

Bosons de Higgs neutres: du LEP au LHC

Maarten Boonekamp
Vanina Ruhlmann-Kleider
CEA/DAPNIA/SPP

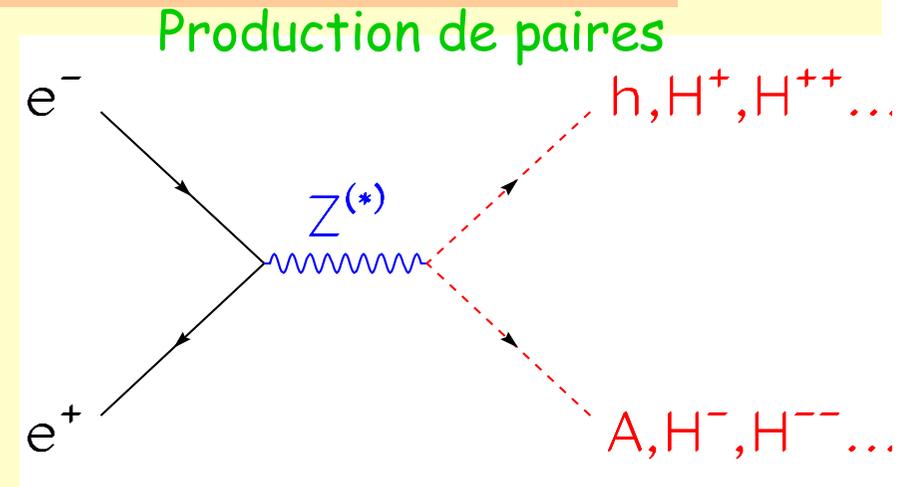
- 1) Stratégie de recherche: le MS
- 2) Résultats/perspectives dans un modèle: le MSSM
- 3) Résultats/perspectives générales: des limites du LEP aux mesures au LHC
- 4) Identifier la nouvelle physique au LHC
- 5) Conclusions

Les recherches au LEP

Les recherches de bosons de Higgs au LEP

o Recherches directes:

- **Seulement 3** processus de production
- **Presque tous les canaux de désintégration** sont exploitables



- limites dans le cadre de **modèles** : MS , MSSM, 2HDM ...
 - contraintes **générales** sur les carrés des **couplages au Z** (ZZH , $ZH_i H_j$) et aux **fermions** (ffH)
- ## o Contraintes indirectes déduites des mesures de précision électrofaibles (EW)

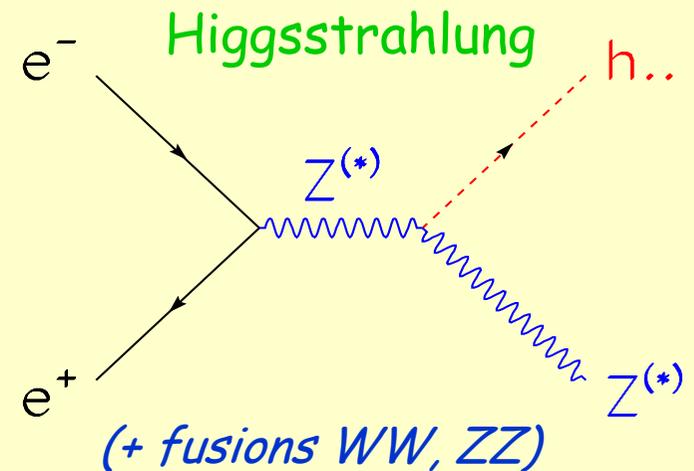
Par la suite:

recherches de bosons neutres (MS , MSSM, couplages au Z)

Les recherches de bosons de Higgs au LEP

o Recherches directes:

- Seulement 3 processus de production
- Presque tous les canaux de désintégration sont exploitables



- limites dans le cadre de modèles : MS, MSSM, 2HDM ...
 - contraintes générales sur les carrés des couplages au Z (ZZH , ZH_iH_j) et aux fermions (ffH)
- ## o Contraintes indirectes déduites des mesures de précision électrofaibles (EW)

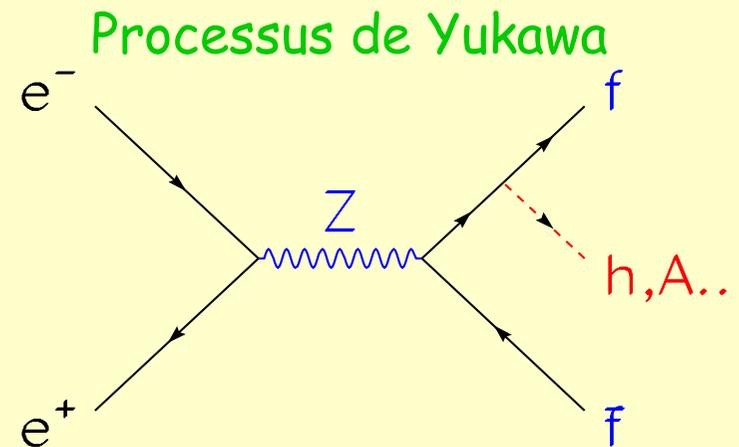
Par la suite:

recherches de bosons neutres (MS, MSSM, couplages au Z)

Les recherches de bosons de Higgs au LEP

o Recherches directes:

- **Seulement 3** processus de production
- **Presque tous les canaux de désintégration** sont exploitables



- limites dans le cadre de **modèles** : MS , MSSM, 2HDM ...
 - contraintes **générales** sur les carrés des **couplages au Z** (ZZH , $ZH_i H_j$) et aux **fermions** (ffH)
- ## o Contraintes indirectes déduites des mesures de précision électrofaibles (EW)

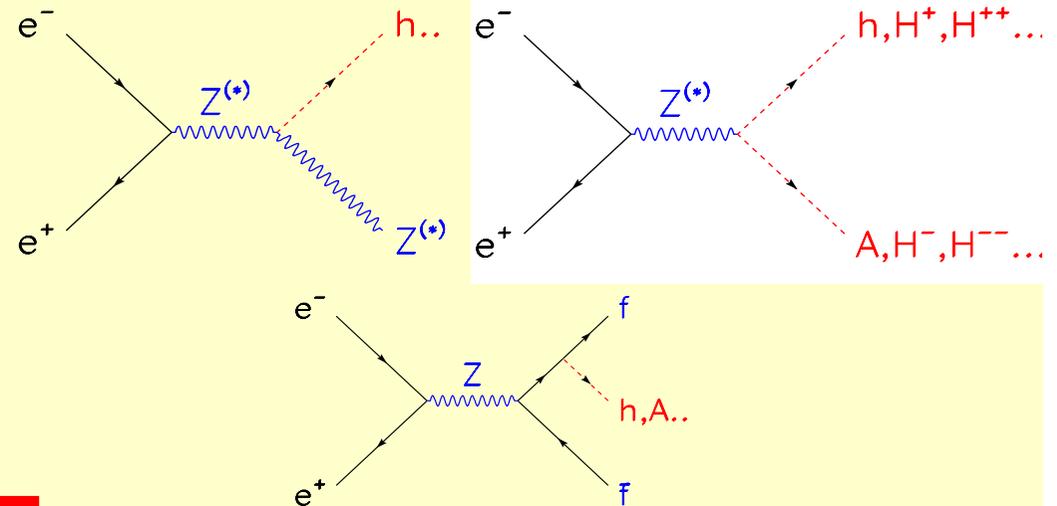
Par la suite:

recherches de bosons neutres (MS , MSSM, couplages au Z)

Les recherches de bosons de Higgs au LEP

o Recherches directes:

- **Seulement 3** processus de production
- **Presque tous les canaux de désintégration** sont exploitables



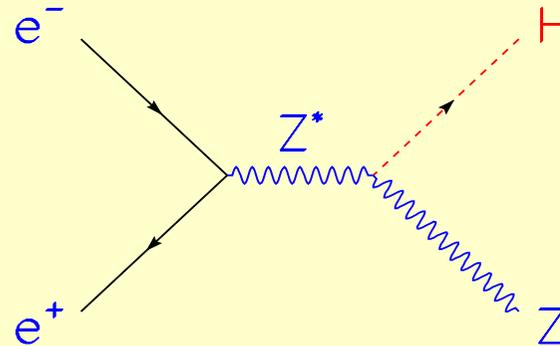
- limites dans le cadre de **modèles** : MS, MSSM, 2HDM ...
 - contraintes **générales** sur les carrés des **couplages au Z** (ZZH , $ZH_i H_j$) et aux **fermions** (ffH)
- ## o Contraintes indirectes déduites des mesures de précision électrofaibles (EW)

Par la suite:

recherches de bosons neutres (MS, MSSM, couplages au Z)

Stratégie de recherche au LEP: l'exemple du M_S

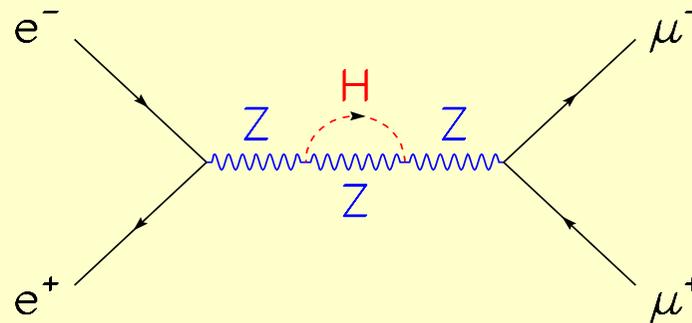
1. Recherches directes :



sensibilité à basse
masse $\lesssim O(110\text{GeV})$

désintégrations: hors détecteur, $\gamma\gamma$, ee , $\mu\mu$, $\pi\pi$, KK , cc , $\tau\tau$, bb , hadrons

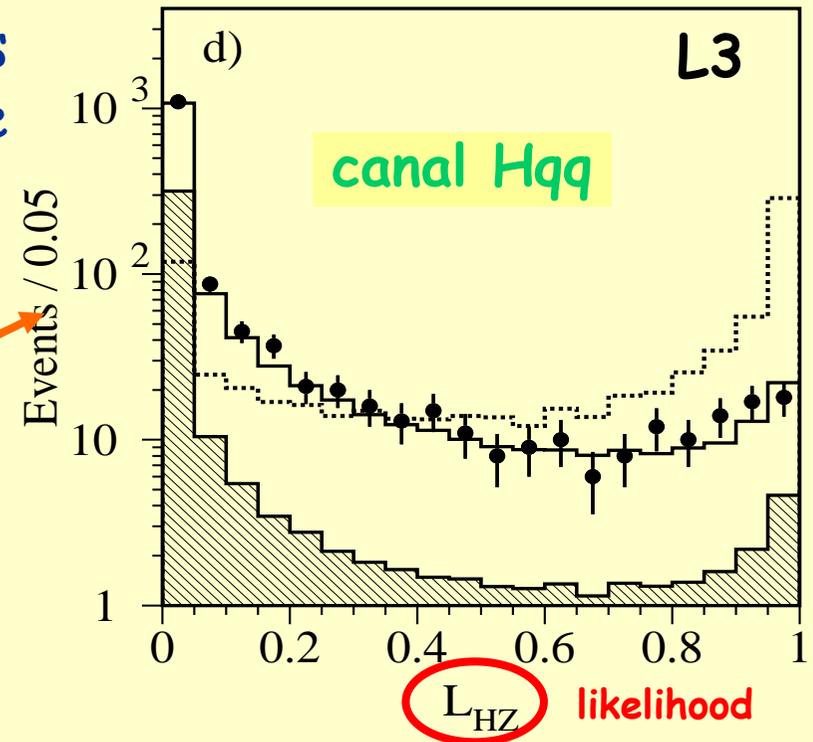
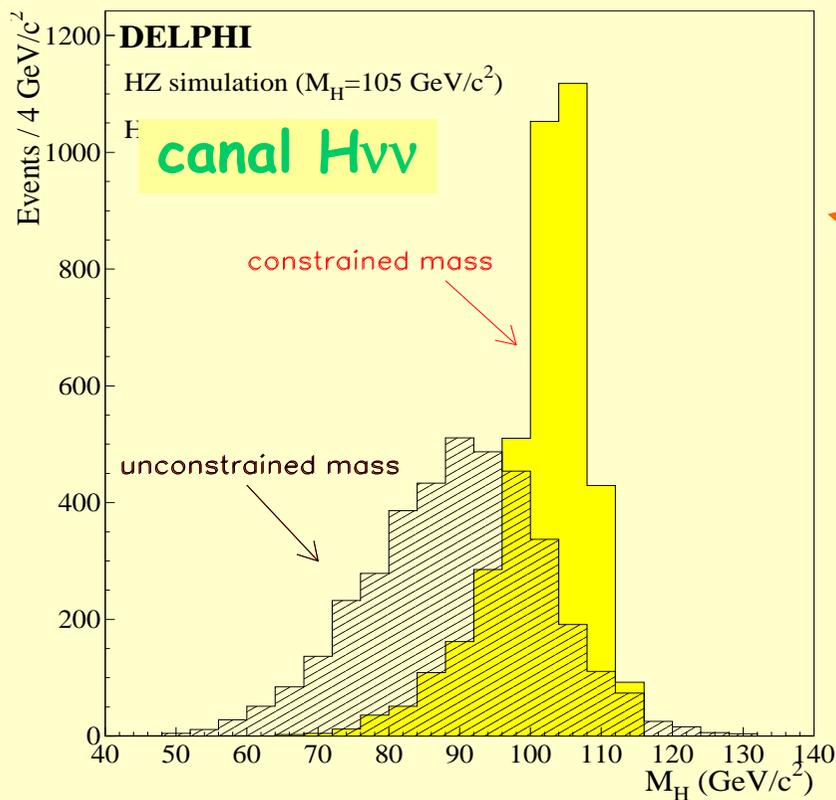
2. Contraintes indirectes tirées des mesures de précision :



sensibilité à basse et
haute masses

Outils: analyses multidimensionnelles et ajustement ciném.

- o Pour une discrimination optimale: analyses multidimensionnelles (NN, rapport de vraisemblance ...)

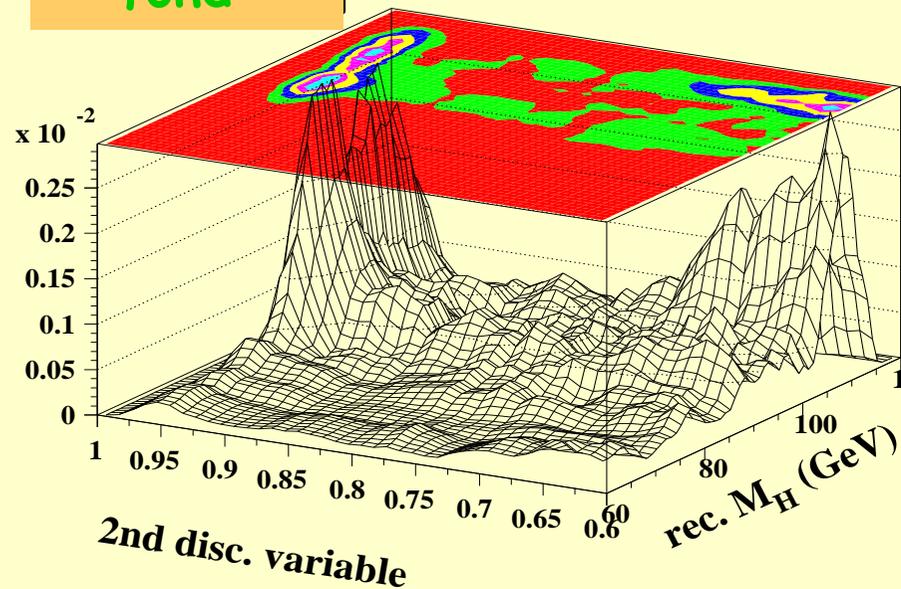


- o Reconstruction en masse: ajustement cinématique avec conservation de E,p et contrainte en masse (ex HZ @LEP2)

Outils: interprétation statistique des résultats

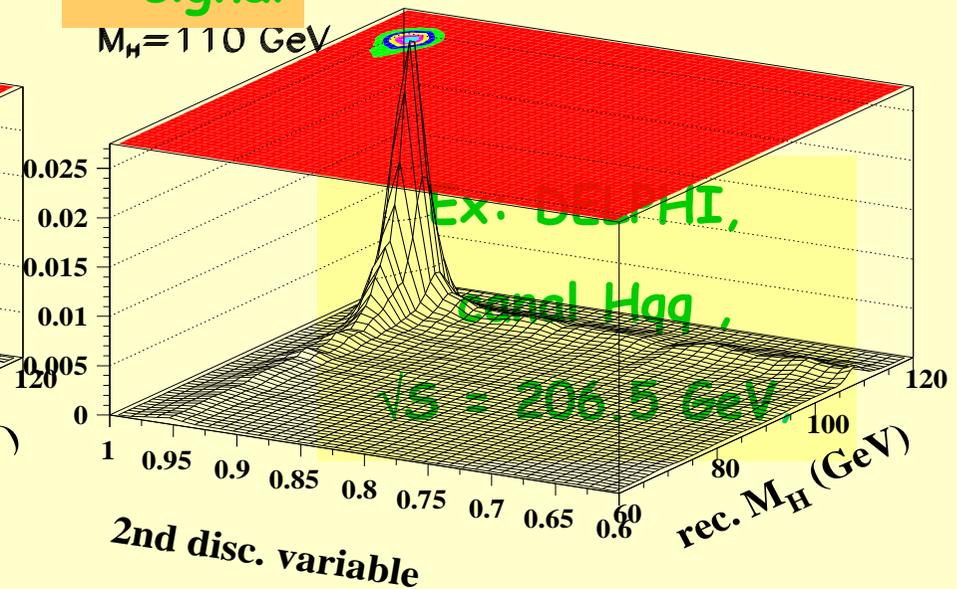
- o Pour une analyse statistique non biaisée et puissante des résultats des recherches :
 - Analyses **modérément** sélectives
 - Taux et **information discriminante supplémentaire** (2d !) utilisés pour tester la compatibilité des données avec:

fond



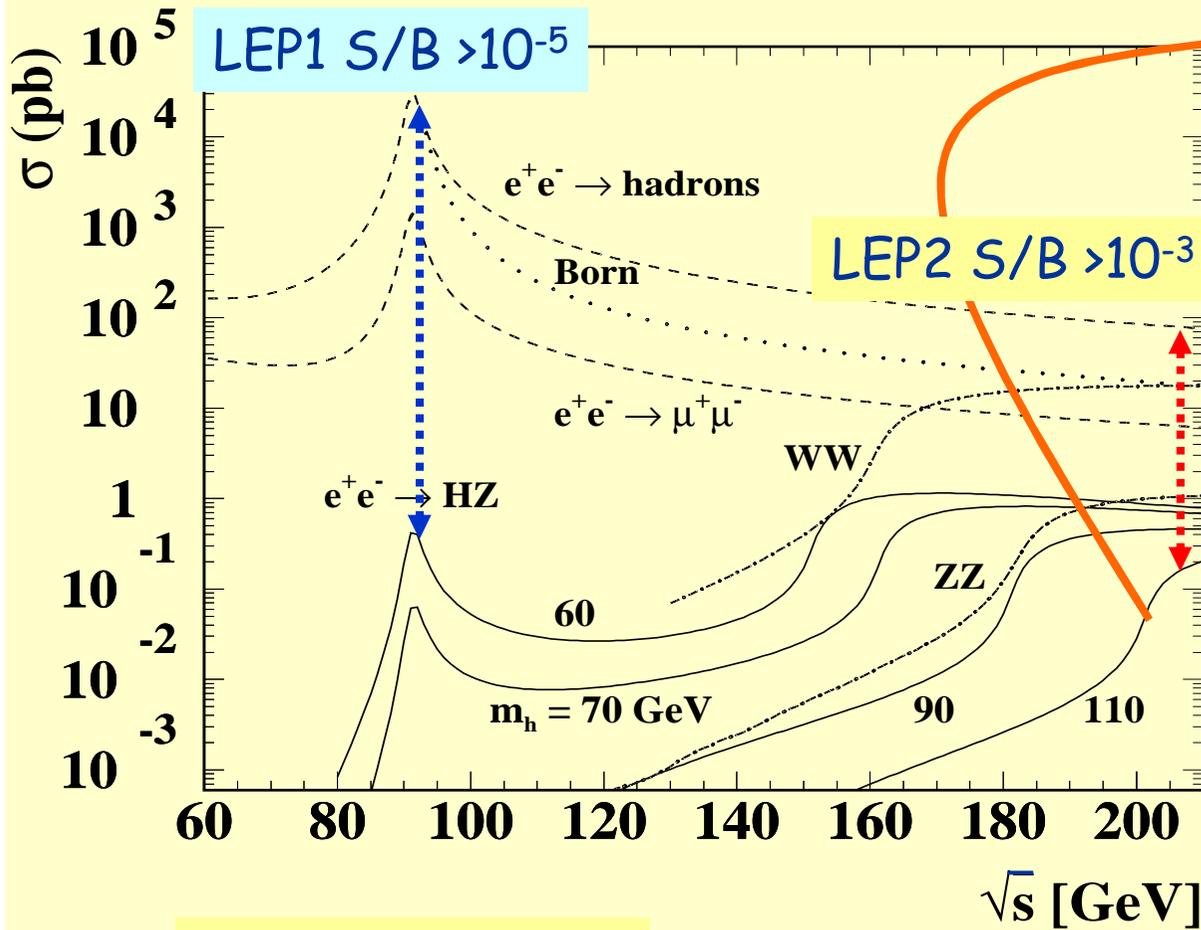
+ signal

$M_H = 110 \text{ GeV}$



- o outils: rapport de vraisemblance ($-2\ln Q$) et niveaux de confiance

Résultats : recherche du boson de Higgs du MS



Montée rapide de σ avec \sqrt{s}
 dès que $\sqrt{s} > M_H + M_Z$
 \Rightarrow qqes pb⁻¹ suffisent pour
 tester M_H au-dessus du
 seuil

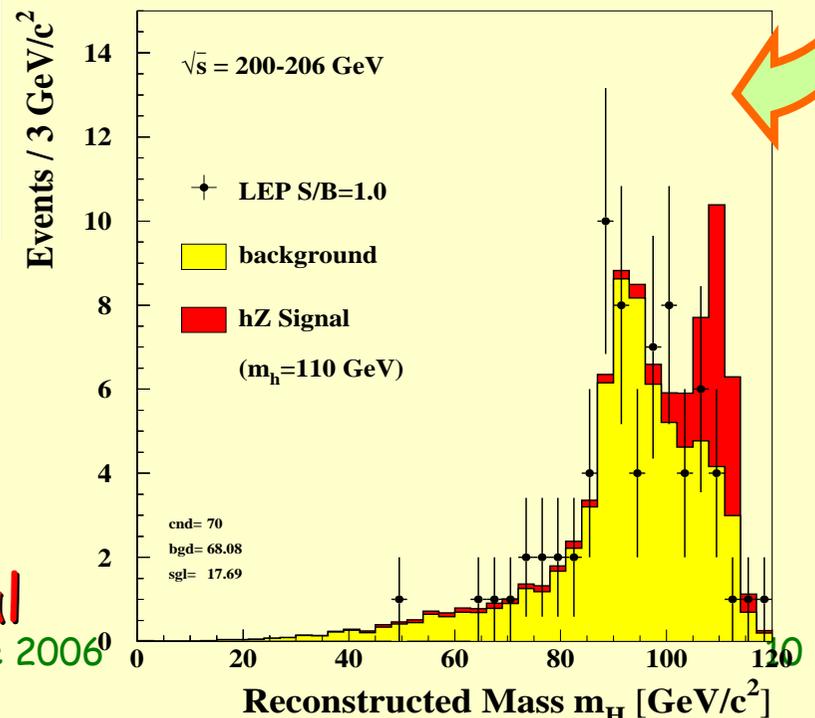
ex: juillet 2000: hypothèse
 $M_H = 110 \text{ GeV}$ exclue

Résultat LEP :

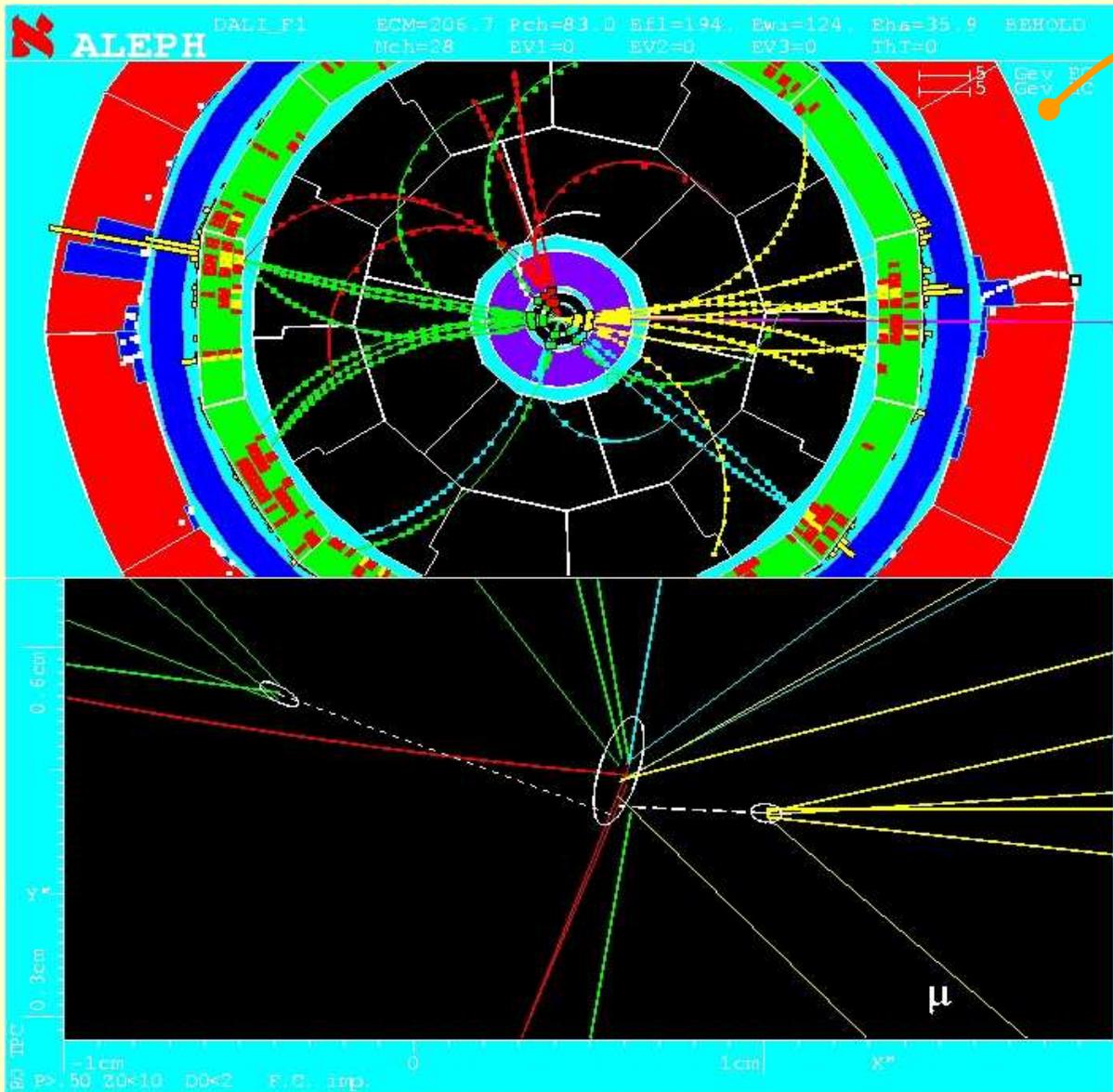
$M_H > 114,4 \text{ GeV}$ (95% CL)

final

4 Septembre 2006



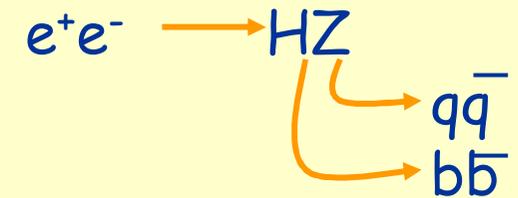
Un événement compatible avec un Higgs du MS



