

Le boson de Higgs au Collisionneur Linéaire

Djamel BOUMEDIENE
LPC Clermont-Ferrand



- Introduction
- Le Higgs dans le Modèle Standard
- Les mesures de précision électrofaibles aujourd'hui
- Observation directe du Higgs à ILC
- Mesures de précision électrofaibles à ILC
- Choix du contexte expérimental
- Conclusion

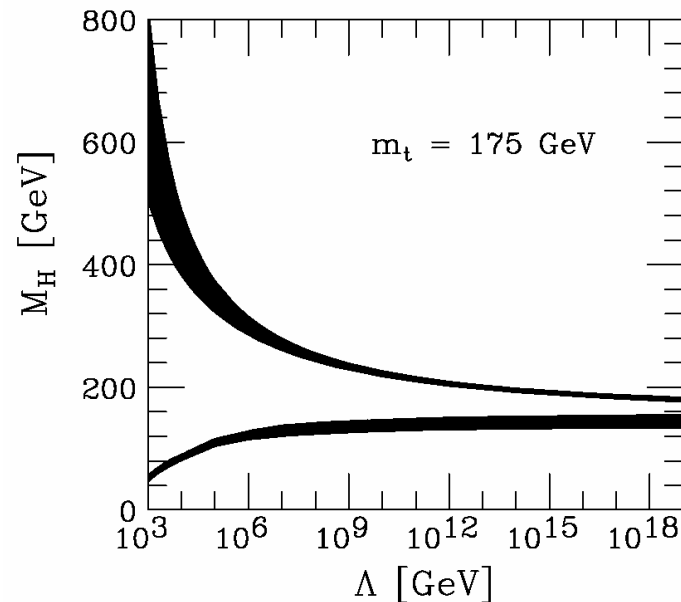
- Dans le MS, le secteur de Higgs est un doublet de champs scalaires
- Sur les 4 degrés de liberté initiaux, 3 sont absorbés par les bosons W^\pm , Z. Le quatrième correspond à une particule physique : le higgs H^0
- Couplage yukawa doublet scalaire-fermions \rightarrow masse des fermions
- Les couplages du boson de Higgs aux fermions et aux bosons de gauge est proportionnel à leurs masses, déterminé par des paramètres connus

$$g_{ffH} = m_f / v \quad g_{vvH} = 2 M_v^2 / v$$



Le Higgs dans le MS

- Le MS peut être testé à l'échelle des corrections radiatives grâce aux mesures de précisions de ses paramètres
- Les contributions du Higgs via des corrections aux propagateurs W^\pm , Z dépendent de sa masse
- Les corrections varient en $\log(m_H/m_W)$



