

La Supersymétrie

- Brève introduction
- Le secteur de Higgs en supersymétrie
- Recherche directe de super partenaires
- Vers la détermination des paramètres du Modèle

Brève Introduction

- Supersymetrie: symétrie reliant fermions \leftrightarrow bosons
- Brisée dans la nature
- La supersymetrie existe-t-elle à « basse » énergie ($\ll M_{\text{Planck}}$) ?
 - Résout problème d'ajustement fin de la masse du Higgs dans le Modèle Standard
 - Permet meilleure unification des couplages
 - Candidat naturel à la matière noire non-baryonique (existence confortée par derniers résultats en cosmologie)

(voir cours de J.Ellis)

MSSM = extension minimale en particules du Modèle Standard
 Pour chaque particule -> superpartenaire

Spin	1	$\frac{1}{2}$	0
		(u_L, d_L)	$(\tilde{u}_L, \tilde{d}_L)$
		u_R	\tilde{u}_R
		d_R	\tilde{d}_R
	g	\tilde{g}	
	W, B	\tilde{w}, \tilde{b}	
		\tilde{h}	H

(+graviton, gravitino)

2 doublets de H dans Susy

Mélange pour donner charginos et neutralinos
 $2 \chi^{\pm}, 4 \chi^0$

R parité = +1 pour particules standards, -1 pour superpartenaires
 $= (-1)^{3(B-L)+2S}$
 Conservée dans les Modèles les plus populaires

~100 paramètres pour décrire de manière complètement générale toutes les masses

Brisure de supersymetrie (secteur caché) : Plusieurs possibilités

Plus populaire:

mSUGRA: brisure de SUSY transmise par gravite à haute énergie

Paramètres:

- m_0 = masse commune des scalaires à l'échelle GUT
- $m_{1/2}$ = masse commune des gauginos à l'échelle GUT
- μ = terme de masse supersymetrique Higgs
- A = couplage trilineaire Higgs-sparticule

⇒ Évolution par les équations du groupe de renormalisation pour obtenir les masses à basse énergie

Le neutralino le plus léger est la particule supersymetrique la plus légère (LSP)

Alternative:

GMSB: Brisure à échelle plus faible transmise par interactions de jauge

Le gravitino est la particule supersymetrique la plus légère

Autre possibilité: non conservation de R- parité

Spectre «typique » en masse des superpartenaires dans mSUGRA:

χ^0_1 < sleptons_R sleptons_L $\sim \chi^0_2$ < stop1 << squarks gluinos



Secteur de Higgs du MSSM

- 2 doublets
 - nécessaire pour donner des masses aux quarks up et down
 - pas d'anomalie
- Après brisure de la symétrie EW, 5 (=8-3) degrés de liberté restent massifs:

h, H (CP +) A (CP -) H^+, H^-

Relation entre potentiel de Higgs et couplage de jauge

$$m_h^2 \sim g^2 v^2 \quad (=> \text{Higgs léger})$$

Contribution au potentiel de Higgs:

- Termes de jauge
- Terme μ
- Terme de brisure douce de Susy

$$V_{\text{Higgs}} =$$

$$\frac{1}{8}(g^2 + g'^2)(H_1^+ H_1 - H_2^+ H_2)^2$$

$$+ \frac{1}{2} g^2 H_1^+ H_2 H_2^+ H_1$$

$$+ (m_1^2 + |\mu|^2) H_1^+ H_1 + (m_2^2 + |\mu|^2) H_2^+ H_2$$

$$- m_{12}^2 \epsilon_{ij} (H_1^i H_2^j + H_1^{*i} H_2^{*j})$$

Valeurs moyennes dans le vide:

$$v^2 = v_1^2 + v_2^2 \quad (v=246 \text{ GeV})$$

$$H_1 = \begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

$v_1 \Rightarrow$ masse aux fermions $i3=-1/2$, $v_2 \Rightarrow$ masse aux fermions $i3=+1/2$

$$\tan(\beta) = v_2/v_1$$

Translation à $\langle H \rangle$ vide + diagonalisation matrice de masse:

$$M_A^2 = m_1^2 + |\mu|^2$$

$$M_{H^\pm}^2 = M_A^2 + M_W^2$$

$$M_{H,h}^2 = \frac{1}{2} \left[M_A^2 + M_Z^2 \pm \sqrt{(M_A^2 + M_Z^2)^2 - 4M_A^2 M_Z^2 \cos(2\beta)} \right]$$

Mélange entre composantes CP+ de H_1, H_2 pour donner h, H : α

$$\cos^2(\beta - \alpha) = \frac{M_h^2(M_Z^2 - M_h^2)}{M_A^2(M_H^2 - M_h^2)}$$

Ordre de Born: 2 paramètres $M_A, \tan(\beta)$

Autres masses + couplages fixés par ces paramètres

Couplages (pour h,H) :

$$hVV = M_S * \sin(\beta-\alpha)$$

$$HVV = M_S * \cos(\beta-\alpha)$$

$$hbb = M_S * -\sin(\alpha)/\cos(\beta)$$

$$Hbb = M_S * \cos(\alpha)/\cos(\beta)$$

$$htt = M_S * \cos(\alpha)/\sin(\beta)$$

$$Htt = M_S * \sin(\alpha)/\sin(\beta)$$

H^{+-}

Ne couple pas à $W^{+-}Z$

$$H^{+t}b \sim m_b \tan(\beta) + m_t \cotan(\beta)$$

A

Ne couple pas à WW, ZZ

$$Att \sim m_t \cotan(\beta)$$

$$Abb \sim m_b \tan(\beta)$$

Prédiction: $M_h < M_Z$ (à l'ordre de Born)

Limite importante M_A grand: h devient ~ higgs du Modèle Standard ($\cos(\beta-\alpha) \sim 0$)

Les corrections radiatives sont importantes !

Par exemple pour la masse du h



Augmentation significative de la limite supérieure de la masse du h (\Rightarrow peut échapper la détection à LEP)

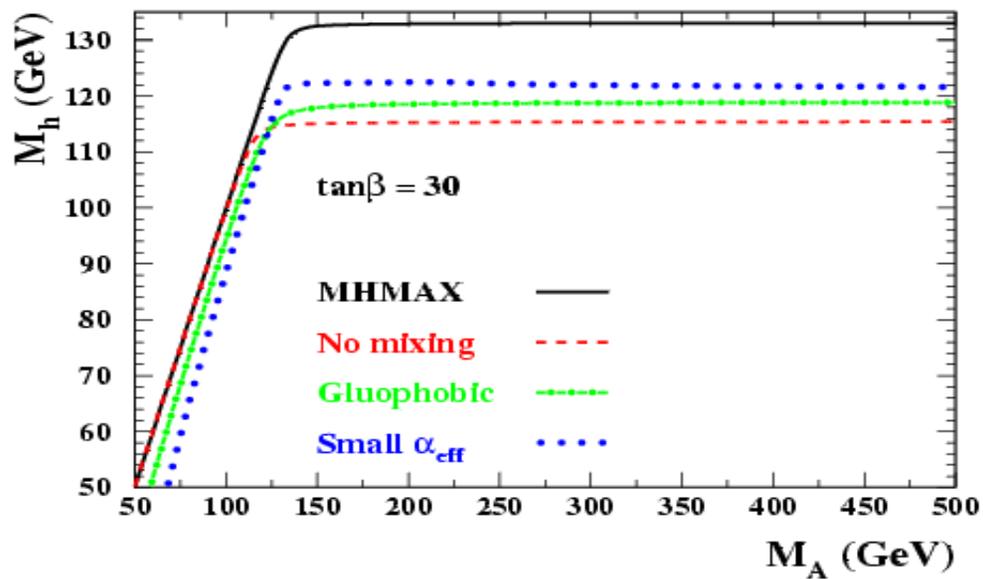
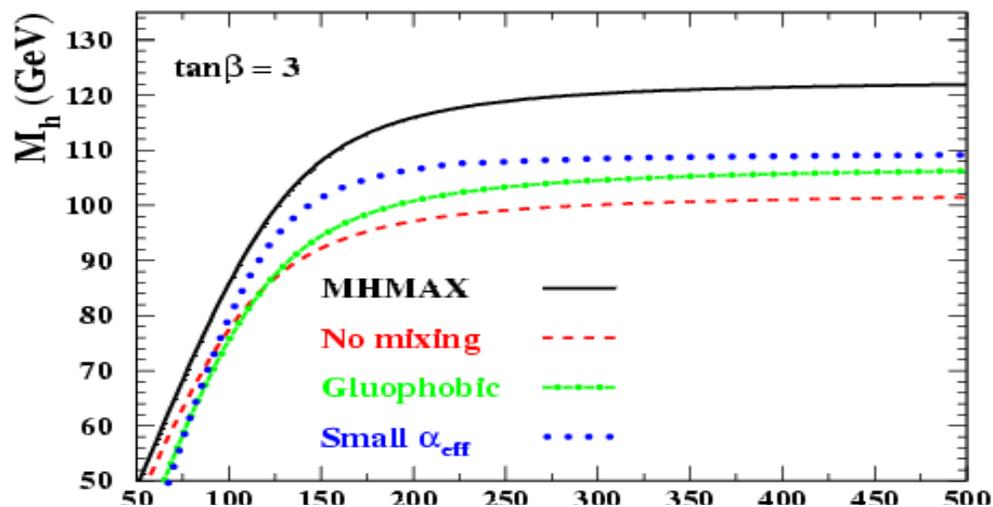
\Rightarrow Dépendance avec autres paramètres du Modèle supersymétrique: échelle de Susy, paramètre de mélange dans le secteur stop (mélange \Rightarrow différence de masse stop1, stop2 \Rightarrow moins bonne compensation des divergences, ...)

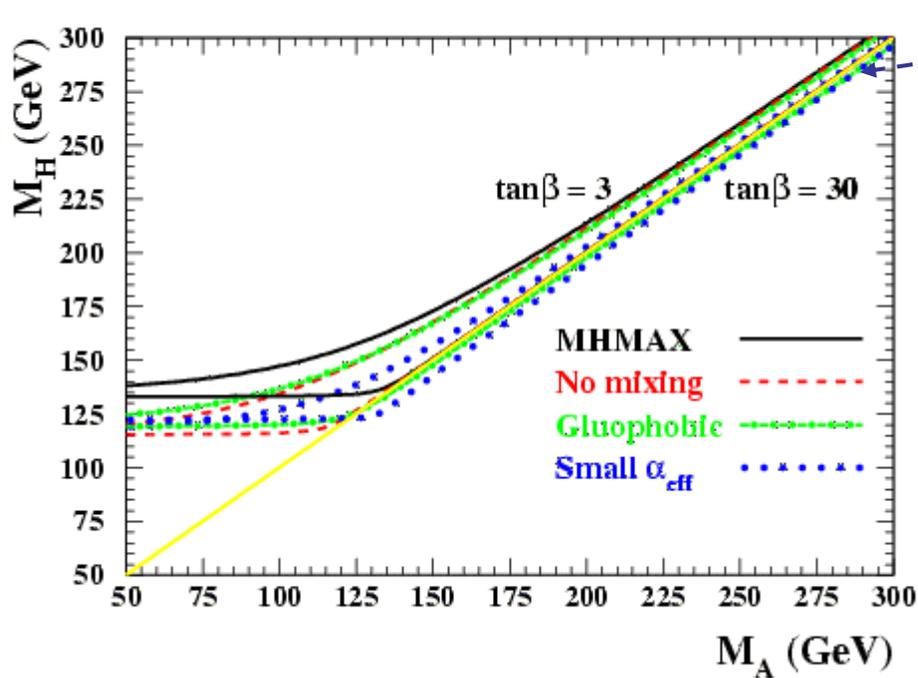
Dans la suite, considère quelques scénarii typiques pour ces paramètres (dans le cadre de MSSM inspiré par mSUGRA)

- **Pas de mélange stop**, $M_{\text{susy}}=1\text{TeV}$
- **mh-max**: plus grande valeur possible de mh pour $M_A, \tan(\beta)$ donnés
- **Gluophobic**: réduit le couplage effectif hgg par compensation entre boucles de top et stop
- **Petit α** : réduit le couplage hbb par une correction de boucle b-gluino

(Carena et al, hep-ph/0202167)

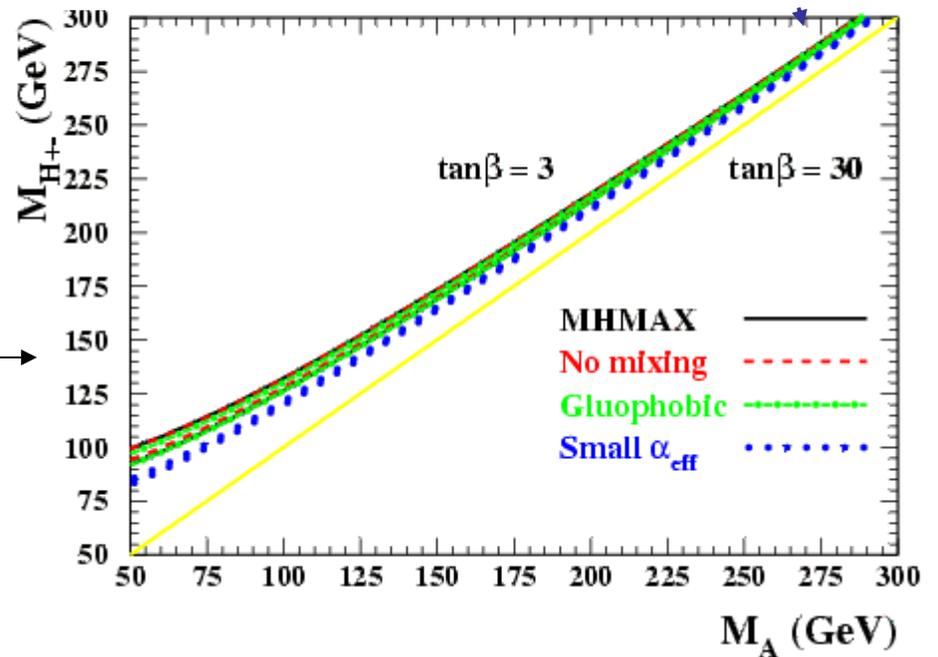
Masse du h





Limite « découplage »
 $M(H) \sim M(A) \sim M(H^+)$

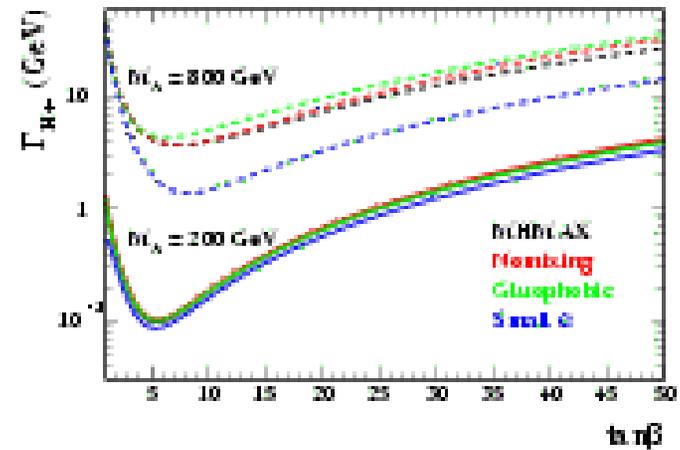
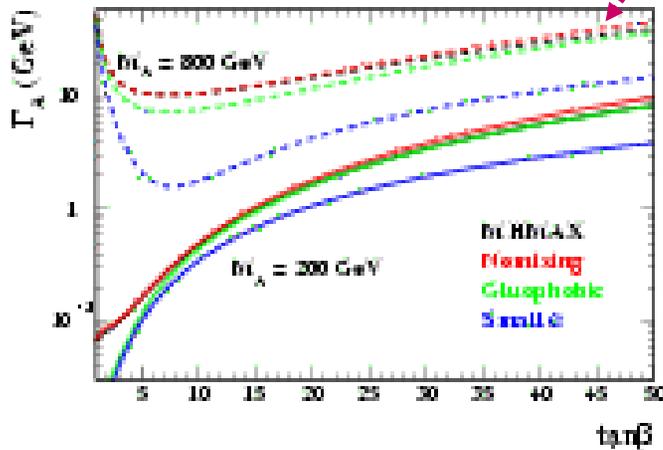
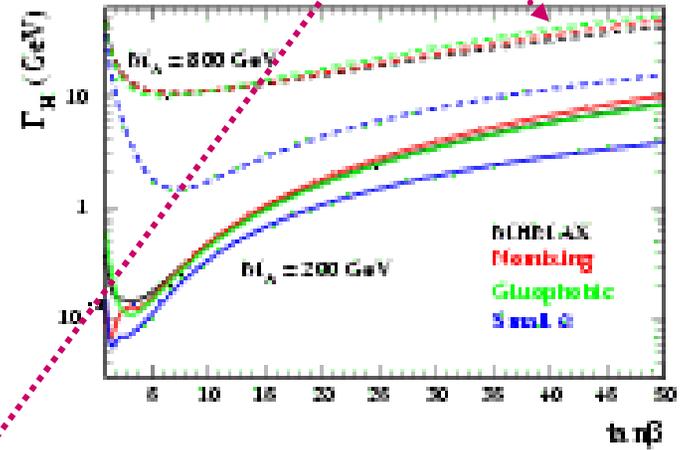
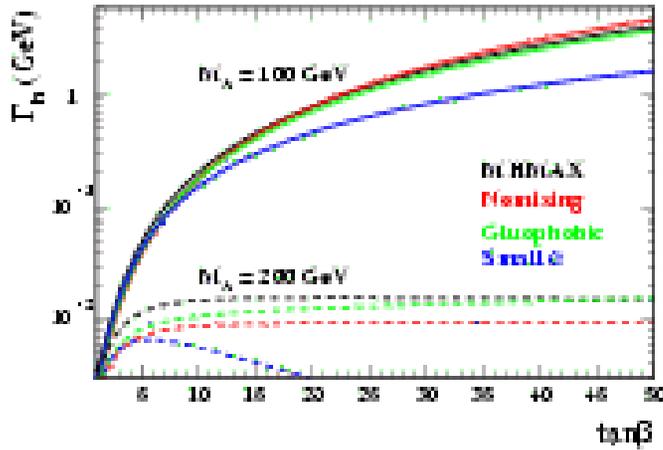
$M(H)^{+-}$