4 jets de particules
2 jets de b



état final:

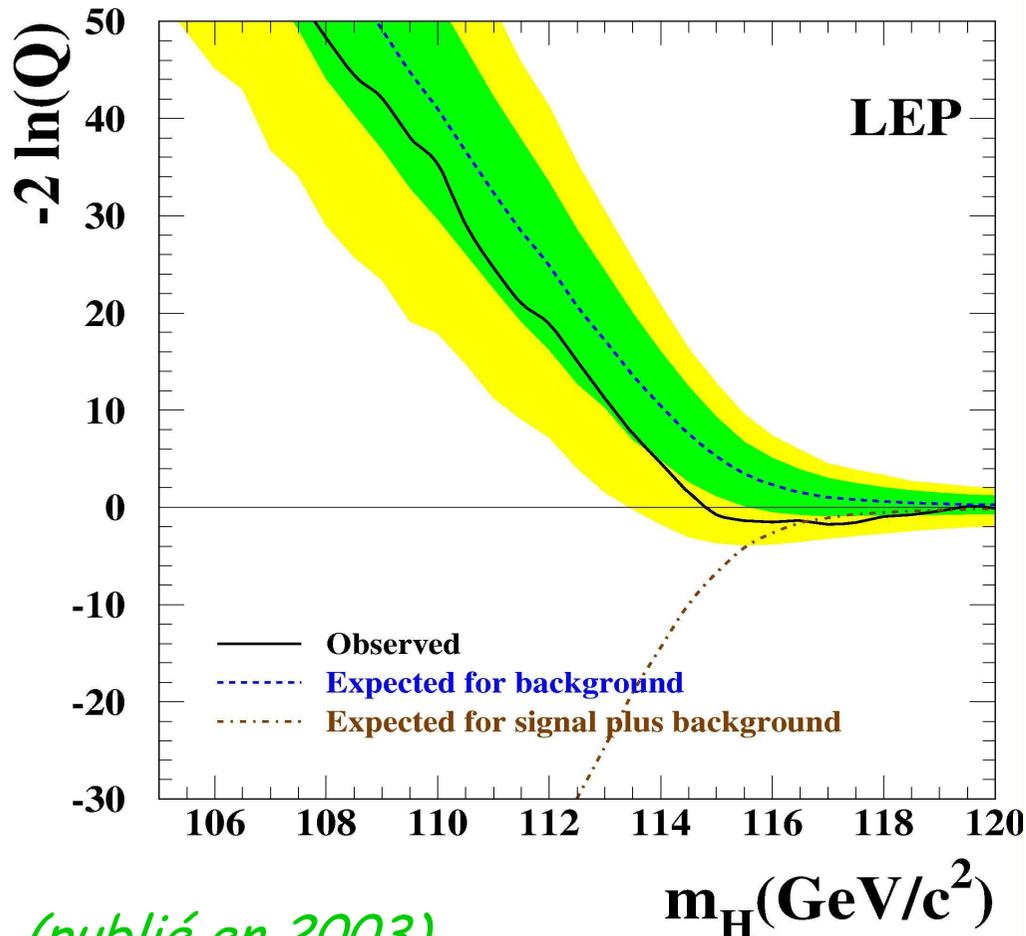


probabilités signal et
fond comparées:

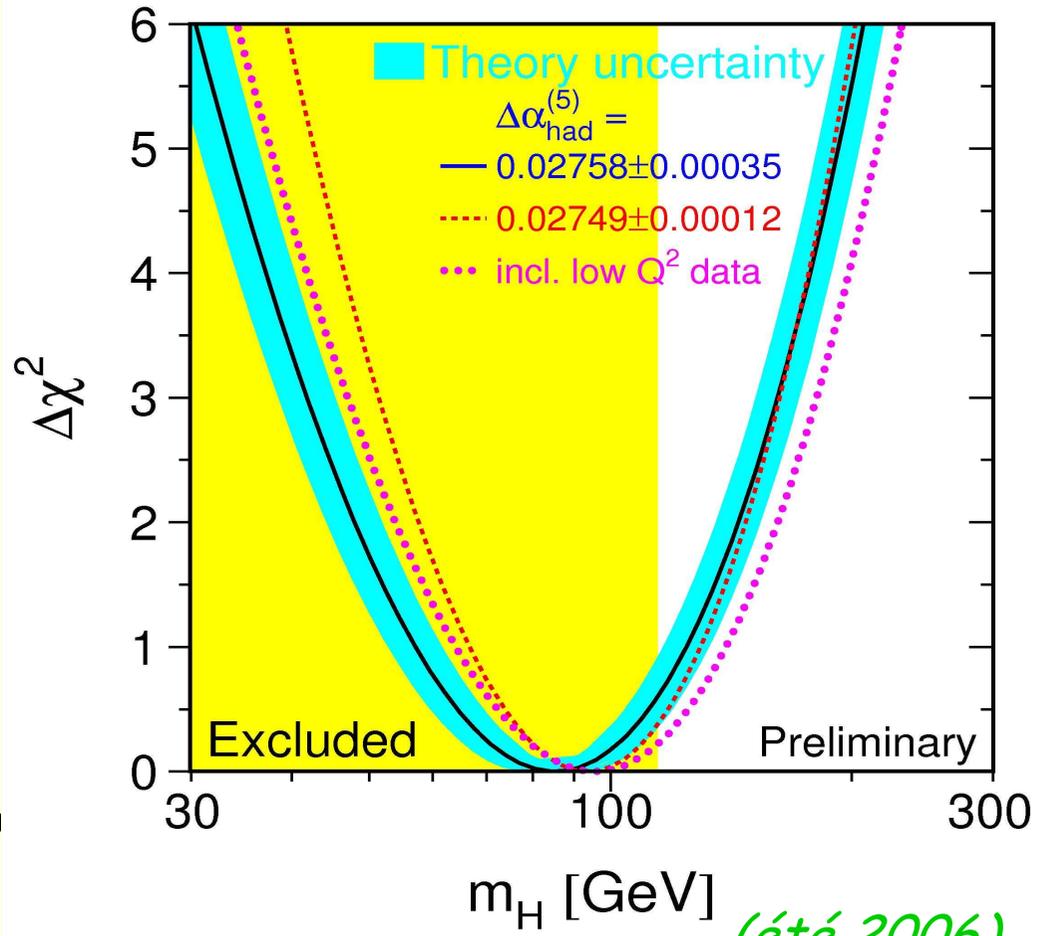
$$\ln(1+s/b) = 1.76$$

masse reconstruite:
 $M_H = 114.1 \pm 3 \text{ GeV}$

Situation actuelle pour le MS:



(publié en 2003)



(été 2006)

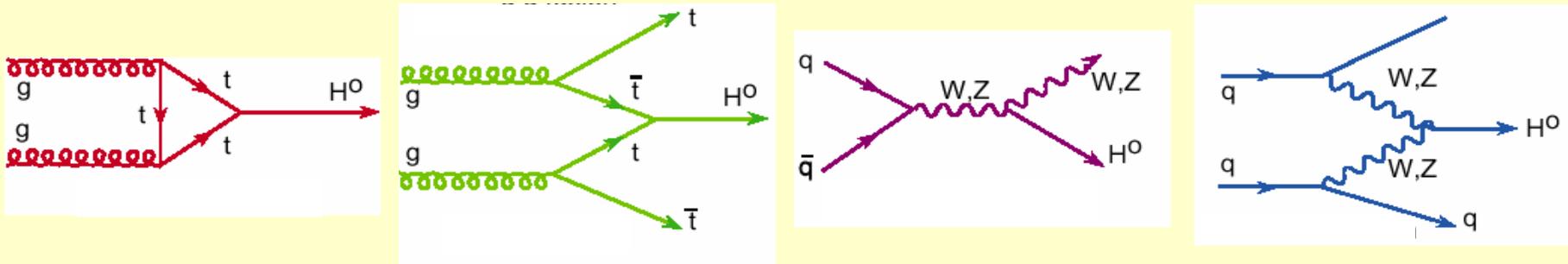
recherches directes :
 $m_H \geq 114,4 \text{ GeV}$ (95% CL)
 $m_H \in [115, 118] \text{ GeV}$?

mesures EW de précision:
 $m_H \leq 166 \text{ GeV}$ (95% CL)

Les recherches au LHC

Production de bosons de Higgs au LHC

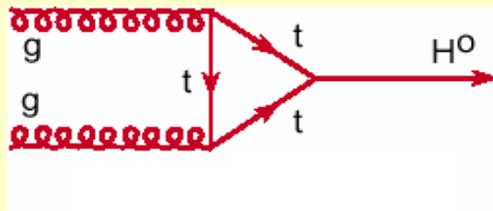
- o Rappel : le LHC est une machine hadronique
 - pp, 14 TeV, $10^{33-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 10-100 fb⁻¹/an
 - p q, g processus dur
- o Nombreux modes de production :



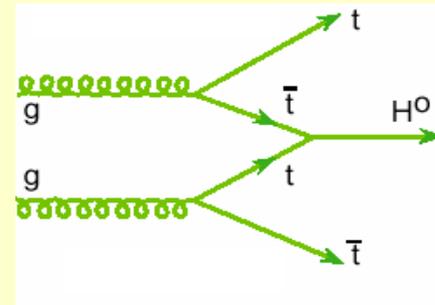
- o Désintégrations : fermions et bosons de jauge légers ($b \rightarrow t \rightarrow c \dots \rightarrow g, \gamma$) puis bosons de jauge lourds ($W \rightarrow Z$)
- o Peu de modes sont exploitables : il faut des leptons et/ou des photons dans l'état final

Stratégie de recherche au LHC : le MS

- o Recherches directes. Sensibilité : $M_H > 100 \text{ GeV}$
 - Traditionnelles

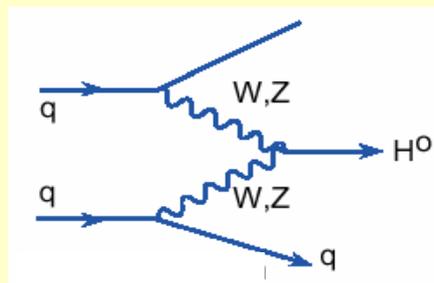


$\gamma\gamma$
($M_H < 140 \text{ GeV}$)
 WW, ZZ
($M_H > 140 \text{ GeV}$)



bb
($M_H < 120 \text{ GeV}$)

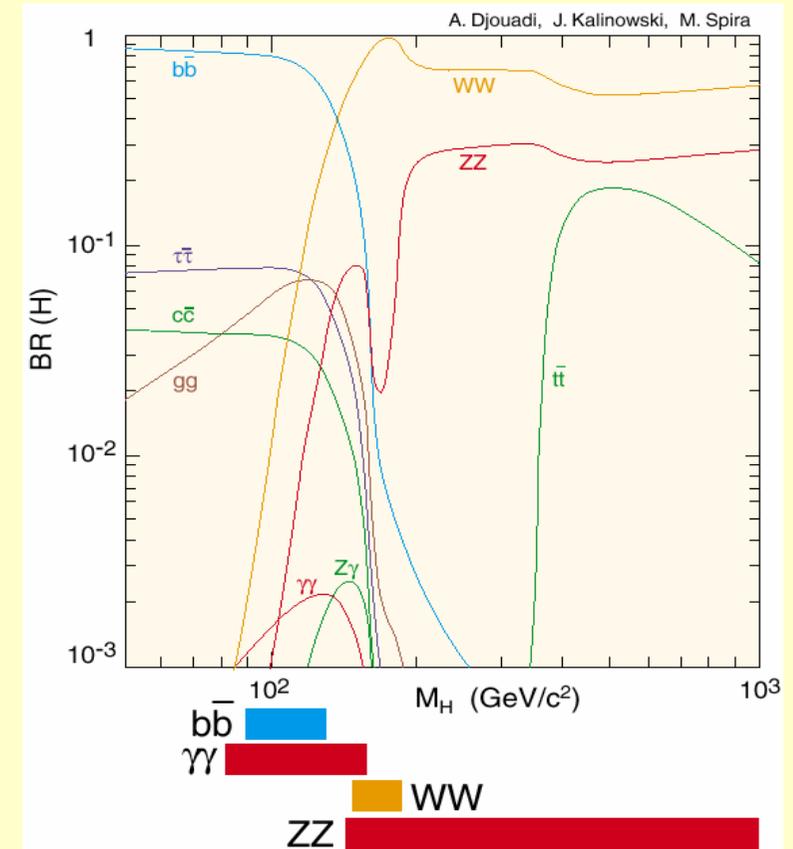
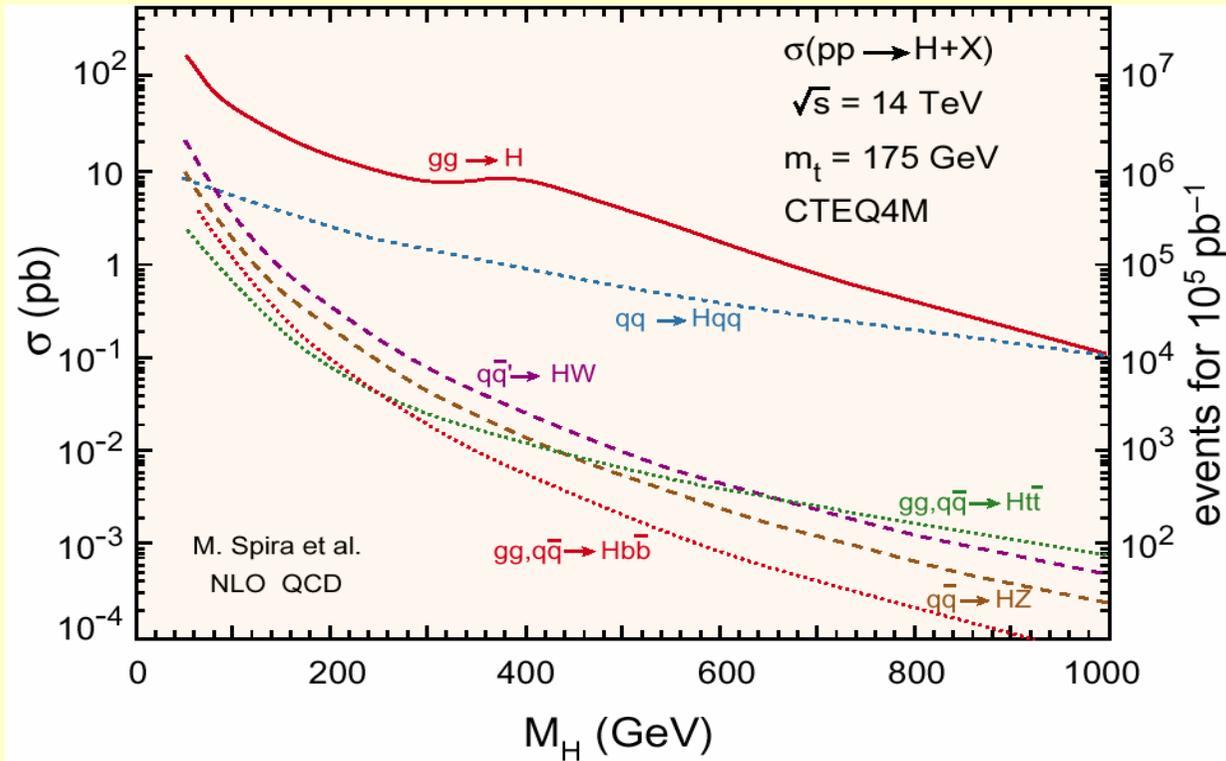
- Addition « récente » :



$\tau\tau$ ($M_H < 140 \text{ GeV}$),
 WW ($M > 130 \text{ GeV}$)

Stratégie de recherche au LHC : le MS

o Pour mémoire...



Outils (1)

o Analyses

- Sélections « simples » mais robustes : coupures ($N_e, N_\mu, N_\gamma, N_{jet}; E_{T,miss}, p_T, \text{isolation}, \dots$)
- Simplicité d'apparence seulement : l'identification des particules est un défi
 - Ex : $R(b:uds) \sim 10^2$; $R(\gamma:jet) \sim 10^3$; $R(e:jet) \sim 10^6$
- Introduction progressive de méthodes sophistiquées (NN, L, ...) avec l'arrivée de la communauté du LEP. Pas une priorité pour l'instant

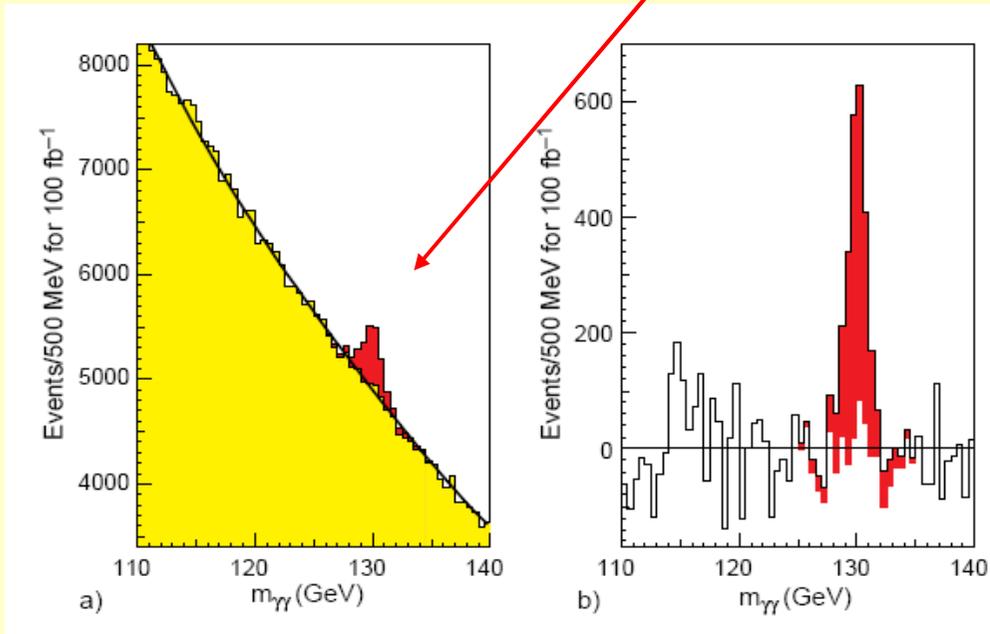
Outils (2)

o Interprétation

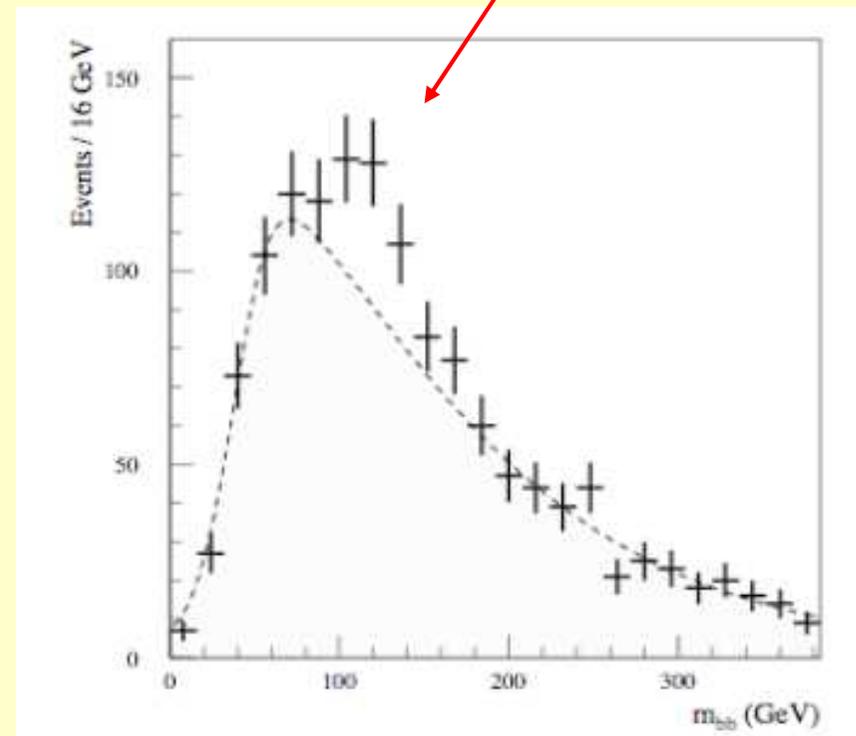
- Analyses avec coupures : comptage poissonnien (dans une fenêtre en masse)
- Principale différence par rapport au LEP : le fond doit le plus souvent être mesuré dans les données
- Exploitation statistique
 - Sensibilité (moyenne!)
 - Information complémentaire : probabilité de découverte

Quelques exemples (1)

o gg $H;H$ $\gamma\gamma,$ $t\bar{t}H$ $(l\nu b)$ (jjb) (bb) (douteux)



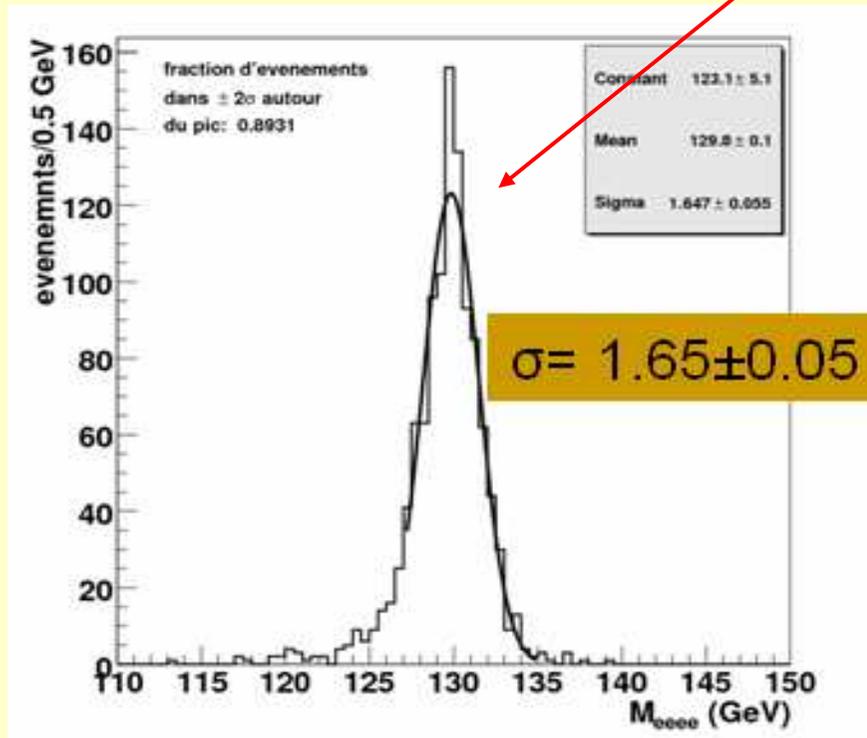
(CMS ECAL TDR)



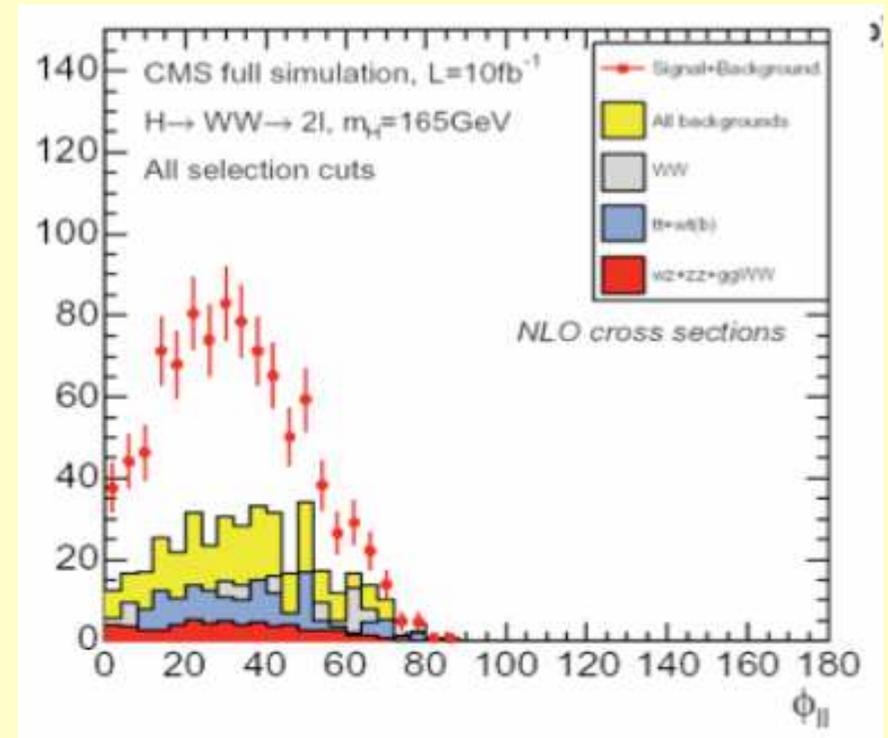
(ATLAS TDR)

Quelques exemples (2)

o gg $H; H$ ZZ $4l$, H WW $2l2\nu$ (M_{rec})