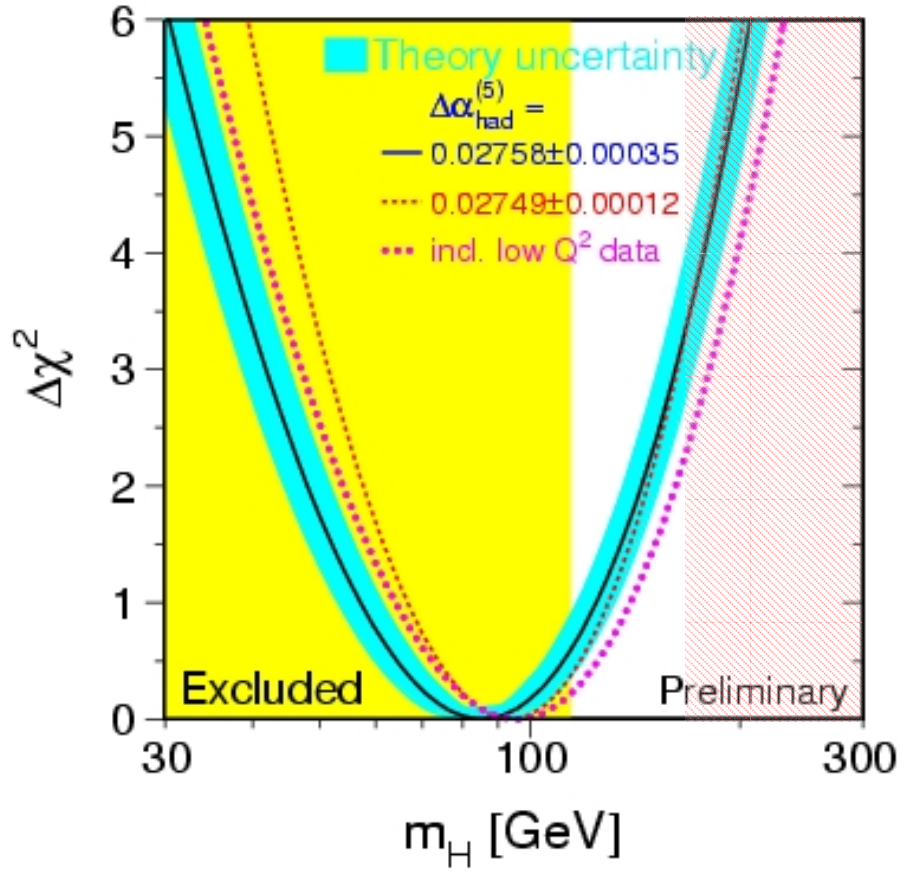
Extension minimale du Modèle Standard

- Super-partenaires associés aux particules du Modèle Standard
- Sources de violation CP supplémentaires (Baryogénèse de l'univers)
- Les particules les plus légères sont de bons candidats à la matière sombre de l'univers
- Deux doublets de Higgs → 5 bosons physiques
 - h^0, A^0, H^0, H^\pm
Avec A^0 (CP = -1)

- Introduction
- Le Higgs dans le *Modèle Standard*
- Les mesures de précision électrofaibles aujourd'hui
 - Limite actuelle sur m_H
 - Mesure de m_W
 - Mesure de m_t
 - Scénarios à considérer
- Observation directe du Higgs à ILC
- Mesures de précision à ILC
- Choix du contexte expérimental
- Conclusion

$m_h = 85^{+39}_{-28} \text{ GeV}/c^2$
 $m_h > 114 \text{ GeV}/c^2 \text{ CL } 95\%$
 $m_h < 166 \text{ GeV}/c^2 \text{ CL } 95\%$

- Les propriétés du Higgs standard + les mesures de précision électrofaible → Higgs léger