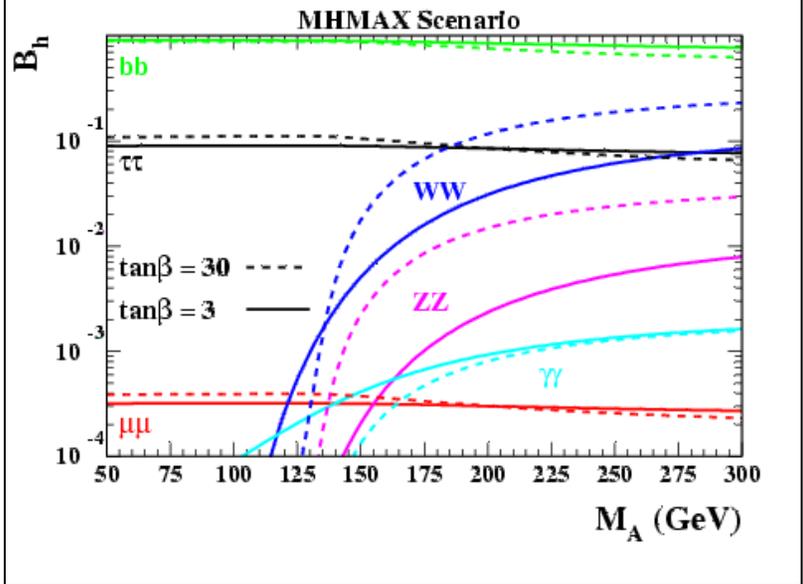
Largeurs totales:

h reste relativement étroit

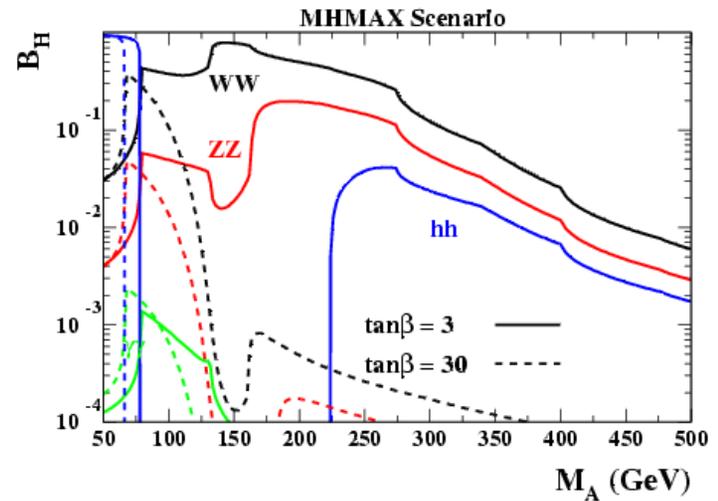
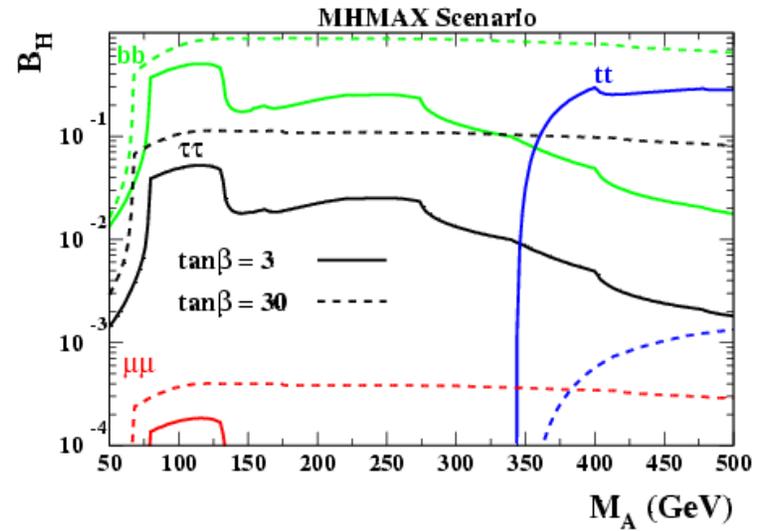
$$\Gamma > \Delta M(H-A)$$



Désintégration h



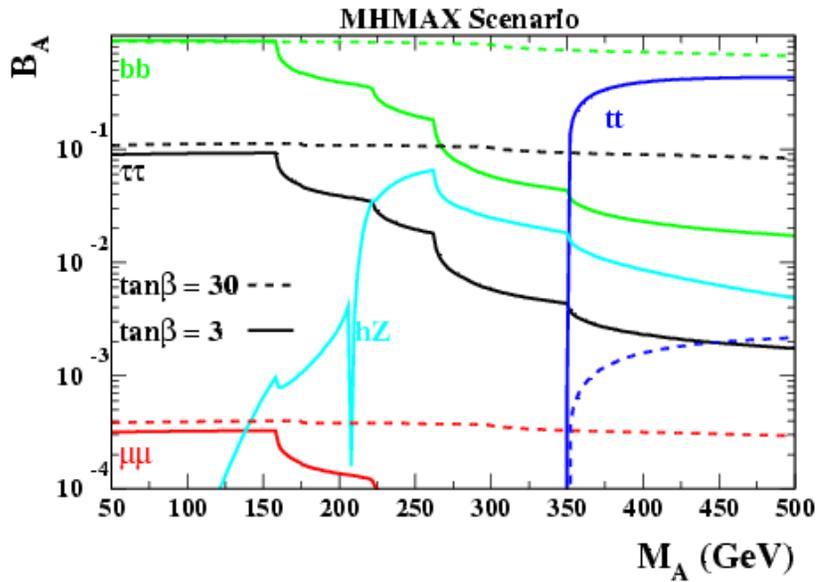
Désintégration du H



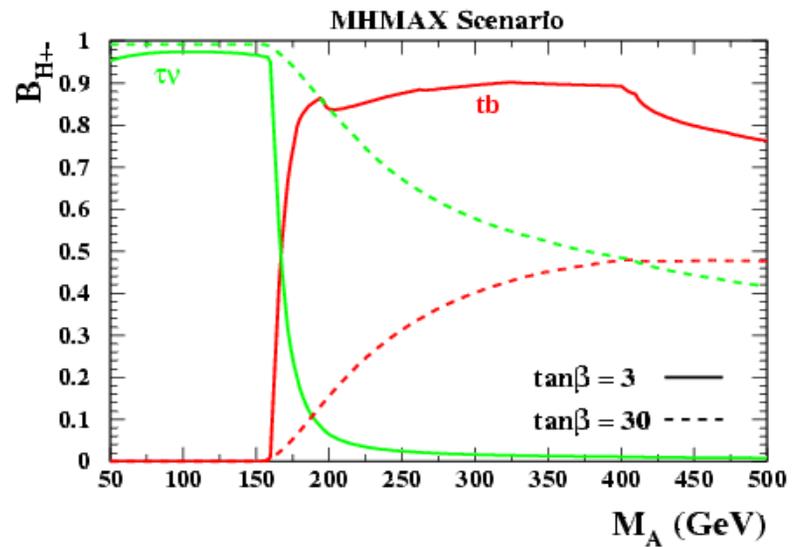
Complémentarité
h/H



Désintégration du A



Désintégration de H^{+-}



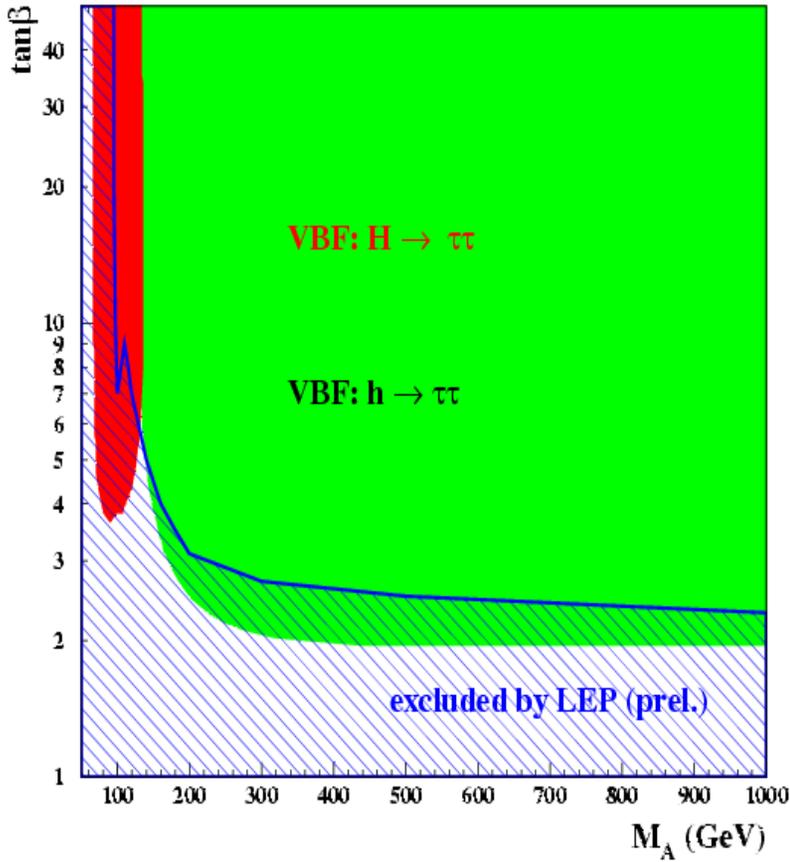
Stratégies pour recherche Higgs MSMM

- Pas de désintégration en super-partenaires:
 - Application des recherches du Higgs du Modèle Standard:
 - section efficaces = MS * facteur ($M_A, \tan\beta$)
 - rapport de branchement = $f(M_A, \tan\beta)$
 - Nouveaux canaux:
 - $H, A \rightarrow \tau\tau, \mu\mu$ (grands $\tan(\beta)$) : la section efficace devient dominée par la production $bbH, bbA \sim \tan^2(\beta)$
 - H^{\pm} 2 possibilités:
 - masse $< m_{\text{top}}$ \Rightarrow produit dans désintégration $t \rightarrow b H^{\pm}$
 - masse $\geq m_{\text{top}}$
- Désintégration en super-partenaires

Applications recherches Higgs standard

- $\sigma(gg) = s_{SM} * \Gamma(h(H,A) \rightarrow gg) / \Gamma(H_{SM} \rightarrow gg)$
- $\sigma(\text{VBF}, h) = \sin^2(\alpha - \beta) * \sigma_{SM}$
- etc...
- Canaux les plus prometteurs: h (à grands M_A), H (à petits M_A) \rightarrow modes standards pour higgs léger (<140-150 GeV)
 - VBF h,H $\rightarrow \tau \tau$
 - VBF h,H $\rightarrow WW^*$
 - h,H $\rightarrow \gamma \gamma$
 - h,H $\rightarrow 4$ leptons (pour mh-max)
 - t tbar h,H h,H $\rightarrow b \text{ bbar}$

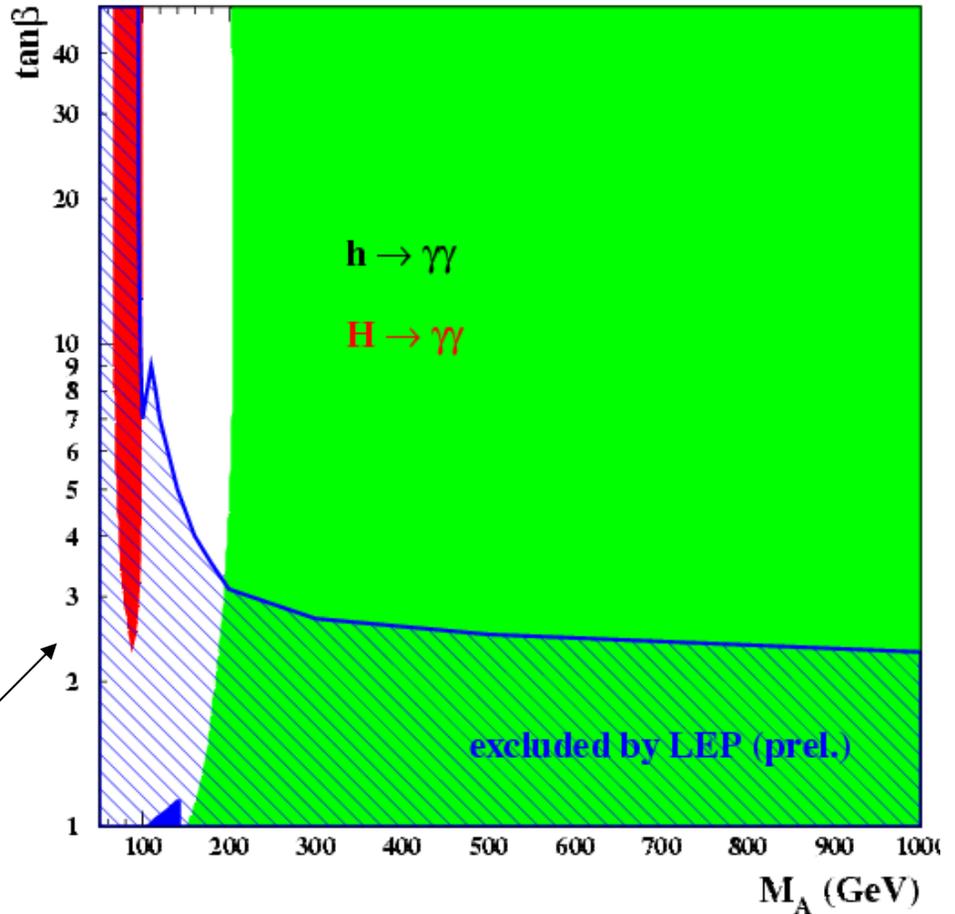
MHMAX scenario



VBF $H, h \rightarrow t\bar{t}$
avec 30 fb^{-1} (Atlas)

*Canal exigeant: jets étiqueteurs,
résolution en p_{miss} , identification des τ*

MHMAX scenario



$H, h \rightarrow \gamma\gamma$
avec 300 fb^{-1} (Atlas)

A,H -> $\tau\tau$

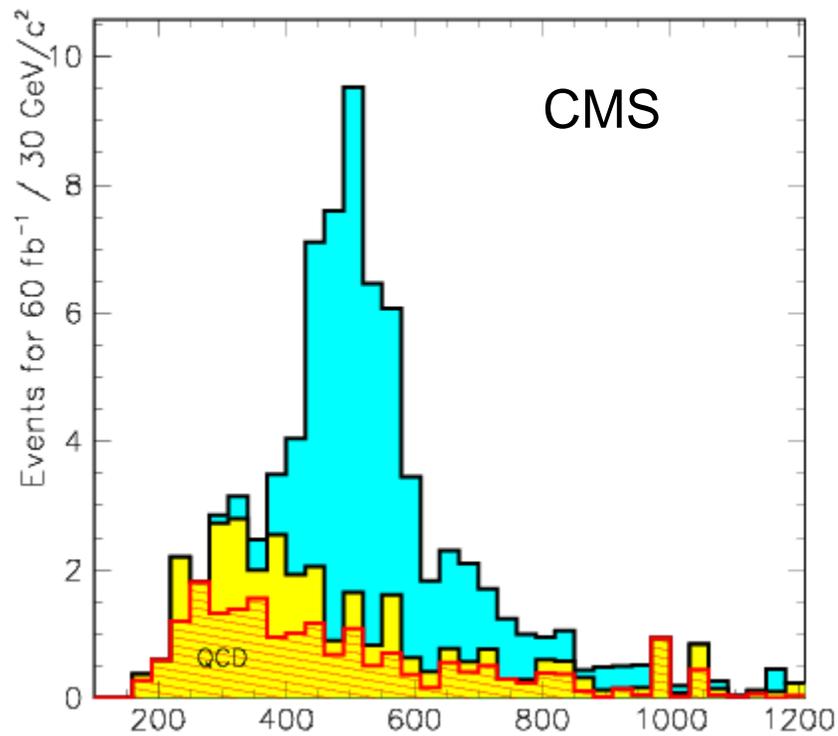
- Section efficaces $bbA,bbH \sim \tan^2(\beta)$ (+production directe avec boucle de b)
- Désintégration $\tau\text{--}\tau$ devient observable (BR $\sim 10\%$ sauf pour grand MA, petits $\tan(\beta)$ ou $A,H \rightarrow t\bar{t}$ devient dominant)
- Signal $\tau\text{--}\tau \rightarrow$ dilepton ou lepton+hadron ou hadron+hadron:
 - mesure de $M(\tau\text{--}\tau)$ avec approximation colinéaire pour les neutrinos \sim résolution en impulsion transverse manquante si $P_t(A,H) > 0$
(\Rightarrow coupure sur $\Delta\phi$ entre les deux taus, différentes résolutions pour les 2 mécanismes de production)
 - Identification des désintégration hadroniques des τ
 - Canal lepton+hadron est en général le meilleur
- **On peut chercher à identifier les jets de b produit en association**
 \Rightarrow algorithmes dédiés pour identifier des b de \sim faible impulsion transverse ($\sim < 50$ GeV) sur une grande gamma de pseudorapidité
- Bruits de fond:
 - $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$ (irréductible)
 - $t\bar{t}$, $W + \text{jet}(s)$: $W \rightarrow$ lepton jet \rightarrow faux τ (pour canal lepton+hadron)
 - Jets QCD pour canal hadron+hadron
- Résolutions sur la masse + identification des τ dépendent de la luminosité (effets empilements)

Exemple analyse Atlas du TDR ($\tan\beta=10$):

- étape 1: événement avec 1 lepton ($pt>25$ GeV) et 1 jet identifié comme τ ($pt>40$ GeV)
- étape 2: $pt(\text{miss})>20$ GeV, et reconstruction de masse
- étape 3: séparation production directe (boucle) et production associée ($b\bar{b}$)
 - directe: veto jets de b $pt>15$ GeV, coupure $\Delta\phi(\text{lepton-jet})$
 - associe: au moins 1 jet de b, pas plus de deux jets non-b

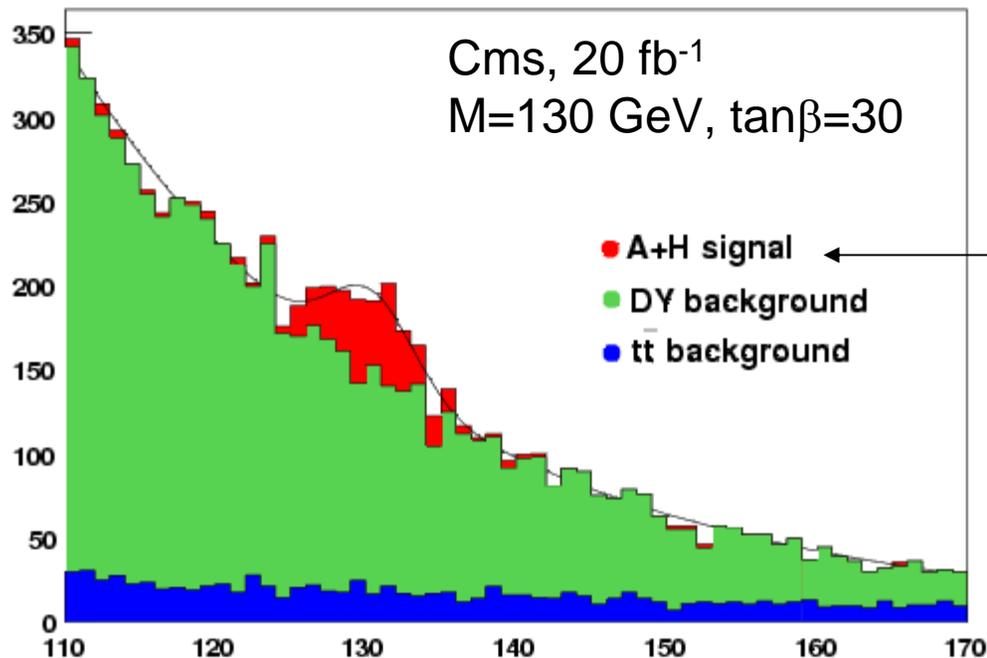
m_A (GeV)	150	300	450
$\sigma \times \text{BR}$ for direct production (pb)	1.3	0.05	0.015
$\sigma \times \text{BR}$ for associated production (pb)	2.9	0.28	0.04
Mass window (GeV)	± 30 GeV	± 55 GeV	± 75 GeV
Inclusive analysis			
Signal significance for 30 fb^{-1}	5.7	1.2	0.6
Direct/associated analysis			
Event rates:			
Direct production	49 / 2	9.5 / 0.35	1.5 / 0.16
Associated production	56 / 72	6 / 18	1.3 / 6.3
Total signal	105 / 74	15.5 / 18	2.8 / 6.5
$W+\text{jet}$	530 / 46	740 / 43	228 / 22
$t\bar{t}$	7 / 6	9 / 8	5 / 4
$b\bar{b}$	14 / 29	4 / 21	1 / 6
$Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$	163 / 5	41 / 2	7 / 0.5
Total background	714 / 86	794 / 74	241 / 32.5
Signal significance for 30 fb^{-1}	3.9 / 8.0	0.6 / 2.1	0.2 / 1.1
Combined significance for 30 fb^{-1}	8.9	2.2	1.2
Combined significance for 300 fb^{-1}	12.5	3.8	2.1

