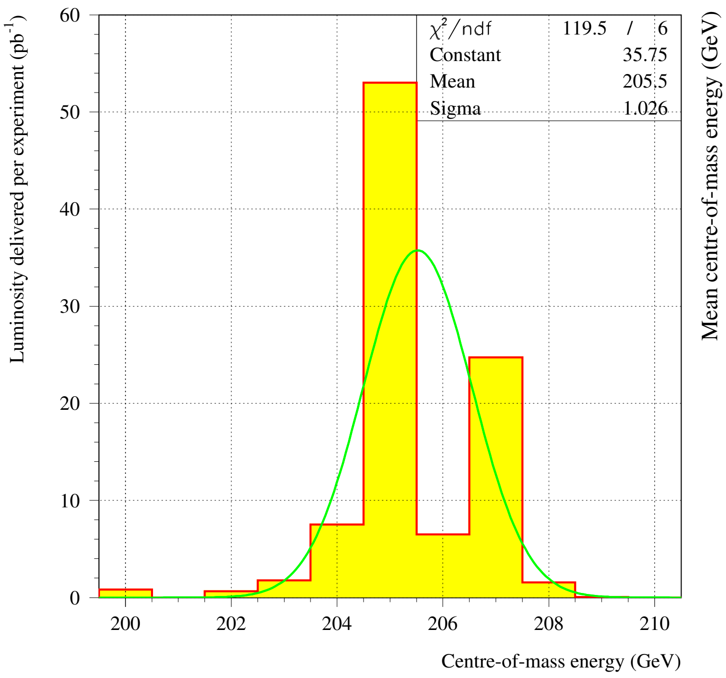
noeud de sortie	noeud 1	noeud 2	noeud 3
Signal	1	0	0
$q\bar{q}\gamma$ 4-fermions	0	1	0
$\gamma\gamma$ *had.*	0	0	1

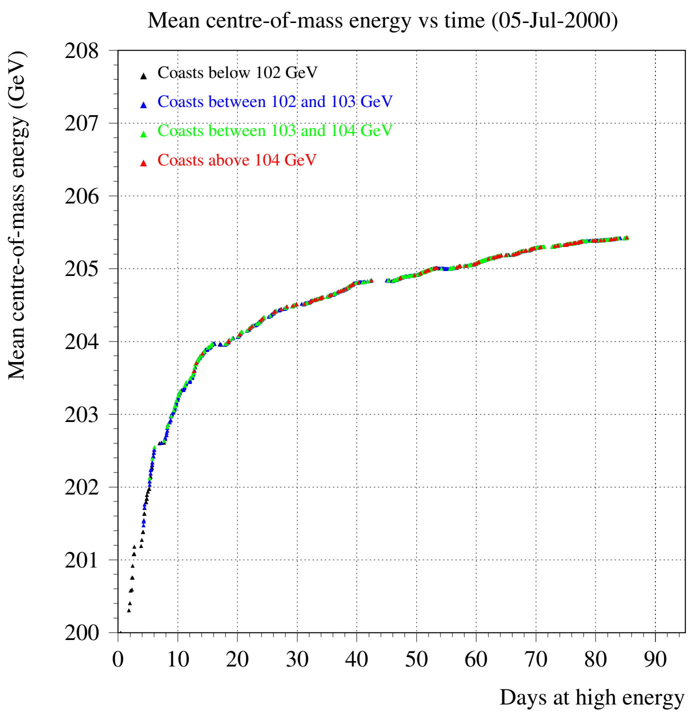
- M_{vis}, E_{30^o}/E_{vis}, **acol., acop., btagging (2 jets Durham)...**

Recherche des squarks



- **Prise de données 2000:**

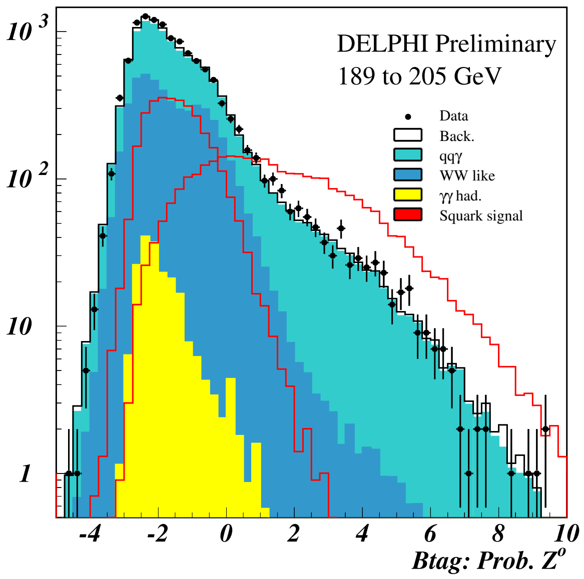


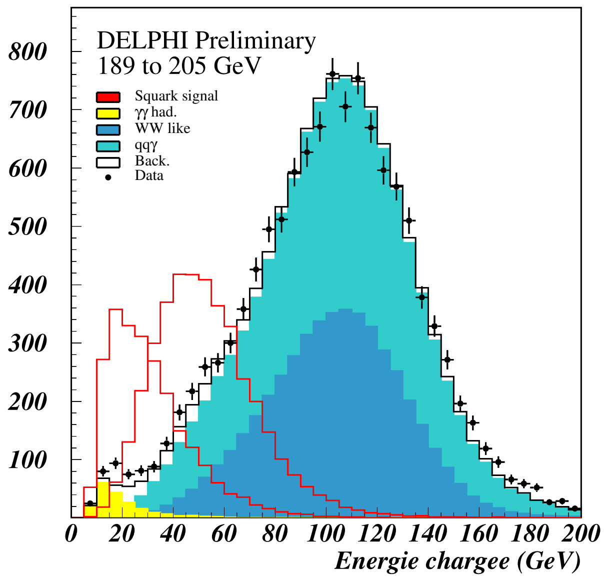


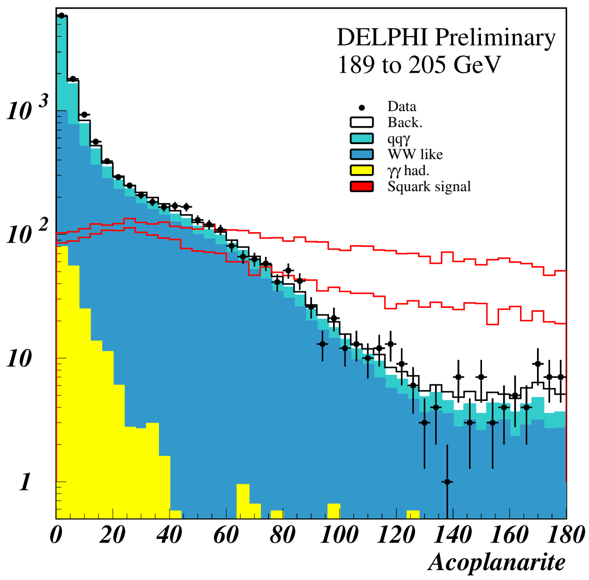
Recherche des squarks

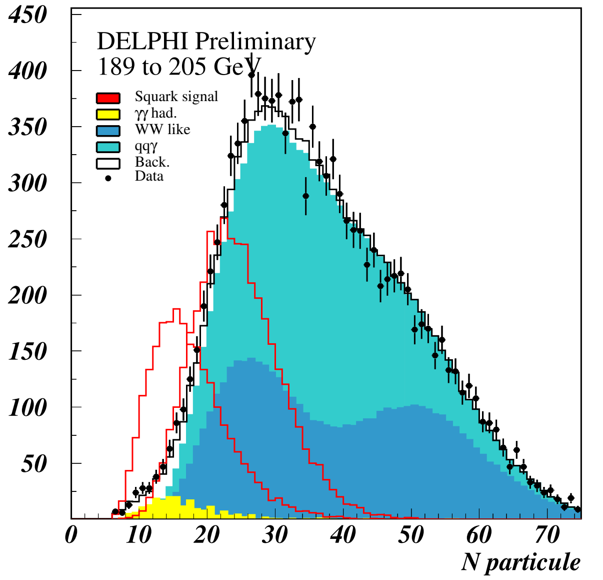
• Comparaison data-MC à la préselection:

- Les données de 189 à 208.8 GeV sont combinées

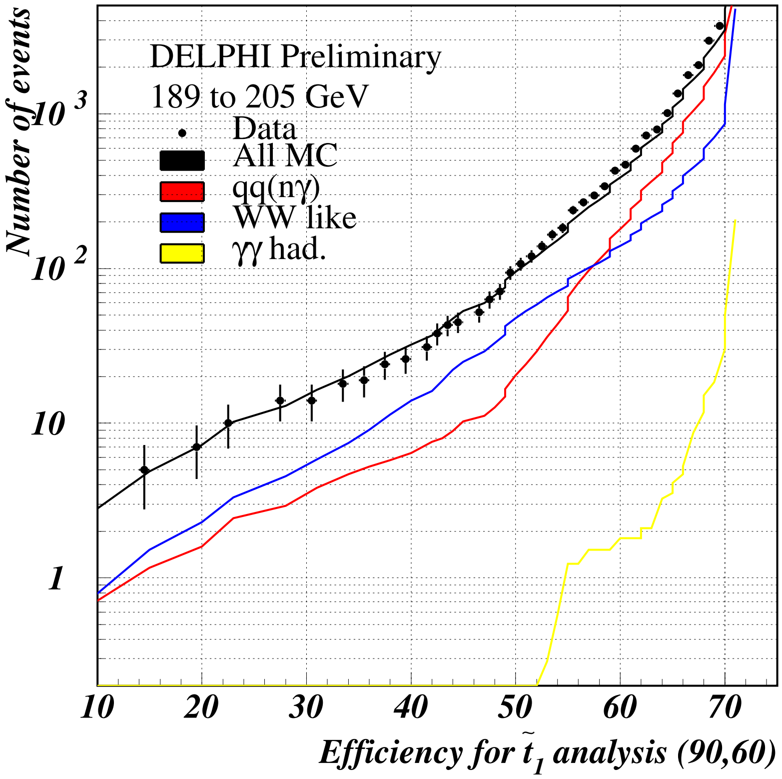


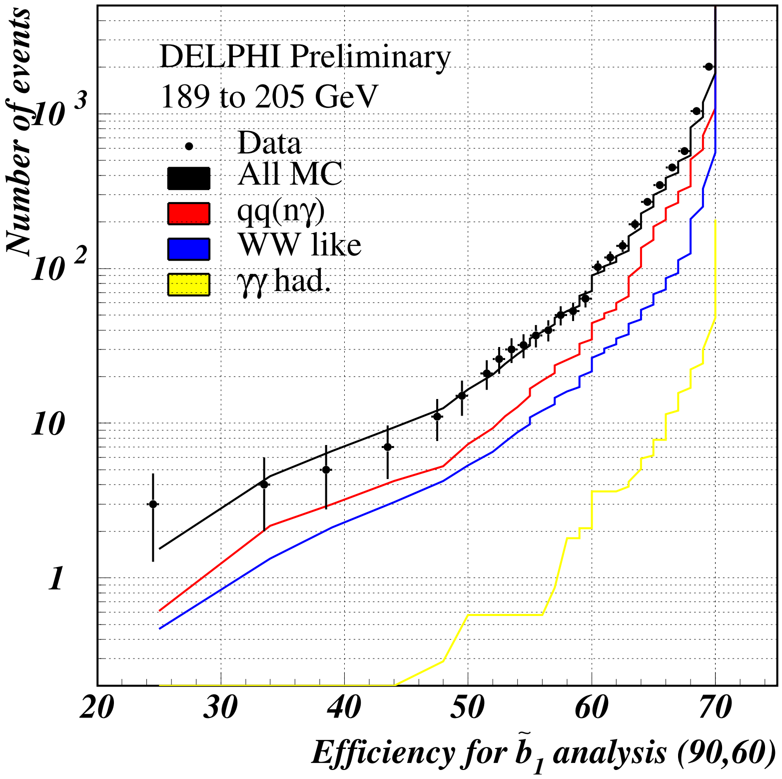






Recherche des squarks





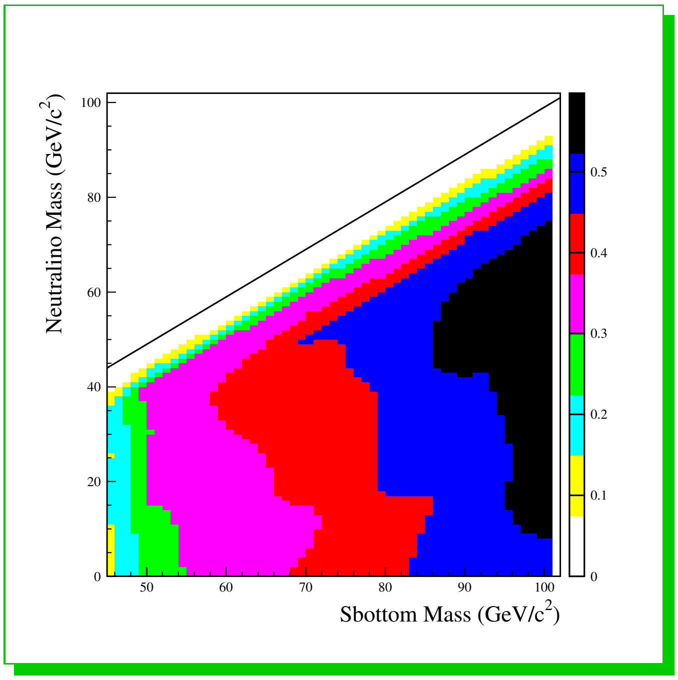
Recherche des squarks

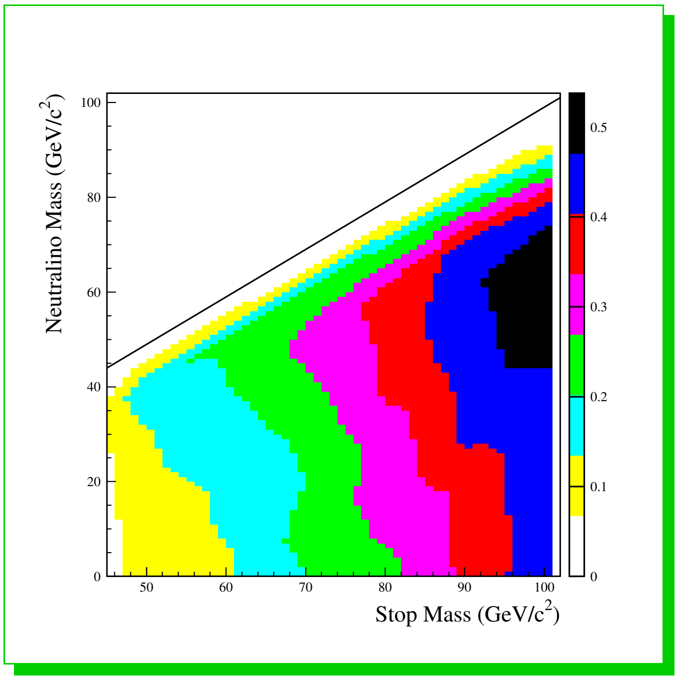
- **Résultats de 189 à 205.**

		Analyse stop		Analyse sbottom	
$\sqrt{s}$	$\mathcal{L}$ (pb^{-1})	data	MC	data	MC
189	158.0	6	5.79±0.50	4	2.65±0.37
192	25.9	2	1.22±0.13	3	0.88±0.16
196	76.4	3	3.74±0.27	1	2.80±0.31
200	83.4	1	3.97±0.27	1	2.41±0.28
202	40.6	2	1.98±0.12	2	1.48±0.14
205	82.5	5	4.79±0.40	2	3.44±0.37
total	466.8	19	21.49±0.77	13	13.66±0.76

- **Efficacités sur le signal:**

- **Les efficacités de détection du signal** sont mesurées pour $\sim$ **50 points** simulés $(m_{\tilde{q}_1}, m_{\tilde{\chi}_1^0})$.
- $\Longrightarrow$ **Interpolation** dans le plan $(m_{\tilde{q}_1}, m_{\tilde{\chi}_1^0})$.

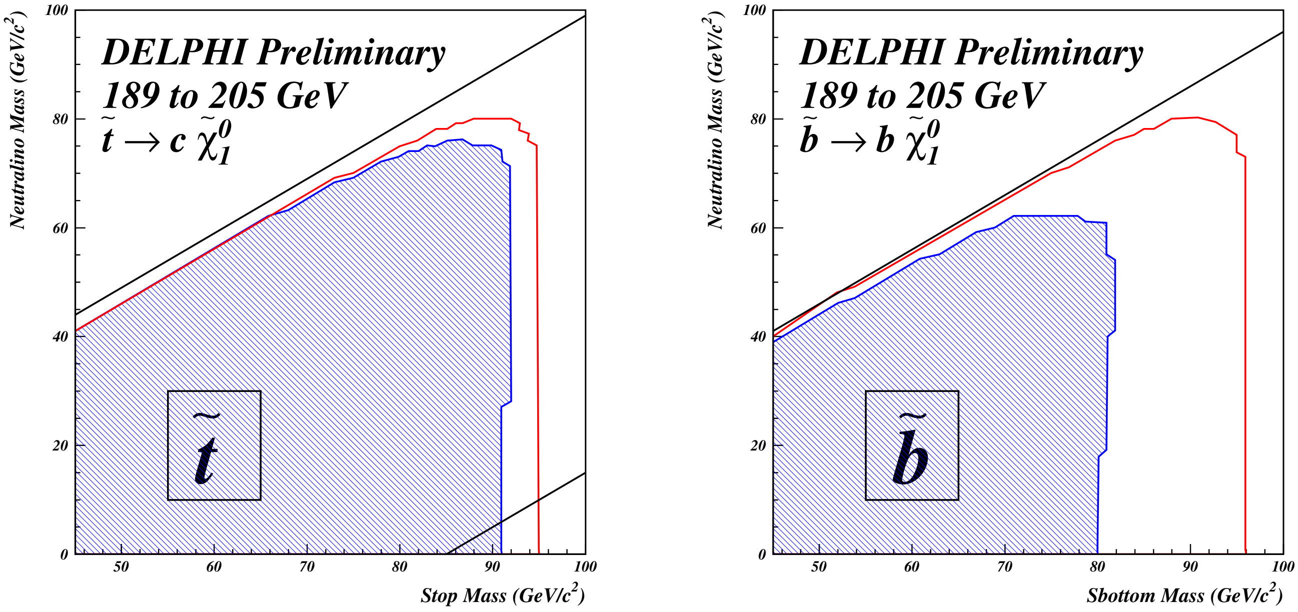




Recherche des squarks

- **Exclusions dans le plan ($m_{\tilde{q}}$,$m_{\tilde{\chi}^0_1}$):**

  - **Sections efficaces des processus $e^+e^- \to \tilde{q}_1\tilde{q}_1$ calculée avec SUSYGEN:**
    - **Pour des squarks purement gauches (zône rouge)**
    - **Pour $\theta_{\tilde{q}} \Longrightarrow$ découplage au Z^0 (zône bleue)**
  - **Limites à 95% de niveau de confiance dans le plan ($m_{\tilde{q}_1}$,$m_{\tilde{\chi}^0_1}$)**