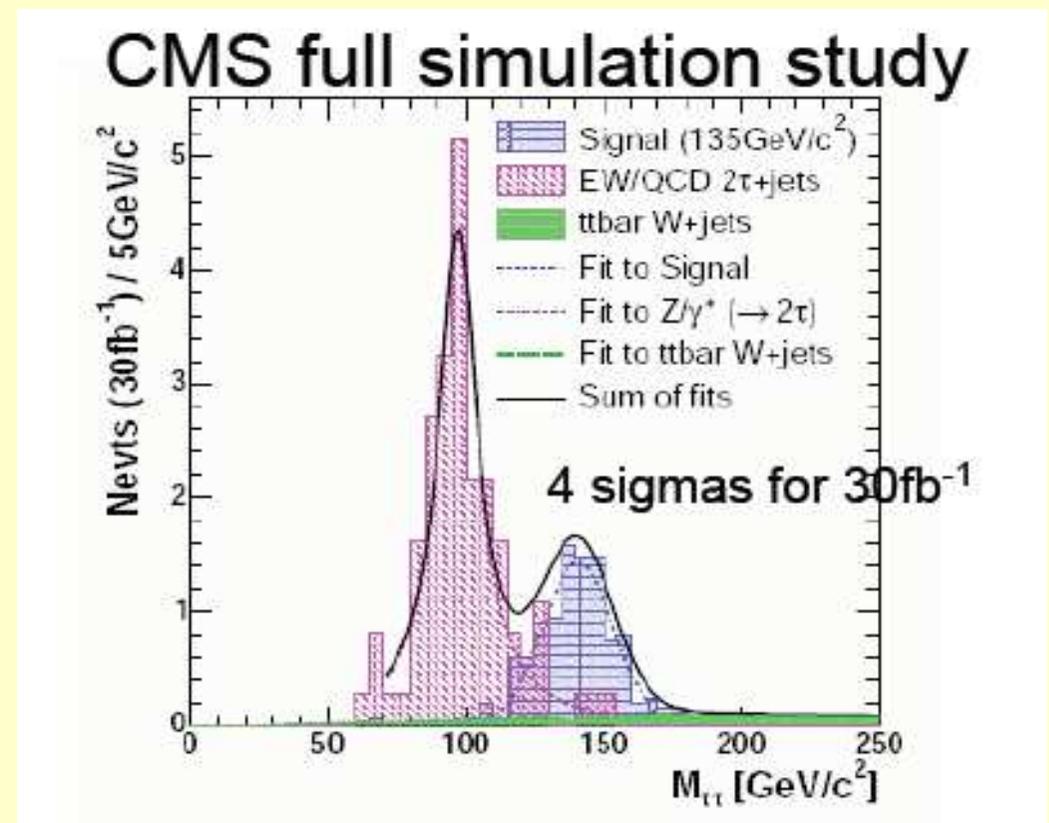
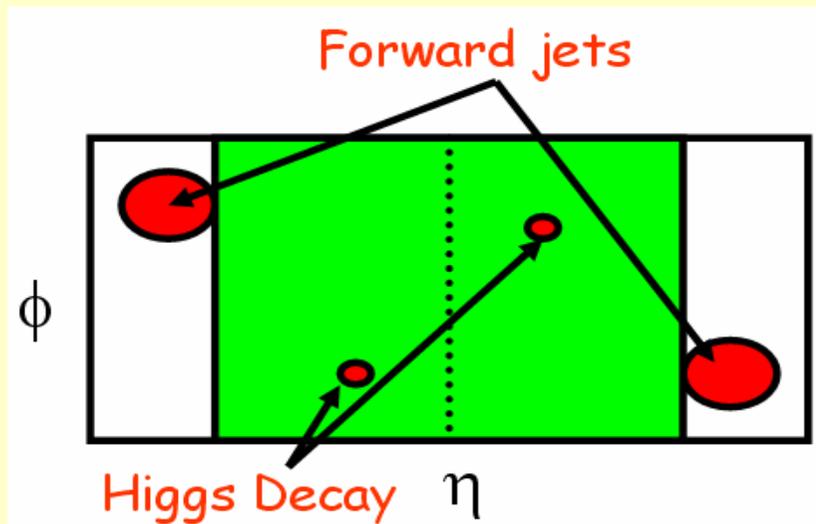
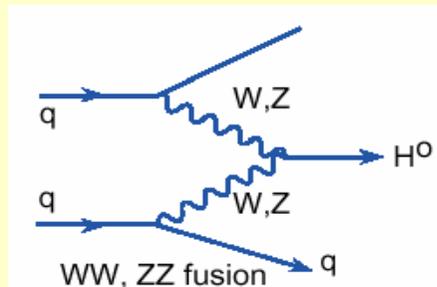
(Thèse N.Kerschen)



(CMS 2006)

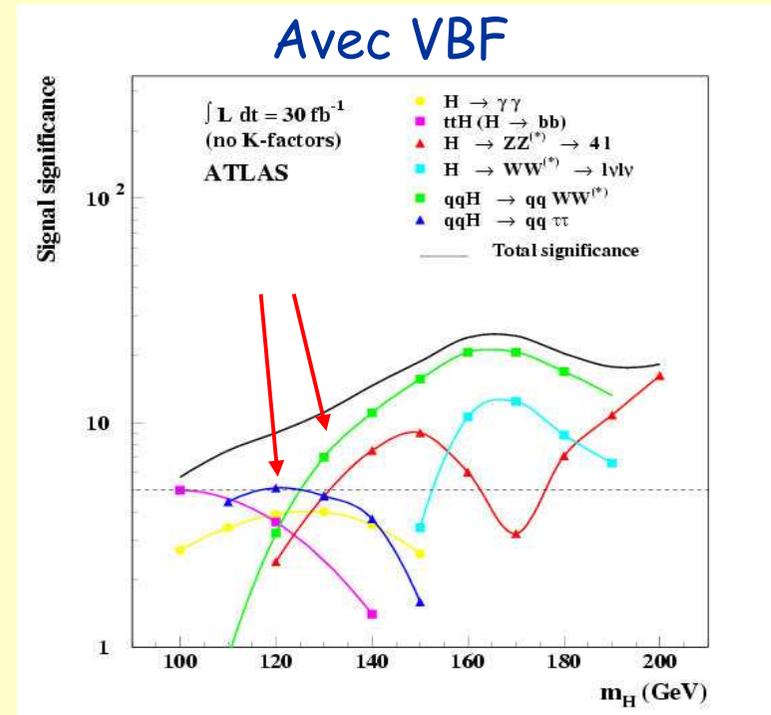
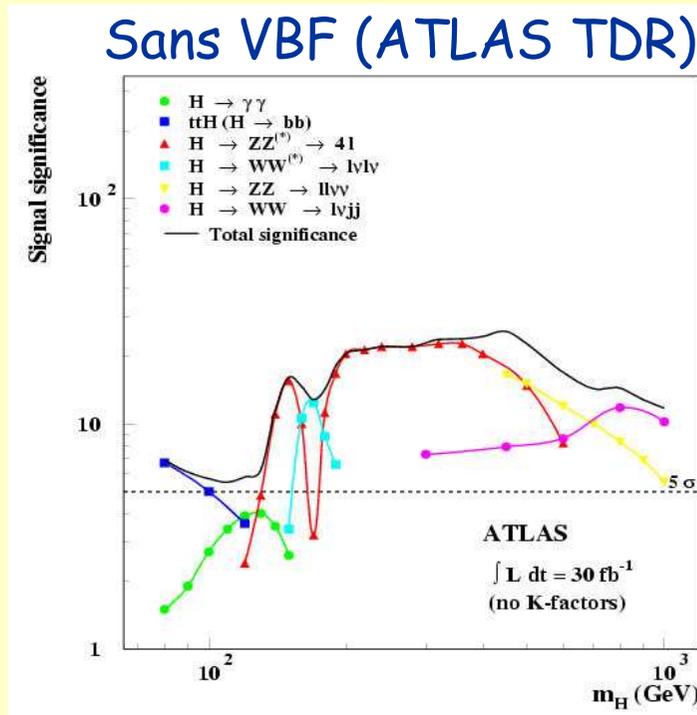
Quelques exemples (3)

o WW $H; H$ $\tau\tau$:



Vue d'ensemble MS

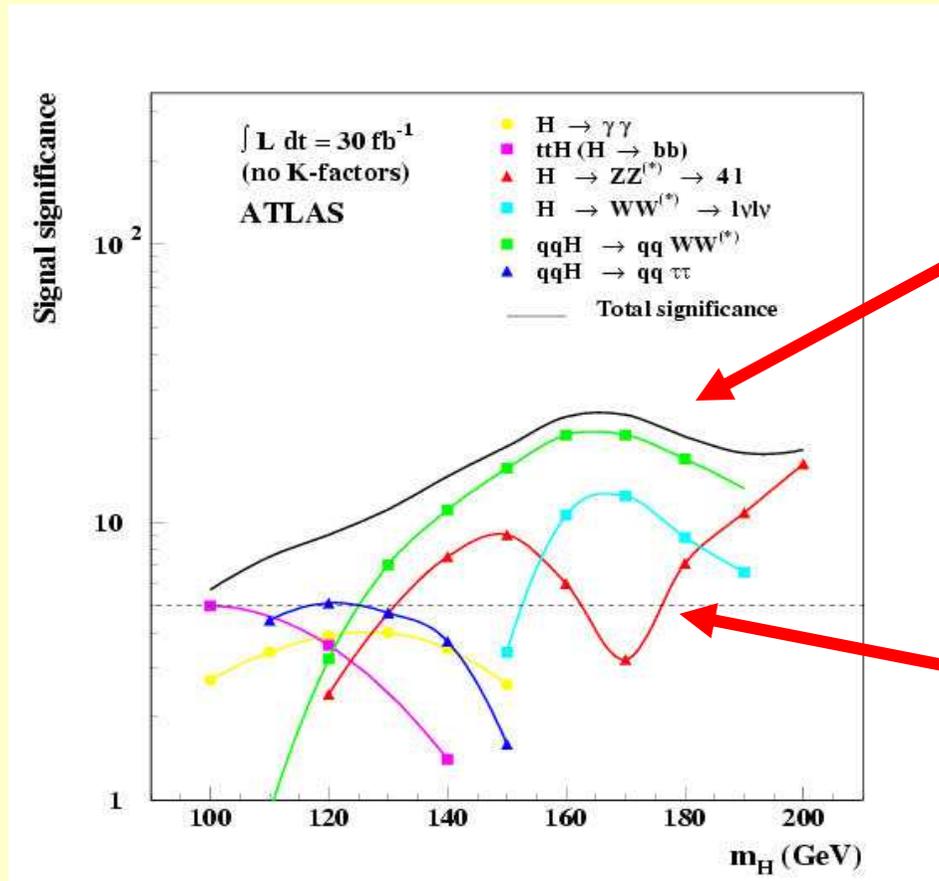
- o Sensibilité après combinaison des canaux disponibles



- o Souvent 2 canaux sensibles (à M_H donné)
- o A basse masse : pas de « canal de découverte » franc

Interprétation statistique (1)

- o Sensibilité et probabilité de découverte

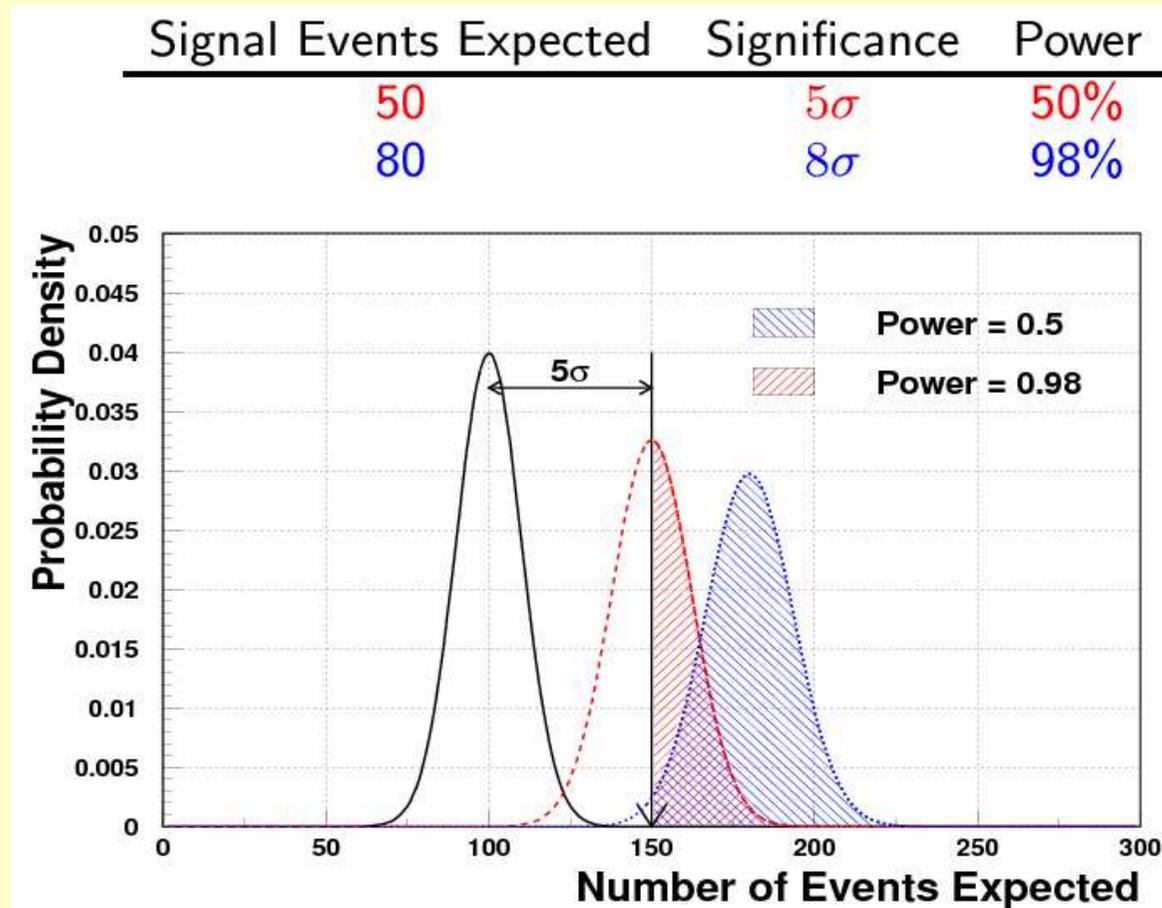


Quel intérêt de montrer une sensibilité à 25σ ?

Que signifie un croisement de la ligne des 5σ ?

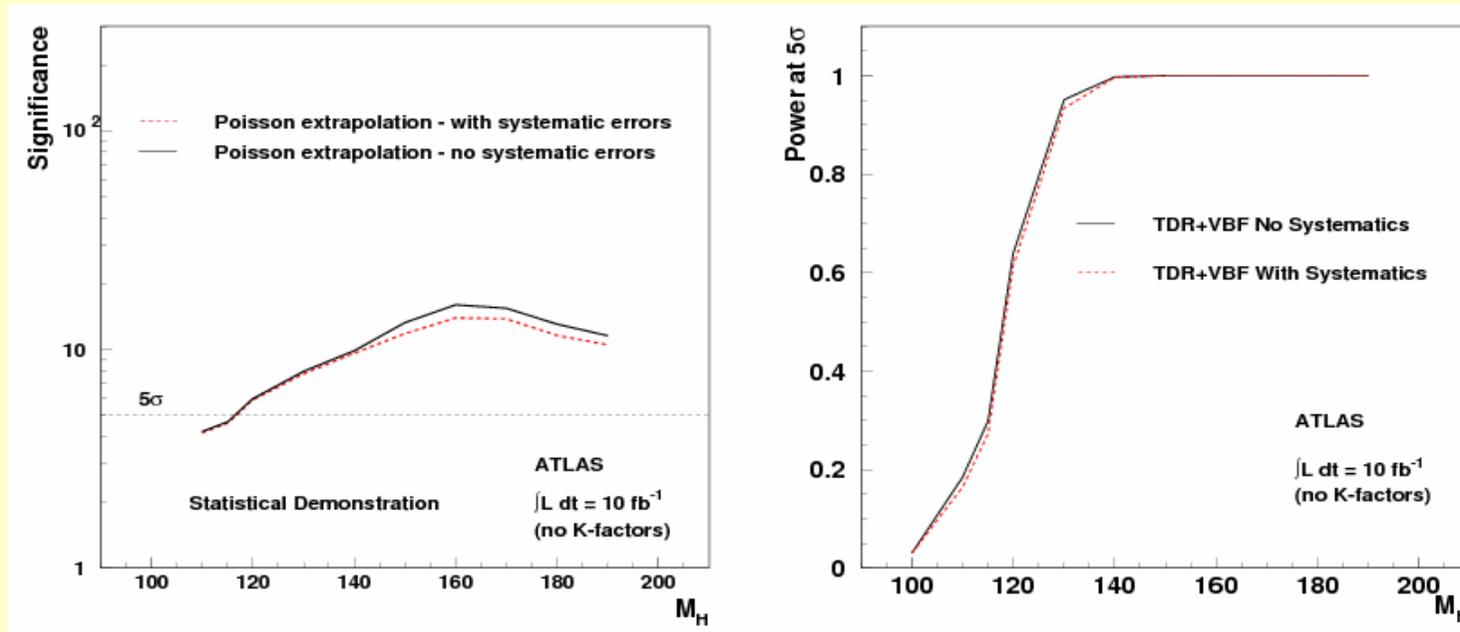
Interprétation statistique (2)

- o Sensibilité et probabilité de découverte



Interprétation statistique (3)

- o Sensibilité et probabilité de découverte

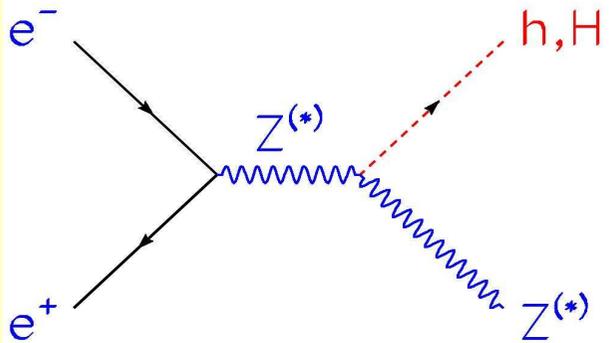


- o ~~$P(\text{découverte}|H) \gg 0$~~ pour $M_H < 130$ GeV
- o Les nouvelles particules peuvent mettre du temps à apparaître!

Le MSSM, LEP, Tevatron, LHC

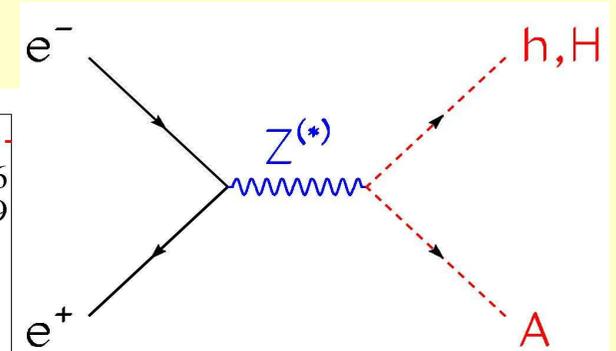
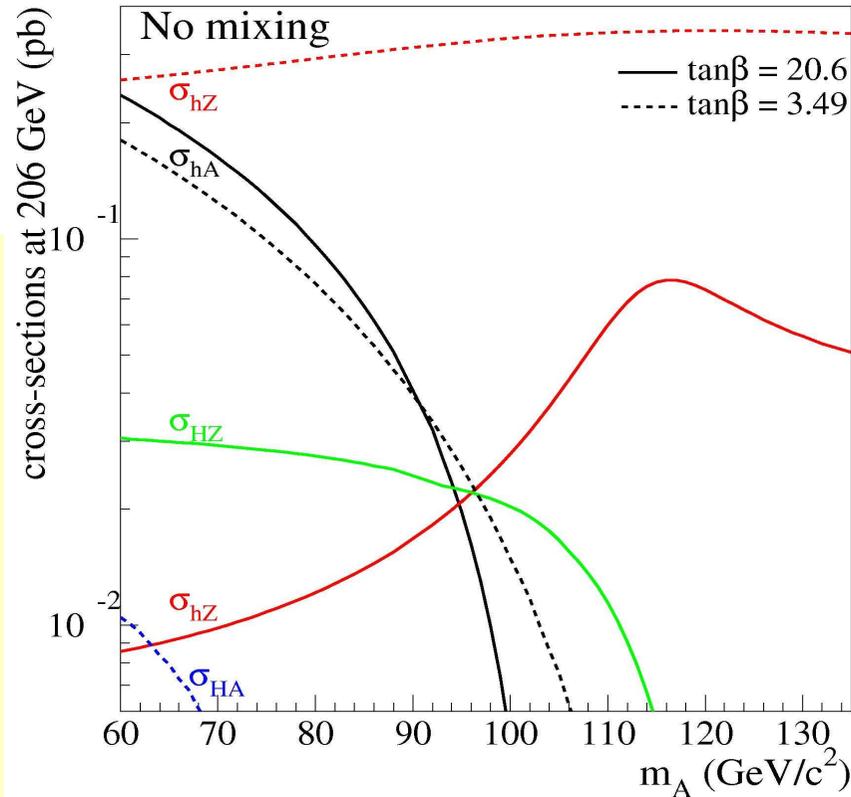
Scénarios MSSM avec CP conservée : LEP

3 Higgs bosons neutres: h, H, A états propres de CP
 au niveau des arbres, 2 paramètres : $\tan\beta, m_A$



hZ : bas $\tan\beta$
 grands $\tan\beta$ & m_A

HZ : grand $\tan\beta$ &
 bas m_A



hA : interm./grand
 $\tan\beta$ & bas m_A

désintégrations: invisible, $\gamma\gamma$, ee , $\mu\mu$, $\pi\pi$, KK , cc , $\tau\tau$, bb , AA , hadrons

Les paramètres du MSSM aux ordres supérieurs

m_{top} et les paramètres de brisure de SUSY, supposés unifiés à une certaine échelle :

SU(2), U(1) termes de masse gauginos: unifiés at $M_{\text{GUT}} \rightarrow M_2$ à M_{EW}

termes de masse sfermions : unifiés à $M_{\text{EW}} \rightarrow M_{\text{susy}}$ à M_{EW}

couplages trilineaires squarks : unifiés à $M_{\text{EW}} \rightarrow A$ à M_{EW}

\Rightarrow paramètre de mélange dans le secteur des squarks $\rightarrow X = A - \mu \cot\beta$

masse du gluino et paramètre de mélange de Higgs $\rightarrow M_{\tilde{g}}$ and μ

Total: 8 paramètres

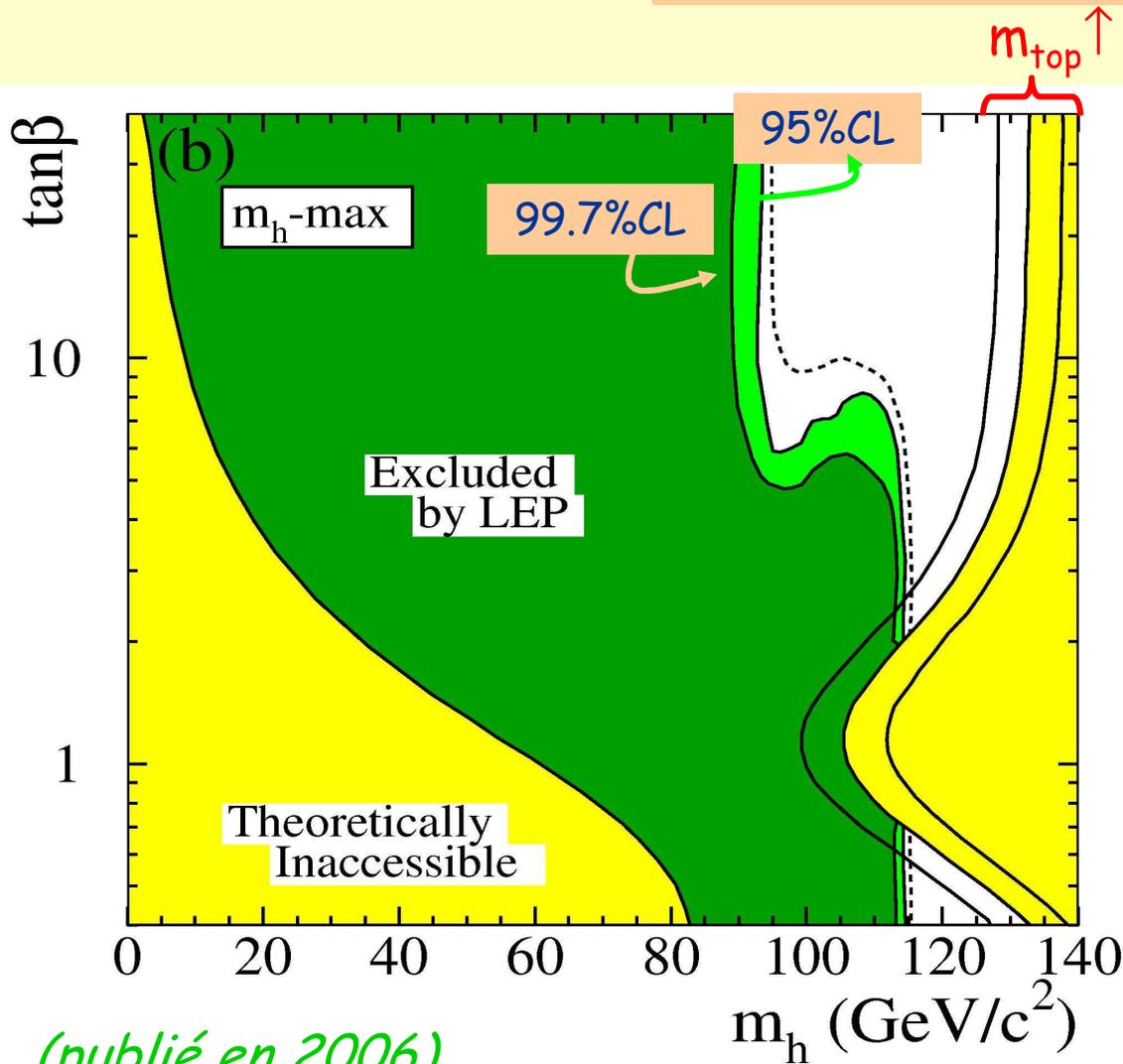
m_{top} est mesuré ; $M_2, M_{\text{susy}}, M_{\tilde{g}}, \mu$ et X définissent un "scénario"; $\tan\beta$ et m_A sont libres ($\tan\beta \in [0.4, 50]$ and $m_A \in [0.02, 1000]$ GeV).

NB: corrections radiatives dans l'approche des diagrammes de Feynman (la plus complète à deux boucles)

Les scénarios : 3 LEP / 5 LHC

- o **m_h^{\max}** : sparticules à haute masse ($M_2, M_{\text{susy}}, M_{\tilde{g}}$ grands), μ et X maximisent l'intervalle en m_h ($m_{\text{top}}=174.3 \text{ GeV}$: $m_h < 132.9 \text{ GeV}$).
variantes LHC : 1) $\mu \rightarrow -\mu$, 2) $\mu \rightarrow -\mu$ & $X \rightarrow -X$
- o **No mixing**: contrepartie de m_h^{\max} avec $X=0$; intervalle en m_h réduit ($m_{\text{top}}=174.3 \text{ GeV}$: $m_h < 115.5 \text{ GeV}$).
variante LHC : 1) $\mu \rightarrow -\mu$, $M_{\text{susy}} \rightarrow 2 M_{\text{susy}}$
- o **Large μ** : au moins un Higgs (h, A or H) cinématiquement accessible ($m_{\text{top}}=174.3 \text{ GeV}$: $m_h < 108.0 \text{ GeV}$) mais $\text{Br}(bb, \tau\tau)=0$ à grand $\tan\beta$.
- o **Gluophobic scenario**: $gg \rightarrow h$ (fortement) supprimé $\forall \tan\beta, m_A$.
- o **Small α_{eff}** : $\text{Br}_h(bb, \tau\tau)$ supprimé à grand $\tan\beta$ et m_A modéré.