Exemple: $A, H \rightarrow \tau\tau \rightarrow$ hadron-hadron
avec identification b produit en association
($m_A=500$ GeV, $\tan\beta=30$)



A,H -> μ μ

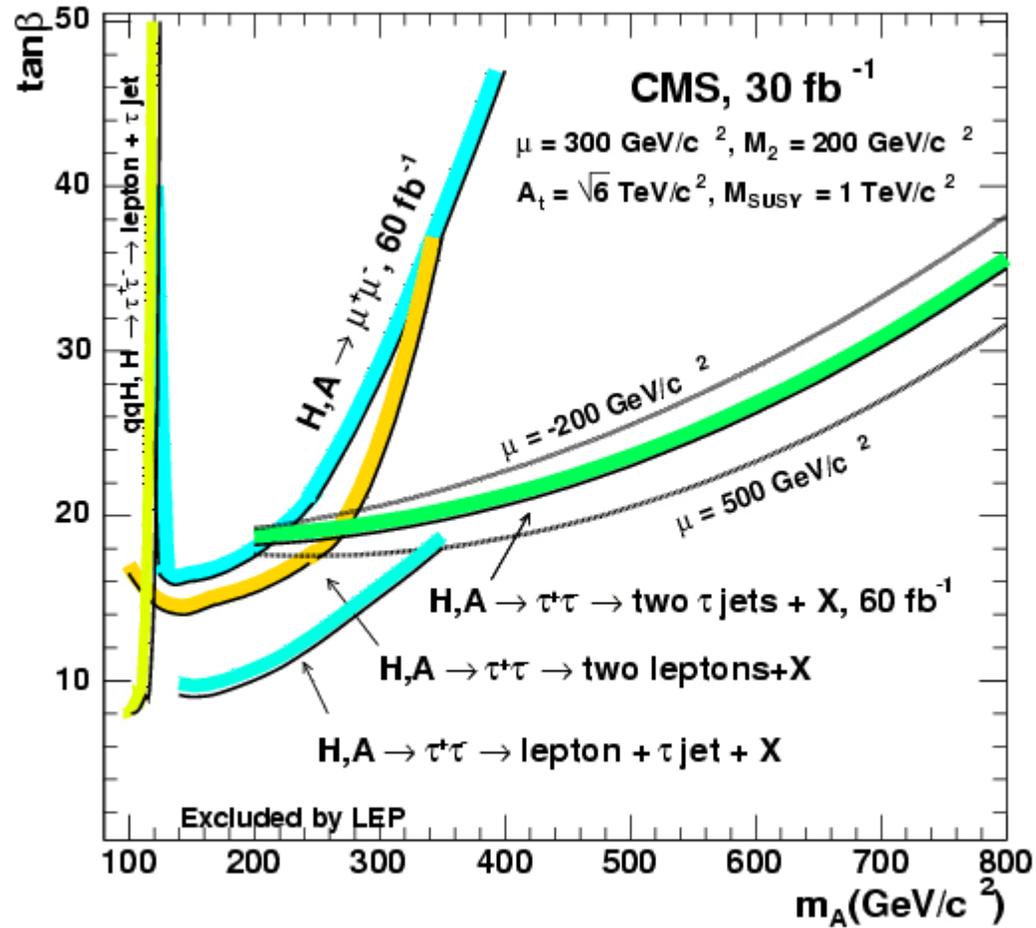
- Même production que pour $\tau\tau$
- Rapport de branchement plus faible ($\sim m_\mu^2/m_\tau^2$) => $\sim 0.03\%$
- Mais bien meilleure efficacité de reconstruction et meilleure résolution



On ne peut pas
séparer clairement
les 2 pics

- Identification des b du processus bbH,bbA utilisée pour réduire Z/DY
- Veto de jet dans la région centrale pour réduire t-tbar

Potentiel de découverte $H, A \rightarrow \tau\tau$ (et $\mu\mu$) pour 30 fb^{-1}



H[±], Masse < M_{top}

Désintégration t → b H[±] compétitive: Production relativement abondante de H[±]

H[±] → c s[±] (petits tanβ)

H[±] → τ[±] ν (grands tanβ)

⇒ Recherche excès d'événements avec τ dans les désintégrations du top

Sélection typique: lepton (e ou μ) + τ (→hadrons) + jets (identification b)

Bruit de fond: principalement t-t[±] avec faux ou vrais τ S ~ milliers evts pour 30 fb⁻¹ mais S/B < 1 (⇒ limité par erreur systématique sur B ~3%)

Limité à M_{H[±]} ~ 150-160 GeV

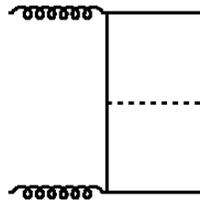
Couvre ~ toute les valeurs de tan(β)

H[±], Masse > M_{top}

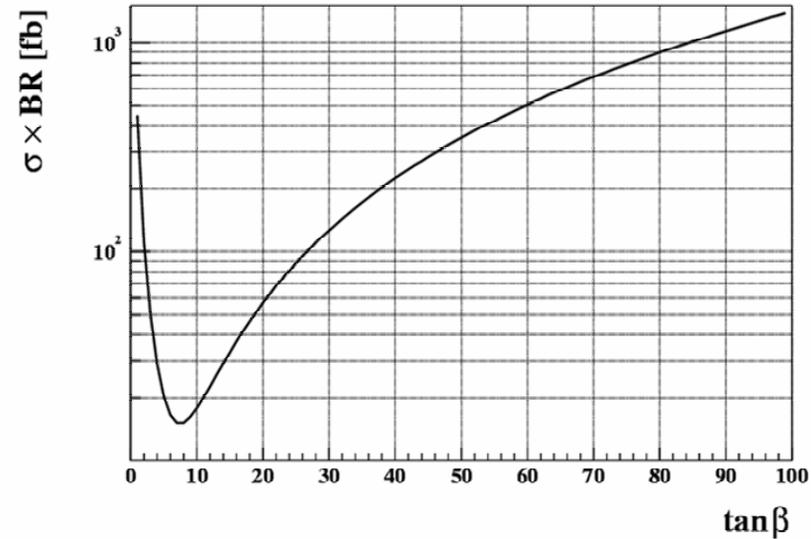
Masse=300 GeV

- Mode principal de production:

gg → H[±] t_{bar} b



$\sigma \sim \tan^2(\beta)$ à grands $\tan(\beta)$
 Incertitude assez grande



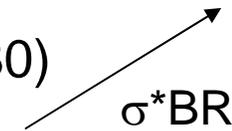
- Désintégration:

– H → t b_{bar} (BR=80% m_H=300 GeV, tanβ=30)

t → bW → 3jets; t_{bar} → b_{bar} lepton ν

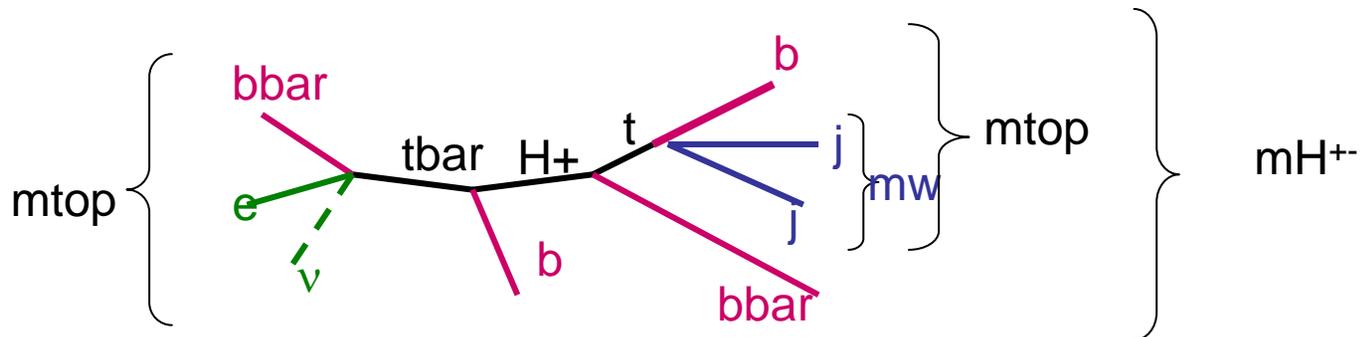
– H → τ ν (BR=20% m_H=300 GeV, tanβ=30)

t_{bar} → 3 jets



Mode 1: $H^+ \rightarrow t \bar{b}$

- **Topologie:**
 - $t \rightarrow bW \rightarrow b jj$
 - autre $\bar{t} \rightarrow$ semileptonique (\Rightarrow déclenchement) } (ou inverse)
 - b de la production associée
 - 1 lepton, énergie transverse manquante, 4 jets de b, 2 autres jets
- **Bruit de fond:**
 - irréductible $t \bar{t} b \bar{b}$
 - réductible $t \bar{t}$ jet jet
- **But:** reconstruire la masse invariante H^+ par $m(b\text{-}\bar{b}\text{-}j\text{-}j)$
- **Difficulté:** combinatoire
- **Identification de 3 ou 4 jets de b** (il n'est pas forcément nécessaire de détecter le jet de b produit en association avec $H^+ \bar{t}$)
- **Fonction de maximum de vraisemblance utilisant la cinématique pour trouver la meilleure combinaison**



Présélection:

Lepton, énergie transverse manquante

=4 jets de b $pt > 20$ GeV $\eta < 2.5$

≥ 2 autres jets $pt > 20$ $\eta < 5$

Recherche bonne combinaison:

-reconstruit $m(jj)$ (doit être égal à m_W pour bonne combinaison)

-estime $p_z(\nu)$ à partir contrainte de $m_W (W \rightarrow l\nu)$ (2 solutions a priori)

-reconstruit $m(jjb_1)$ (doit être égal à m_{top})

-reconstruit $m(l\nu b_2)$ (doit être égal à m_{top})

-Utilise $pt(b_3), pt(b_4)$ pour trouver b de H^+ (par rapport à b produit en association)

- $\Delta R(b_3, top)$ pour trouver quel top vient du H^+

($\rightarrow m(jjb_1 b_3)$ ou $m(l\nu b_2 b_3)$ va donner M_{H^+})

\Rightarrow fonction de vraisemblance

4! * C_m^2 * 2 * 2 possibilités en général (au moins 96)

$\sim 10-20\%$ des événements ont une association parfaite (partons \leftrightarrow jets)

Utilise variables discriminantes pour augmenter S/B

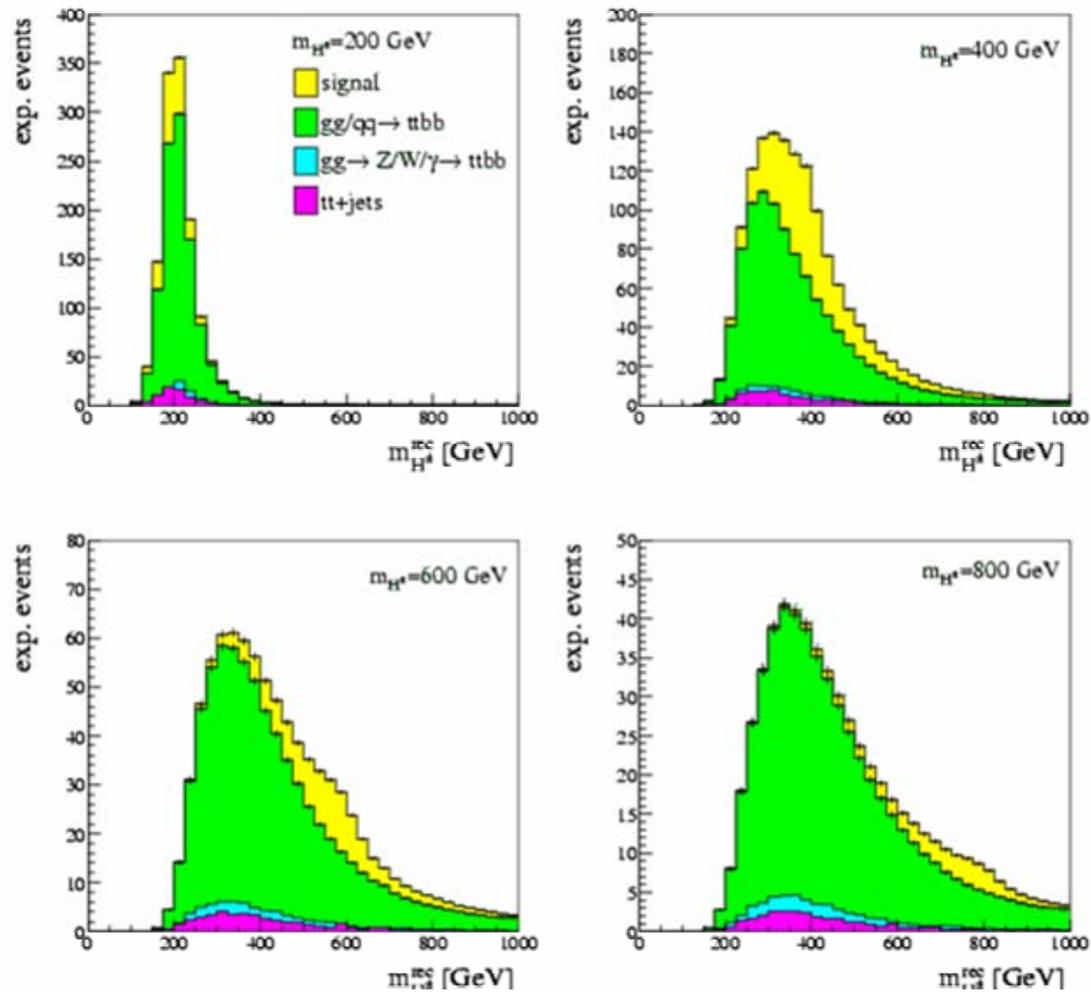
Autres masse invariante + séparations angulaires (distingue

production du bruit de fond ou une paire b-bbar vient d'un gluon)

\Rightarrow Fonction de vraisemblance (dépendant de la masse supposée)

Exemple analyse

Résultats typiques pour 30 fb^{-1}

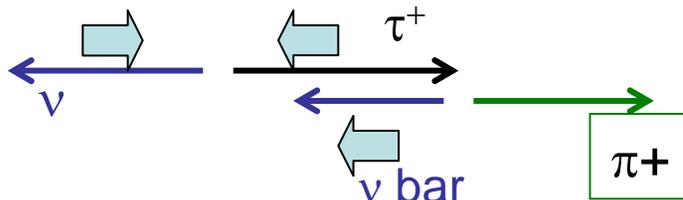


Incertitudes systématiques: section efficace signal
normalisation du bruit de fond
(permet de couvrir aussi une région à petit $\tan(\beta)$)

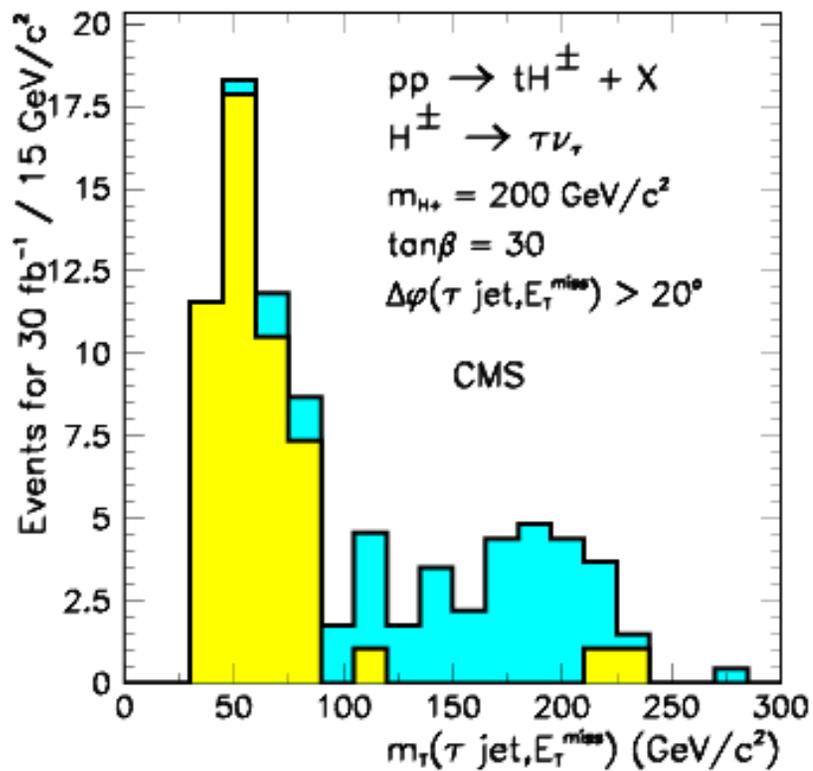
Mode2: $H^+ \rightarrow \tau \nu$

- Topologie:
 - $\tau \rightarrow$ hadrons
 - $t\bar{b}$ \rightarrow 3 jets
 - \Rightarrow Etat final τ + impulsion transverse manquante + 3 jets
- Bruit de fond:
 - $t\bar{b}$
 - Wt
- But: reconstruire la masse transverse tau-impulsion manquante (front descendant à M_H)
- Amélioration de S/B en exploitant spin 0 de H^+

Désintégration $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}$:

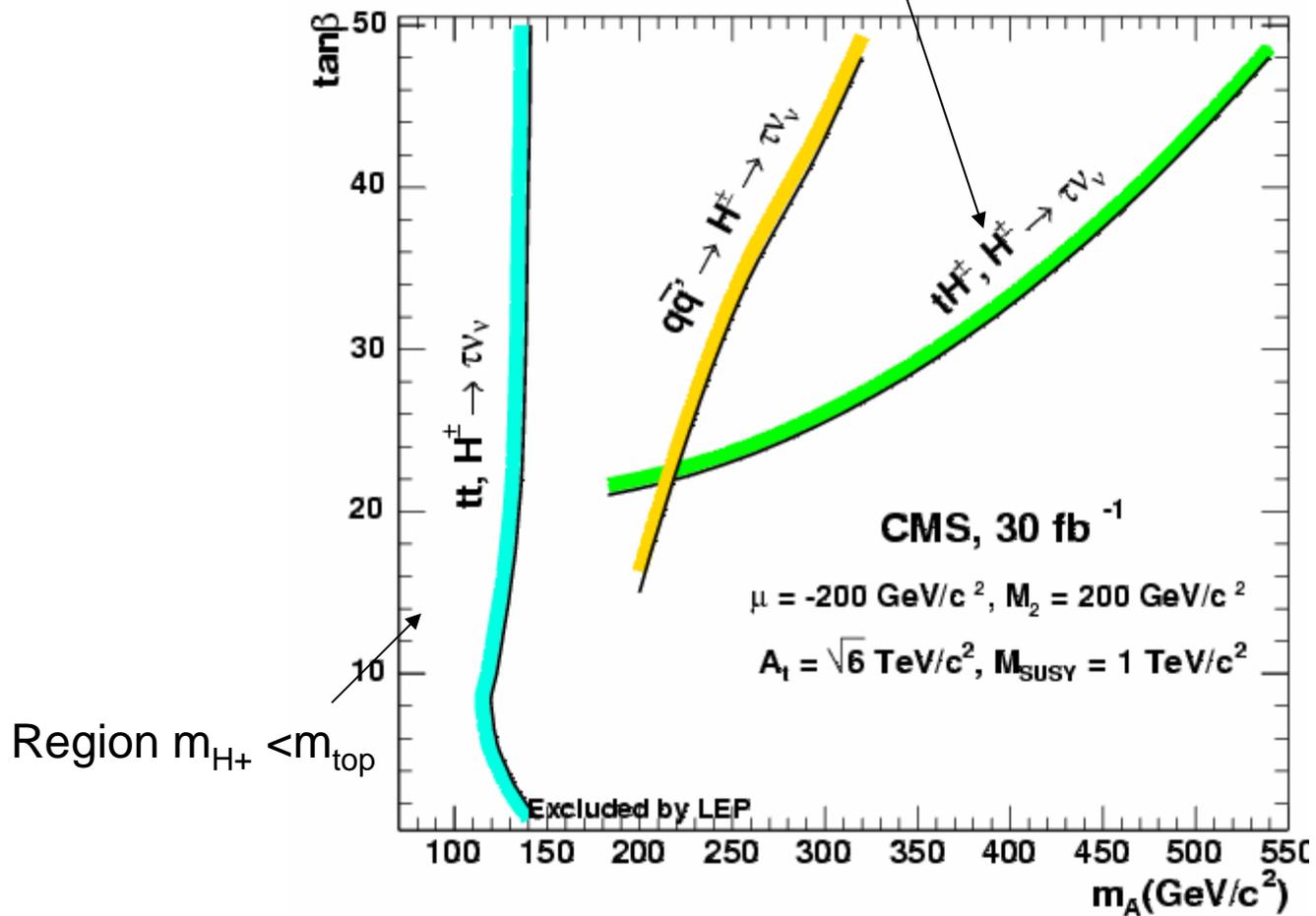


Configuration favorisée:
Coupure: >80% énergie visible
du τ emportée par 1 trace

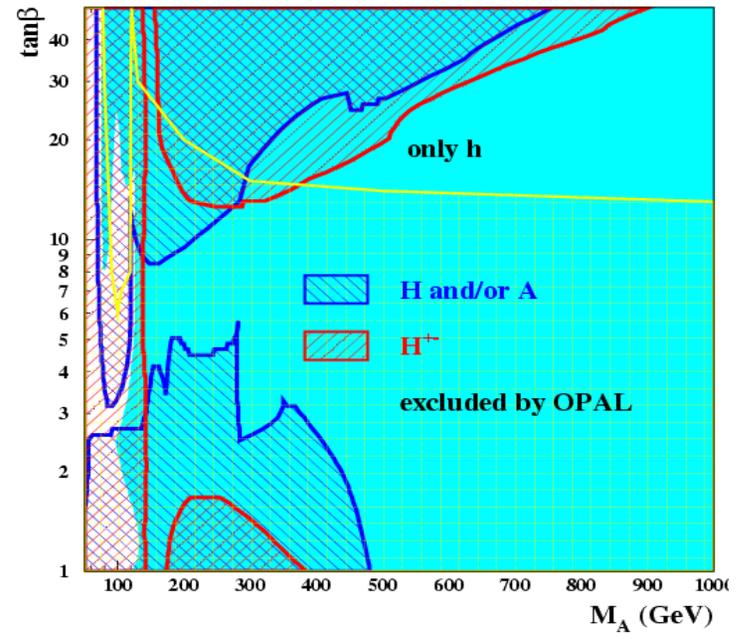
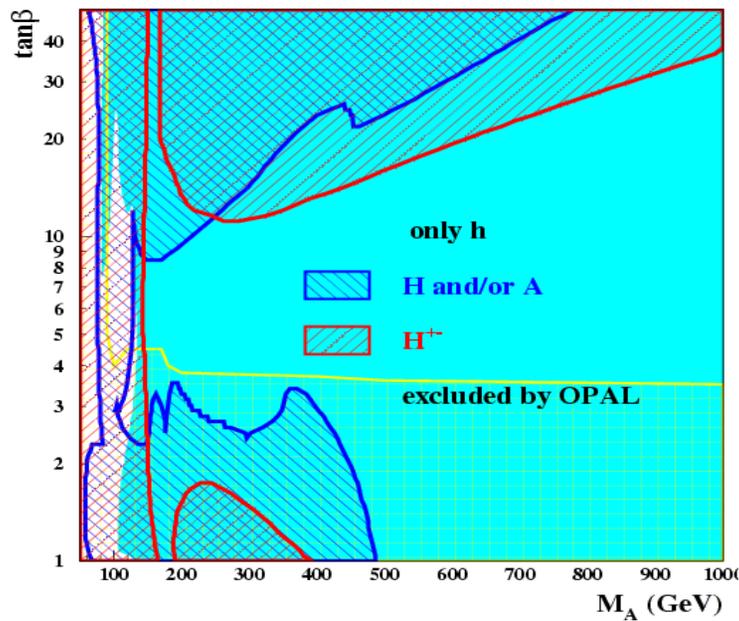
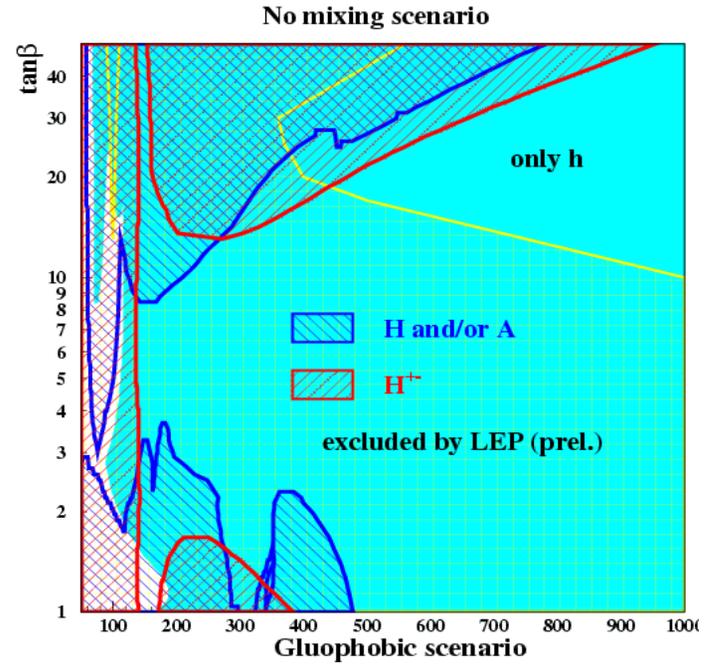
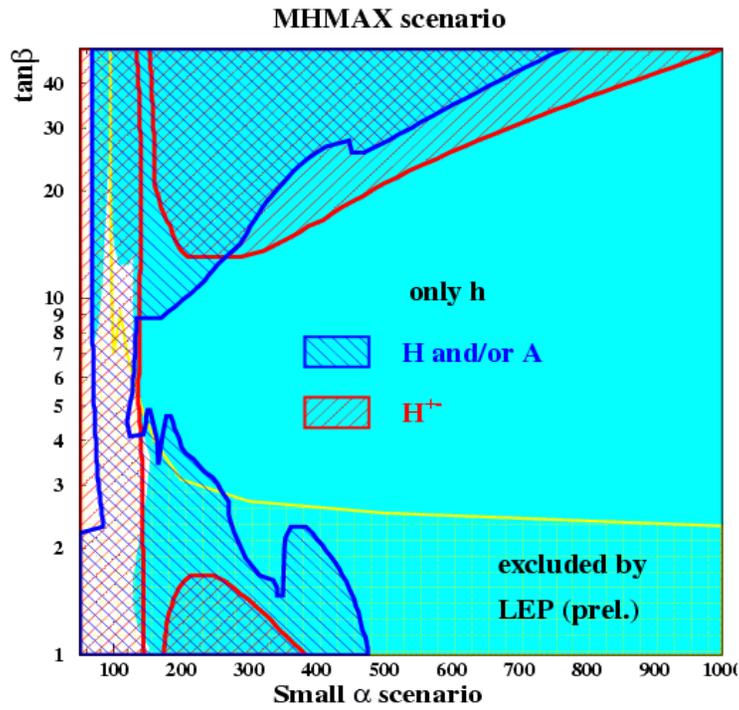


Permet de couvrir région $\tan(\beta) > \sim 20-30$

A grands $\tan(\beta)$, désintégration $\tau\nu$ a une sensibilité un peu meilleure que t-bbar



Résumé pour 300 fb⁻¹ (Atlas) pas de superpartenaires



- Avec 300 fb^{-1} , on observe au moins un boson de Higgs (\sim vrai avec 30 fb^{-1} par VBF en $\tau\tau$)
- Cas limites intéressants:
 - **Grands M_A** : h « quasi standard », observation de H,A,H⁺ possible à grands $\tan\beta$
 - **M_A intermédiaire, $\tan\beta \sim 5$** : h (ou H) observable en VBF, taux réduit par rapport à MS, A,H,H⁺ plus difficiles à voir
 - **$M_A \sim 130-150 \text{ GeV}$, grands $\tan(\beta)$** : tous les higgs ont \sim la même masse. On peut les observer ($\rightarrow \tau\tau$ ou bb). Mais résolution \gg différence de masse \Rightarrow difficiles à séparer. Canaux $\mu\mu$?
- Précision sur les masses $\sim 0.1 \%$ (h standard) à quelques % (modes en τ). $\tan\beta$ à $\sim 5-15\%$ par mesure du taux H,A $\rightarrow\tau\tau$ et/ou H⁺ $\rightarrow \tau\nu$ (limité par incertitudes systématiques + connaissance section efficace)
- Luminosité SLHC: augmentation par $\sim 50 \text{ GeV}$ (en M_A) de la couverture de H,A ?

Observation possible de H⁺ $\rightarrow \mu\nu$??

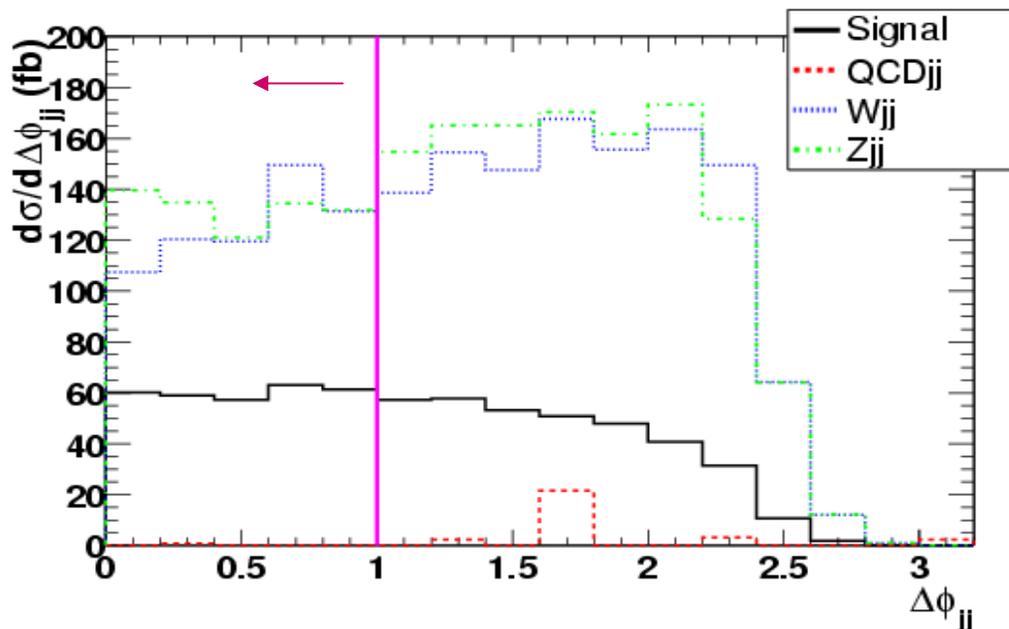
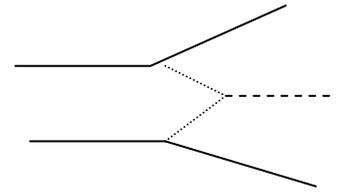
Note: on peut considérer un modèle à 2 doublets en dehors du cadre de SUSY \Rightarrow moins de relation entre les paramètres, plusieurs possibilités différentes

H -> particules supersymétriques

- Si possible cinématiquement, certaines désintégrations sont compétitives par rapport aux modes -> particules standards
 - $h \rightarrow \chi^0_1 \chi^0_1$ (-> invisible !)
 - $H/A \rightarrow \chi^0_2 \chi^0_2$ (puis $\chi^0_2 \rightarrow \chi^0_1 l^+ l^-$)
- On peut aussi produire h dans des désintégrations de particules susy plus massives (par exemple $\chi^0_2 \rightarrow \chi^0_1 h$)

h -> invisible

- Mode le plus prometteur: Production VBF de h. Signature:
 - 2 jets avec caractéristiques VBF
 - Grande énergie transverse manquante
 - Pas de lepton, Pas de jet dans la région centrale
- Principale difficulté: Déclenchement (2 jets vers l'avant + énergie transverse manquante) (CMS -> efficacité ~95%)



Bruits de fond:

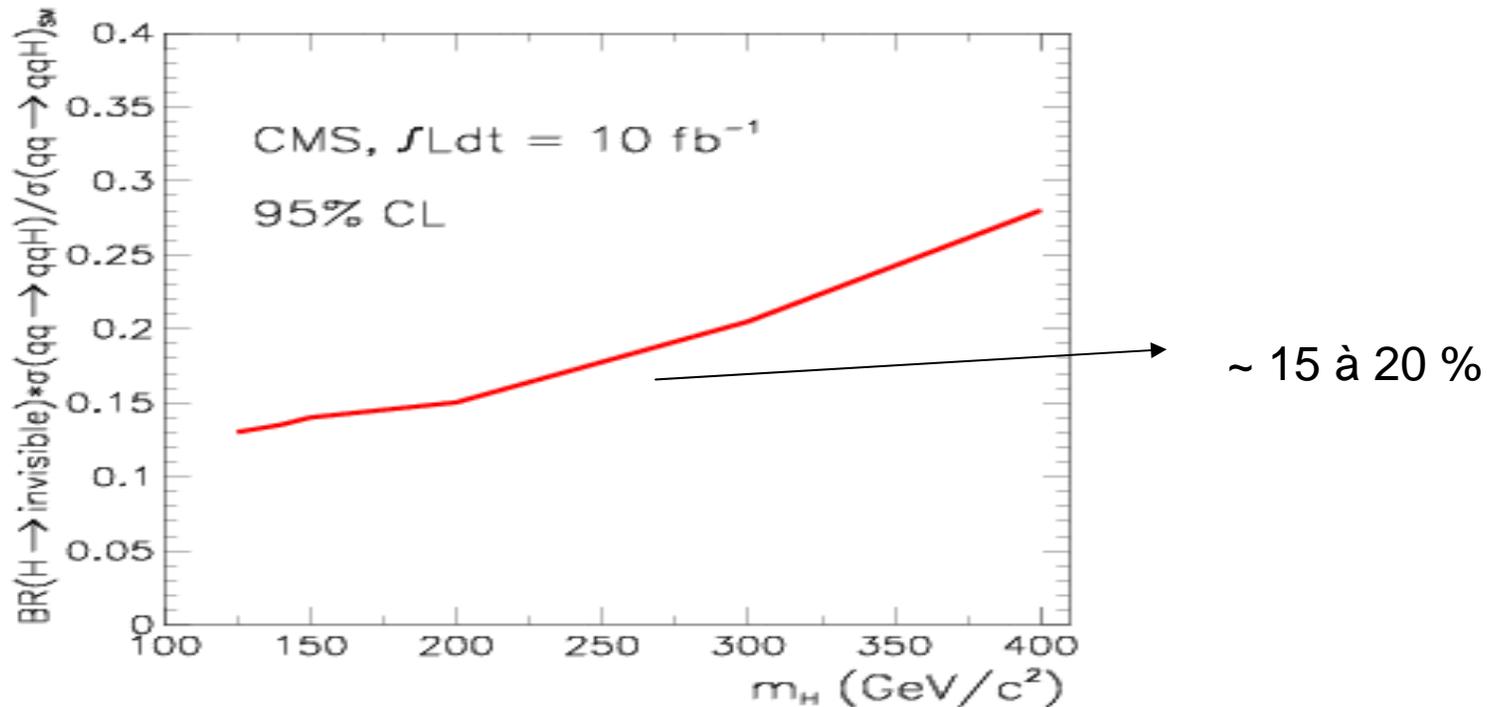
Z+2 jets, W+2 jets, avec

Z -> νν

W -> l ν

Peut être normalisé aux modes avec lepton(s) observé(s)

Sensibilité à $\sigma(\text{VBF}) \cdot \text{BR}(h \rightarrow \text{invisible}) / \sigma(\text{VBF MS})$

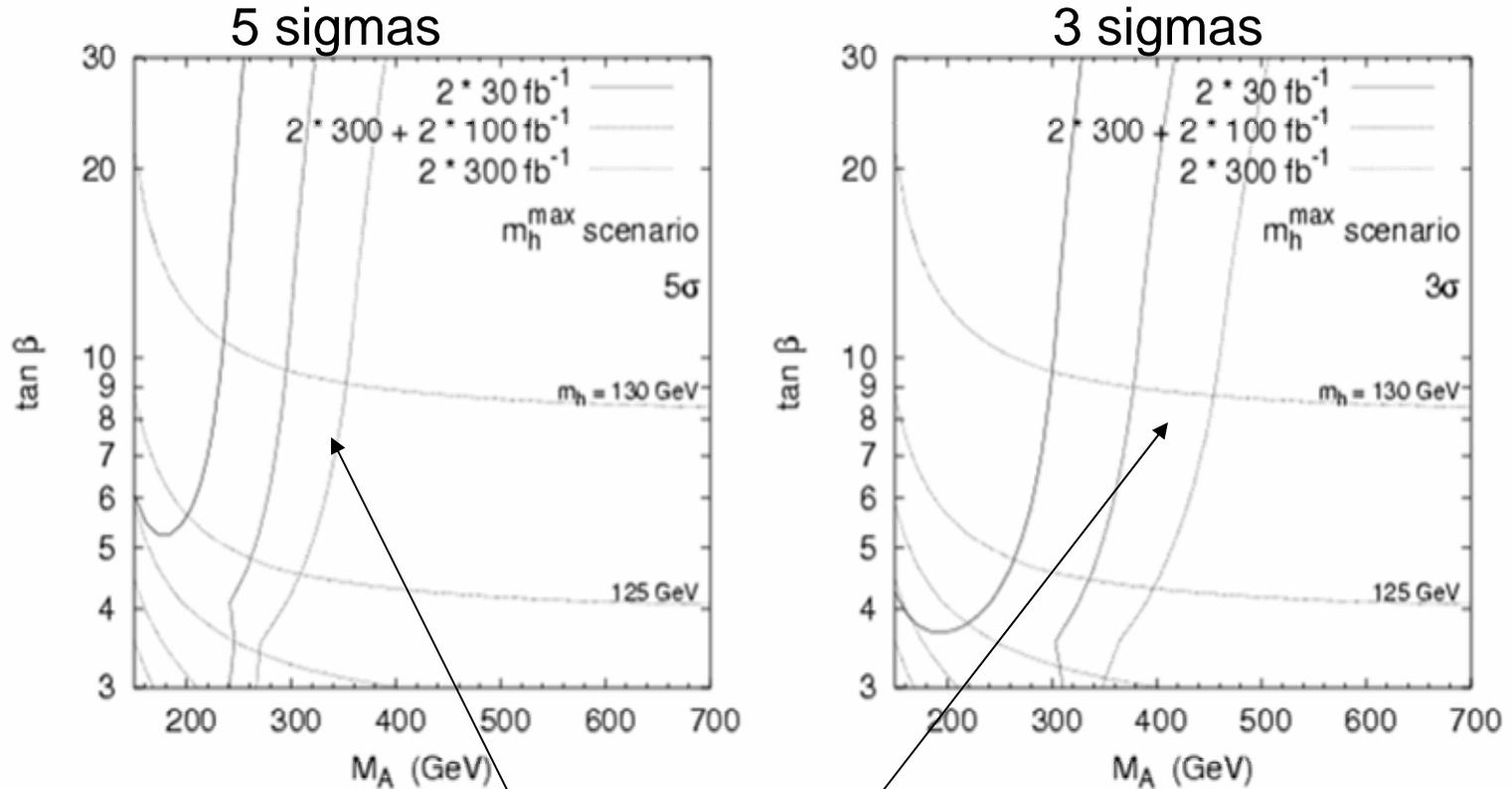


Autre Mode: t-tbar-H suivi de H-> invisible, t-tbar -> lepton+jets
La sensibilité semble moins bonne (facteur ~ 5)

Comment se convaincre qu'on observe un boson de Higgs ?
(pas de mesure de la masse)

Scénario avec observation de h seul.