- **Limites en masse: ($\Delta M >$ 20 GeV/c²)**

	Limite (GeV/c²)		Limite (GeV/c²)
$\Theta_{\tilde{t}} = \mathbf{0}$	$m_{\tilde{t}_1} \geq \mathbf{95}$	$\Theta_{\tilde{b}} = \mathbf{0}$	$m_{\tilde{b}_1} \geq \mathbf{96}$
$\Theta_{\tilde{t}} = \mathbf{56}$	$m_{\tilde{t}_1} \geq \mathbf{91}$	$\Theta_{\tilde{b}} = \mathbf{68}$	$m_{\tilde{b}_1} \geq \mathbf{80}$

Le gluino LSP ?

Modèle SUGRA : (J. Gunion)

- **Equation du groupe de renormalisation:**

$$M3 : M2 : M1 \;\sim \alpha_3 : \alpha_2 : \alpha_1$$

Habituellement : $m_{\tilde{g}} \;\sim\; M3$ **est plus lourd que** $m_{\tilde{\chi}_1^0}$

- **Mais, il existe des modèles où** $m_{\tilde{g}} \;<\;$ **M1,M2**
- **0-II String model :**

$$M3 : M2 : M1 \;\sim\; -(3+\delta_{GS}) : (1-\delta_{GS}) : (33/5-\delta_{GS})$$

- **Si** $\delta_{GS} \;\sim\; -3$ **: M3 est le plus léger**
  $\Longrightarrow$ **Le gluino est la LSP**

Modèle GMSB : (S. Raby)

$$M_3 \;\sim\; \frac{\alpha_3(M)}{4\pi}\left(\frac{M}{M_{GUT}}\right)^2 \Lambda$$
$$M_2 \;\sim\; \frac{\alpha_2(M)}{4\pi}\Lambda$$
$$M_1 \;\sim\; \frac{\alpha_1(M)}{4\pi}\Lambda$$

- **le** $\tilde{\mathrm{g}}$ **peut être la LSP**
- **Un** $\tilde{\mathrm{g}}$ **NLSP (**$\widetilde{\mathrm{G}}$ **LSP) aura une durée de vie** $>$ **100 ans.**
  $\Longrightarrow$ **Gluino stable**

Le gluino LSP ?