Les scénario(s) m_h^{\max}



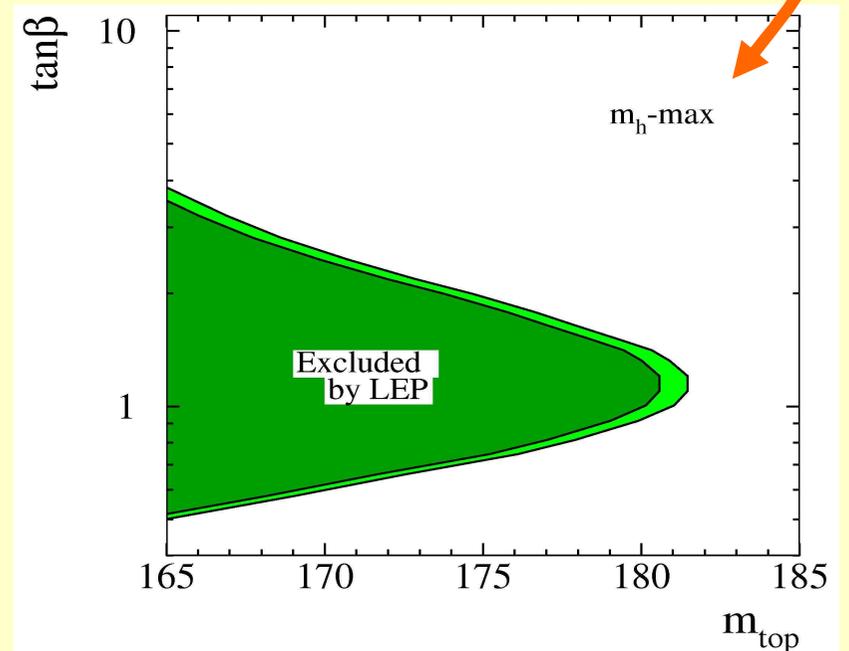
$m_{\text{top}} = 174.3$ GeV, limites 95% CL:

$m_h > 92.8$ GeV, $m_A > 93.4$ GeV

ne varient pas avec m_{top}

exclusion en $\tan\beta$: 0.7 - 2.0

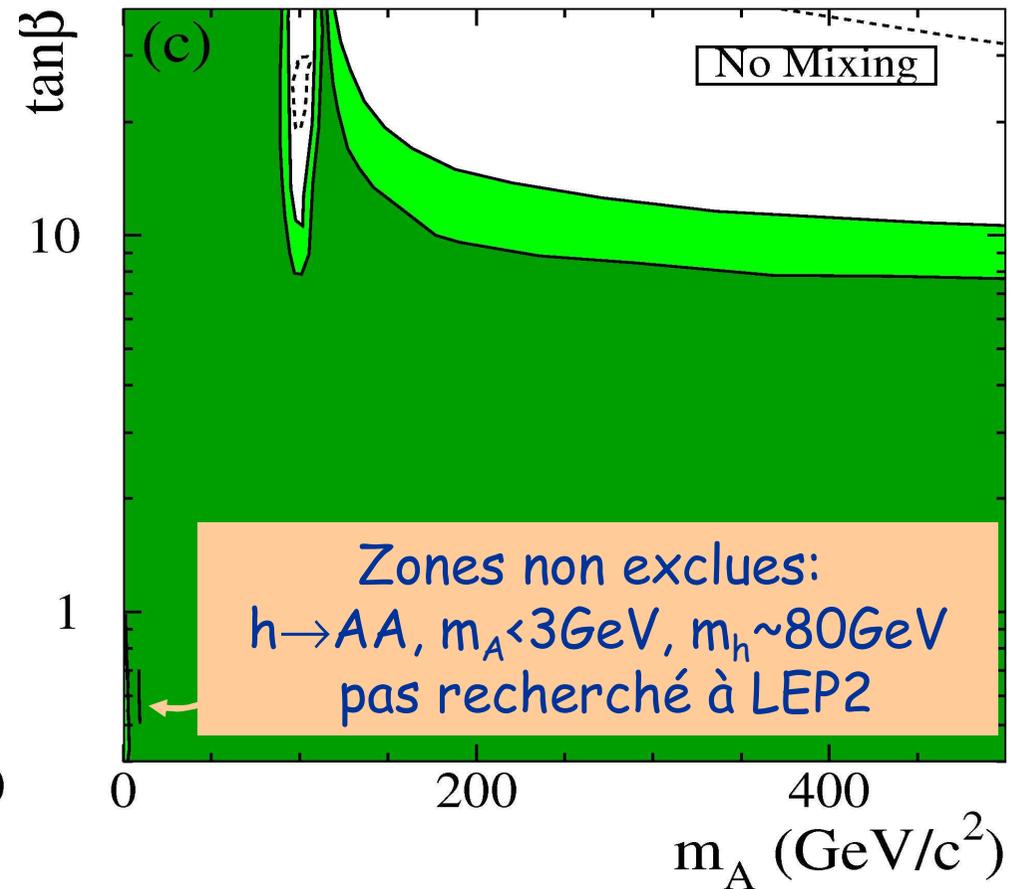
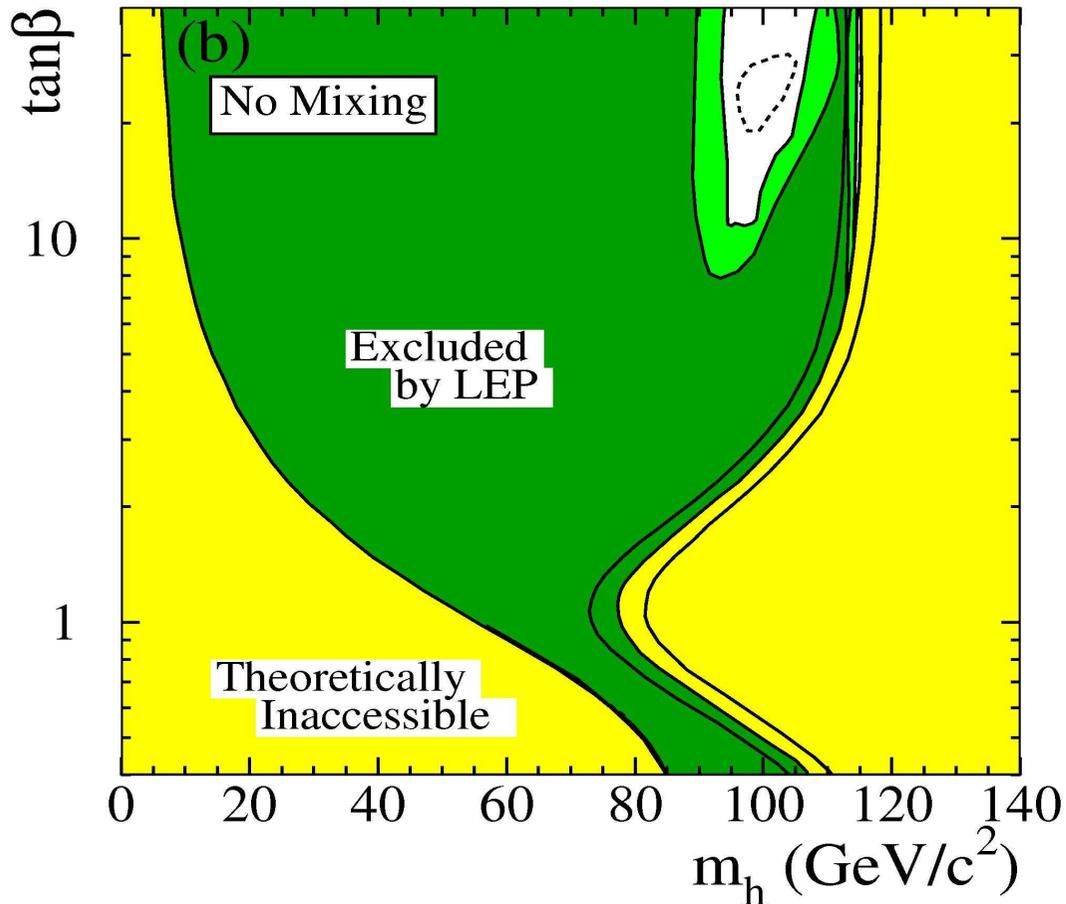
varie avec m_{top}



(publié en 2006)

variantes LHC : limites en masse ~identiques, exclusion en $\tan\beta$ plus forte

Les scénario(s) no mixing



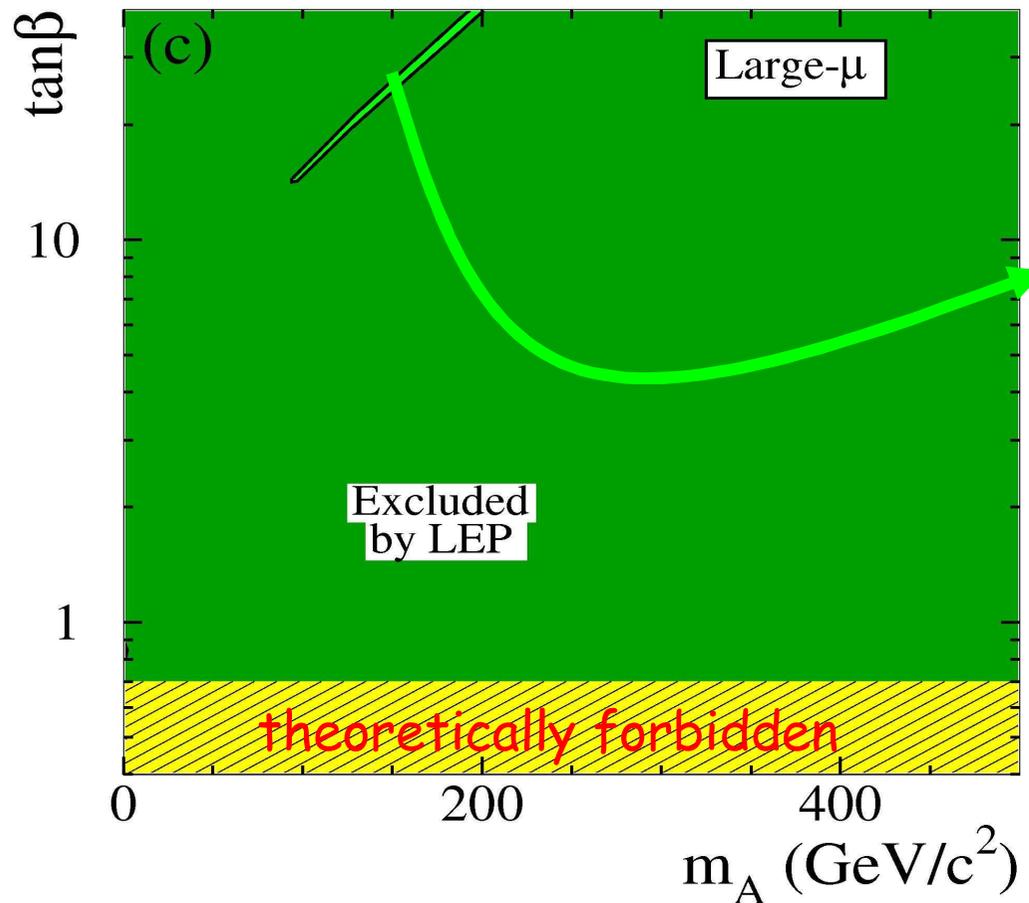
$m_{\text{top}} = 174.3 \text{ GeV}$, limites 95% CL :

$m_h, m_A > 93.6 \text{ GeV}$ ($\tan\beta > 0.7$) exclusion en $\tan\beta$: 0.4 - 10.2 ($m_A > 3 \text{ GeV}$)

variation forte avec m_{top} : scénario totalement exclu à $m_{\text{top}} = 169.3 \text{ GeV}$ (H accessible)

variante LHC : contraintes en masse et $\tan\beta$ moins fortes

Le scénario large μ



exclu à 95% CL, pas à 99.7% CL:

- o hZ seul processus possible
- o BR($h \rightarrow bb$) supprimé
- o $m_h \sim 108 \text{ GeV}$ limite de sensibilité des recherches dans l'état final hadronique indépendantes de la saveur

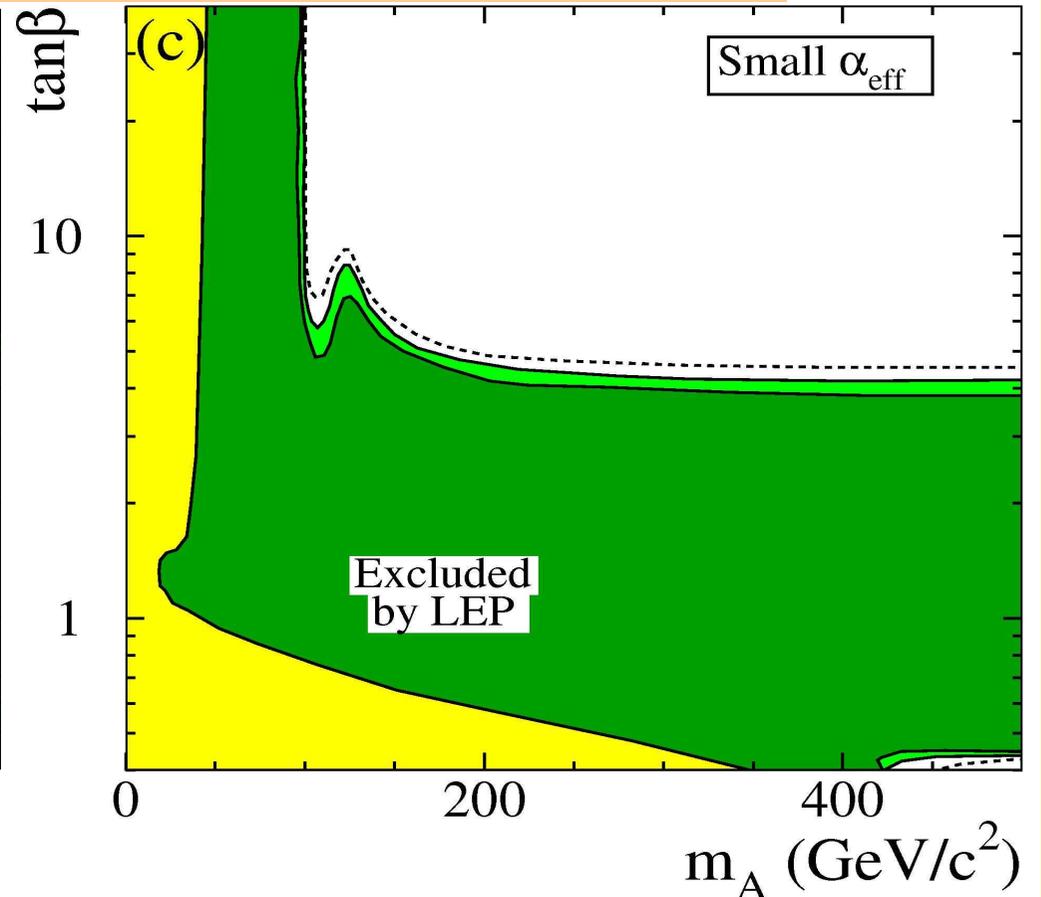
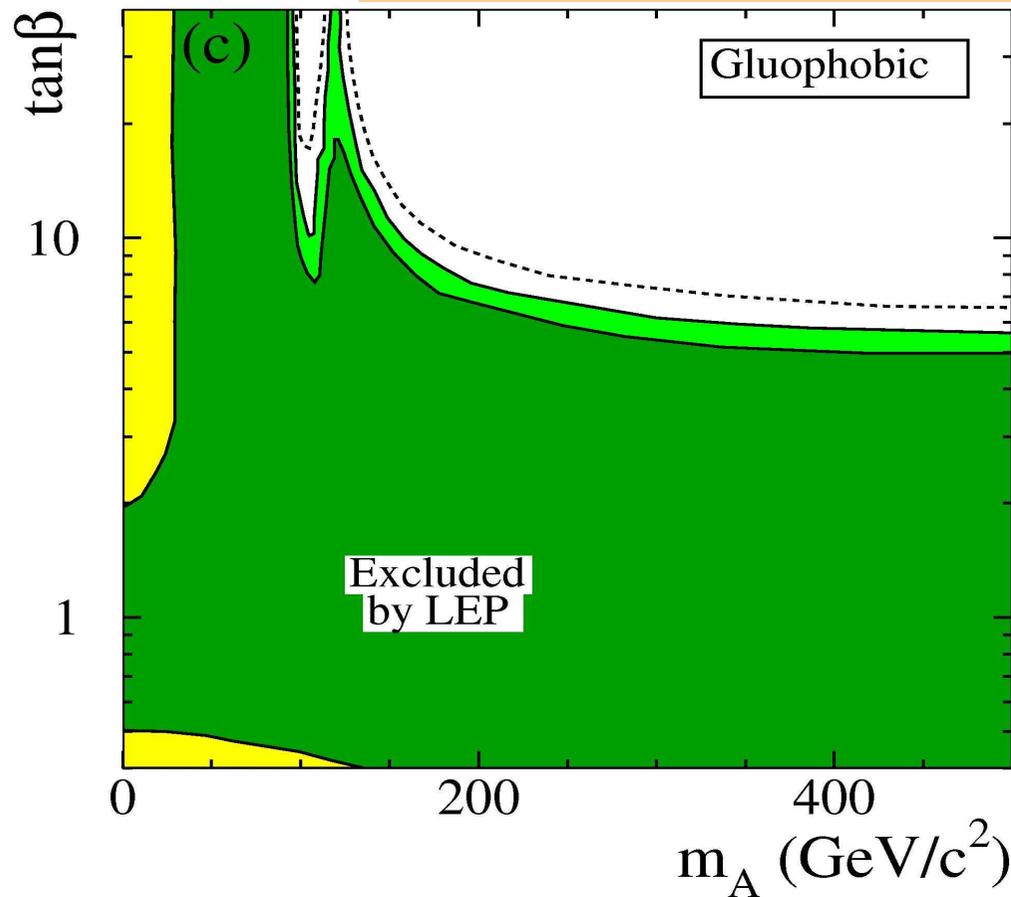
La zone non exclue croît avec m_{top}

m_{top} inférieur ou égal à 174.3 GeV:

scénario **entièrement exclu à 95%CL**

grâce à: recherches du H et analyses indépendantes de la saveur

Les scénarios gluophobic et petit α



$m_{\text{top}} = 174.3 \text{ GeV}$, limites 95% CL :

$m_h > 90.5 \text{ GeV}$, $m_A > 96.3 \text{ GeV}$

exclusion en $\tan\beta$: 0.4 - 5.4

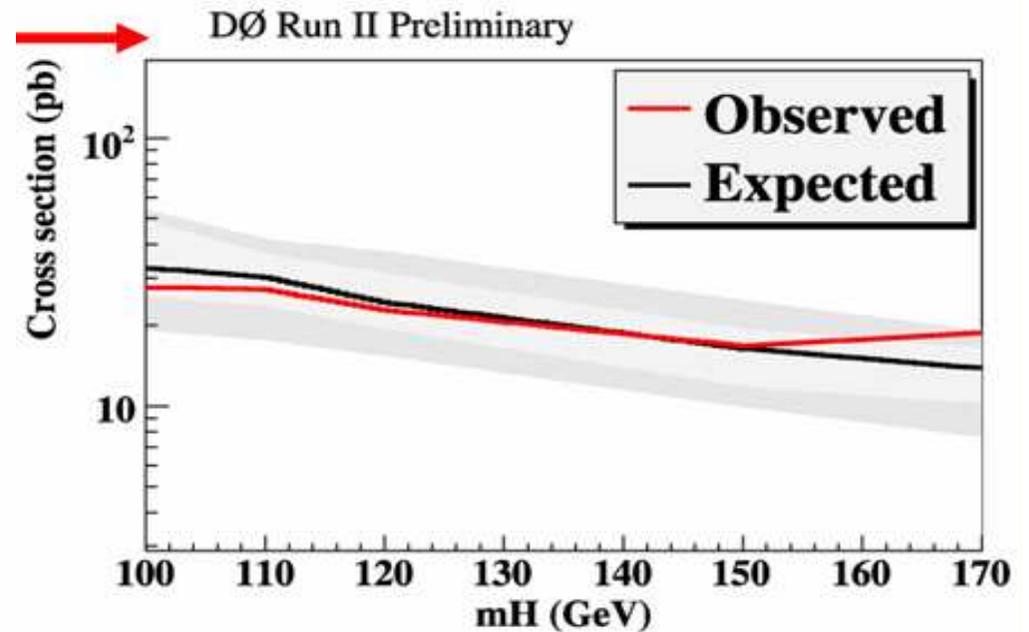
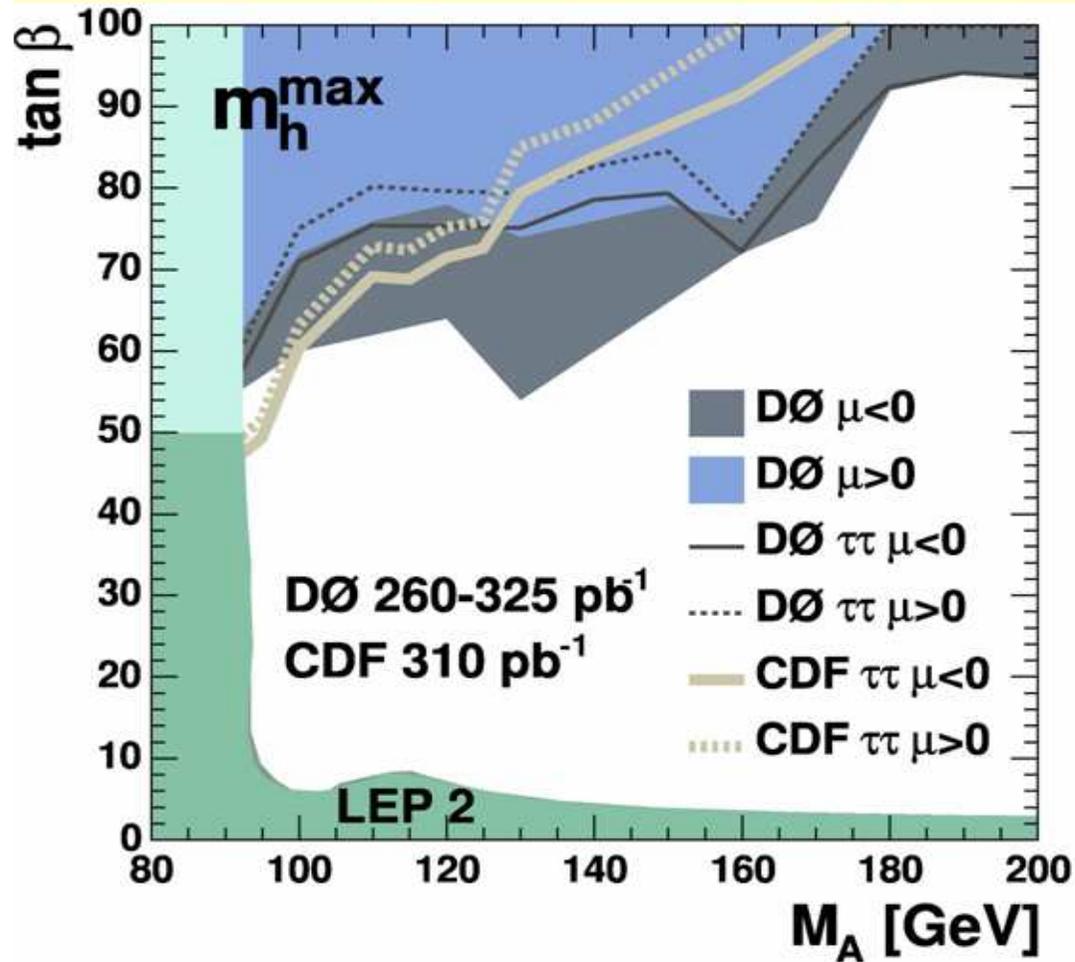
$m_h > 87.3 \text{ GeV}$, $m_A > 98.8 \text{ GeV}$

exclusion en $\tan\beta$: 0.4 - 4.2

varient modérément avec m_{top}

NB: h, A non dégénérés en masse à grand $\tan\beta$

Scénarios MSSM avec CP conservée : le Tevatron



$bb(H \rightarrow bb)$

Mis à jour : 900 pb^{-1}

À répercuter dans $(M_A, \tan\beta)$

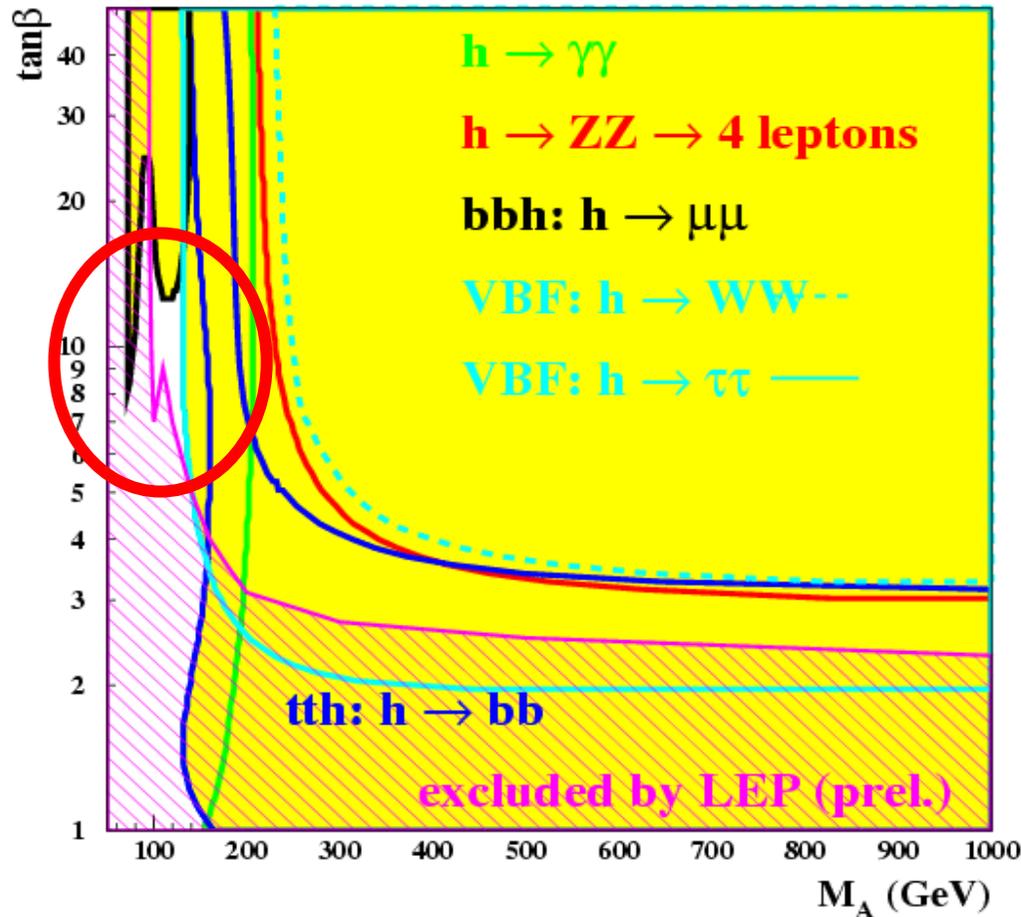
$bb(H \rightarrow bb) + gg \rightarrow H \rightarrow \tau\tau$