Les couplages différent-ils du Modèle Standard ?



Possibilité d'observation d'une déviation

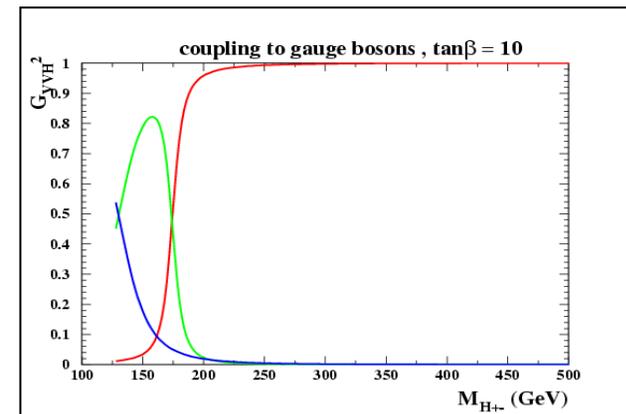
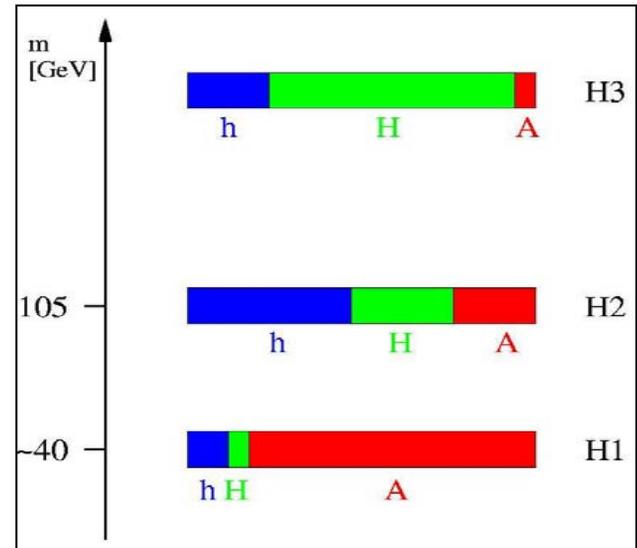
Ne marche pas à très grands M_A

Scénario plus compliqué pour secteur de Higgs (I): Violation de CP

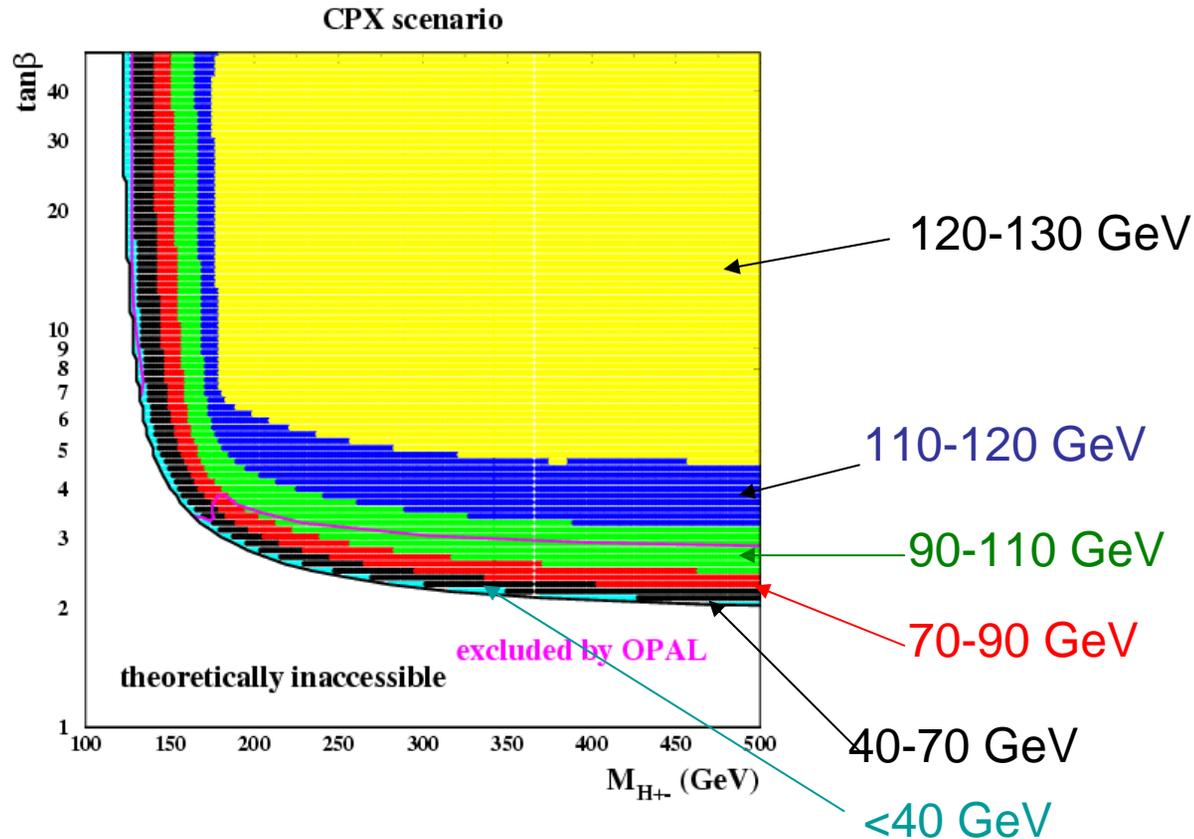
Carena, Ellis, Pilaftsis, Wagner, *Phys.Lett B495 155(2000)*

- Dans Modèle précédent, pas de violation de CP dans le secteur de Higgs (couplages réels)
- On peut avoir des paramètres complexes qui interviennent dans les boucles:
 - couplages trilineaires A_t, A_b
 - paramètre de masse du gluino
- Cas extrême: ces 3 paramètres ont des phases de 90 degrés
- Phénoménologie: les 3 bosons de Higgs neutres ne sont plus états propres de CP mais des mélanges entre états propres de CP (H,h,A)
- H1,H2,H3 couplent à W,Z
 $\Sigma g^2 = g^2(\text{SM})$

Désintégrations H3->H1H1, H2->H1H1
possibles

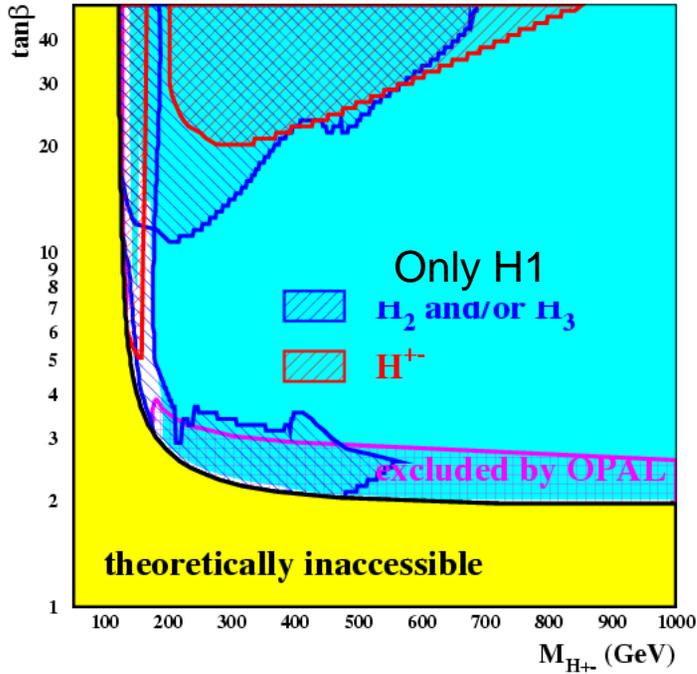


Masse du boson le plus léger H1 (paramètres $M_{H^{++}}$, $\tan\beta$)

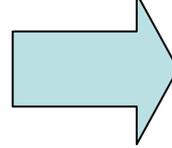


Application des canaux MSSM + Higgs « standards » :

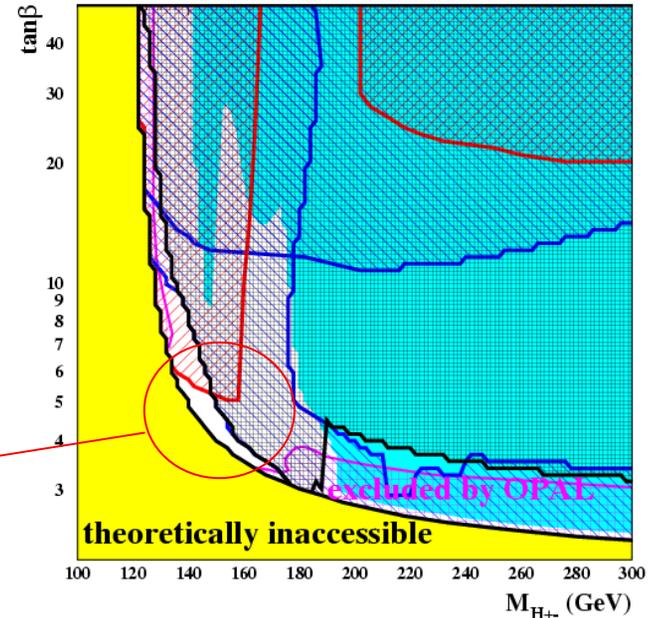
CPX scenario



zoom



CPX scenario



Petit trou dans région
ou masse des H sont faibles
(70, 110, 160 GeV)
(études dédiées ?)

Scénario plus compliqué pour secteur de Higgs (II): NMSSM

Rajoute un singlet au secteur de Higgs

=> 7 états physiques $h_1, h_2, h_3, a_1, a_2, h^\pm$

$h_i \rightarrow a_j$ a_j possible

(voir Ellwanger et al hep-ph/0305109)

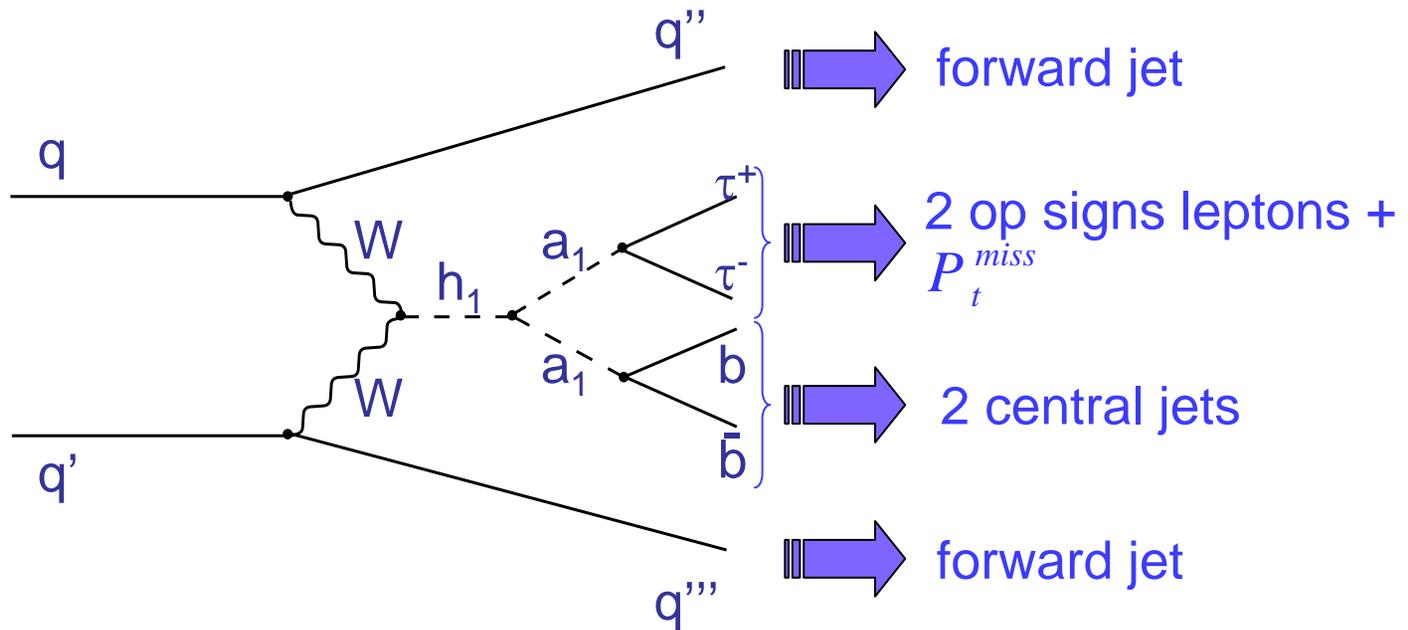
Peut-on échapper à la découverte d'au moins un Higgs avec les canaux classiques ?

Exemple potentiellement délicat: (à la limite de LEP)

$m(h_1) = 115$ GeV, $m(a_1) = 56$ GeV,

$BR(h_1 \rightarrow a_1 a_1) = 98\%$

$BR(a_1 \rightarrow b\bar{b}) = 92\%$ $BR(a_1 \rightarrow \tau\tau) = 8\%$



Difficultés:

Les leptons sont de faible p_t

Les b sont aussi de relativement petit p_t

Configuration du type 2 lepton + 2 jets de b + 2 autres de jets

Bruit de fond dominant $t\text{-}\bar{t}$ + 2 jets

$Z \rightarrow t\bar{t}$ + 4 jets peut être réduit par identification des b

Études détaillées en cours

Note: encore une fois importance de l'identification des b et des τ

Recherche directe de SUSY

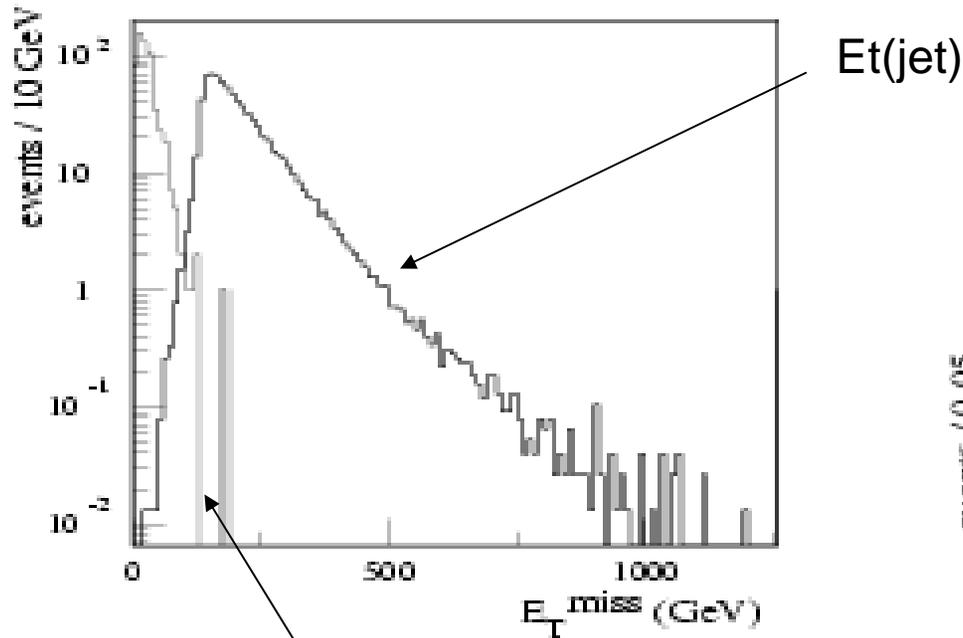
- squarks et gluinos sont produits par interactions fortes (production par paires si R parité conservée) => grandes sections efficaces. Particules SUSY les plus abondamment produites au LHC
 - Désintégration directe ou en cascades -> particules standards (quarks et gluons) + LSP (R parité conservée)
 - Le LSP n'interagit pas dans le détecteur
- => Signature traditionnelle jets + grande énergie transverse manquante

Cadre mSUGRA pour la plupart de ce cours

Énergie transverse manquante

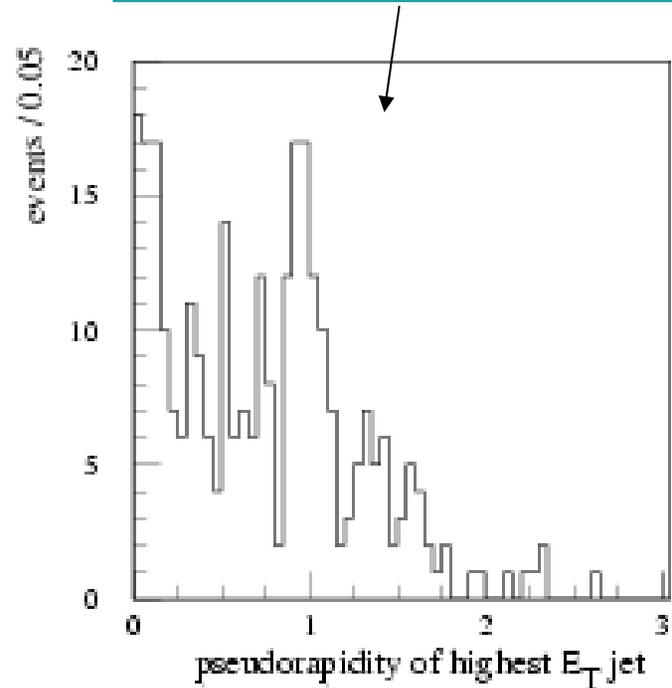
- Maîtrise des queues de résolution indispensable pour observer signal supersymetrie
- **Mesure essentiellement calorimetrique**
- **Couverture du calorimetre jusqu'à $\eta = 5$ est essentielle (sinon effet de jets echappant à l'acceptance). Il n'est pas necessaire d'avoir une couverture plus importante**
- **Résolution $\sim 0.5\sqrt{\Sigma E_t}$ (en GeV)**
- **Effets de bruit électronique et empilement réduit en imposant seuil sur E_t des cellules utilisées pour calcul E_{tmiss}**
- **Algorithmes de pondération pour corriger effet de non-compensation, non-linearites à basse énergie, etc...**