Hadronisation du gluino :

Un $\tilde{g}$ stable s'hadronise pour former des hadrons singlets de couleurs (R-hadron):

• **Isoscalar**	$R_o = \tilde{g}g$	**(gluballino)**
• **Isotriplet**	$\tilde{\rho} = \tilde{g}q\bar{q}'$	**(glumesino)**
• **flavor singlet**	$S_o = \tilde{g}uds$	**(glubarino)**
	$n\tilde{g} = \tilde{g}\tilde{g}$	**(gluinoball)**

$\Longrightarrow$ **Pour la suite, on considère 2 états de R-hadrons :**

$$R_O \;,\; R^{\pm}$$

Soit P la probabilité que le $\tilde{g}$ fragmente en un $R^{\pm}$

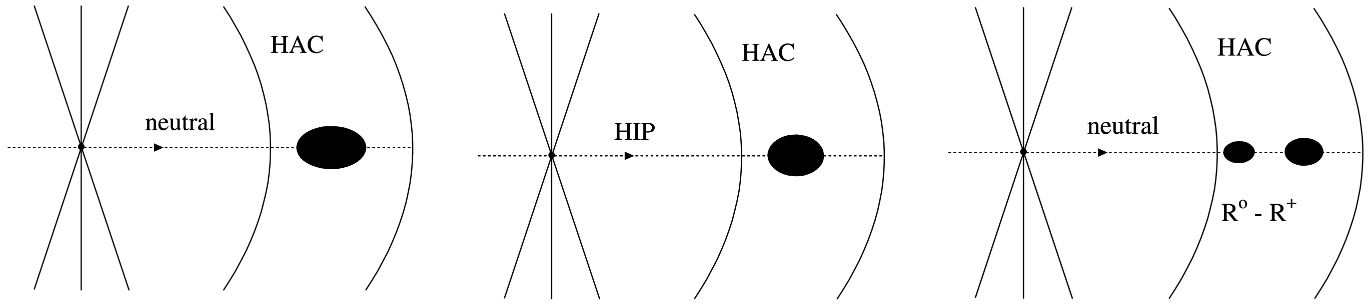
Limites actuelles :

- **Gluino NLSP : $\tilde{g} \rightarrow q q \tilde{\chi}^0_1$:**
  - **kTeV exclut $m_{\tilde{g}}$= 1-5 GeV**
  - **CDF exclut $m_{\tilde{g}}$= 5-173 GeV**
- **Contraintes si le $\tilde{g}$ est stable:**
  - **Fermilab (beam dump) exclut $m_{\tilde{g}}$= 2-4 GeV**
  - **Fermilab : $m_{\tilde{g}}$= 1-5 GeV pour $m_{\tilde{q}}$= 150-600 GeV**
  - **Running de α_s exclut $m_{\tilde{g}}$< 6** GeV

Contraintes supplémentaires:

- **Cosmologie : la densité relique peut être suffisament faible**
- **Isotopes lourds et stables : Les R-hadrons ne s'attachent pas aux noyaux lourds**

Interaction du $\tilde{g}$



Energie déposée dans un calorimètre:

- **Le R^o interagit peu avec la matière**

On considère donc le processus :

$$R_0 N \rightarrow R_0 X$$

$$\Delta E = \frac{m_X^2 - m_N^2 + |t|}{2m_N}$$

Pour estimer la valeur moyenne de l'énergie perdue à chaque collision $\Longrightarrow$ estimation de $\frac{d\sigma}{d|t|dm_X}$

Exemple de Modèle de sections efficaces

- **(1)** $\frac{d\sigma}{d|t|dm_X} \propto 1$ **pour** $|t| \leq 1GeV^2$**, 0 ailleurs.**

$$\langle \Delta E \rangle = \frac{\int_{m_N}^{\sqrt{s}-m_{R^0}} dm_X \int_{|t|_{\min}(m_X)}^{|t|_{\max}(m_X)} d|t| \, \Delta E \frac{d\sigma}{d|t|dm_X}}{\int_{m_N}^{\sqrt{s}-m_{R^0}} dm_X \int_{|t|_{\min}(m_X)}^{|t|_{\max}(m_X)} d|t| \frac{d\sigma}{d|t|dm_X}}$$

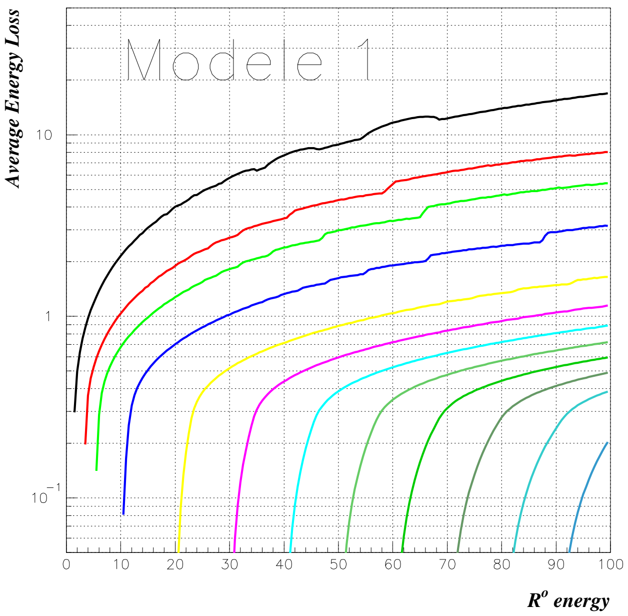
Interaction du $\tilde{g}$

Les R-hadrons dans DELPHI :

Calorimetres Electromagnetiques:	$\sim$ **1** Λ_T
Calorimetre Hadronique:	**6.6** Λ_T

- **Correction 1 :**
  Prise en compte de la nature en octet de couleur des constituants du R^o (facteur C_A/C_F): $\sigma^T_{R^oN} \sim (9/4)\sigma^T_{\pi N}$
- **Correction 2 :**
  Taille du R-hadron (facteur $\langle r^2_{R^o}\rangle/\langle r^2_\pi\rangle$): $\sigma^T_{R^oN} \sim (1/4)\sigma^T_{\pi N}$

- **Correction totale :** $\sigma^T_{R^oN} \sim (9/16)\sigma^T_{\pi N}$
- **(ce qui revient à dire que $\Lambda_T(R^o) = \mathbf{(16/9)}\ \Lambda_T(\pi)$)**
- $\Longrightarrow (9/16) \times 7.6\Lambda_T = 4$ **collisions**



Production de R-hadrons

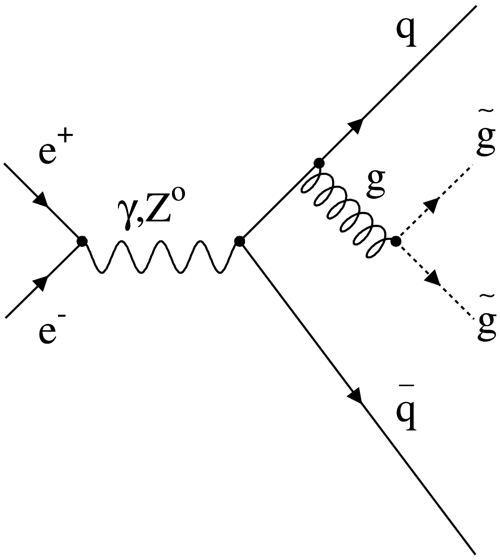
• Désintégration de particules SUSY:

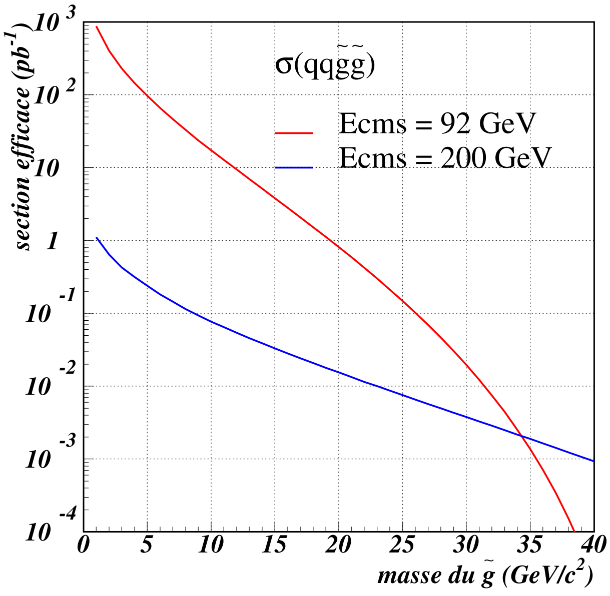
- $e^+e^- \rightarrow \widetilde{\chi}_1^0\widetilde{\chi}_1^0 \rightarrow$ **qq'**$\tilde{g}$ **qq'**$\tilde{g}$ **(6 jets)**
- $\rightarrow \widetilde{\chi}^+\widetilde{\chi}^- \rightarrow$ **qq'**$\tilde{g}$ **qq'**$\tilde{g}$ **(6 jets)**
- $\rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{g}c\tilde{g}$ **(4 jets)**

• Indépendante des autres sparticules:

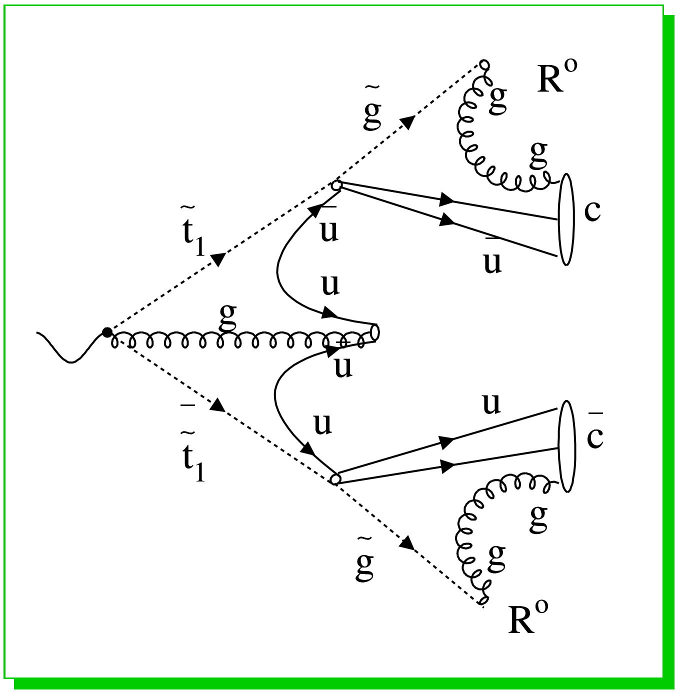
- **Splitting du gluon :**

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\tilde{g}\tilde{g}$$





Simulation dans STOPGEN



- **L'hadronisation des gluinos en R-hadrons est effectuées de manière non-pertubative en utilisant la distribution de Peterson.**

Choix des particules pour la simulation

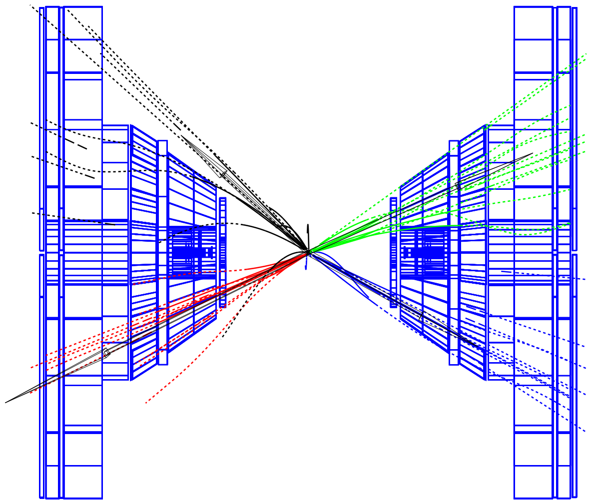
Les R-hadrons seront simulés comme:

- **des muons lourds pour les $R^{\pm}$**
- **des K_L^o pour les R^o**

- **Pour les R_o, l'énergie donnée au K_L^o sera celle calculée à partir des formules précédentes.**

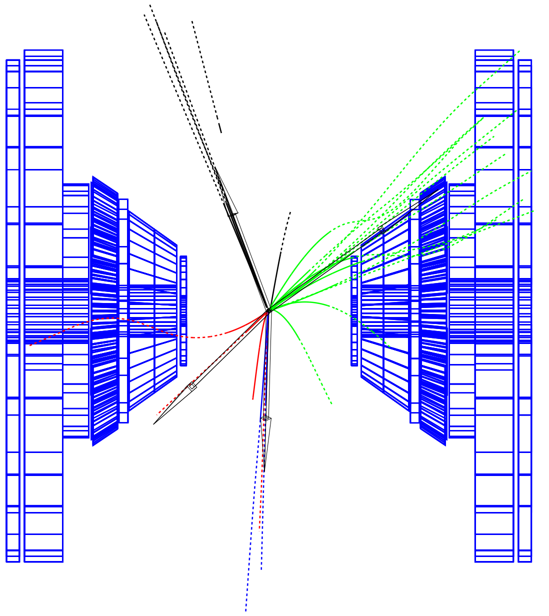
- **Pour les $R^{\pm}$: recherche de dE/dx anormaux. (également possible: utilisation du RICH de DELPHI).**

Simulation dans STOPGEN



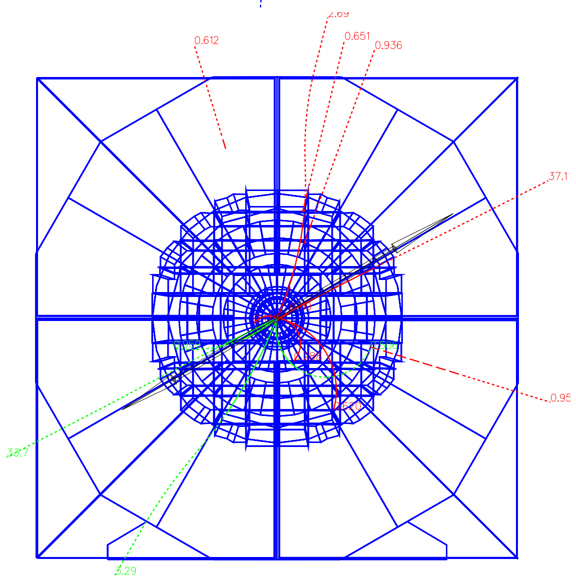
- **$m_{\tilde{t}_1} = 50$, $m_{\tilde{g}} = 1$:**

La fragmentation est molle: les particules issues de l'étape de fragmentation sont nombreuses. topologie 4 jets



- **$m_{\tilde{t}_1} = 70$, $m_{\tilde{g}} = 10$:**

peu de particules provenant de la fragmentation: topologie 2 jets + 2 jets "fins"