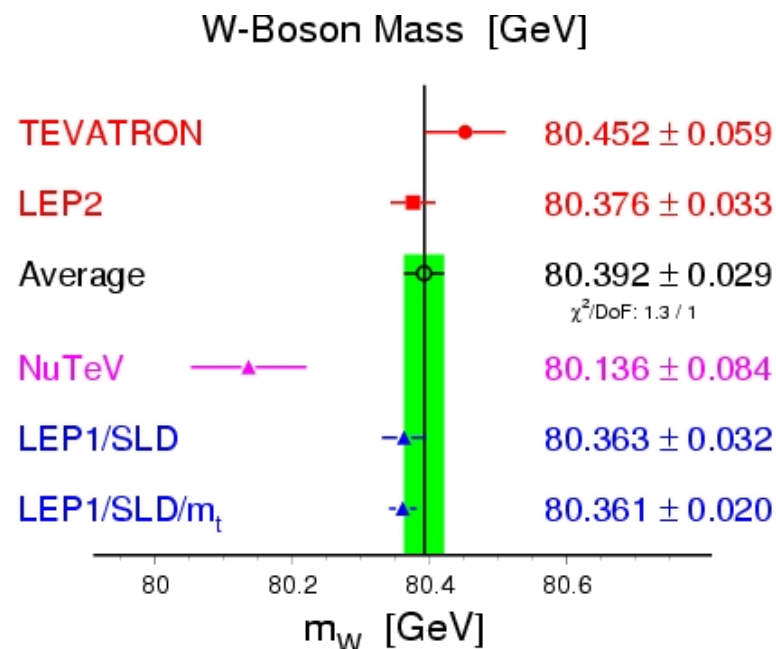
July 2006 – LEP EW WG – Tevatron EW WG



$$\delta m_W = 29 \text{ MeV}/c^2$$

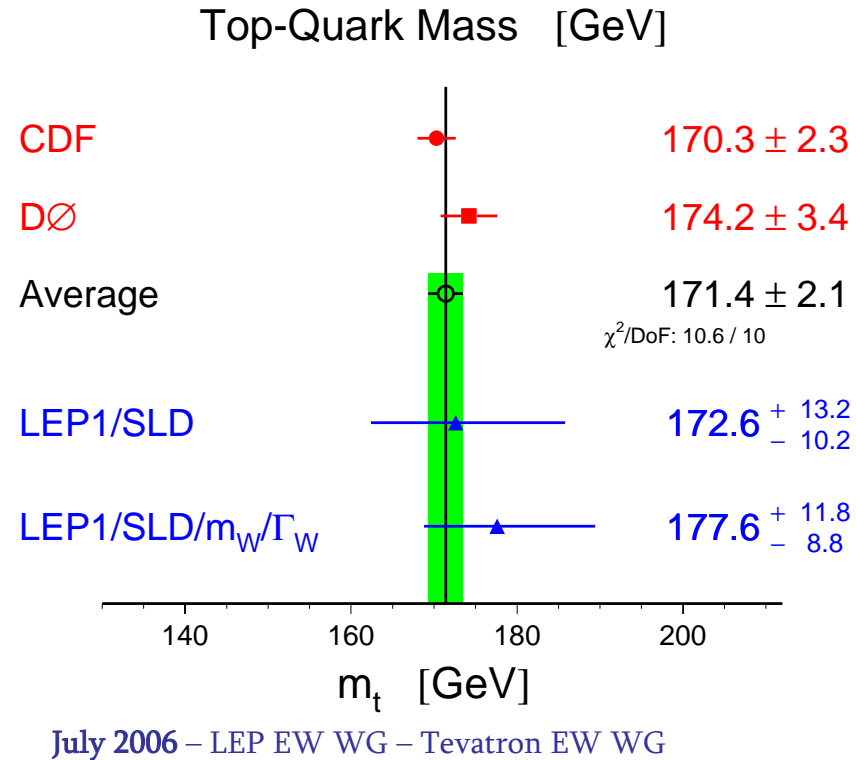
→ Niveau de précision de $\sim 1/3000$

- Combinaison de Tevatron et LEP2 pour les mesures directes
- LEP1, SLD et NuTeV pour les mesures indirectes
- La précision atteinte sur m_W autorise une amélioration de la mesure
- La mesure sera améliorée puis dominée par des systématiques irréductibles au Tevatron