Scénarios MSSM avec CP conservée : LHC

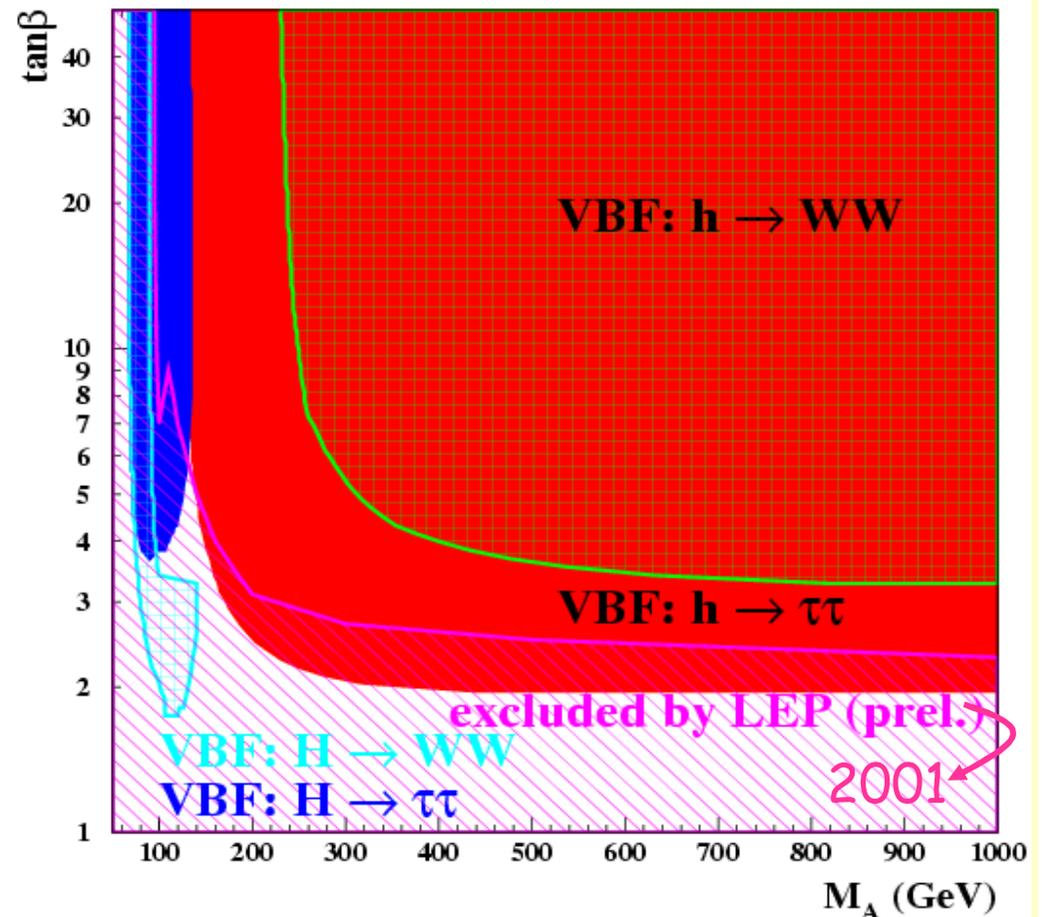
Higgs le plus léger, h

+ canaux VBF pour le H

MHMAX scenario



MHMAX scenario



NB: VBF: 30fb^{-1} , autres: 300fb^{-1}

⇒ couverture ~complète

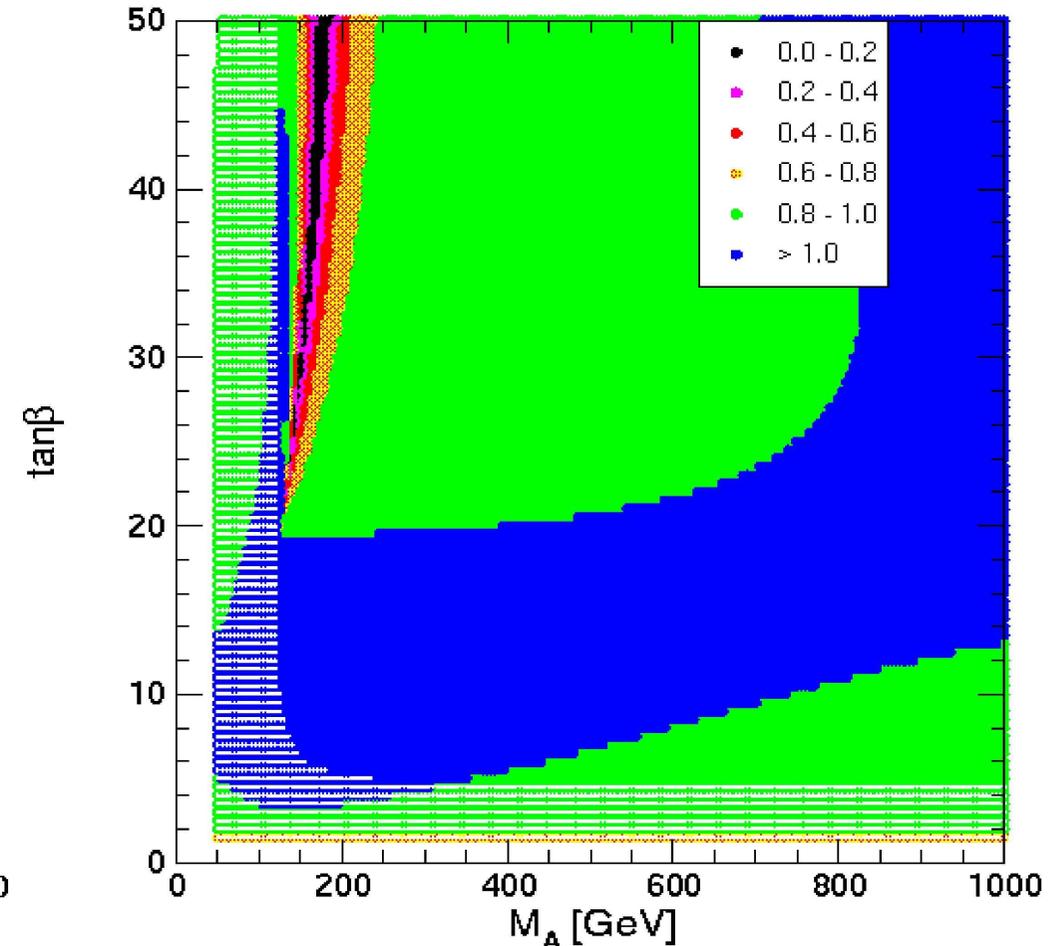
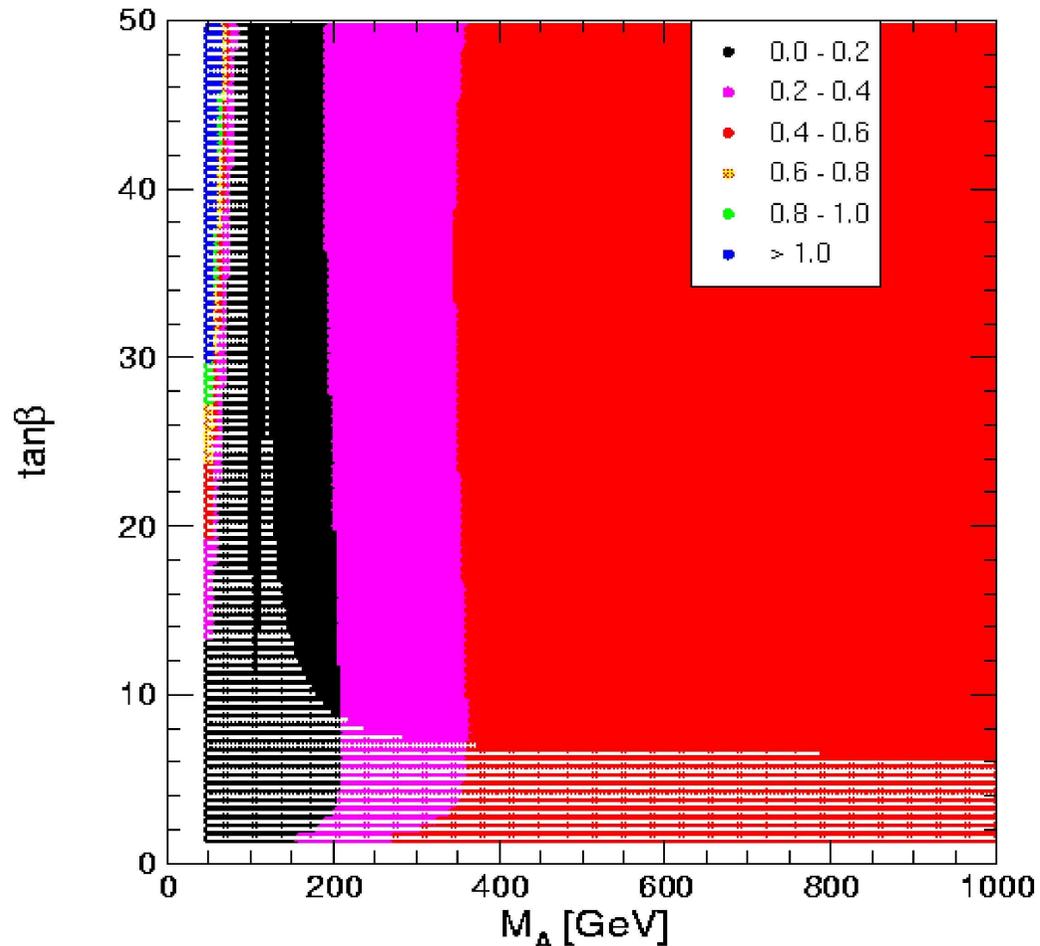
Prédictions théoriques au LHC: $\sigma \text{ Br(MSSM)}/\sigma \text{ Br(MS)}$

gluophobic sc.

small α

$\sigma(gg \rightarrow h) \times \text{BR}(h \rightarrow \gamma\gamma)$

$\sigma(WWh) \times \text{BR}(h \rightarrow bb)$

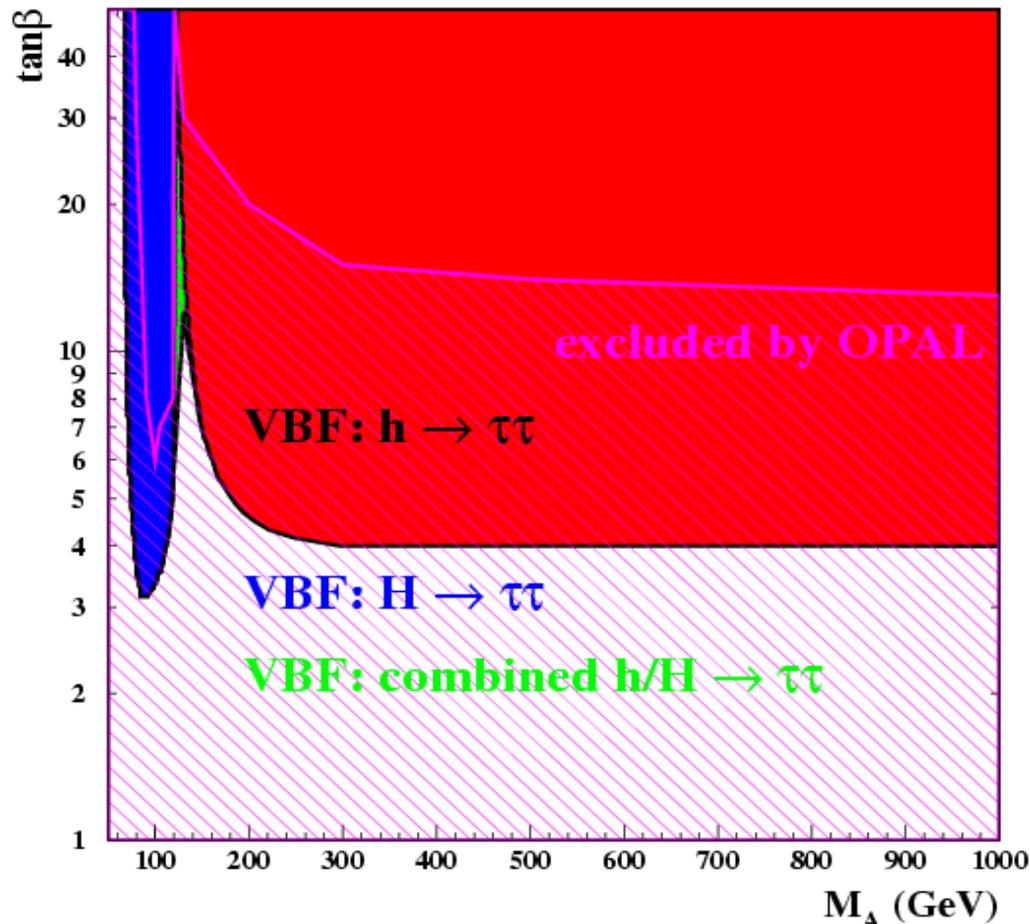


\Rightarrow canal $gg \rightarrow h \rightarrow \gamma\gamma$ fortement supprimé,
mais $tt(h \rightarrow bb)$ et fusion WW renforcés

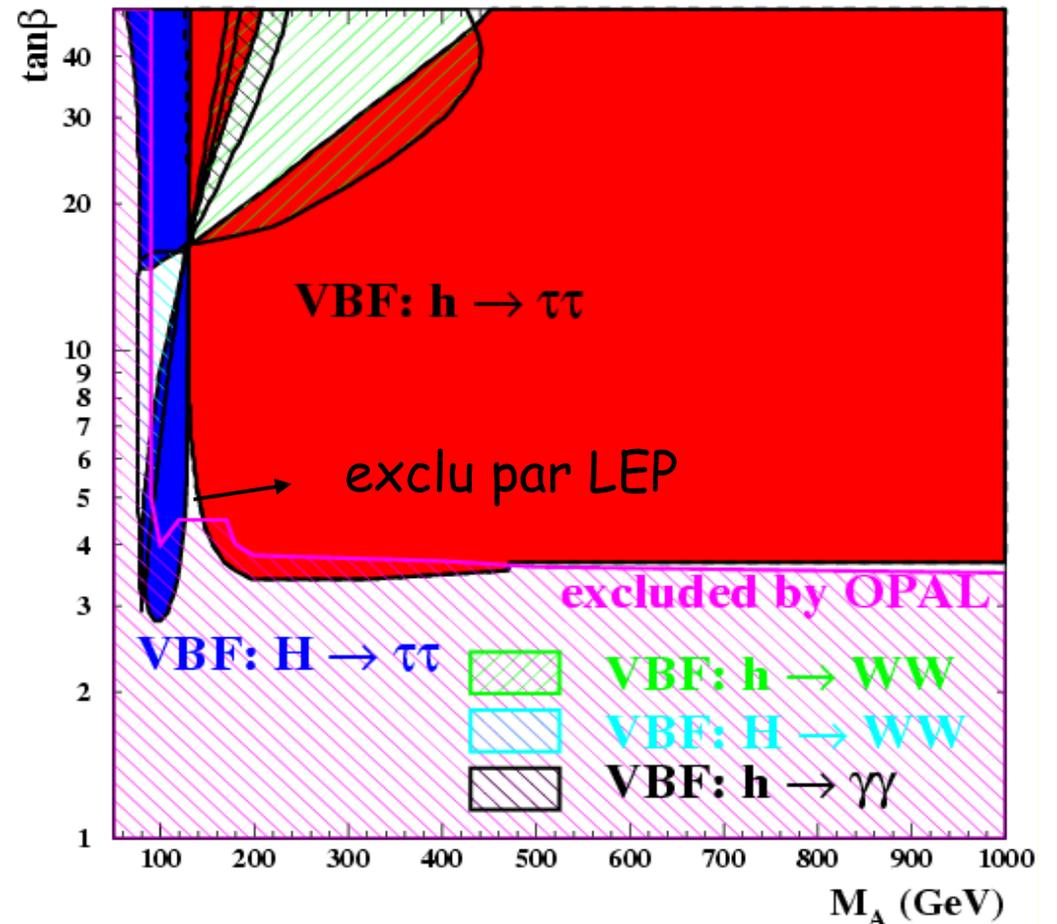
\Rightarrow canal $WW(h \rightarrow bb, \tau\tau)$ supprimés,
mais $h \rightarrow \gamma\gamma$ similaire au MS

Les scénarios gluophobique et petit α

Gluophobic scenario



Small α scenario

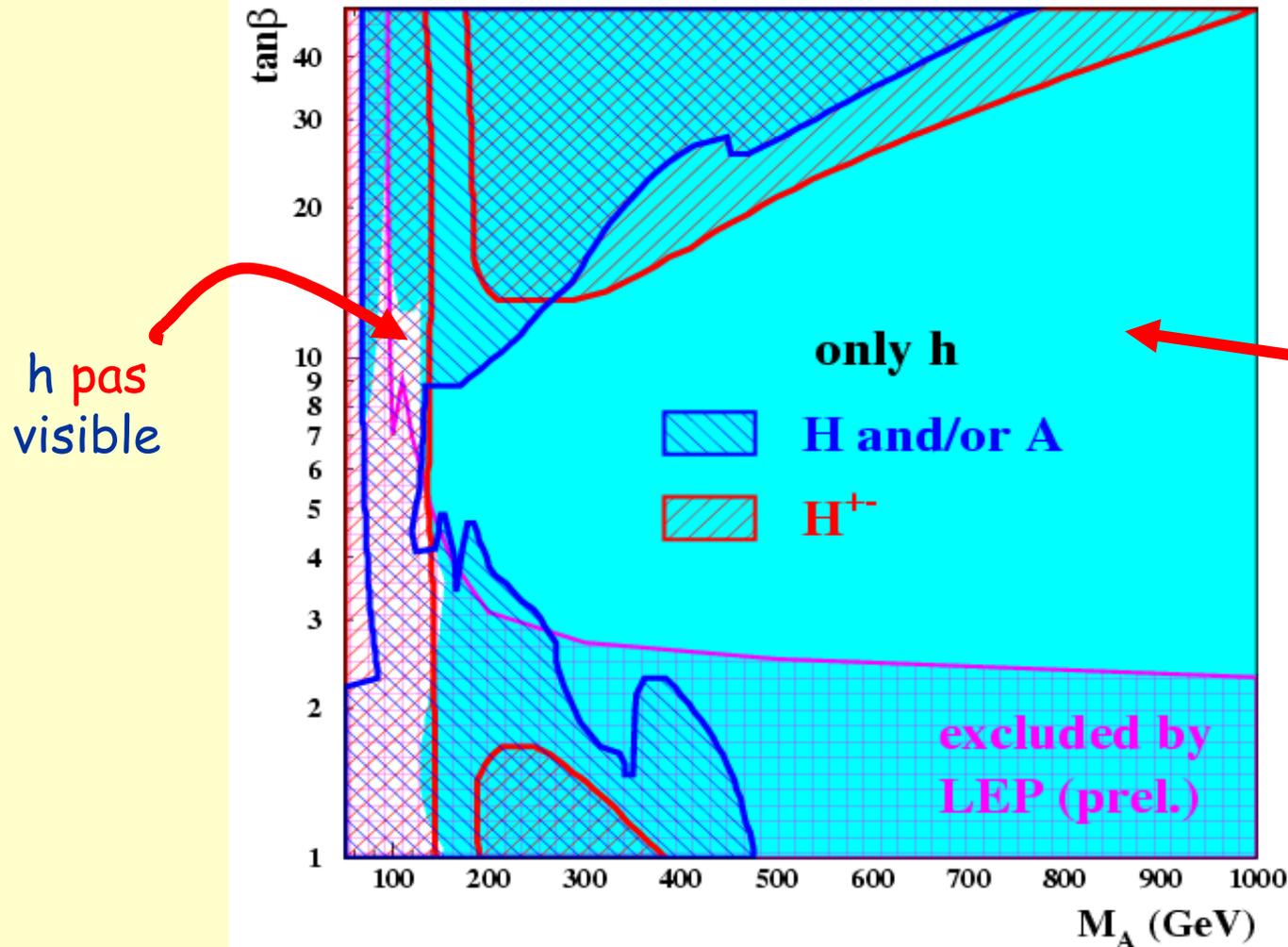


⇒ excellente couverture de l'espace des paramètres grâce à la **redondance** des canaux : **au moins un** boson de Higgs visible en **~tout point** (valable dans tous les scénarios CP conservée)

Combien de bosons de Higgs visibles ?

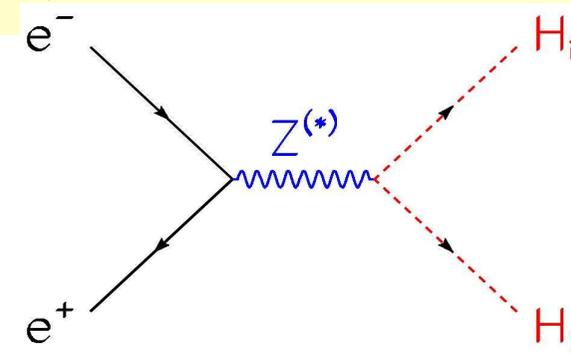
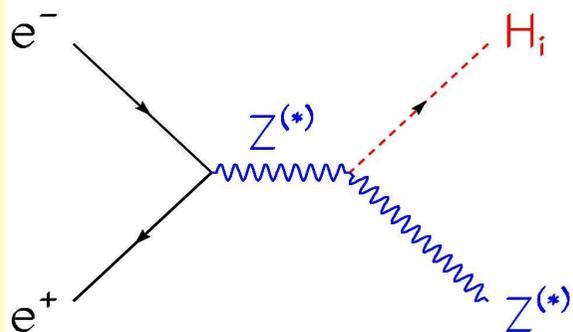
300fb⁻¹, sauf VBF: 30fb⁻¹

MHMAX scenario



Scénarios MSSM avec CP brisée: LEP

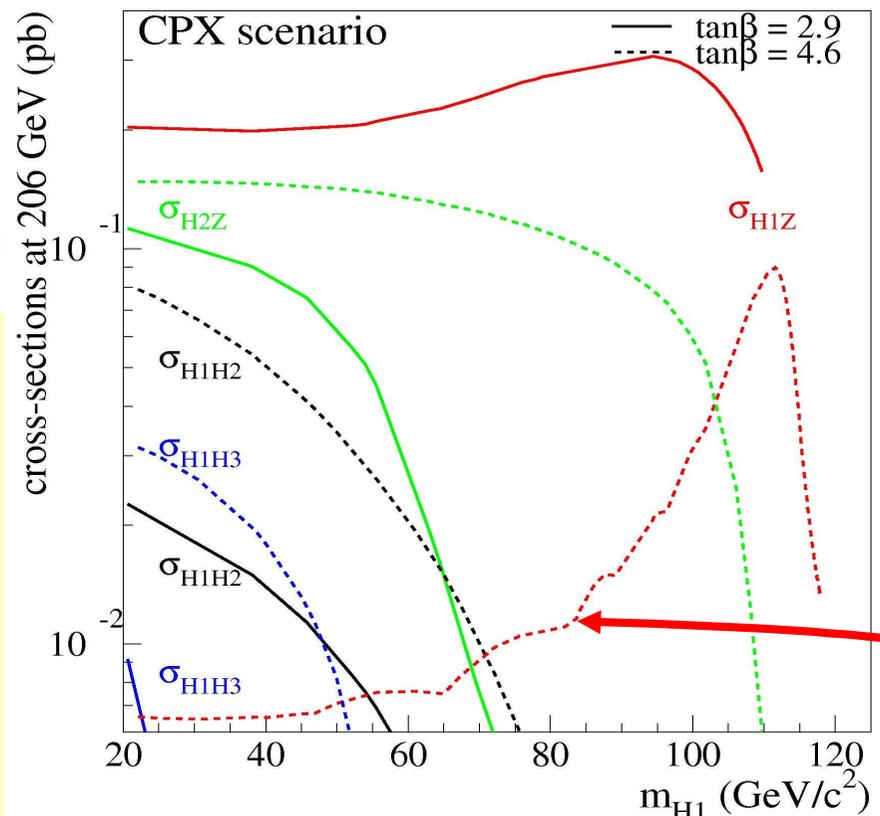
3 bosons neutres : H_1, H_2, H_3 mélanges d'états propres de CP
aux arbres, 2 paramètres : $\tan\beta, m_{H^\pm}$



$H_1 Z$: bas $\tan\beta$,
grands $\tan\beta$ & m_{H1}

$H_2 Z$: bas/interm.
 $\tan\beta$ & bas m_{H1}

$H_1 H_2$: interm./grand
 $\tan\beta$ & bas m_{H1}



par rapport au cas CPC:

A priori, plus de processus, mais certains couplages ZZH_i sont supprimés
Désintégrations similaires, mais $H_j \rightarrow H_i H_i$ est renforcée

Les paramètres du MSSM aux ordres supérieurs

- o Les 8 paramètres **usuels** du MSSM :
 - au niveau des arbres : $\tan\beta$, m_{H^\pm}
 - liés aux corrections radiatives : m_{top} et les paramètres de brisure de SUSY : M_2 , M_{susy} , $M_{\tilde{g}}$, μ et $A_{t,b}$
- o Paramètres **additionnels pour CPV** :
 - deux phases CPV: $\arg(A_{t,b})$ et $\arg(M_{\tilde{g}})$

o Effets CPV dominants en:

$$m_{\text{top}}^4 \frac{\text{Im}(\mu A_{t,b})}{(v_1^2 + v_2^2) 32\pi^2 M_{\text{susy}}^2}$$

⇒ bas M_{susy} , grand μ $|A_{t,b}|$ et $\arg(A_{t,b}) \sim 90^\circ$

⇒ le scénario CPX :

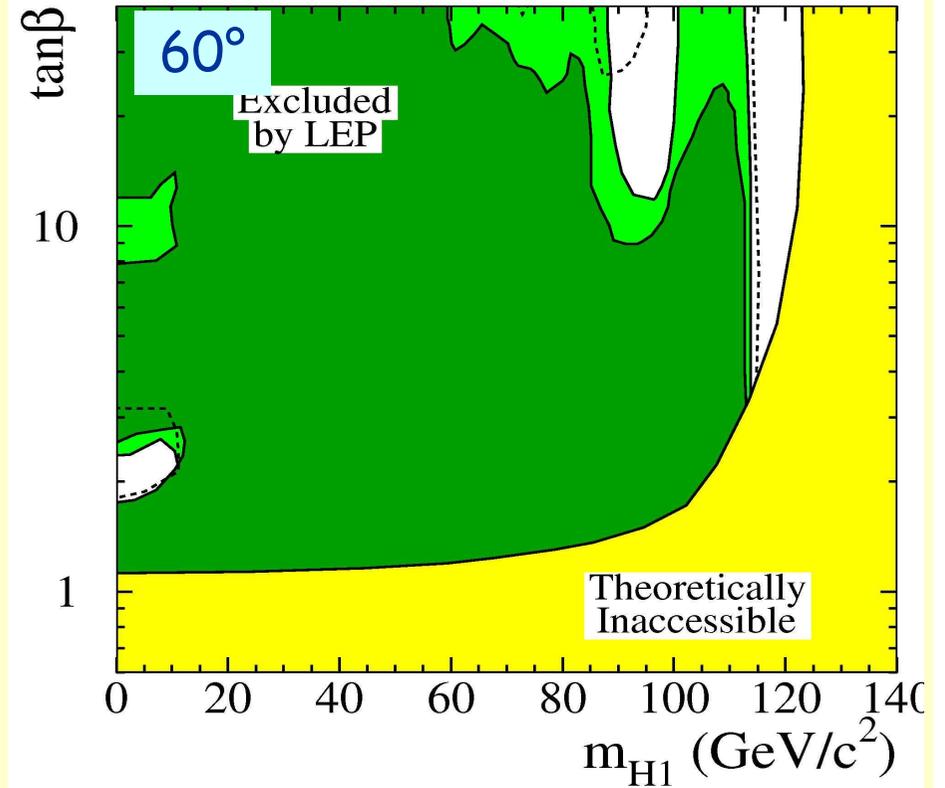
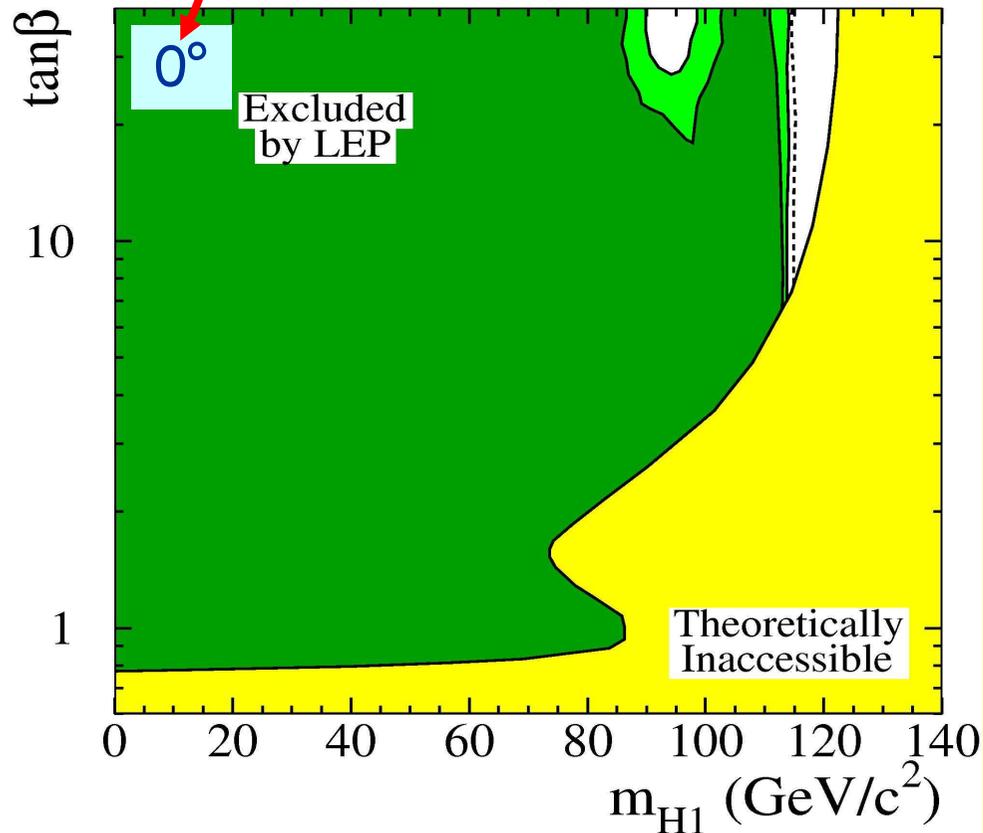
$$M_{\text{susy}} = 500 \text{ GeV}, \mu = 4M_{\text{susy}} = 2 \text{ TeV}, |A_{t,b}| = M_{\tilde{g}} = 2M_{\text{susy}} = 1 \text{ TeV}, M_2 = 200 \text{ GeV} \text{ et} \\ \arg(A_{t,b}) = \arg(M_{\tilde{g}}) = 90^\circ$$

+ 10 variantes pour étudier la dépendance en $\arg(A_{t,b})$, μ et M_{susy} .