Etude des queues en impulsion transverse manquante: Evénements $Z(\rightarrow\mu\mu)+1$ jet ($p_T > 200$ GeV) (TDR Physique Atlas) (simulation GEANT)

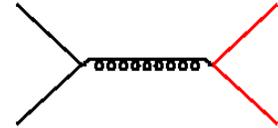
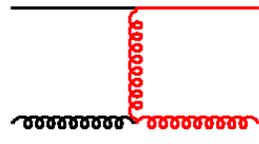
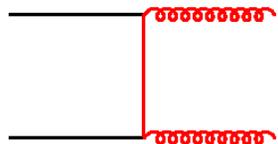
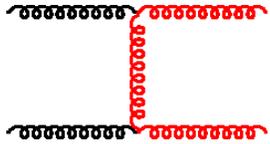


Energie transverse manquante mesurée
(pour mesure parfaite des μ)
Rejection > 1000 a 200 GeV
2 evts > 150 GeV : vrais ν dans jet
(désintégrations de b)

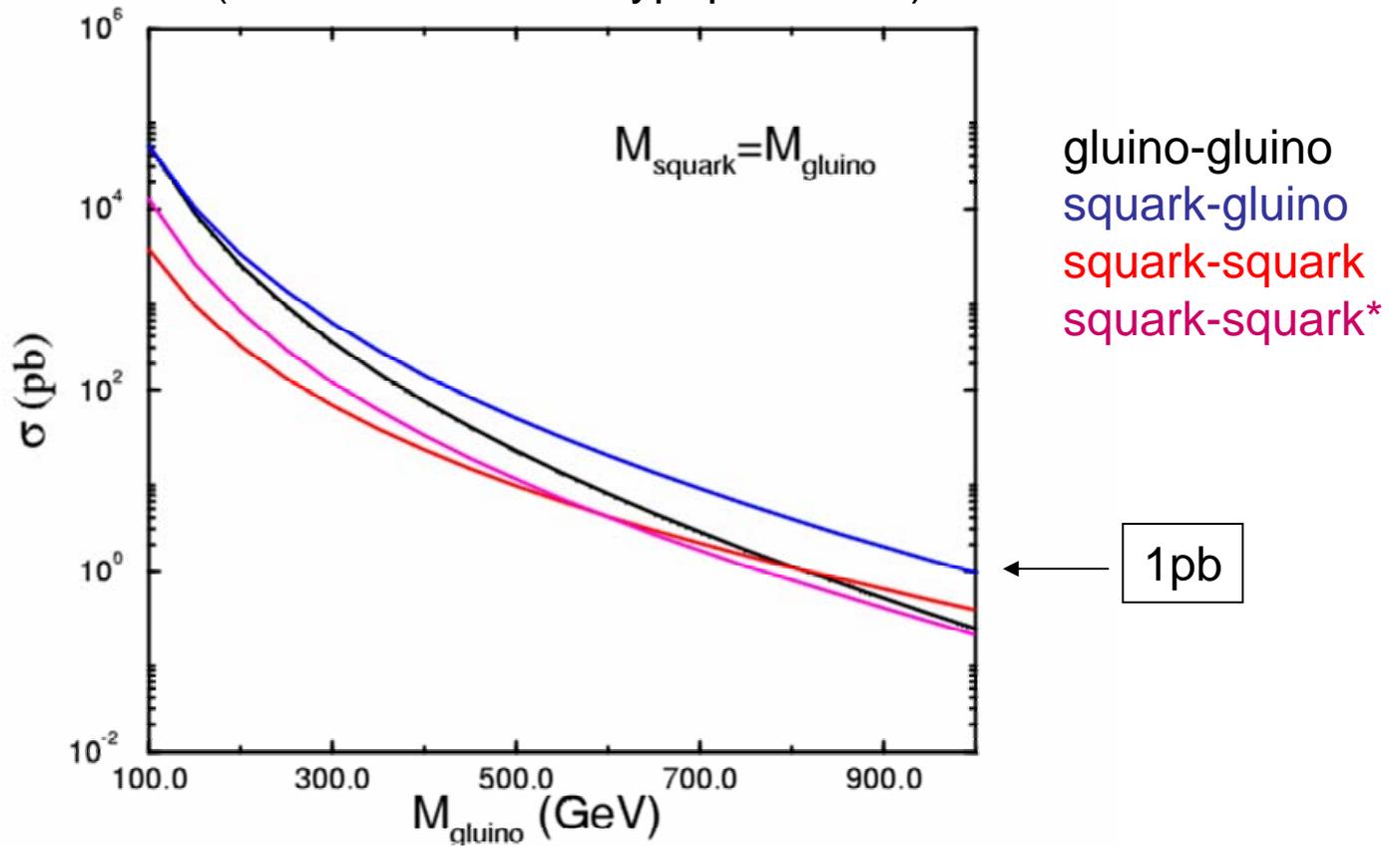
η jets pour événements avec $E_{\text{miss}} > 50$ GeV
 \Rightarrow Évidence de transition entre calorimètres tonneau et bouchon



Production des squarks et gluinos:



(sections efficaces typiques à LO)



$$\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}q\tilde{q}$$

$$\begin{array}{l} \rightarrow q\chi^0_1+X \\ \rightarrow q\chi^0_1+X \end{array}$$

Signature « multijets+E_{miss}+0 lepton » typique:

4 jets > 50 GeV (P_{tmax}>100 GeV), E_{miss}>100 GeV

Événement « sphérique »

Construit M_{eff} = E_{miss}+ΣP_t(jets)

Pas de lepton (muon ou e) isolés

Bruits de fond:

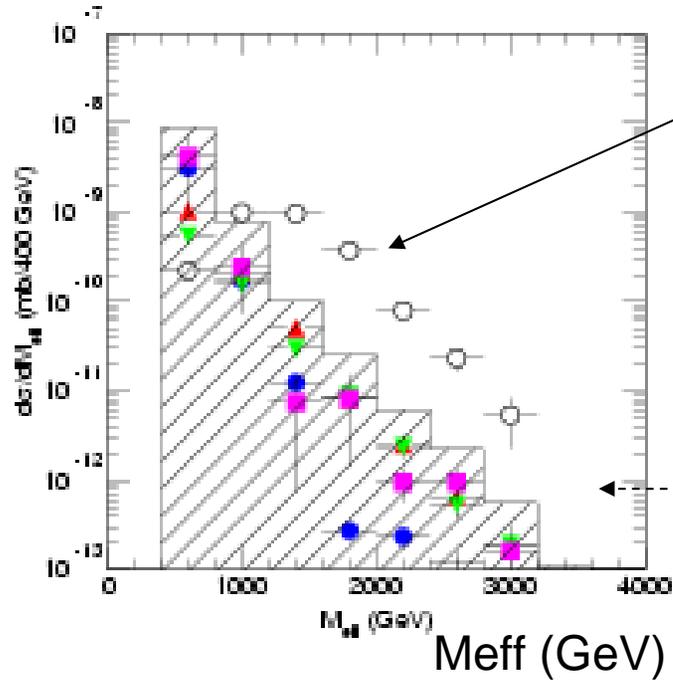
W+jets, Z+jets (avec W->lepton ν, Z-> ν ν)

t-tbar (-> désintégration avec 1 ou plusieurs ν)

Événements multijets QCD avec E_{miss} mal mesurée

(section efficace >> section efficace signal)

Exemple pour $m(\text{gluino}) \sim 750 \text{ GeV}$, $m(\text{squarks}) \sim 650 \text{ GeV}$



signal

t-tbar

W+jets

Z+jets

Bruit de fond QCD

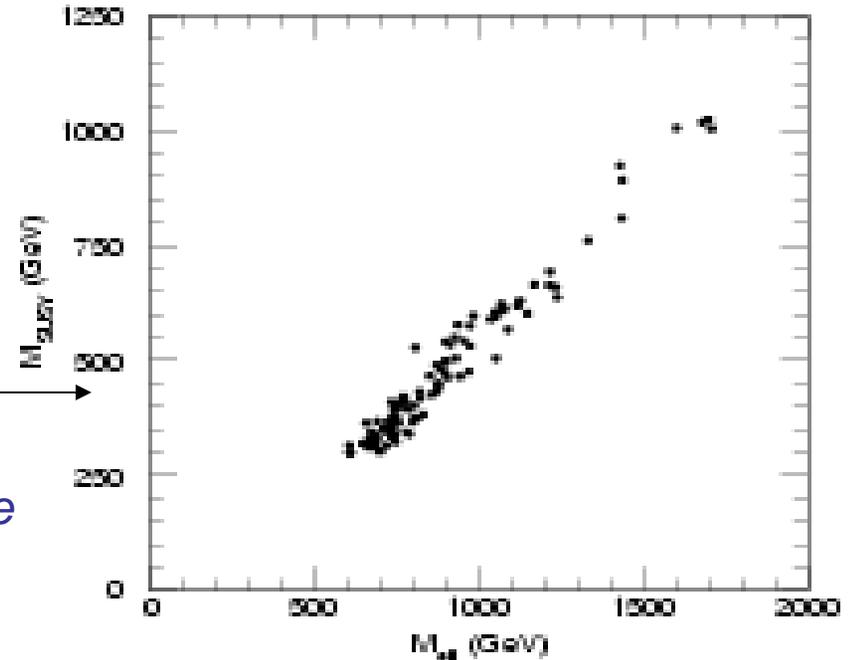
S/B > 10

Taux > 1pb

1 fb / bin

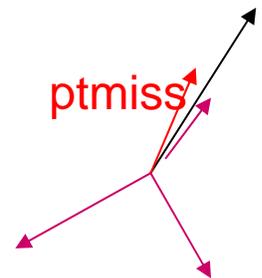
Meff est corrélée à l'échelle typique de masse Susy (=Min(squark,gluino))

mSUGRA, corrélation moins bonne pour MSSM plus général



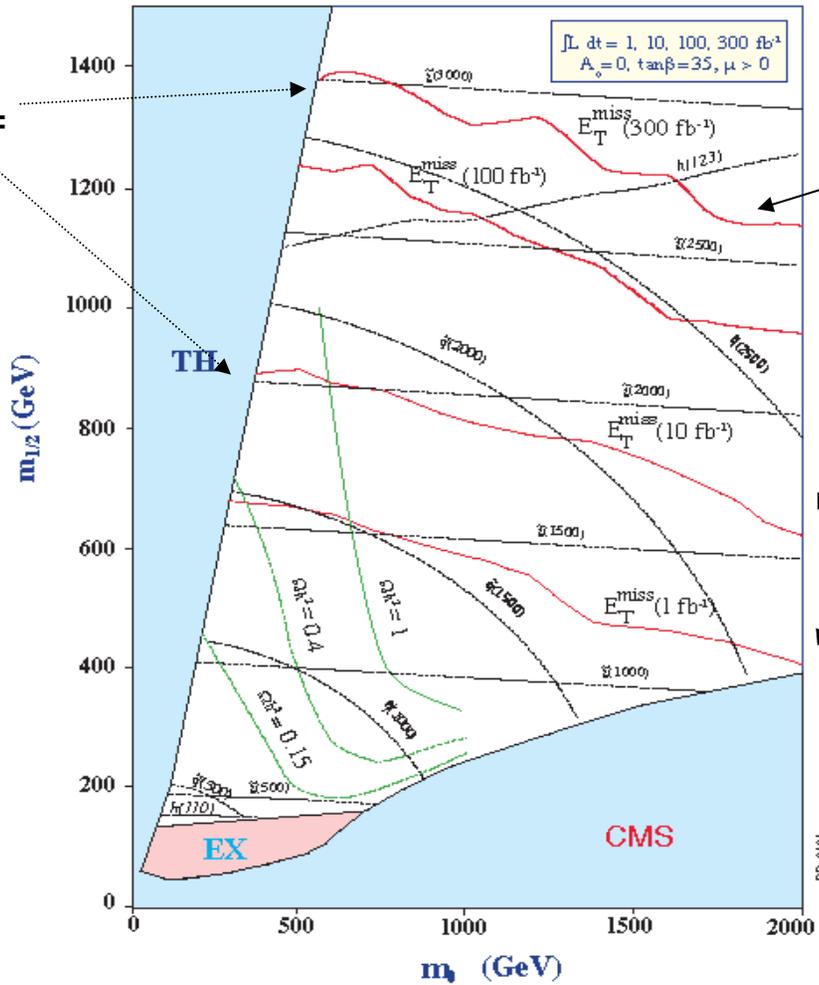
Maitrise du bruit de fond ?

- Bruit de fond de bosons vecteurs: W, Z +jets: normalisation possible avec canaux tels que $Z(->ee)$ +jets
- Bruit de fond top: MC pour extrapoler entre signal top et bruit de fond à SUSY
- Bruit de fond instrumental: jets+'fausse' énergie transverse manquante:
 - difficile à simuler
 - éliminer les pathologies dans la réponse du détecteur
 - Moyens de contrôle:
 - Signification de E_{miss} : $E_{\text{miss}}/\text{Résolution}$ (Résolution= $f(\Sigma E_t$, doit être mesuré dans des échantillons de contrôle)
 - $\Delta\phi$ (p_{tmiss} , jets): pour des événements avec 1 jet mal mesuré, p_{tmiss} va pointer en ϕ dans la direction du jet
 - jets dans les régions de transition entre différents calorimètres

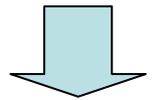


The CMS \tilde{q}, \tilde{g} mass reach in $E_T^{\text{miss}} + \text{jets}$ inclusive channel for various integrated luminosities

$m(\text{gluino}) = 2, 3 \text{ TeV}$

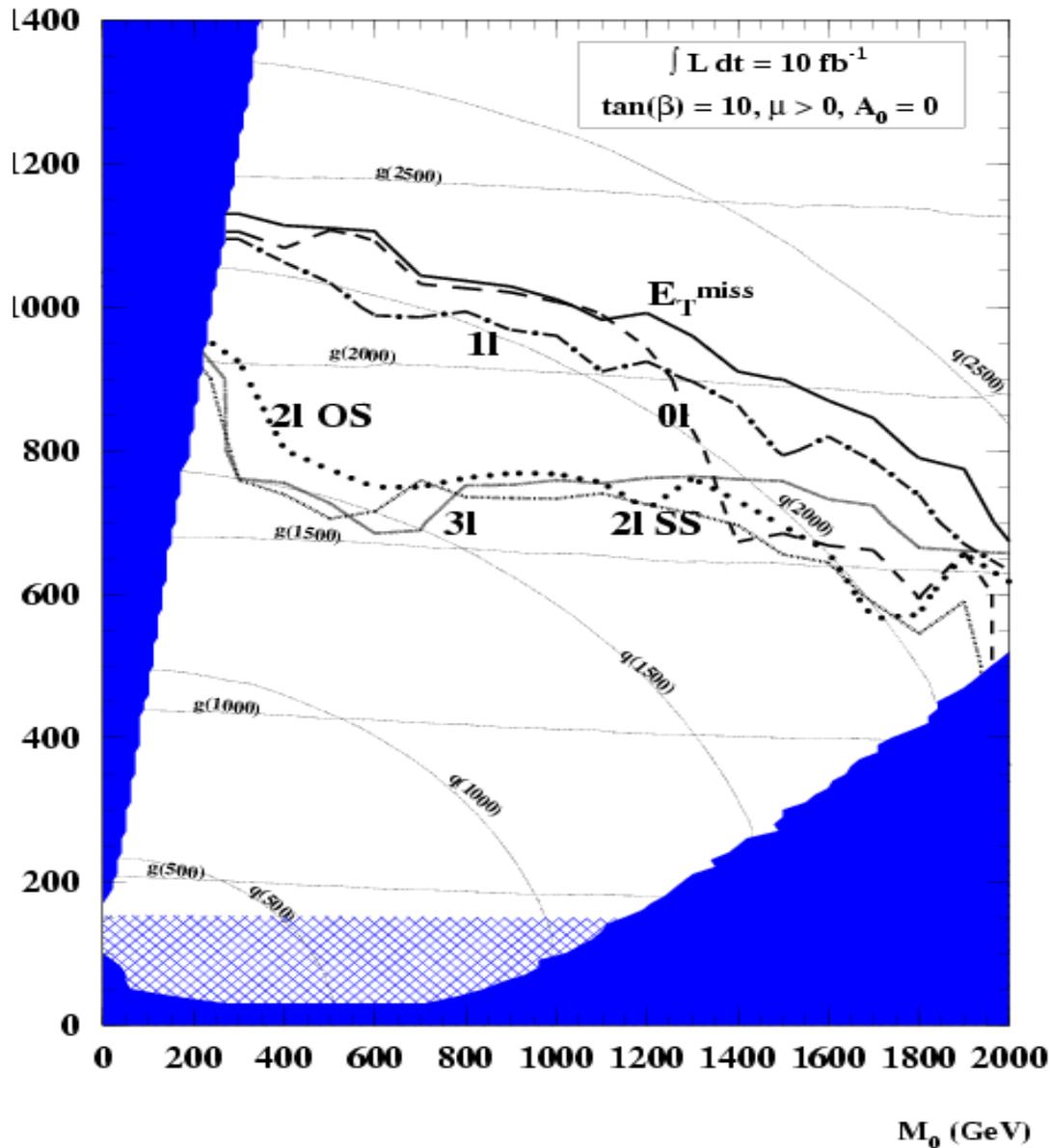


Régions accessibles pour 1, 10, 100, 300 fb^{-1}



~ 1 TeV en 1 mois (si détecteur compris)
~ 2.5 - 3 TeV ultime

(paramètres mSUGRA)



Signatures avec lepton(s)
 Produit dans cascade de
 désintégration:
 par exemple $\chi^0_2 \rightarrow l^+ l^- \chi^0_1$

Probablement moins
 sensible aux effets
 expérimentaux sur $E_{T\text{miss}}$
 que canaux sans lepton
 (bruit de fond QCD
 supprimé)

(Modèles GMSB)

LSP = Gravitino, très léger ($\ll 1$ GeV)

Plusieurs possibilités suivant type NLSP:

NLSP = neutralino

χ^0_1 -> Gravitino Photon

* Pour courtes durées de vie, signature spectaculaire avec jet+Emiss+photons> Peu de bruit de fond du Modèle Standard

* Pour durée de vie plus longue, χ^0_1 peut se désintégrer dans le détecteur

-> photon ne provenant pas du vertex primaire (cf mesure angle γ avec le calorimètre Atlas) => durée de vie => paramètre du Modèle