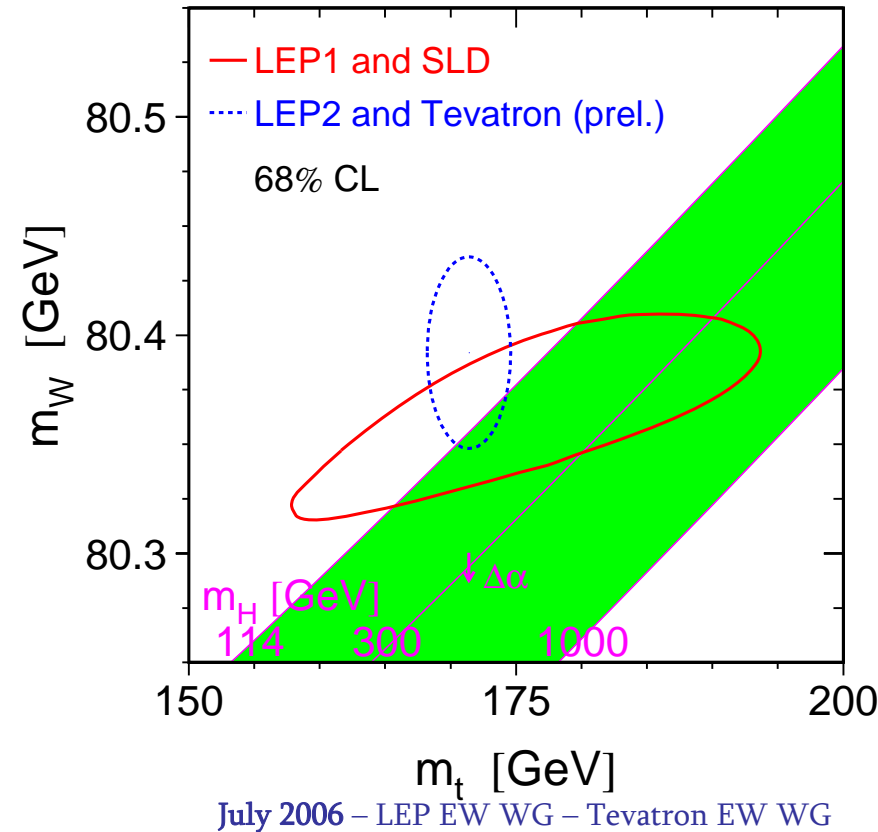


July 2006 – LEP EW WG – Tevatron EW WG

- Mesure de m_t exclusivement au Tévatron
 $\delta m_t = 2,1 \text{ GeV}/c^2$
- Améliorations attendues :
 δm_t sera baissée à $\sim 1,6 \text{ GeV}/c^2$ avec les prochaines mesures
- Le test du MS nécessite une meilleure précision sur m_t

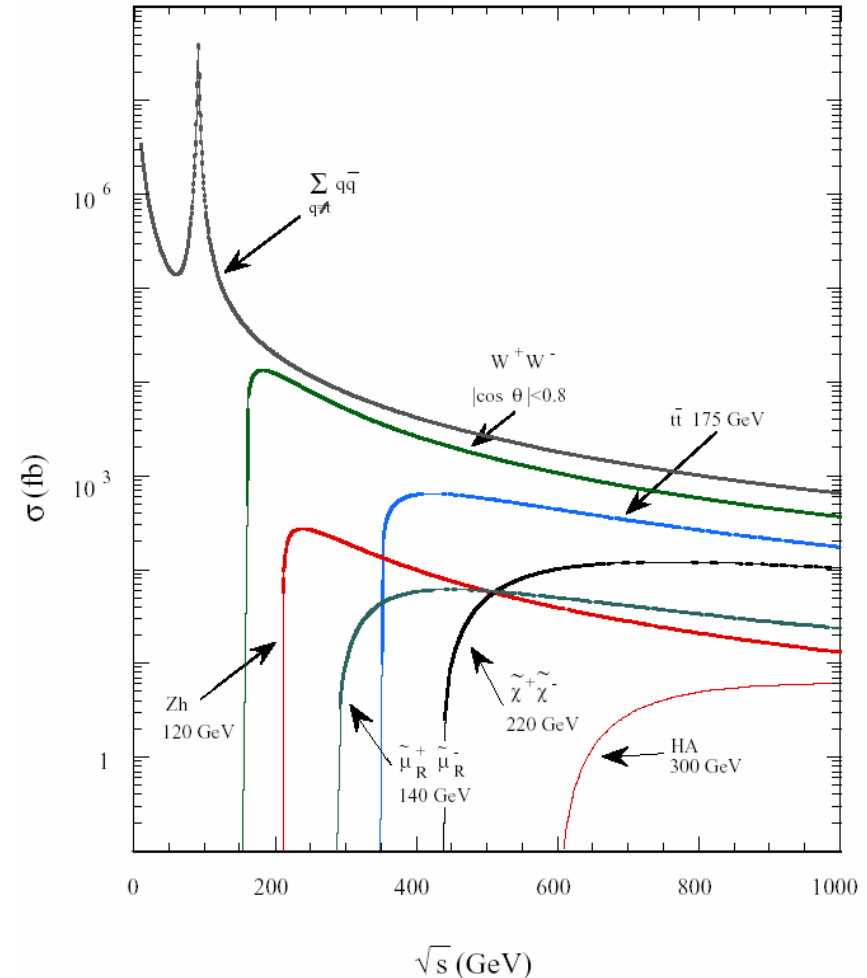


- Le Minimal Standard Model est actuellement capable de décrire les mesures de précision LEP/Tevatron. L'existence d'une nouvelle physique n'est pas démontrée
- Si le Higgs est observé : A-t-il le profil prédit par le MS ?
 - En masse, temps de vie, Br, couplage aux fermions, auto-couplage, section efficace
- Est-ce un Higgs supersymétrique?
- ILC poussera la précision des mesures pour contraindre le modèle au niveau quantique afin de répondre à cette question
- On doit pouvoir observer l'inattendu ⇒ réaliser des mesures indépendantes des modèles