NB: corrections radiatives dans les approches du **groupe de renormalisation** et des **diagrammes de Feynman** (actuellement au même niveau de développement)

Variations avec les phases de CPV

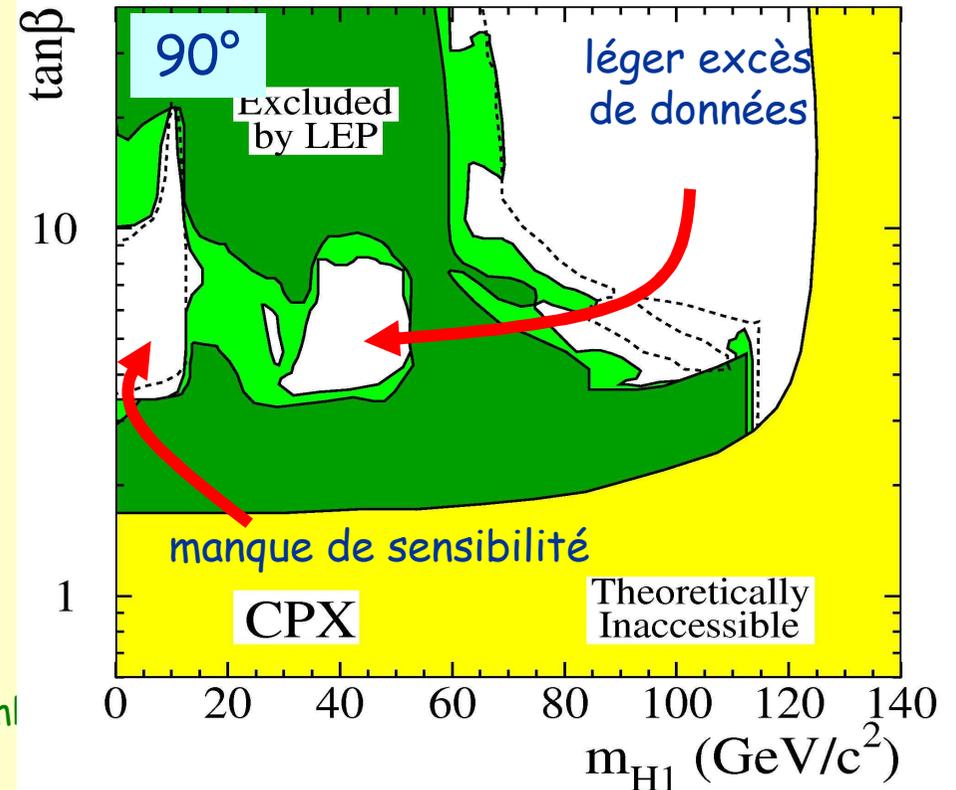
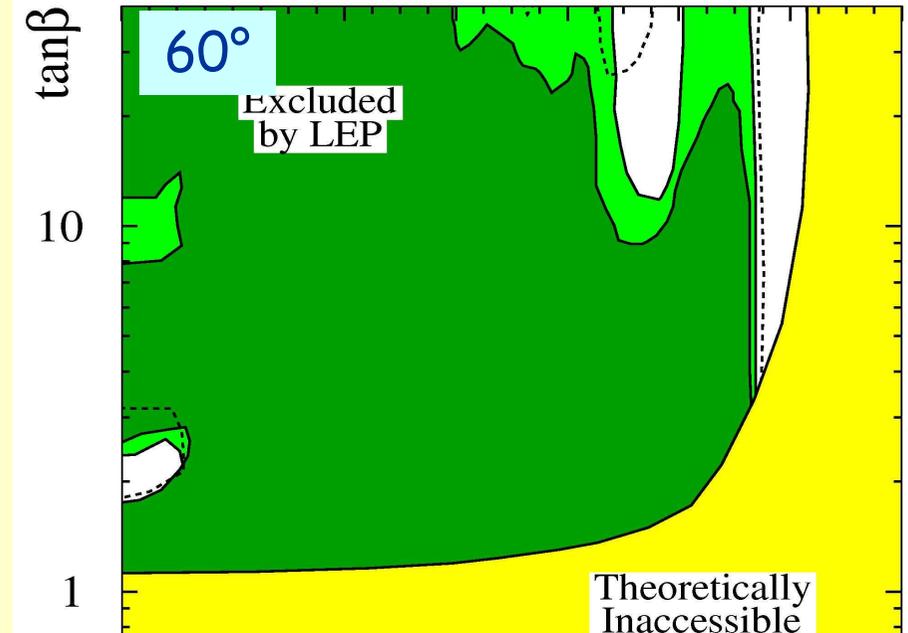
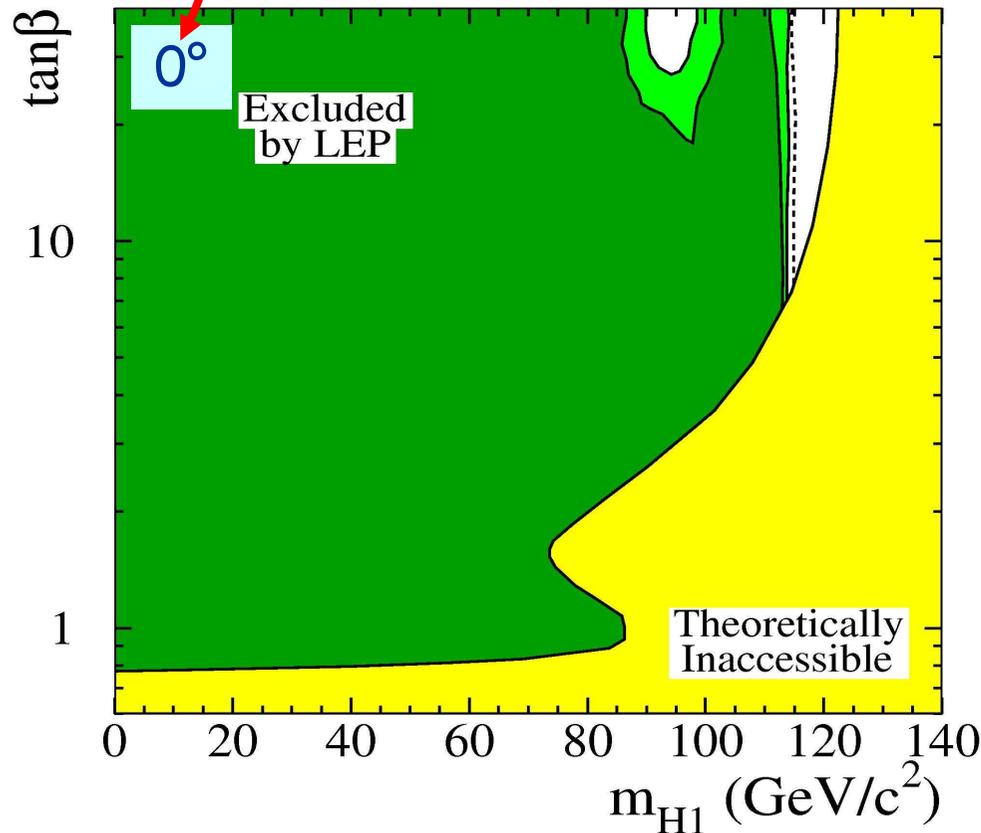
CPC !



Phases $\sim 90^\circ$: $H_1 Z$ supprimé, reste:
 grand $\tan\beta$: $H_1 H_2$
 $\tan\beta$ interm.: $(H_2 \rightarrow H_1 H_1) Z$

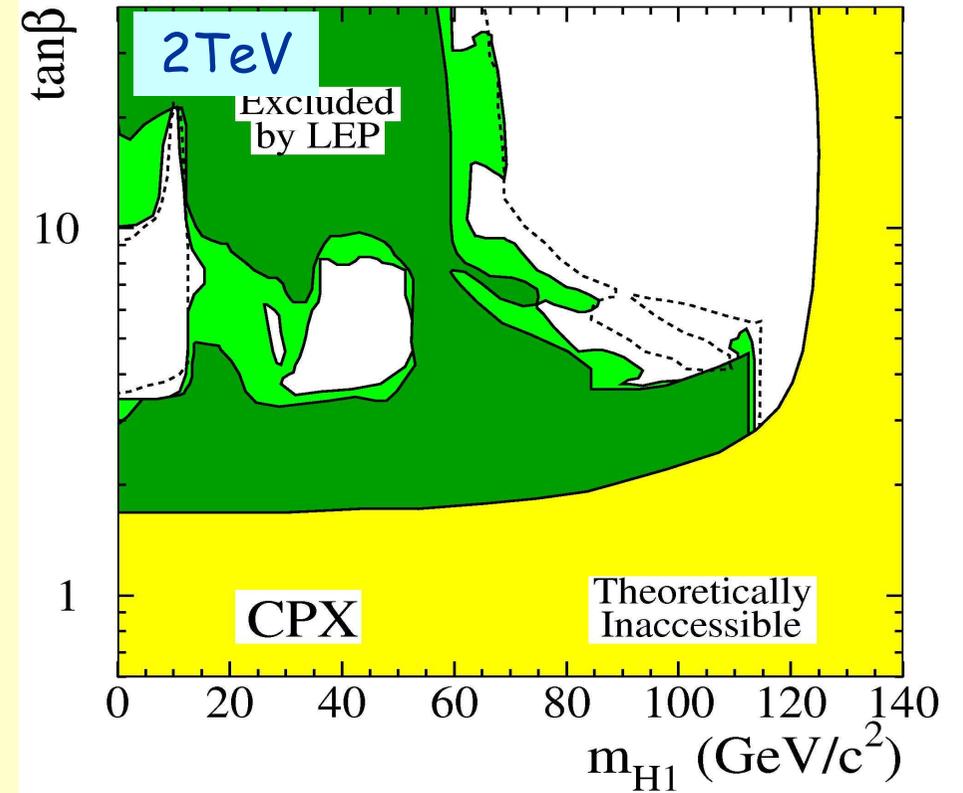
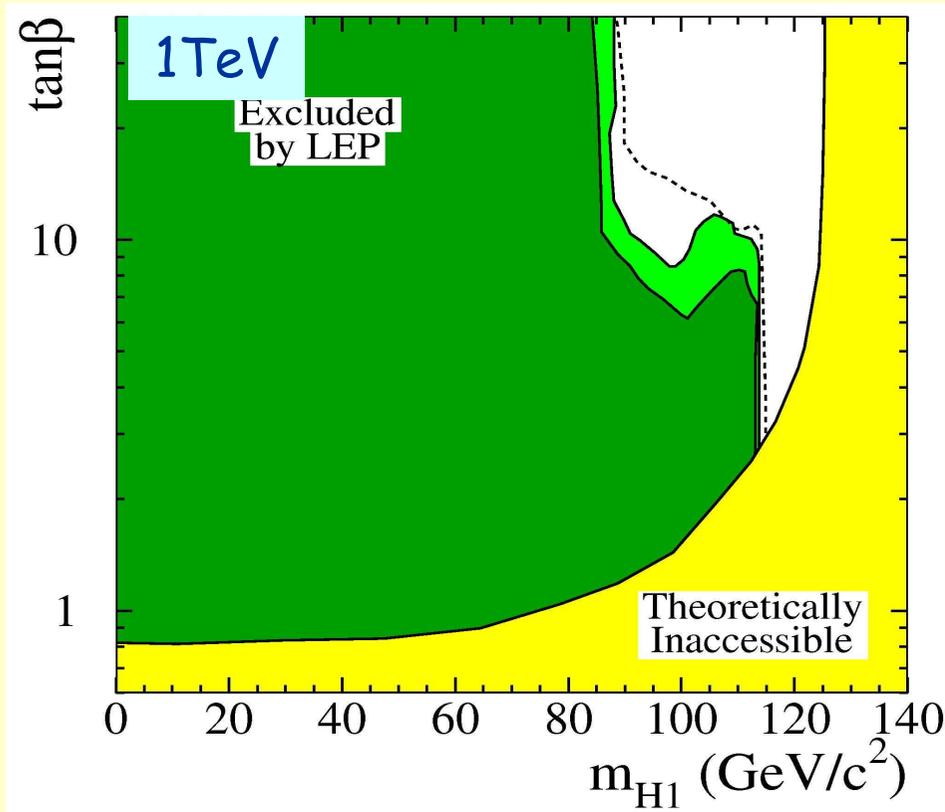
Variations avec les phases de CPV

CPC !



Phases $\sim 90^\circ$: $H_1 Z$ supprimé, reste:
 grand $\tan\beta$: $H_1 H_2$
 $\tan\beta$ interm.: $(H_2 \rightarrow H_1 H_1) Z$

Dépendance en μ



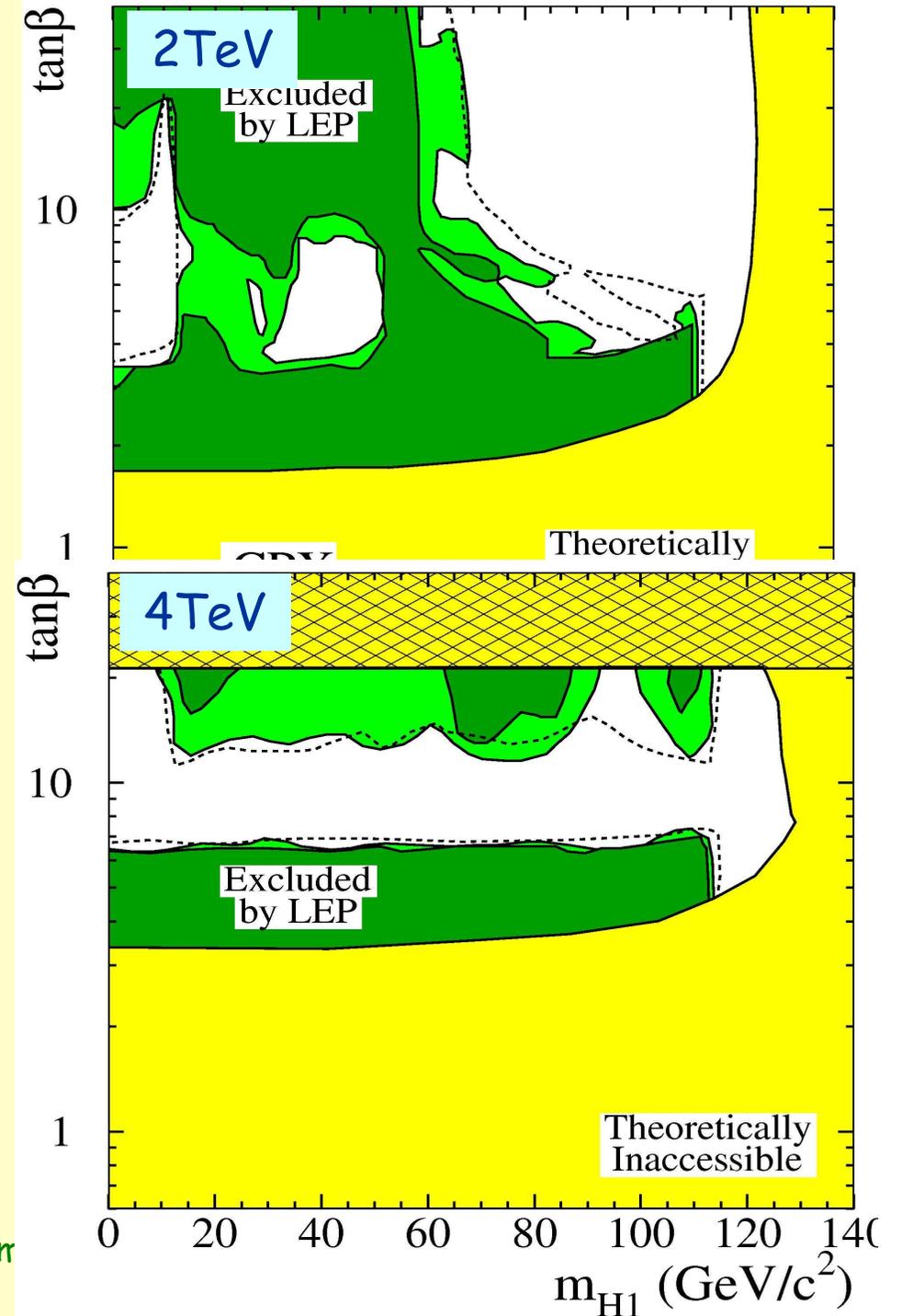
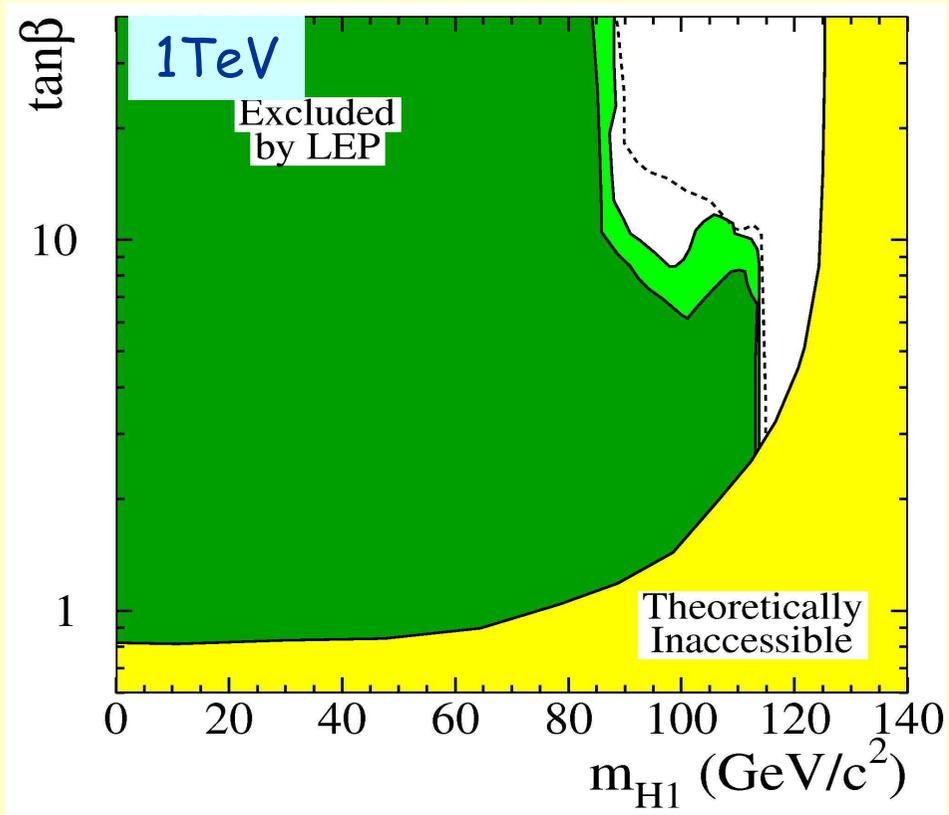
A $\tan\beta$ intermédiaire :

$\mu=1\text{TeV}$: deux processus

$\mu=2\text{TeV}$: un processus

$\mu=4\text{TeV}$: **aucun** processus

Dépendance en μ



A $\tan\beta$ intermédiaire :

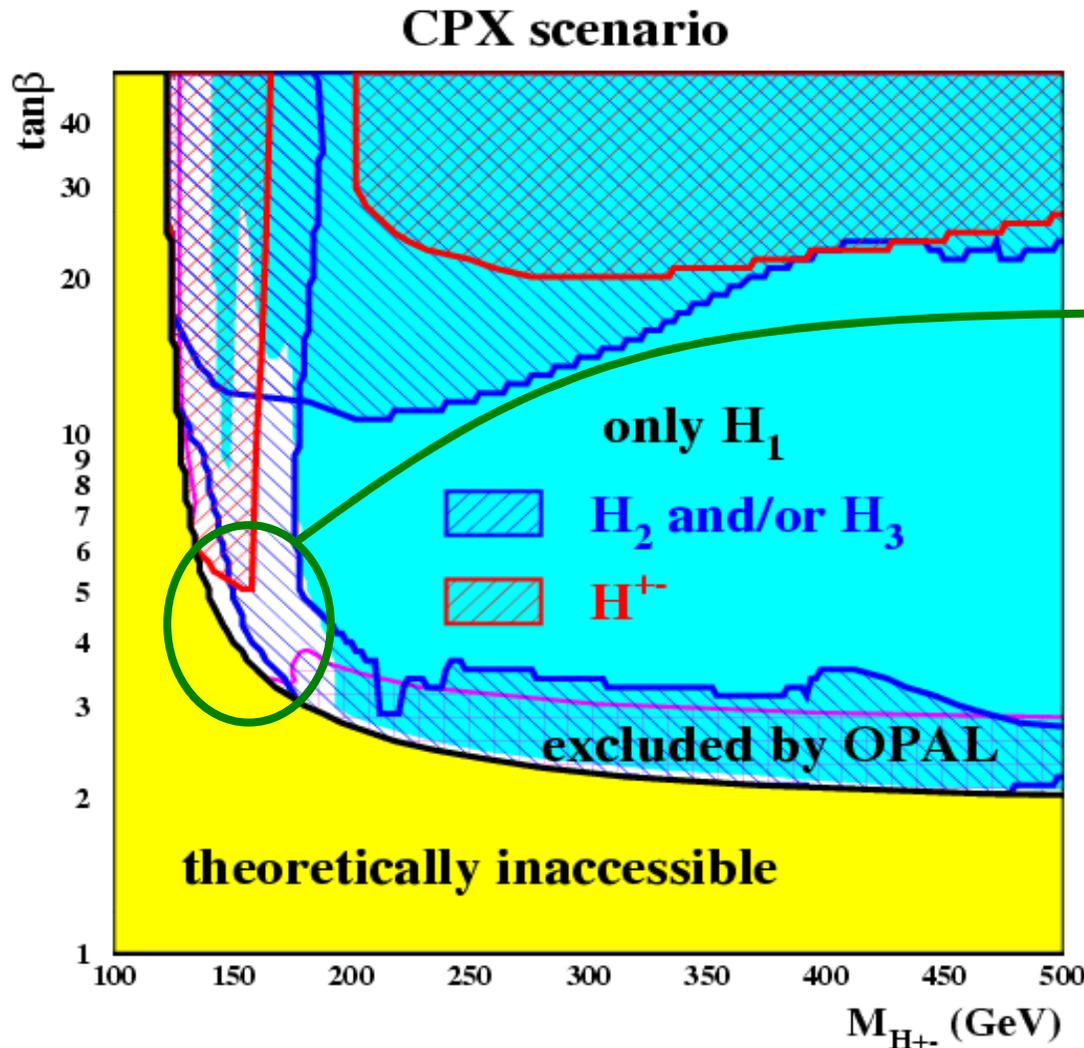
$\mu = 1\text{TeV}$: deux processus

$\mu = 2\text{TeV}$: un processus

$\mu = 4\text{TeV}$: **aucun** processus

Scénarios MSSM avec CP brisée: LHC

300fb⁻¹, sauf VBF: 30fb⁻¹



Zone non couverte:

$$M_{H_1} < 55 \text{ GeV}$$

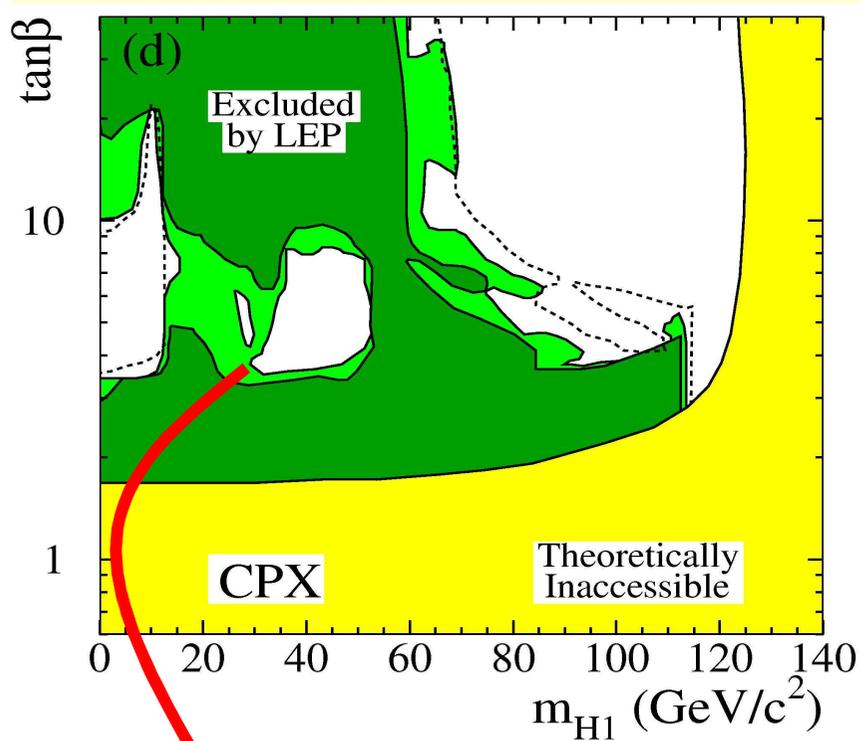
$$M_{H_2}: 105 \text{ to } 120 \text{ GeV}$$

$$M_{H_3}: 140 \text{ to } 180 \text{ GeV}$$

et H_1 découplé du Z, W et t

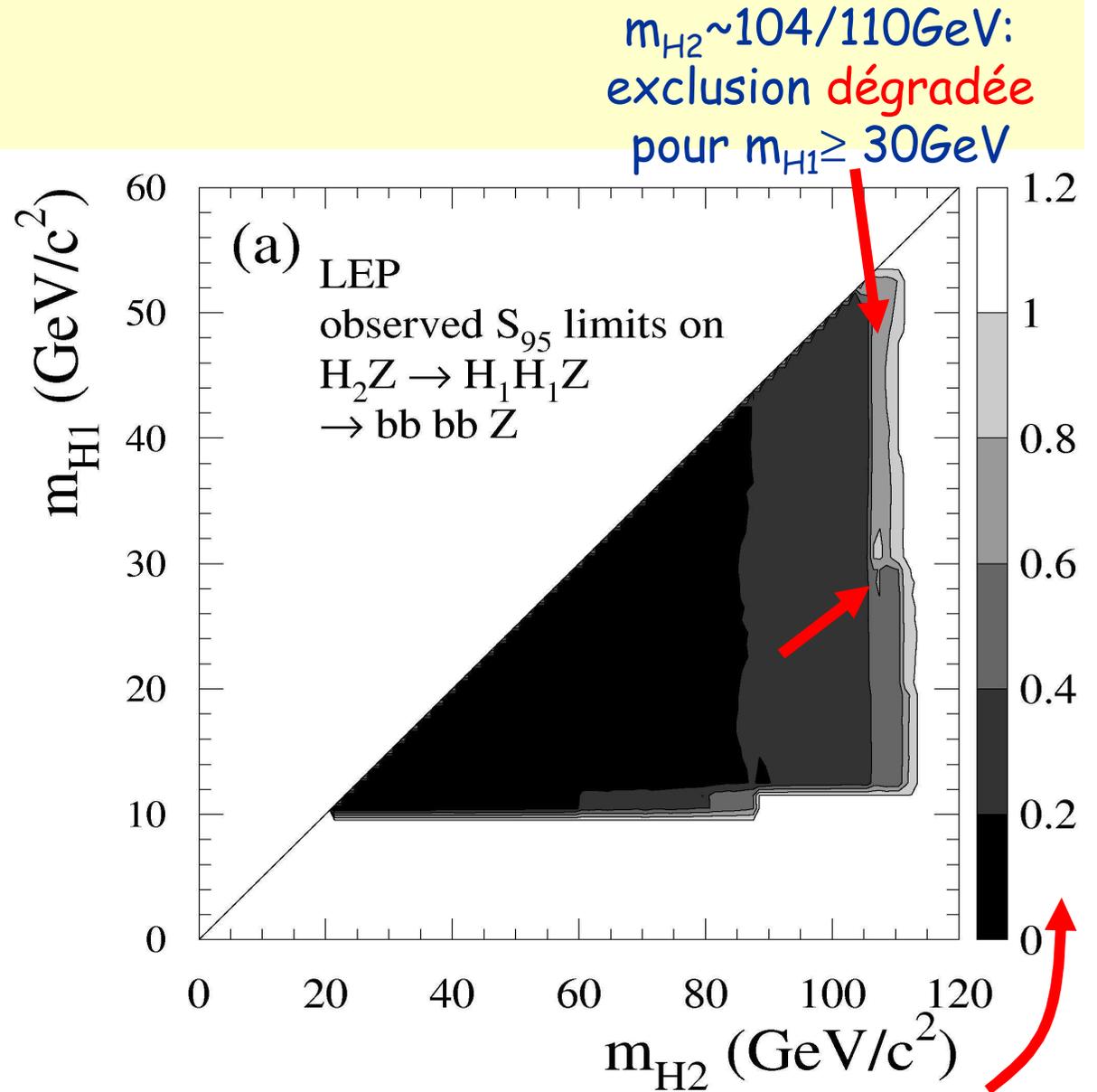
⇒ scénarios en cours d'étude

Scénario CPX: lien modèles - limites en couplages² x Br (ex)