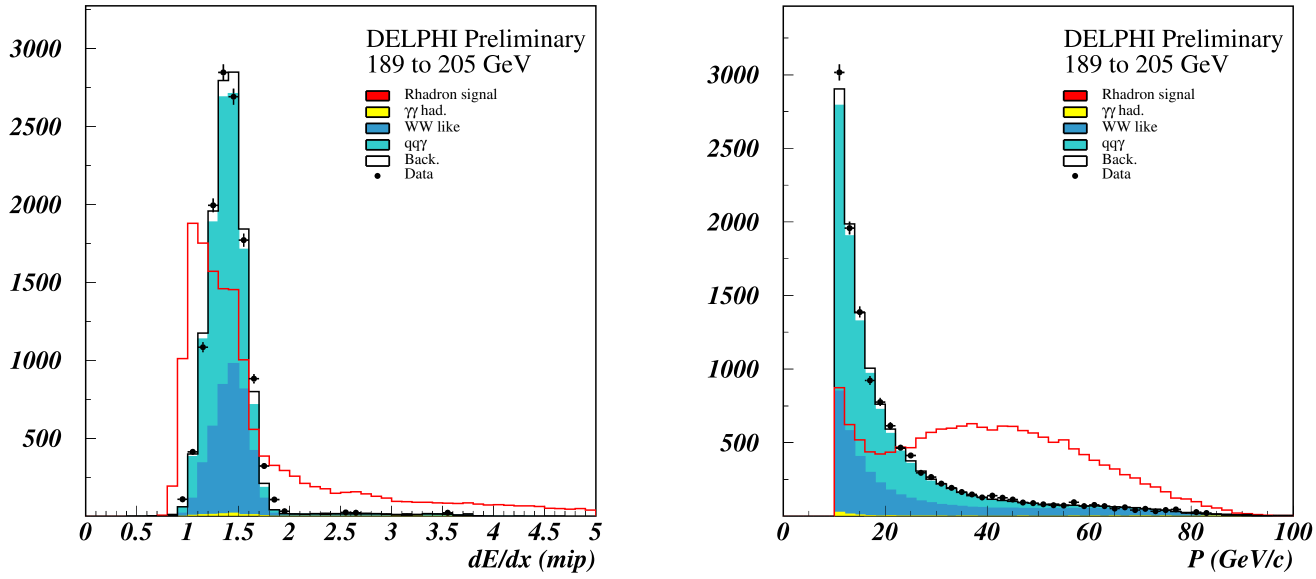


- **$m_{\tilde{t}_1} = 90$, $m_{\tilde{g}} = 85$:**

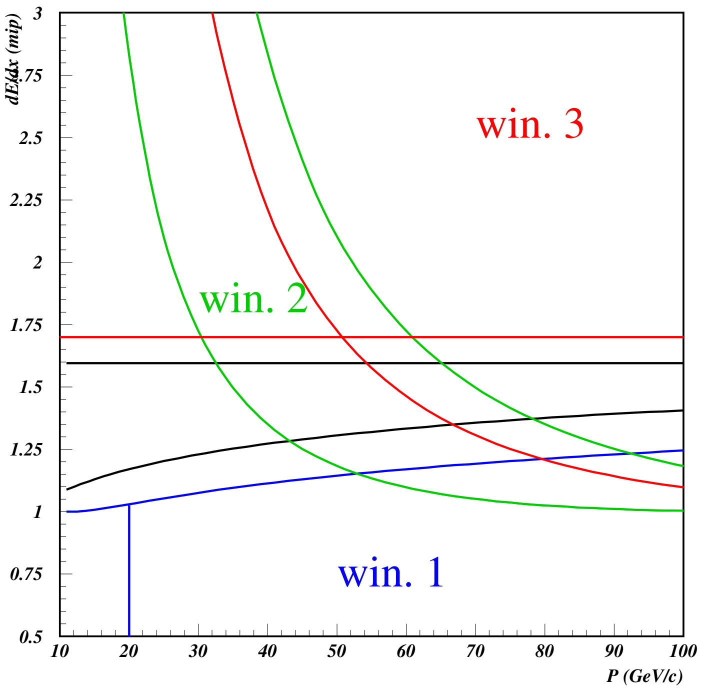
La fragmentation est dure: les R-hadrons emportent la majeur partie de lénergie et sont pratiquement "back-to-back". topologie 2 jets "mous"+ 2 particules isolees ($R^{\pm}$) ou topologie 2 jets "mous"+ energie manquante (R°)

Recherche des $R^{\pm}$

Comparaison data-MC:



R-hadrons chargés: Fenêtres de masse



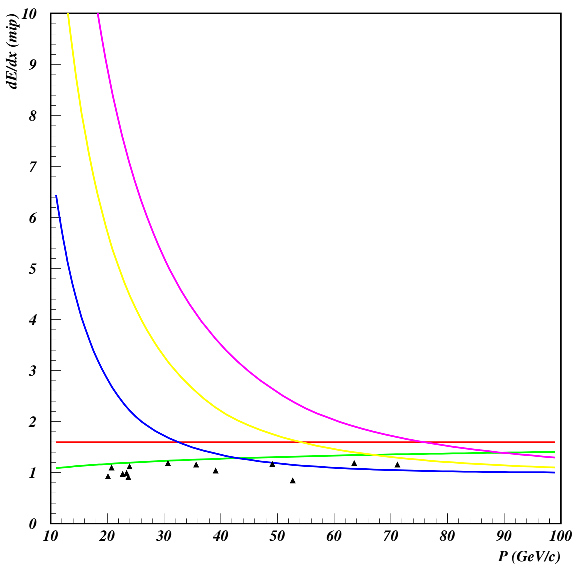
- **Fenêtre 1:**
  $m_{\tilde{g}} \leq$ **30** GeV/c^2
- **Fenêtre 2:**
  30 GeV/c$^2 < m_{\tilde{g}} <$ **60** GeV/c^2
- **Fenêtre 3:**
  $m_{\tilde{g}} \geq$ **60** GeV/c^2

Recherche des $R^{\pm}$

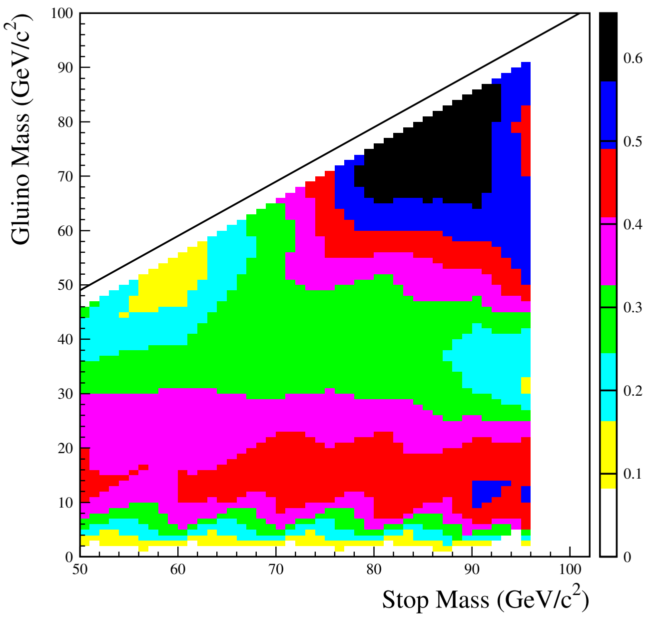
• R-hadrons chargés:

	Fenêtre 1		Fenêtre 2		Fenêtre 3	
$\sqrt{s}$	data	MC	data	MC	data	MC
189	4	5.03±0.56	0	0.185±0.055	0	0.213±0.096
192	1	0.84±0.18	0	0.031±0.012	0	0.014±0.008
196	4	2.35±0.29	0	0.095±0.049	0	0.003±0.002
200	0	2.42±0.31	0	0.046±0.010	0	0.030±0.014
202	2	0.99±0.12	0	0.020±0.008	0	0.010±0.003
204	2	1.54±0.16	0	0.013±0.003	0	0.036±0.021
total	13	13.17±0.75	0	0.390±0.076	0	0.306±0.100

• Candidats:



• Efficacités:



Recherche des R°

- **Préselection:**

  - **Sélection d'évènements hadroniques.**
  - **Réduire le fond $\gamma\gamma \rightarrow$ hadrons à basse énergie.**

Les évènements sont alors clusterisés en 2 et 4 jets avec l'algorithme Durham.