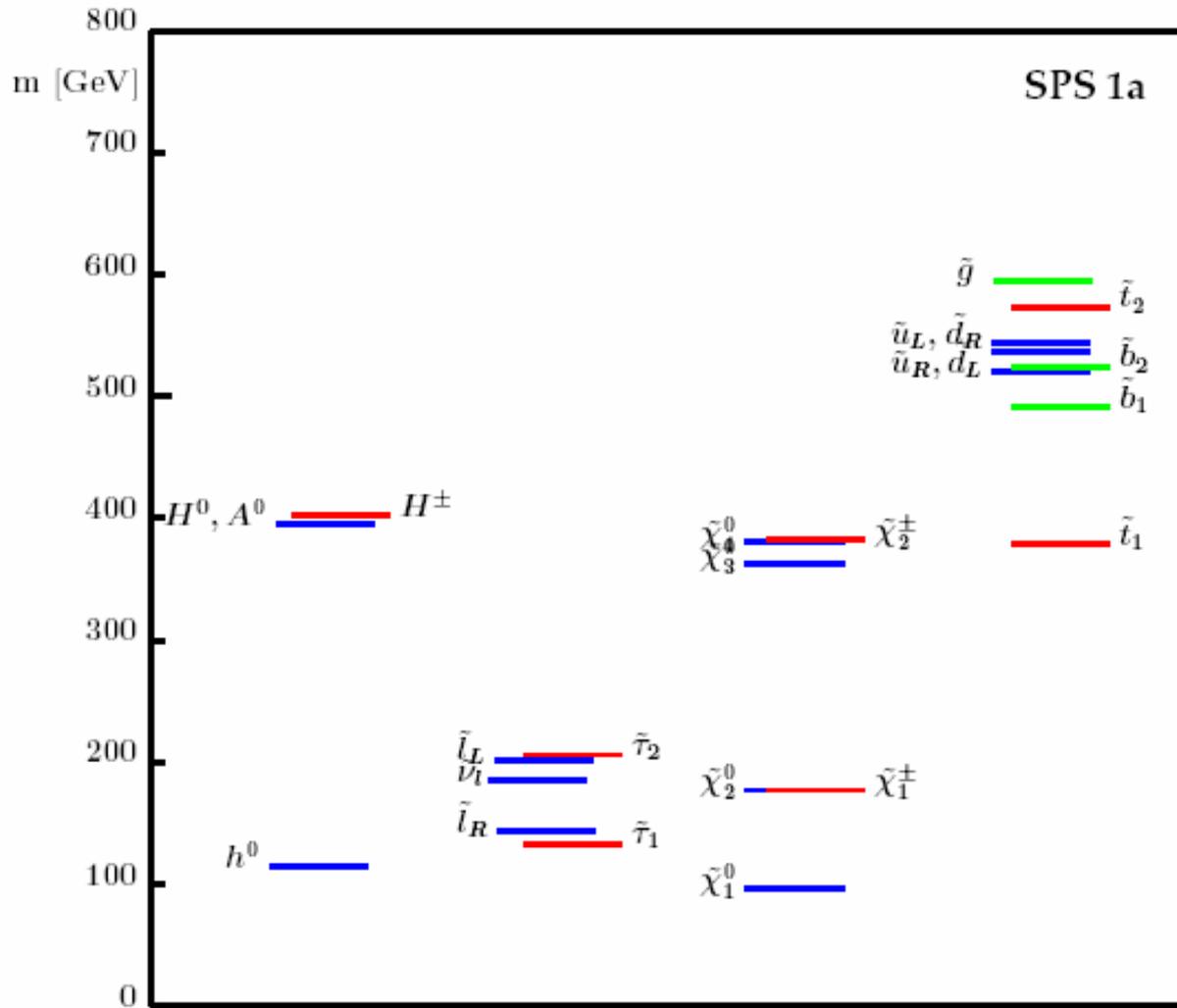
NSLP = stau

Événements avec des leptons, permettent en général un bon S/B

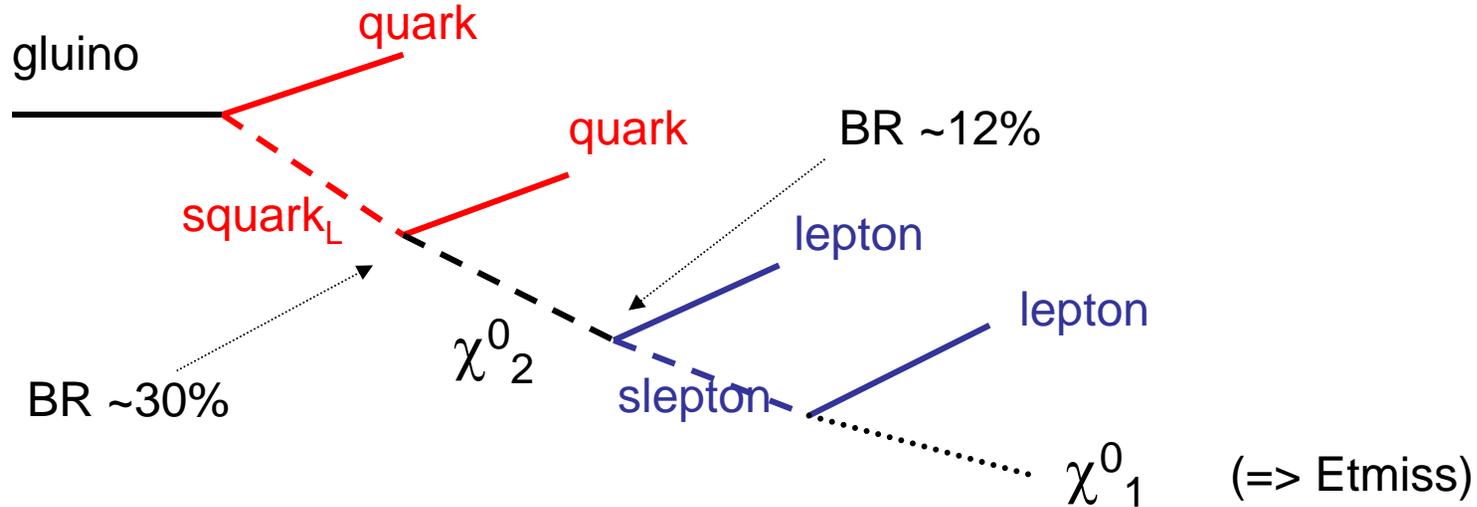
Détermination des paramètres du Modèle ?

- Mesure des masses des particules
- Exemple d'un point mSUGRA ($m_0=100$ GeV, $m_{1/2}=250$ GeV, $\tan\beta=10$, $A=-100$ GeV, $\mu>0$) (compatible avec matière noire)
- Étudié dans note Atlas 2004-007
- Favorable car squarks et gluinos sont relativement légers \Rightarrow production abondante, possibilité d'études des désintégrations en cascade (taux de désintégrations $\Rightarrow e^+e^-$ et $\mu^+\mu^-$ sont assez grands)
- Beaucoup de modes observables et de mesures possibles...

Spectre de masses pour ce point



Production par paires de gluino. Cascade possible:



Quark = quark léger ou b (=> identification de b permet de séparer ces 2 cas)
(note: les masses des sbottoms sont différentes des autres squarks)

Lepton => 2 lepton de même saveur et de signes opposés (e ou μ)

On peut aussi avoir $\chi^0_2 \rightarrow \text{stau tau} \Rightarrow$ canal spécifique avec identification des τ

Reconstruction de la cinématique:

Précision de 0.1 % sur échelle énergie e et μ

Précision de 1% sur échelle énergie des jets

Sélection:

- ≥ 4 Jets ($P_{t1} > 150$ GeV, $P_{t2} > 100$ GeV)
- $M_{\text{eff}} > 600$ GeV
- $E_{\text{miss}} > \max(100, 0.2 * M_{\text{eff}})$
- 2 leptons isolés de même saveur et signes opposés

Bruit de fond:

Dominé par t-tbar

(Contributions nettement plus faibles de W/Z+jets, WW)

Bruit de fond interne:

Autres désintégrations en cascades de SUSY

Pour bruit de fond, les leptons sont produits indépendamment

=> même nombre de e- μ que e-e + μ - μ (toujours signes opposés)

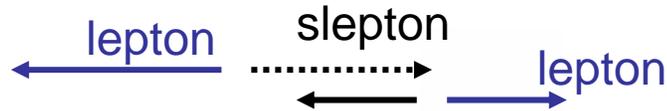
=> **Bruit de fond peut être « facilement » soustrait statistiquement pour toute distribution**

(S/B est > 1 donc peu d'augmentation des incertitudes statistiques)

Énergie manquante (2 neutralinos) => reconstruction complète de masses invariants impossible

Stratégie: examiner les limites des distributions de masse invariants des particules observables

Exemple: dans désintégration $\chi^0_2 \rightarrow$ **lepton slepton** \rightarrow **lepton lepton** χ^0_1
 Masse l+l- maximale:

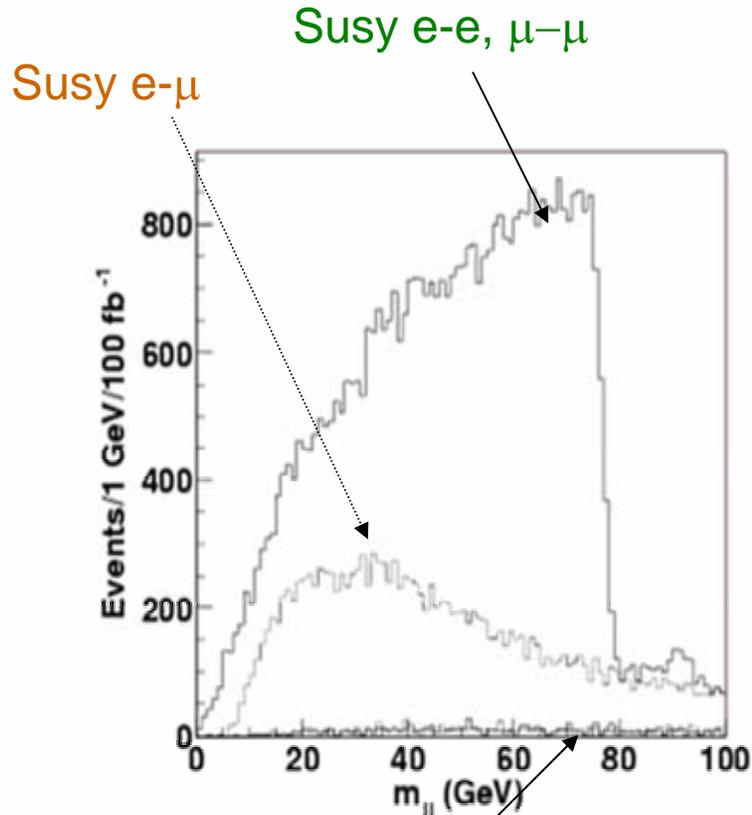


$$(m_{ll}^2)_{\max} = \frac{(m_{\chi_2^0}^2 - m_{\tilde{l}_R}^2)(m_{\tilde{l}_R}^2 - m_{\chi_1^0}^2)}{m_{\tilde{l}_R}^2}$$

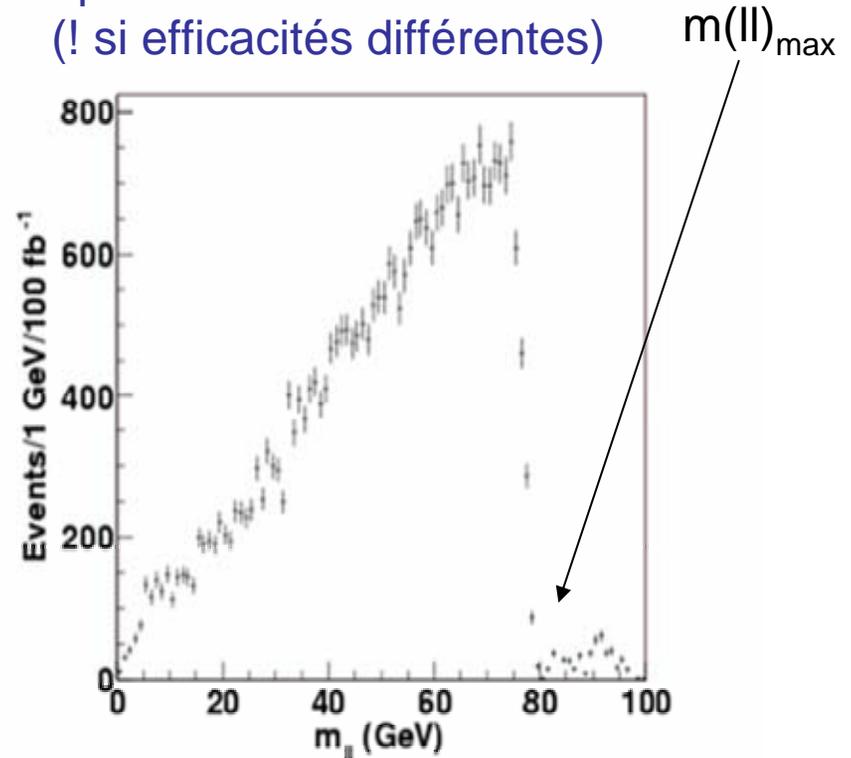
(2 désintégrations à 2 corps)

Calcul similaire pour $(m_{ql})_{\max}$ (désintégration du squark) et pour les masses **ql**

Distribution de masse(lepton-lepton)



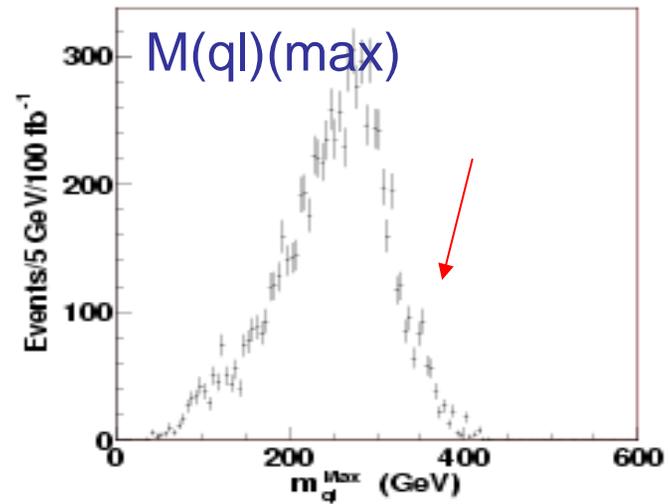
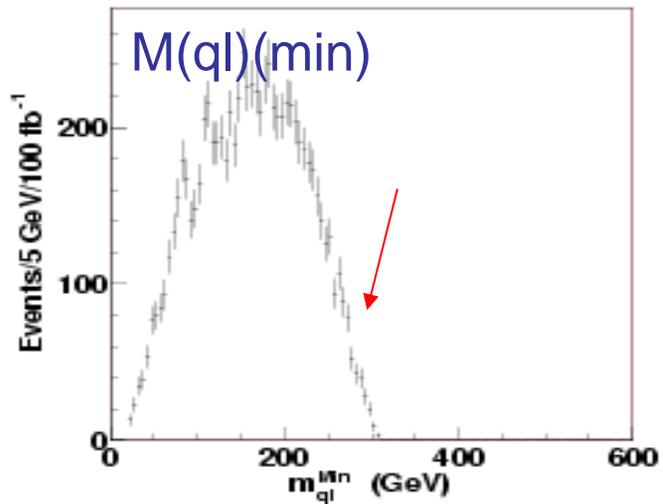
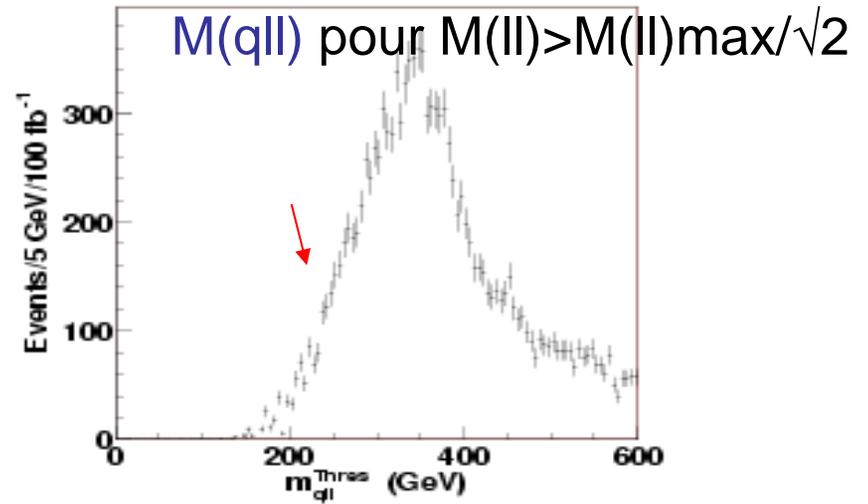
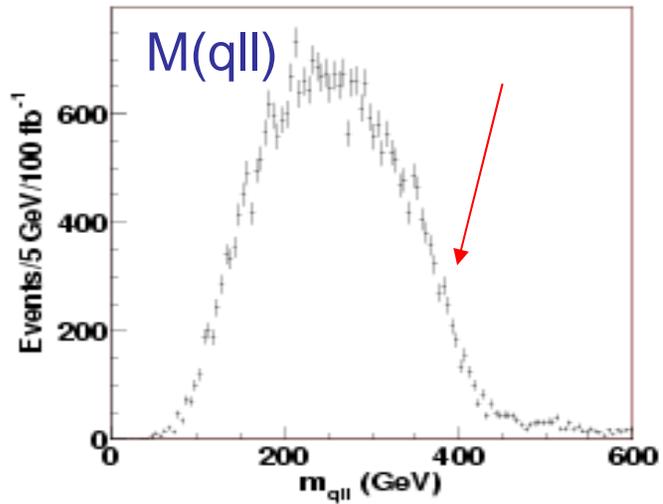
après soustraction
(! si efficacités différentes)



Bruit de fond MS

Lepton-lepton => très bonne
précision sur la masse

=> Front descendant à $\sim <0.1$ GeV pour 100 fb⁻¹



Précisions pour 100 fb⁻¹

Edge	Nominal Value	Fit Value	Syst. Error Energy Scale	Statistical Error
$m(ll)^{\text{edge}}$	77.077	77.024	0.08	0.05
$m(qll)^{\text{edge}}$	431.1	431.3	4.3	2.4
$m(ql)_{\text{min}}^{\text{edge}}$	302.1	300.8	3.0	1.5
$m(ql)_{\text{max}}^{\text{edge}}$	380.3	379.4	3.8	1.8
$m(qll)^{\text{thres}}$	203.0	204.6	2.0	2.8
$m(bll)^{\text{thres}}$	183.1	181.1	1.8	6.3

Sépare b et quarks légers

Pour 1% d'erreur systématique
sur l'échelle d'énergie des jets

Un peu de cinématique...

$$(m_{ql}^2)^{\text{edge}} = \frac{(m_{\bar{q}L}^2 - m_{\bar{\chi}_2^0}^2)(m_{\bar{\chi}_2^0}^2 - m_{\bar{\chi}_1^0}^2)}{m_{\bar{\chi}_2^0}^2}$$

$$(m_{ql}^2)_{\text{min}}^{\text{edge}} = \frac{(m_{\bar{q}L}^2 - m_{\bar{\chi}_2^0}^2)(m_{\bar{\chi}_2^0}^2 - m_{\bar{l}_R}^2)}{m_{\bar{\chi}_2^0}^2}$$