$\tan\beta \sim 5$, $30 \text{ GeV} \leq m_{H_1} \leq 55 \text{ GeV}$:
 $m_{H_2} \sim 104/110 \text{ GeV}$
 $(H_2 \rightarrow H_1 H_1 \rightarrow bbbb)$ Z domine
 $\text{Br}(H_2 \rightarrow H_1 H_1) : 60-80\%$ $\text{Br}(H_1 \rightarrow bb) \sim 92\%$

Séminaire SPP



$m_{H_2} \sim 104/110 \text{ GeV}$:
 exclusion dégradée
 pour $m_{H_1} \geq 30 \text{ GeV}$

(a) LEP
 observed S_{95} limits on
 $H_2 Z \rightarrow H_1 H_1 Z$
 $\rightarrow bb bb Z$

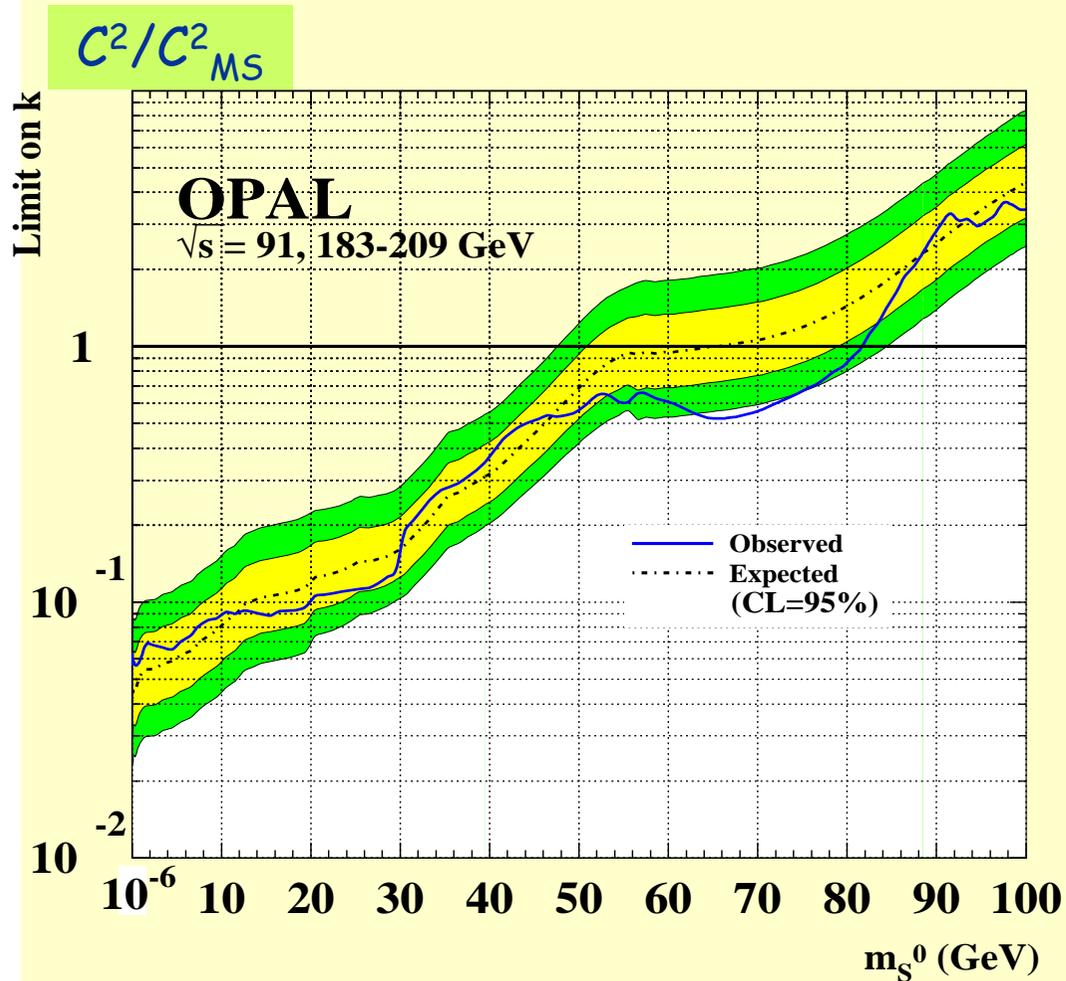
4 septembre

limite sur $C^2/C_{ref}^2 \text{ Br}^2(H_1) \text{ Br}(H_2)$

Résultats généraux

Tentative de bilan général du LEP

Pour un boson de Higgs couplé au Z (ZZH), avec désintégrations directes



ZZH

état final H	seuil en m_H	lim@110GeV
bb	12 GeV	24%
$\tau\tau$	4 GeV	14%
hadrons	4 GeV	40%
invisible	aucun	40%
$\gamma\gamma$	2 GeV	7%

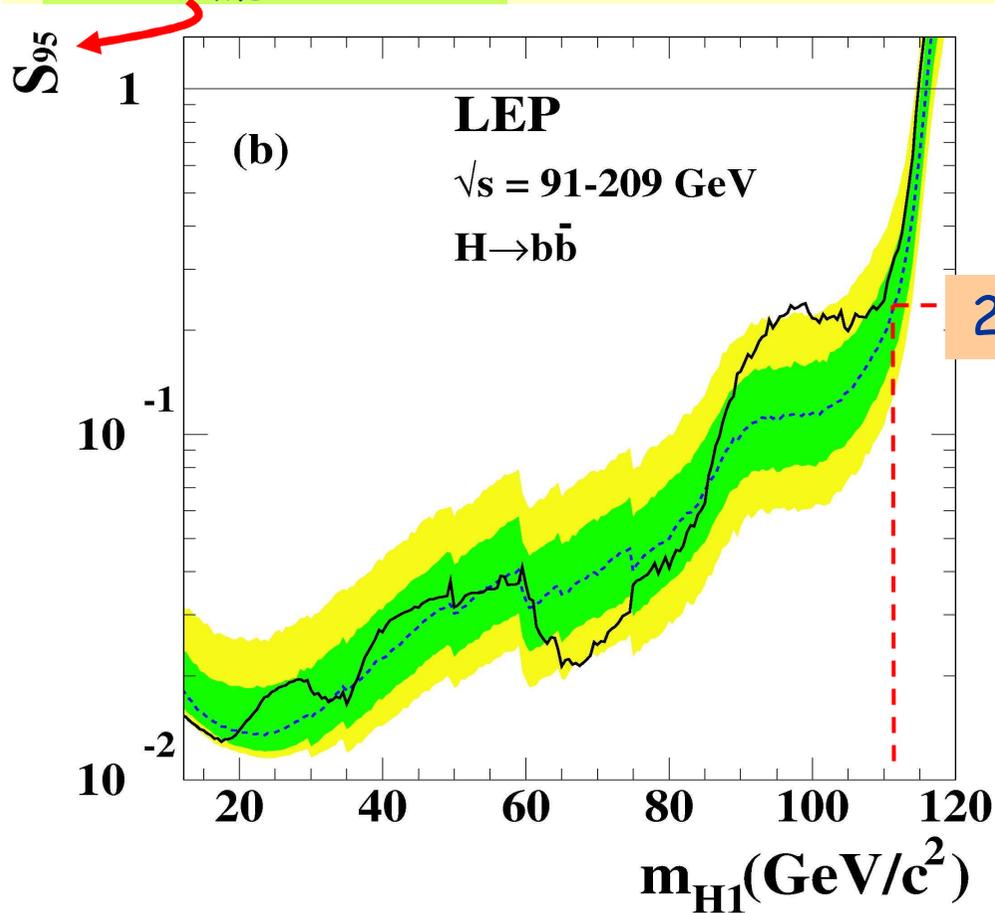
état final	seuil en m_H	lim@20GeV
∇	10^{-6} GeV	10%

⇒ étude complète

Tentative de bilan général du LEP

Pour un boson de Higgs couplé au Z (ZZH), avec désintégrations directes

$$C^2/C_{MS}^2 \times Br(H)$$



24%

ZZH

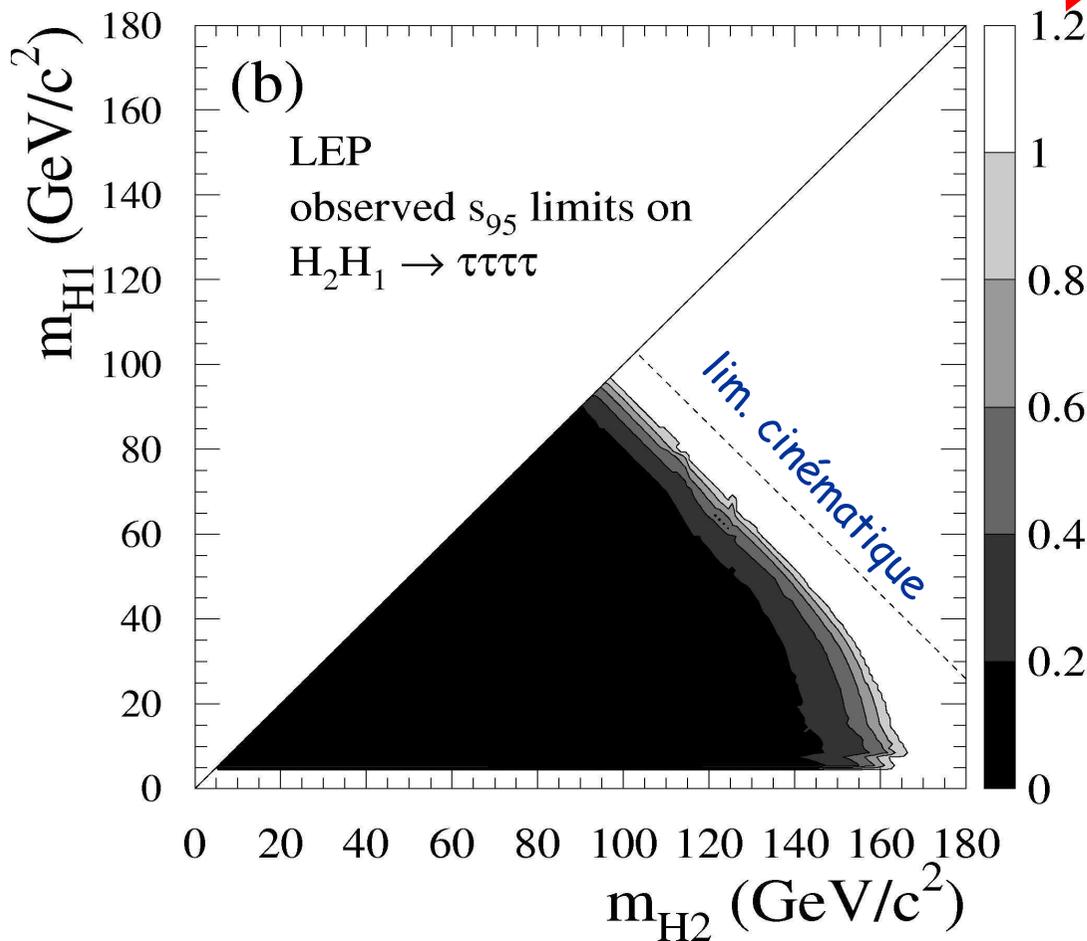
état final H	seuil en m_H	lim@110GeV
bb	12 GeV	24%
$\tau\tau$	4 GeV	14%
hadrons	4 GeV	40%
invisible	aucun	40%
$\gamma\gamma$	2 GeV	7%

état final	seuil en m_H	lim@20GeV
∇	10^{-6} GeV	10%

⇒ étude complète

Deux bosons de Higgs couplés au Z (ZH_1H_2), avec désintégrations directes

limite sur $C^2/C_{ref}^2 \text{ Br}(H_1) \text{ Br}(H_2)$



ZH_1H_2

état final	seuil en m_{H_1}, m_{H_2}	limites@	
H_1H_2	m_{H_1}, m_{H_2}	15,90	90,90
bbbb	12 GeV	18%	41%
$\tau\tau\tau\tau$	4 GeV	0,4%	21%
hadrons	4 GeV	43%	>1

+ recherches dans les états finals $bb\tau\tau$, $bb\gamma\gamma$ et dans la gamme de masses accessibles à LEP1 ($m_{H_2} < O(50\text{GeV})$)

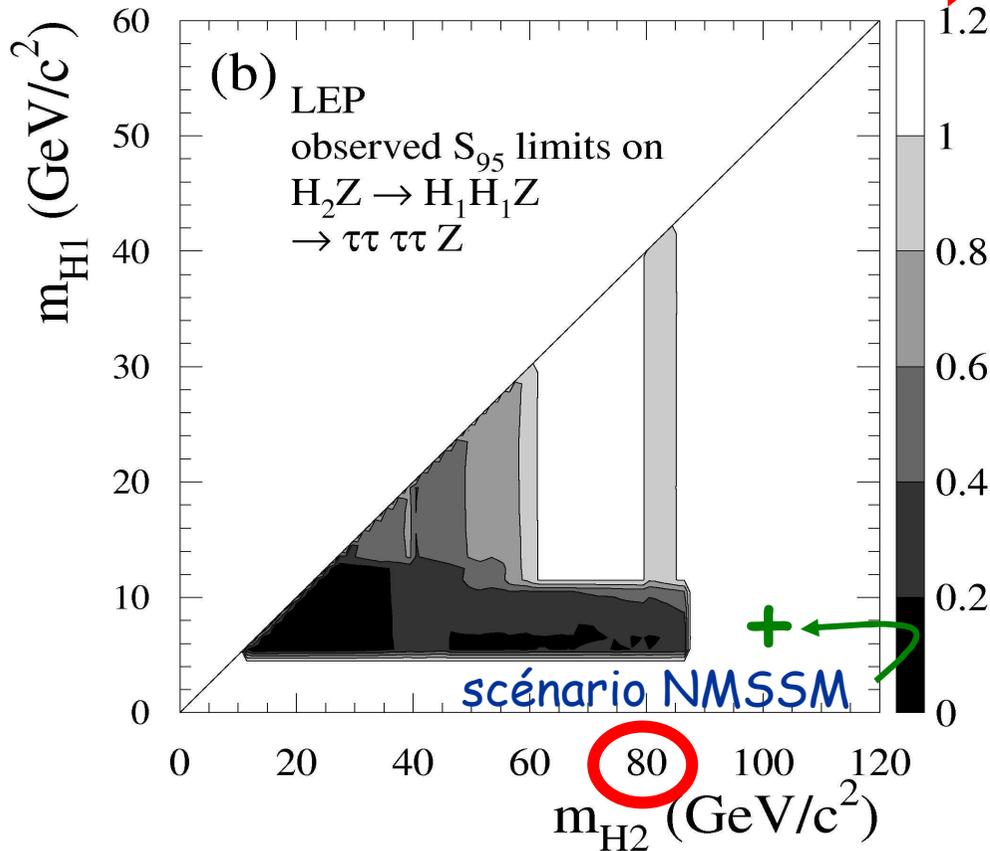
⇒ étude incomplète:

par ex: $m_{H_1} \leq 4\text{GeV}$ et $m_{H_2} \geq O(50\text{GeV})$: aucune recherche @LEP2

Un boson de Higgs couplé au Z (ZZH₂), avec désintégrations en cascade

limite sur $C^2/C_{ref}^2 \text{ Br}^2(H_1) \text{ Br}(H_2)$

ZZH₂



état final H ₂	seuils en m _{H1} , m _{H2}	limites@ m _{H1} , m _{H2}
bbbb	10; 20 GeV	50,100: 29%
τττ	5; 10 GeV	25,55: 68%
invisible	0,5m _{H2} ; aucun	∇,90: 7%
∇	0,5m _{H2} ; 10 ⁻⁶ GeV	∇,60: 60%

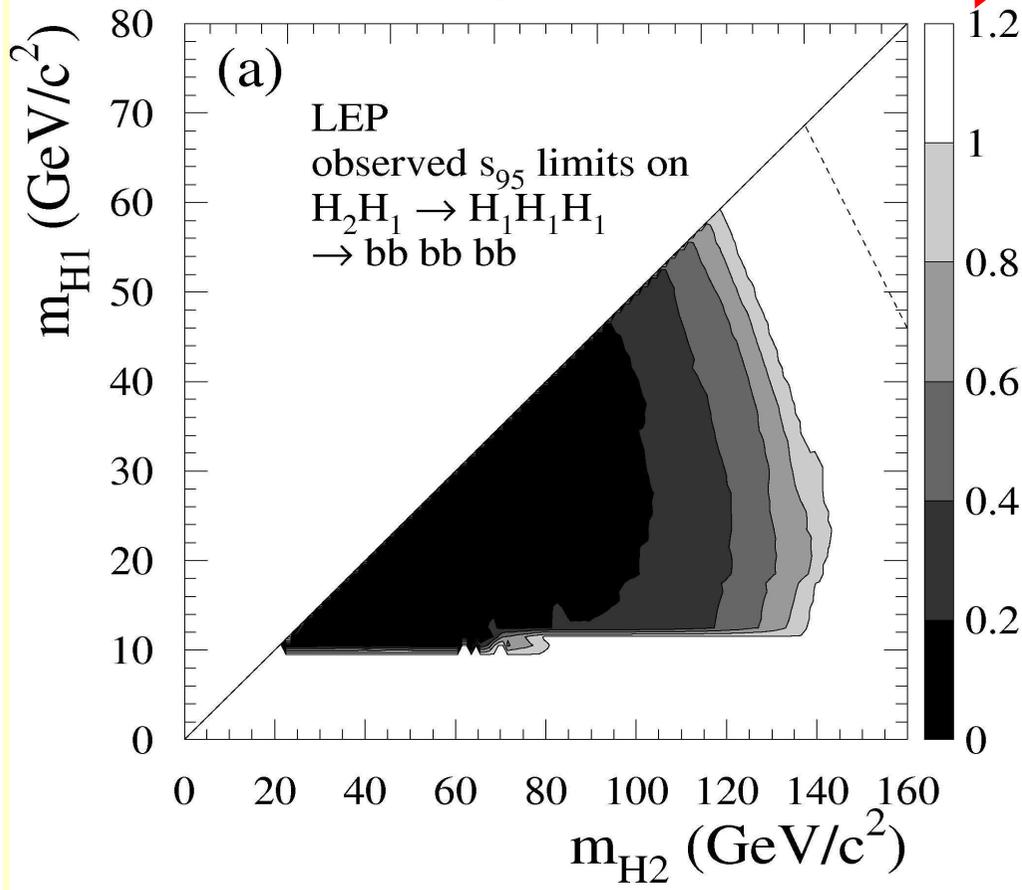
+ recherches ~complètes dans la gamme de masses m_{H1}, m_{H2} accessibles à LEP1 (m_{H2} < O(50GeV))

⇒ étude incomplète, par ex:

- état final τ : sensibilité en masse limitée
- m_{H2} ≥ O(100GeV) : aucune recherche dans l'état final hadronique (hors bbbb) ou pour m_{H1} ≤ 4GeV

Deux Higgs couplés au Z (ZH_1H_2), avec désintégrations en cascade

limite sur $C^2/C_{ref}^2 \text{Br}^3(H_1) \text{Br}(H_2)$



ZH_1H_2

état final H_1H_2	seuils en m_{H_1}, m_{H_2}	Limites @ m_{H_1}, m_{H_2}
bbbbbb	10; 20 GeV	50,100: 30%
$\tau\tau\tau\tau$	5; 10 GeV	10,55: 0,3%

+ recherches ~complètes dans la gamme de masses m_{H_1}, m_{H_2} accessibles à LEP1 ($m_{H_2} < O(50\text{GeV})$)

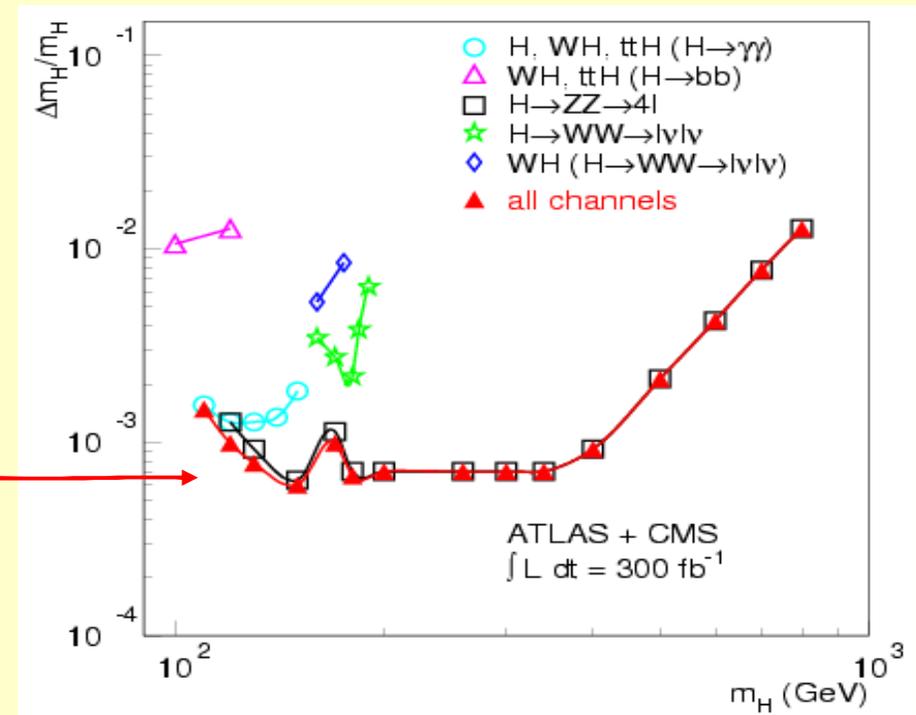
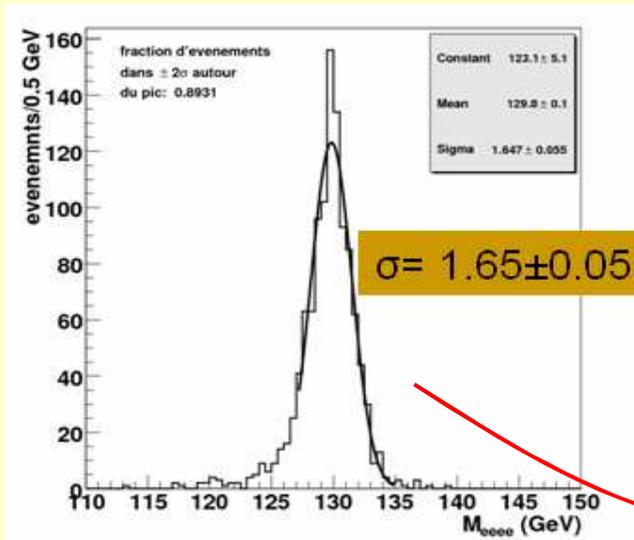
⇒ étude incomplète, par ex:

- état final $\tau\tau$: faible sensibilité en masse des recherches
- $m_{H_2} \geq O(50\text{GeV})$: aucune recherche dans l'état final hadronique (hors bbbb) ou pour $m_{H_1} \leq 4\text{GeV}$

Interprétation du signal au LHC? (on suppose une découverte!)