- **Analyse en fenêtre de masse:** $\Delta\mathbf{M} = m_{\tilde{t}_1} - m_{\tilde{g}}$

  - $\Delta M \leq 20$**: Coupures Séquentielles**
  - $\Delta M > 20$**: Réseau de neurones**

  - **Structure du réseaux: (10,15,3)**

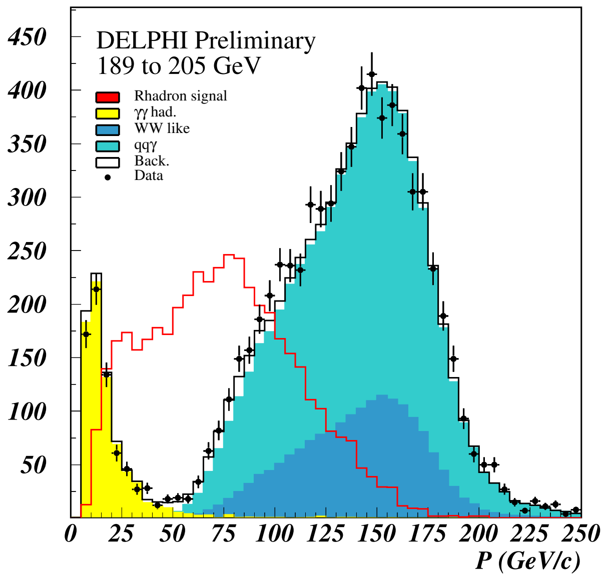
noeud de sortie	noeud 1	noeud 2	noeud 3
Signal	1	0	0
$q\bar{q}\gamma$ 4-fermions	0	1	0
$\gamma\gamma$ *had.*	0	0	1

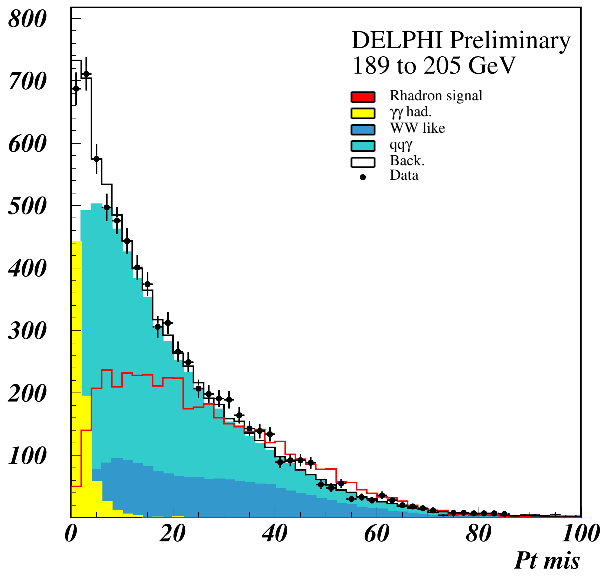
  - M_{vis}, **acol., acop.,** $\sqrt{s'}$, E_{ch}^{max}, E_{ne}^{max} ...

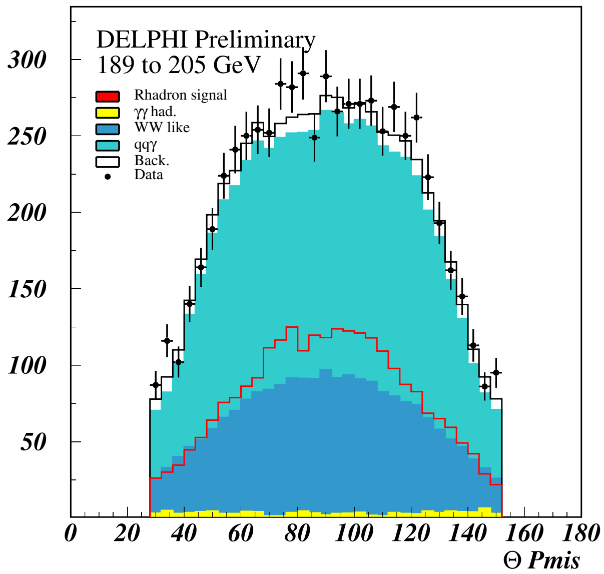
Recherche des R°

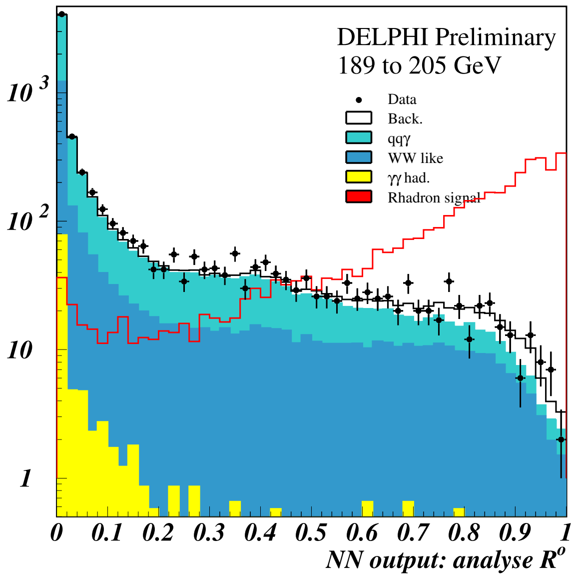
• Comparaison data-MC à la préselection:

- Les données de 189 à 208.8 GeV sont combinées







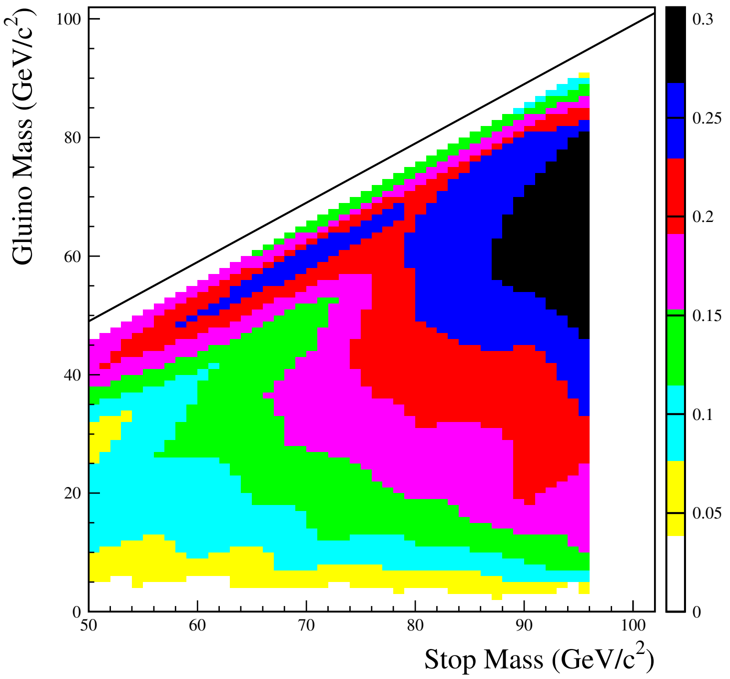


Recherche des R°

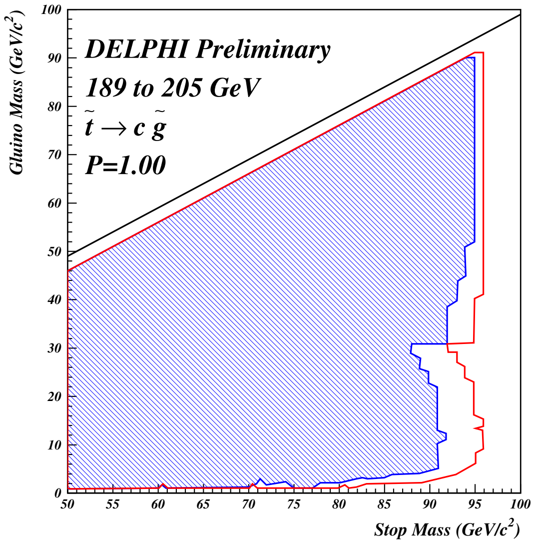
- **R-hadrons neutres:**

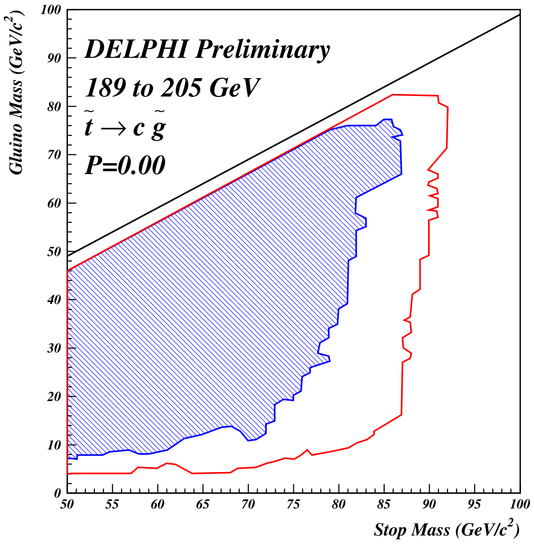
	$\Delta M \leq 20.$		$\Delta M > 20.$	
$\sqrt{s}$	data	MC	data	MC
189	**3**	**5.93±1.63**	**9**	**6.46±0.50**
192	**1**	**0.62±0.09**	**4**	**1.46±0.15**
196	**5**	**1.96±0.29**	**6**	**5.11±0.30**
200	**1**	**2.36±0.33**	**6**	**5.89±0.34**
202	**2**	**1.09±0.16**	**4**	**1.81±0.11**
204	**2**	**1.91±0.20**	**1**	**4.22±0.25**
total	**14**	**13.26±1.71**	**30**	**24.94±0.75**

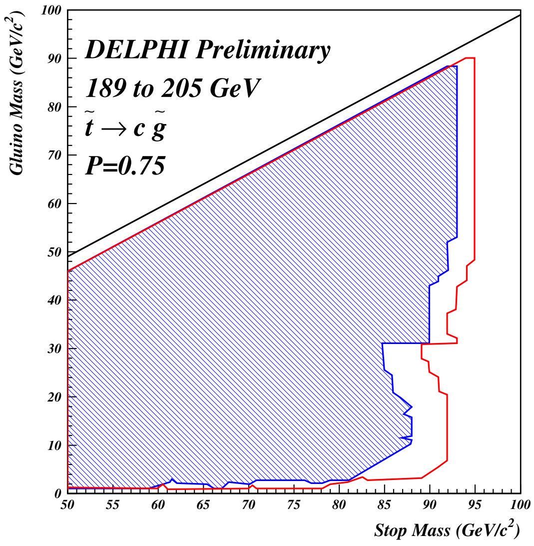
- **Efficacités sur le signal:**

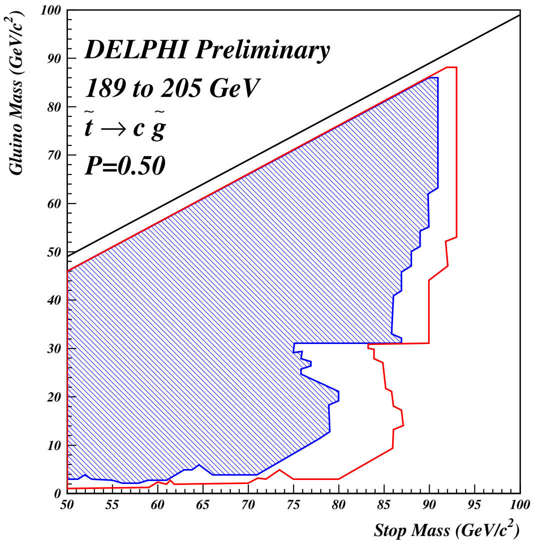


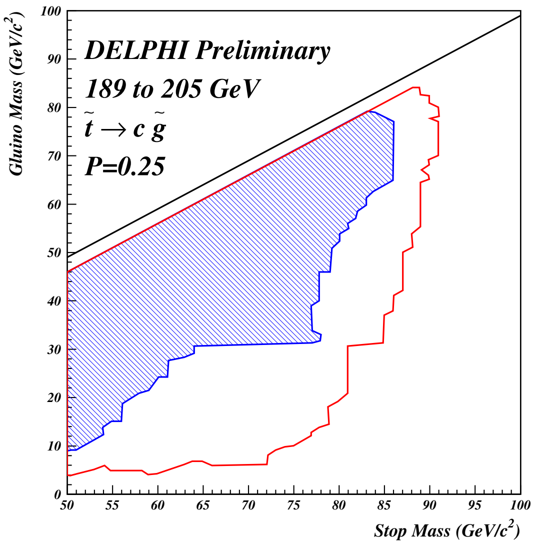
Recherche des gluinos











Conclusion

• Hadronisation du stop:

- **Un générateur pour étudier les effets de l'hadronisation du $\tilde{t}_1$ en collisioneur e^+e^-.**
- **Plusieurs canaux de désintégrations possibles:**
  - **• $\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$ • $\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{g}$ • $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tau$ (RPV)**
- **A venir: désintégration à 4 corps: $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}^{\pm}$**

• Recherche des squarks: $\tilde{q}_1 \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$

- **La recherche des squarks $\tilde{t}_1$ et $\tilde{b}_1$ est effectuée.**
- **$\Longrightarrow$ Exclusion dans le plan ($m_{\tilde{q}_1}$,$m_{\tilde{\chi}_1^0}$)**
- **Travail à effectuer:**
  - **Une analyse pour les faibles ΔM.**
  - **Etude des systématiques (hadronisation, NN ...)**

• Un gluino LSP ?

- **Des topologies peu recherchées jusqu'ici.**
- **Une analyse 2 jets+ 2 "jets" $\tilde{g}$ a été développé dans DELPHI sur les données LEP2 dans le canal $\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{g}$**
- **Travail à effectuer:**
  - **Rechercher le cas mixte: $e^+e^- \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{g}c\tilde{g} \rightarrow ccR^{\pm}R^{\circ}$**
  - **Généralisation aux autres squarks ($\tilde{b}_1$)**
  - **Analyser les données LEP1 pour rechercher le signal $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\tilde{g}\tilde{g}$, qui est indépendant des masses des autres sparticules.**