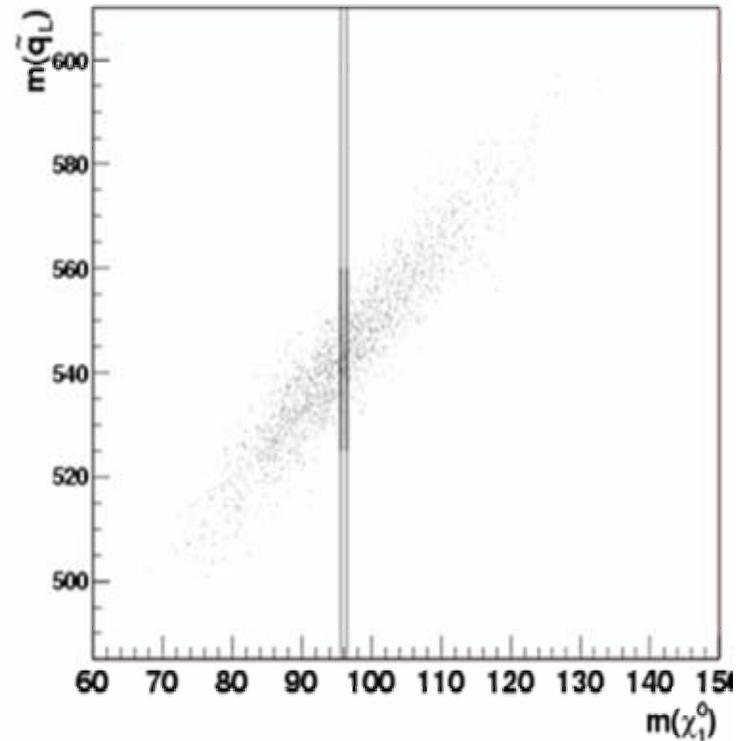
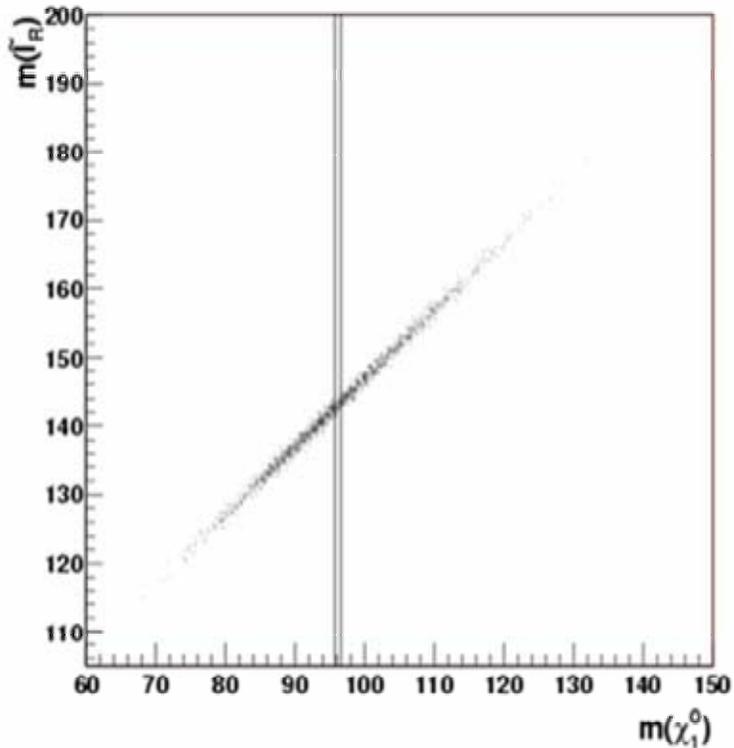
$$(m_{ql}^2)_{\text{max}}^{\text{edge}} = \frac{(m_{\bar{q}L}^2 - m_{\bar{\chi}_2^0}^2)(m_{\bar{l}_R}^2 - m_{\bar{\chi}_1^0}^2)}{m_{\bar{l}_R}^2}$$

$$(m_{ql}^2)^{\text{thres}} = \frac{[(m_{\bar{q}L}^2 + m_{\bar{\chi}_2^0}^2)(m_{\bar{\chi}_2^0}^2 - m_{\bar{l}_R}^2)(m_{\bar{l}_R}^2 - m_{\bar{\chi}_1^0}^2) - (m_{\bar{q}L}^2 - m_{\bar{\chi}_2^0}^2) \sqrt{(m_{\bar{\chi}_2^0}^2 + m_{\bar{l}_R}^2)^2 (m_{\bar{l}_R}^2 + m_{\bar{\chi}_1^0}^2)^2 - 16 m_{\bar{\chi}_2^0}^2 m_{\bar{l}_R}^4 m_{\bar{\chi}_1^0}^2} + 2 m_{\bar{l}_R}^2 (m_{\bar{q}L}^2 - m_{\bar{\chi}_2^0}^2)(m_{\bar{\chi}_2^0}^2 - m_{\bar{\chi}_1^0}^2)]}{4 m_{\bar{l}_R}^2 m_{\bar{\chi}_2^0}^2}$$

=> On peut remonter aux (différences de) masses

Mesure essentiellement des différences de masse avec LSP
=> +/- 5 à 10 GeV de précision si seulement LHC.

Si on connaît la masse de χ^0_1 => ~ +/- qqqs GeV sur de nombreuses masses



Masses du gluino et du sbottom: (même chaîne de désintégration)

$$\tilde{g} \rightarrow \tilde{b}\bar{b} \rightarrow b\chi_2^0\bar{b} \rightarrow bl^+l^-\chi_1^0\bar{b}$$

-> Utilise jets de b pour réduire bruit de fond combinatoire avec autres jets produits dans l'événement

-> Approximation: χ_1^0 est ~au repos dans le centre de masse de χ_2^0

$$\vec{p}(\chi_2^0) = \left(1 + \frac{m(\chi_1^0)}{m(l^+l^-)}\right) \vec{p}(l^+l^-) \quad (\text{impulsion de } \chi_2^0 \text{ dans labo})$$

Pour une hypothèse de $m(\chi_1^0)$, on connaît $m(\chi_2^0)$ (par méthode précédente)

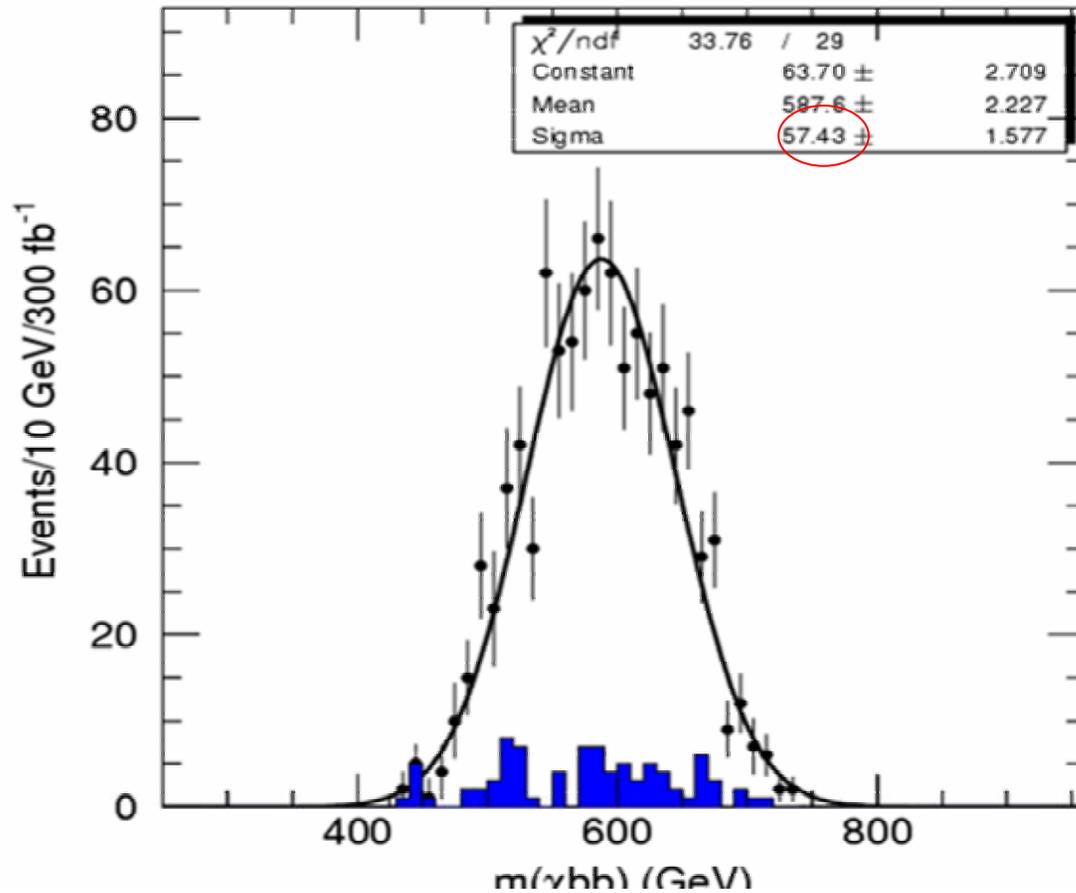
⇒ Reconstruction de $m(b\chi_2^0)$ -> masse du sbottom

et de $m(bb\chi_2^0)$ -> masse du gluino

(2 combinaisons, choix avec corrélation entre ces masses)

(Possibilité de mettre en évidence les 2 sbottoms de masses différentes, si résolution des jets bien comprise + grande luminosité)

Résolution dominée par approximation dans calcul impulsion χ^0_2



Masse reconstruite gluino (pour bonne hypothèse $m(\chi^0_1)$)

Masse gluino $\sim 500 \text{ GeV} + m(\chi^0_1)$ (pour cet exemple)

Autres possibilités (1):

Production directe de slepton (interactions faibles) avec désintégration en $\chi^0_1 + \text{lepton}$

Signature:

- 2 leptons de même saveur et signes opposés
- Énergie transverse manquante
- Pas de jet

Bruits de fond (technique de soustraction des événements e- μ)

- WW
- t-tbar
- WZ
- (+bruits de fond SUSY)

Pas de reconstruction directe de la masse. Utilise masse transverse

« généralisée »

$$M_T^2 = \min_{p_1 + p_2 = p_T} (\max(m_T^2(p_1, p_t(l_1)), m_T^2(p_2, p_t(l_2))))$$

Permet d'accéder à la masse du slepton_L (plus lourd que slepton_R)

Limité par statistique, Précision de quelques GeV sur la différence de masse avec le LSP (pour 300 fb⁻¹)

Autres possibilités (2):

Production de gauginos lourds (χ^0_4, χ^+_2) dans désintégrations des squarks
Les rapports de branchement peuvent être de ~quelques pourcents

Par exemple: squark $\rightarrow \chi^0_4$ quark $\rightarrow \chi^0_1$ $l^+ l^-$ quark

Similaire à cas avec désintégration χ^0_2 mais masse $l+l^-$ plus grande
 \Rightarrow observable pour 100 fb^{-1}

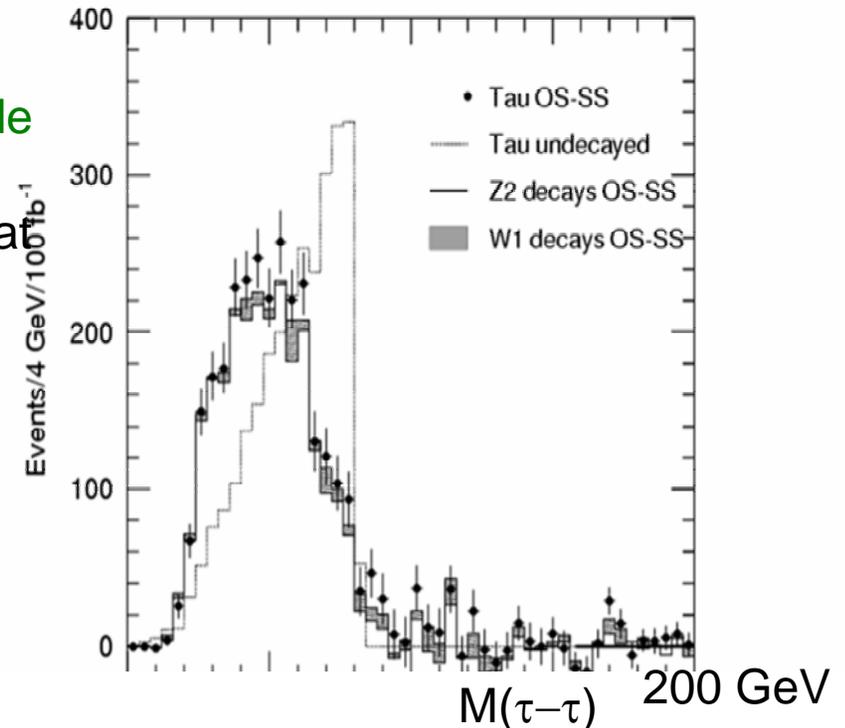
Autres possibilités (3):

Observation de la désintégration stau-tau de χ^0_2

\Rightarrow Production d'une paire de taus dans l'état final (identification de $\tau \rightarrow$ hadrons)

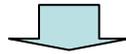
\Rightarrow Mesure excès d'événements de signes opposés dans distribution $M(\tau\tau)$

\Rightarrow Signal observable, Sensible à $m(\text{stau}) - m(\text{LSP})$



Pour ce choix particulier des paramètres, on mesure (avec 300 fb^{-1}) les masses des particules avec les précisions suivantes:

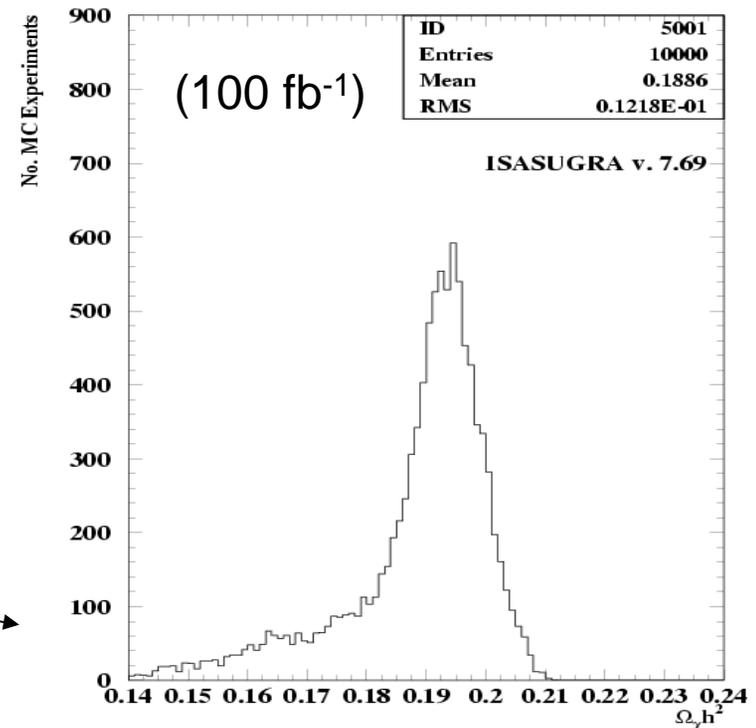
$\chi^0_1, \chi^0_2, \chi^0_4 \sim 4\text{-}5 \text{ GeV}$
gluino $\sim 8 \text{ GeV}$
sbottom $\sim 8 \text{ GeV}$
squarks $\sim 20 \text{ GeV}$
sleptons $\sim 5\text{-}7 \text{ GeV}$



Interprétation dans le cadre de mSUGRA =>

$m_0 \quad \pm 4 \text{ GeV}$
 $m_{1/2} \quad \pm 1.8 \text{ GeV}$
 $\tan(\beta) \quad \pm 1.2$
 $A_0 \quad \pm 32 \text{ GeV}$

« prédiction » de la densité de matière noire

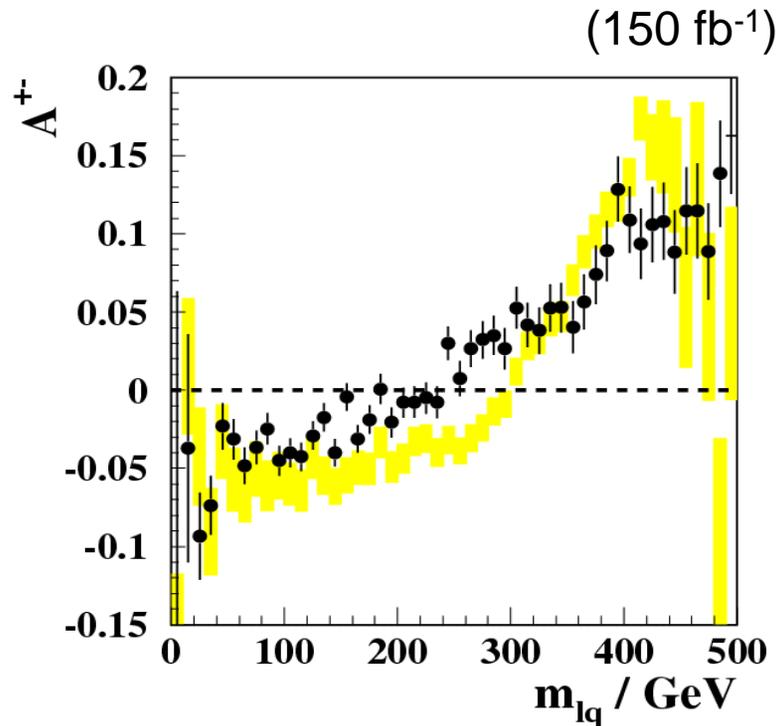
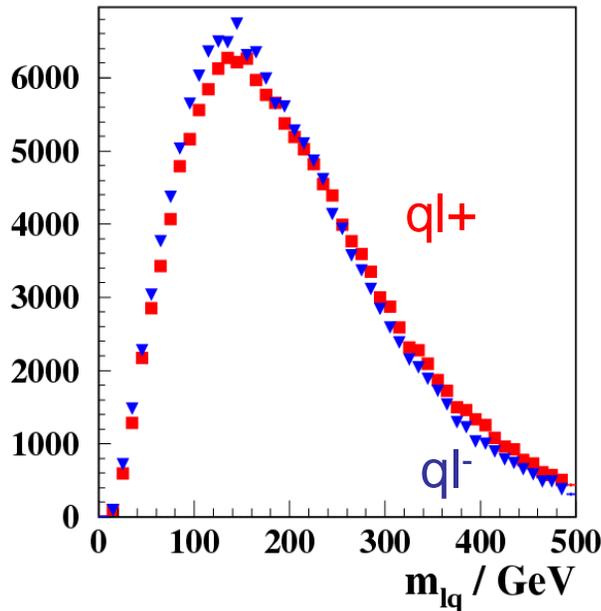


Compatibilité des différentes mesures

Est-on sensible au spin des sparticules (=spin particules $\pm \frac{1}{2}$) ?

Exemple:

χ^0_2 principalement wino => couplages chiraux



Quelques conclusions sur Supersymetrie:

- Sensibilité aux squarks et gluinos jusqu'à ~ 3 TeV ($\sim + 0.5$ TeV avec luminosité SLHC)
- Pour point favorable, possibilité de mesurer de nombreuses masses et de contraindre le Modèle
- Apport externe de $m(\chi^0_1)$ important (voir cours complémentarité LHC/LC)
- Si masse plus grandes:
 - Taux d'événements réduits
 - Certains rapports d'embranchement peuvent être moins favorables
 - Plus difficile de mesurer les paramètres
 - SLHC ?
- *Encore pas mal d'études à faire pour étudier tous ces cas...*

(variante plus exotique de susy) (la tendance de l'été ?)

Arkani-Hamed, Dimopoulos hep-th/0405159

- **Scalars à masses très grandes (10^{10} GeV)**
 - pas de problème de FCNC, Violation de CP
 - abandonne argument d'ajustement fin de M_h
 - **Spins $\frac{1}{2}$ masses $\sim \leq 1$ TeV**
 - garde l'unification des couplages
 - matière noire
 - **Particularités:**
 - gluino de grande durée de vie
 - production de charginos par Drell-Yan (pas de cascade de squark et gluino)
 - mais toujours higgs léger...
- => Phénoménologie radicalement différente...