Mesure des propriétés : masse et largeur (1)

- o Masse : plus que suffisant pour toutes applications

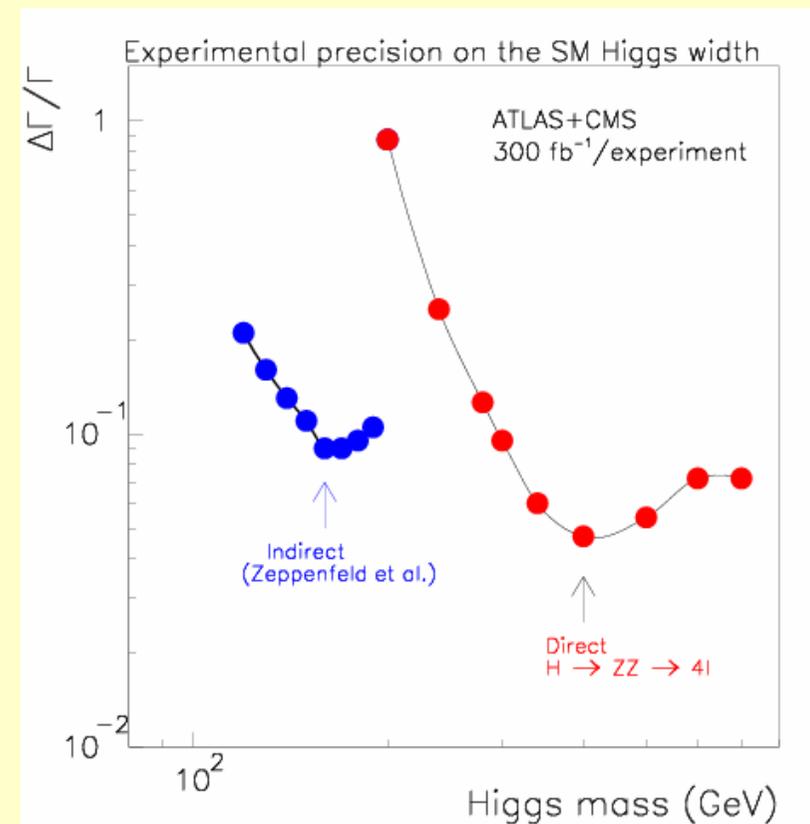


- MS : δM_H : 30 GeV
- MSSM : δM_H : 2-3 GeV

Mesure des propriétés : masse et largeur (2)

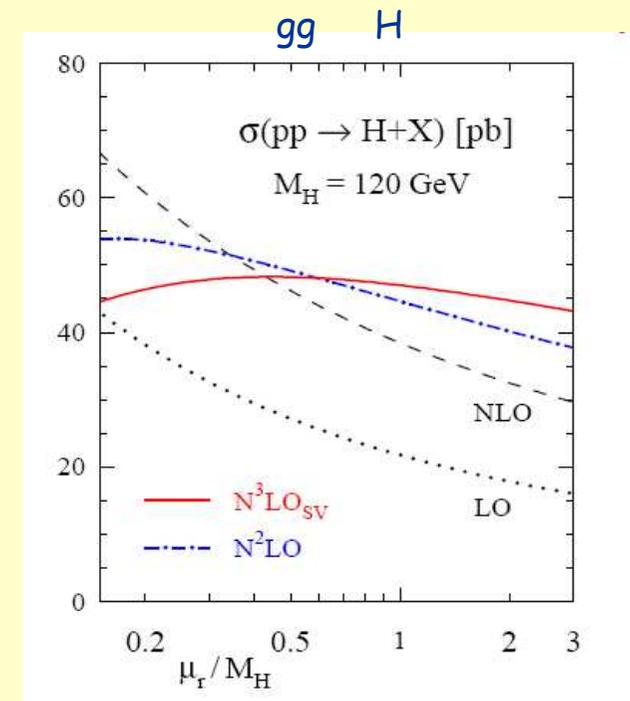
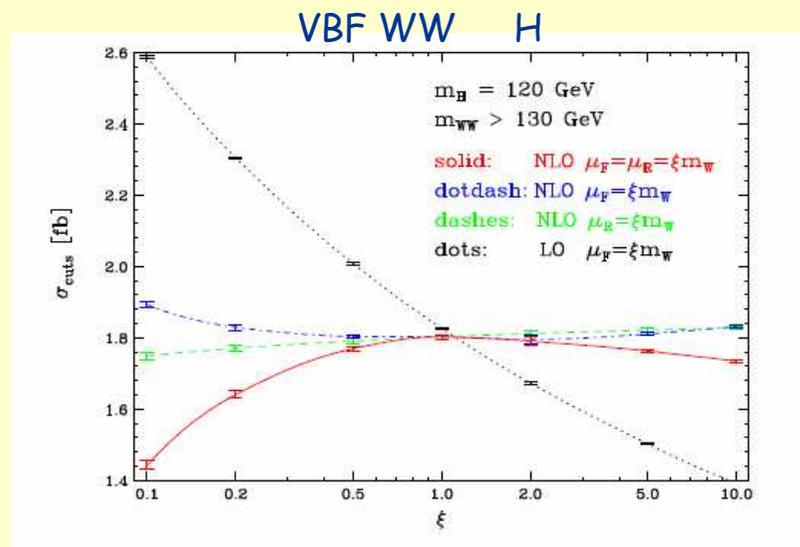
- o Largeur : seulement à haute masse ($\Gamma_H > \sigma_{\text{exp}}$)

- Mesure directe : toujours le pic
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
- Mesure indirecte : comparaison des taux de production
 $qq \rightarrow qqH ; H \rightarrow \gamma\gamma, \tau\tau, WW$
 $gg \rightarrow H ; H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ^*, WW^*$
- $\delta\Gamma_H \sim 5\text{-}10\%$



Mesure des propriétés : taux de production (1)

- Incertitudes statistiques
 $M_H = 130 \text{ GeV} : \sim 1\%$
 $M_H = 180 \text{ GeV} : \sim 5\%$
- Incertitudes théoriques : 10-15%



- Peut-on dire mieux?

Mesure des propriétés : taux de production (2)

o Production par fusion de gluons:

- Aucun processus standard ne met en jeu le même vertex (en particulier, pas le fond)



- Ne met pas en jeu le couplage aux W,Z

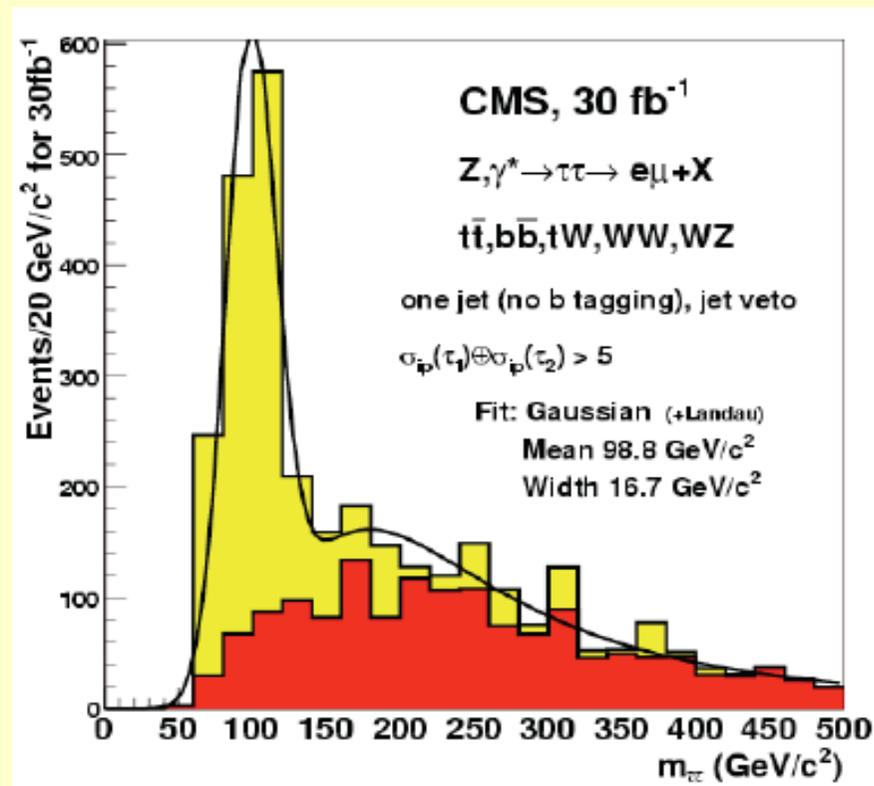
o Intérêt des canaux VBF :

- Testent le couplage aux W,Z
- « Normalisables » sur des données standard



Mesure des propriétés : taux de production (3)

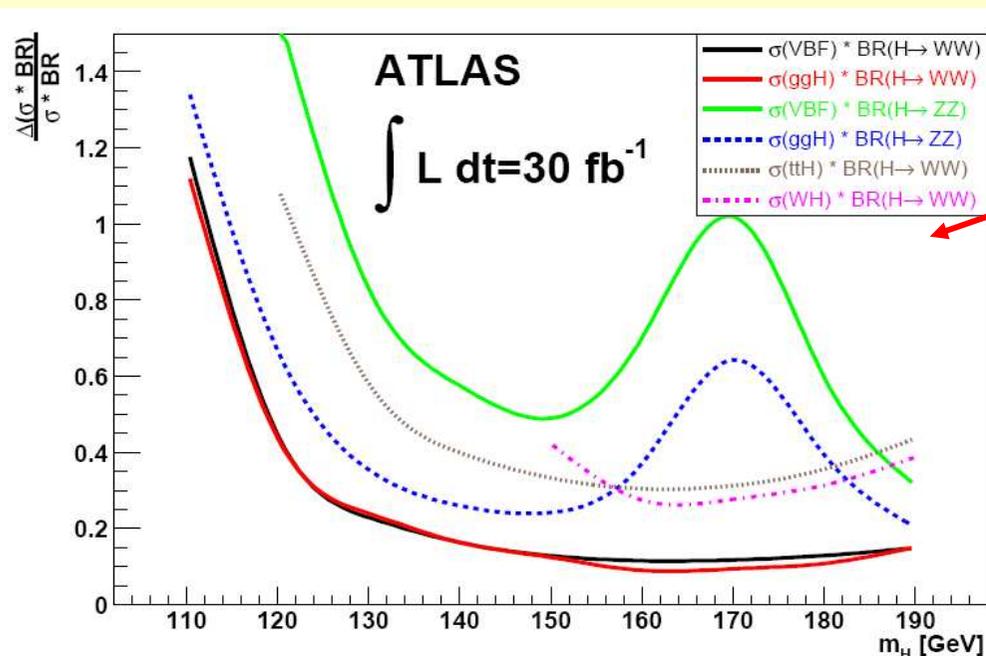
- o Normalisation sur les données: processus de contrôle mesuré à $\sim 2\%$ près



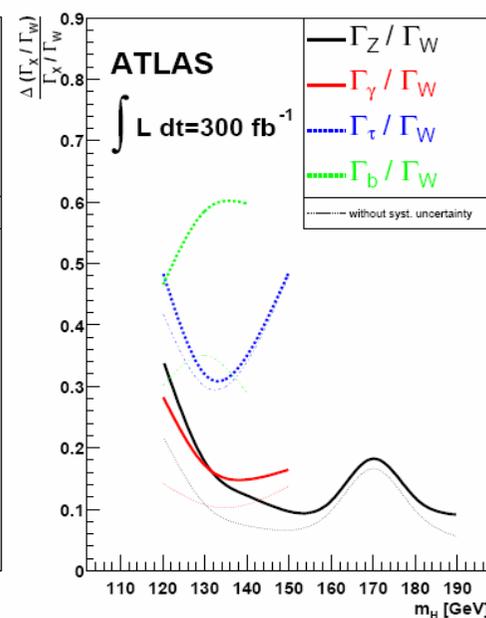
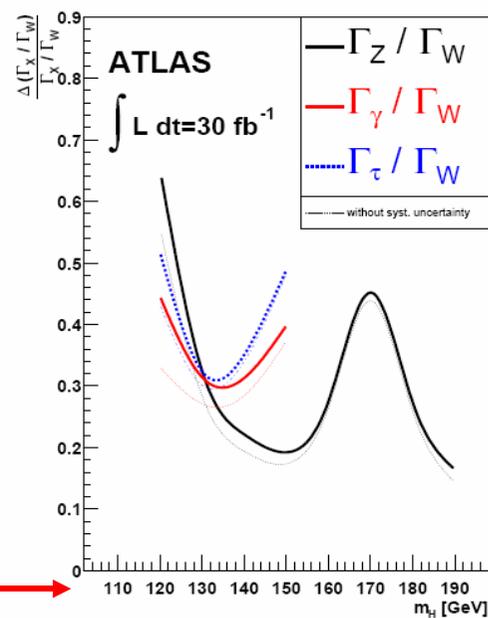
Mesure des propriétés : désintégrations

- o Rapports d'embranchement. Rapports de rapports

Grande incertitude sur les taux.
H WW meilleur canal (~10%)

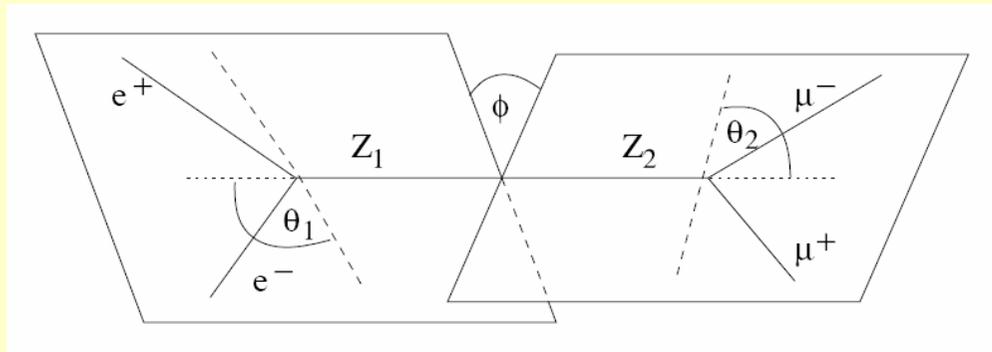


Donc candidat naturel pour normaliser les différents modes de désintégration

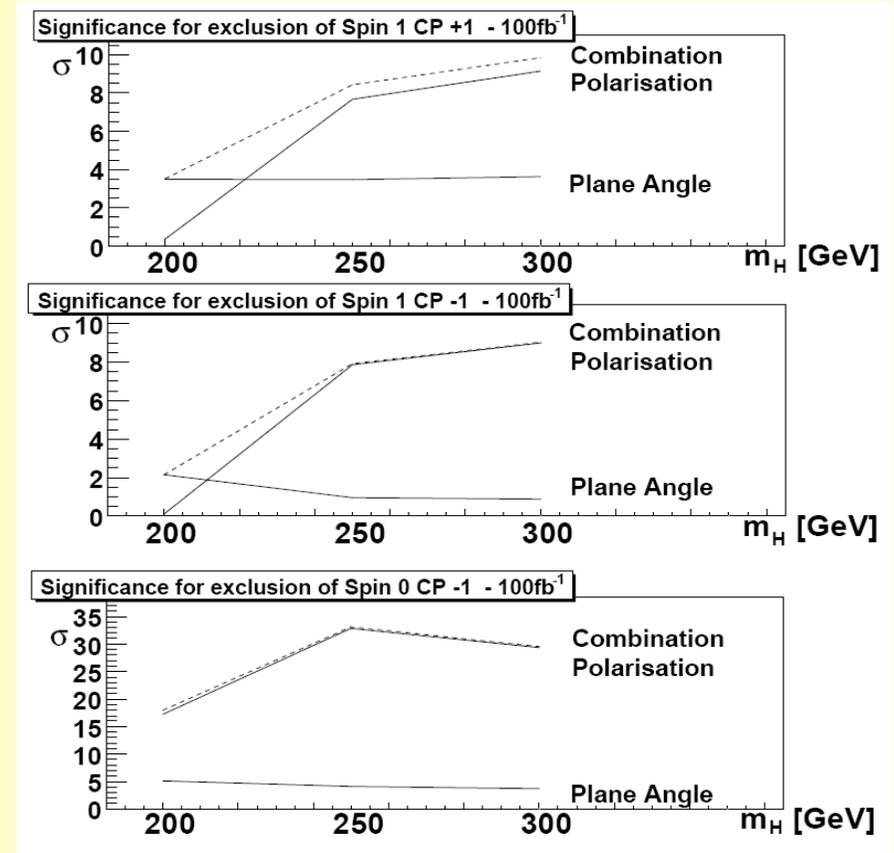


Mesure des propriétés : spin, parité

- o Via les distributions angulaires. Etats finals entièrement reconstruits (donc $H \rightarrow ZZ$). $M_H > \sim 180 \text{ GeV}$

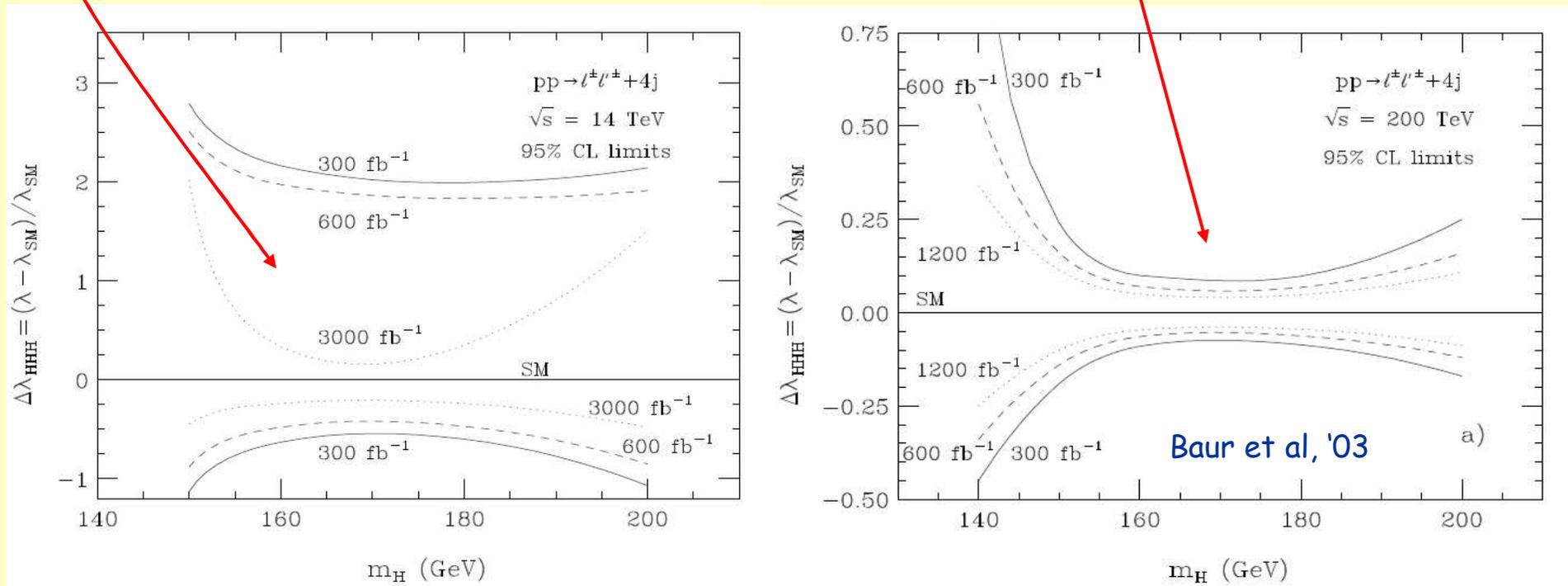


- o Par ailleurs, le mode $H \rightarrow \gamma\gamma$ exclut $S=1$ ($M_H < 140 \text{ GeV}$)



Mesure des propriétés : autocouplage...

- o Accessible à ~10% près, modulo un modeste upgrade en luminosité (3000 fb⁻¹) ou en énergie (200 TeV).
 Domaine en masse restreint (150-200 GeV)



- o Cet aspect ne pourra pas être testé au LHC...

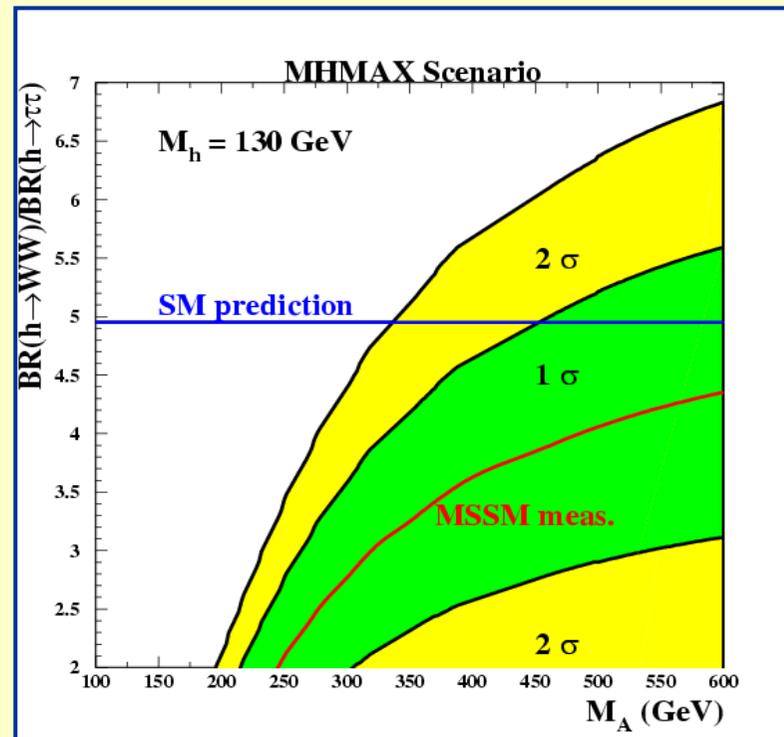
Quelques exemples : $M_H \sim 130 \text{ GeV}$

- Exploitation de $gg \rightarrow \gamma\gamma$, VBF $H \rightarrow \tau\tau$, VBF $Z \rightarrow \ell\ell$
 - Résonance en $gg \rightarrow \gamma\gamma$: $S=0$ ou 2 . CP? Couplages?
 - VBF $H \rightarrow \tau\tau$: couplage à la jauge! $P=+1$!
 - ~~VBF $H \rightarrow \ell\ell$~~ : préfère les fermions lourds!
 - Normalisation du signal par VBF $Z \rightarrow \ell\ell$ (élimine les systématiques sur les taux de comptage) : détermination de $\Gamma_W \cdot \Gamma_\tau$, précision 5-10%

Quelques exemples : $M_H \sim 130 \text{ GeV}$

- Exploitation de VBF H WW : rapport des taux de désintégration en WW et $\tau\tau$. Discrimination possible MS/MSSM, jusqu'à $M_A \sim 350 \text{ GeV}$

$$R = \frac{\text{BR}(h \rightarrow \text{WW})}{\text{BR}(h \rightarrow \tau\tau)}$$



Quelques exemples : $M_H \sim 130 \text{ GeV}$

- o Et si H ressemble vraiment à H_{SM} , il reste encore les ajustements aux mesures de précision:

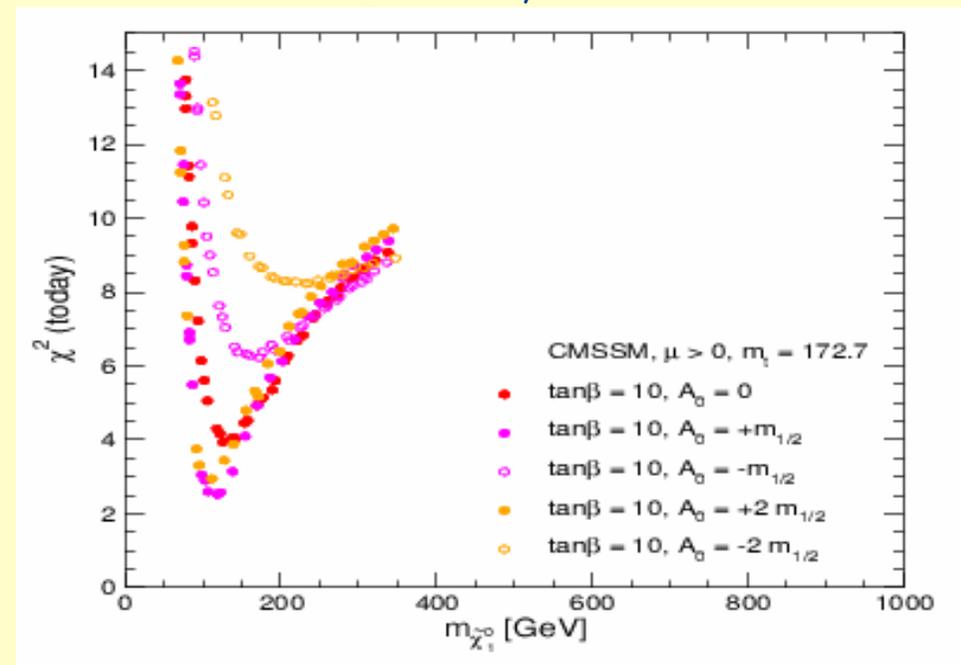
- Entrées : $M_W, M_t, \sin^2\theta_W,$
WMAP, b , $s\gamma, (g-2)_\mu$
- Suppositions : CMSSM,
neutralino1 LSP...

- Sorties : sensibilités aux
paramètres SUSY

Ex : M_{χ_1}

Egalement $M_{\text{stau}}, M_{\text{stop}} \dots$

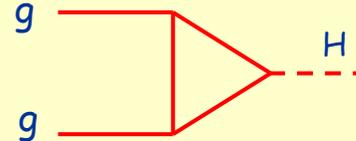
Ellis et al, 2006



- o Et toujours intéressant de comparer χ^2_{CMSSM} à χ^2_{MS}

Quelques exemples : $M_H \sim 200 \text{ GeV}$

- Exploitation de $gg \rightarrow H \rightarrow WW, ZZ; \text{VBF } H \rightarrow WW$
 - Pas d'information sur le couplage aux fermions
 $H \rightarrow WW$ et $H \rightarrow ZZ$: rapport des BR à 10% près
 - $\text{VBF } H \rightarrow WW$ (et $\text{VBF } Z \rightarrow \ell\ell$) : mesure absolue de Γ_W (couplage en production et désintégration)
 - Retour sur $gg \rightarrow H \rightarrow WW$: connaissant Γ_W , sensibilité à Γ_g (nouveaux fermions? Susy?)



- Plus long terme : mesure de spin-parité dans le mode ZZ
- ET : la masse indique une violation du MS!

Quelques exemples : $M_H \sim 800 \text{ GeV}$

o Higgs ou Z' ?

- Signatures $H \rightarrow ll\nu\nu$, $H \rightarrow ll\nu j$. Pas (peu) de reconstruction de masse
- Statistique faible, pas ou peu de mesures des propriétés
- Par ailleurs, $Z' \rightarrow WW, ZZ$ est naturel
- L'absence de $Z' \rightarrow ee, \mu\mu$ peut être un indice
- Seul argument : la masse élevée favorise l'hypothèse Z' (sociologiquement!)

Conclusions (1)

o LEP :

- Au 1^{er} ordre : le H a été cherché sous toutes ses formes, et à toute masse accessible. $\sigma > \sim 0.1 \sigma_{SM}$ est exclu pour $M_H \sim < 100-110$ GeV
- Exceptions notables, dans les modèles étendus:
 - Production par paires (hA), si m_h ou $m_A < \sim 4$ GeV
 - Cascades (h AA): nombreux états finals non couverts

~~« un bosons de Higgs léger est exclu »~~

Conclusions (2)

o LHC :

- Découverte garantie dans le cas du MS, et pour les MSSM les plus simples (attention à $m_A \sim 150 \text{ GeV}$, $\tan\beta \sim 6-7$)
- L'introduction de degrés de liberté supplémentaires (CPV, NMSSM...) entraîne rapidement des zones de non-sensibilité
- En cas de découverte, l'information disponible pourra transformer une nouvelle particule inconnue en probable candidat H. Premières mesures des propriétés, précision $\sim 10\%$
- MSSM : on peut ne voir qu'un H. Dans ce cas, il est souvent \sim MS (discrimination possible pour $M_A < 350 \text{ GeV}$).
Pour trancher : découvertes additionnelles; amélioration des contraintes indirectes.