- Introduction
- Le Higgs dans le Modèle Standard
- Les mesures de précision électrofaibles aujourd'hui
- Observation directe du Higgs à ILC
 - Les processus physiques à ILC
 - Mesures de précision sur le Higgs
 - ↳ Mesure de m_h
 - ↳ Mesure des couplages au Z, W, γ
 - ↳ Mesures du couplage aux fermions
 - ↳ Mesure du couplage Yukawa au top
 - ↳ Potentiel du Higgs
 - ↳ Nombres quantiques du Higgs
 - Cas du Higgs dans le MSSM
- Mesures de précision à ILC
- Choix du contexte expérimental
- Conclusion

- Etat initial contrôlé
- Bruits de fond contrôlés
 - En particulier le principal bruit (continuum qq)
- Avantage des effets de seuils
 - Choix du \sqrt{s} en fonction de la physique désirée
 - Exemple : Dans le cas d'un Higgs léger ($m_h \sim 120$ GeV/c²) le seuil Zh pour l'étude du Higgs
 - Exemple : le seuil WW pour la mesure m_W avec des bruits de fonds connus



- Processus dominants

- a) Higgsstrahlung

- σ en $1/s \Rightarrow$ dominant à basses énergies

- b) Fusion de W

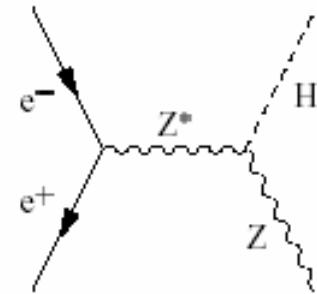
- σ en $\log(s/m_h^2) \Rightarrow$ dominant à haute énergie

- c) Fusion de Z

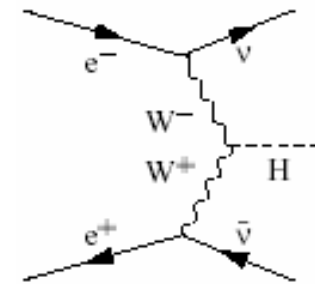
- Pénalisé par le rapport CC / CN
 - σ inférieure d'un ordre de grandeur à $H\nu\nu$
 - Dans le cas de collisions e^-e^- même section que pour tout e^+e^-

- Nombre d'événements attendus

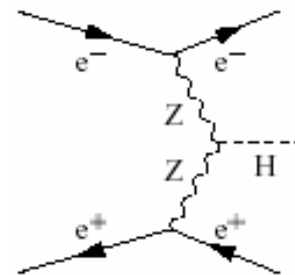
- À $\sqrt{s} = 350 \text{ GeV}$ $m_h = 120 \text{ GeV}$, $L = 500\text{fb}^{-1}$ 80 000 higgs attendus



(a) Higgsstrahlung



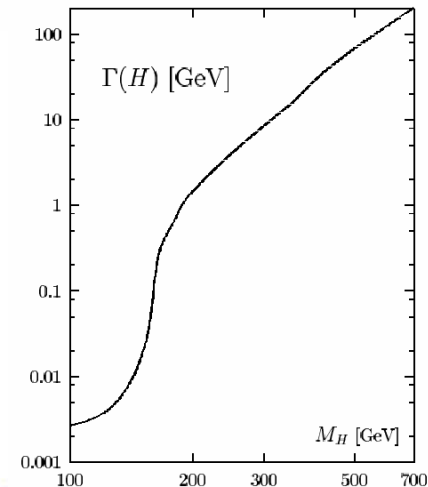
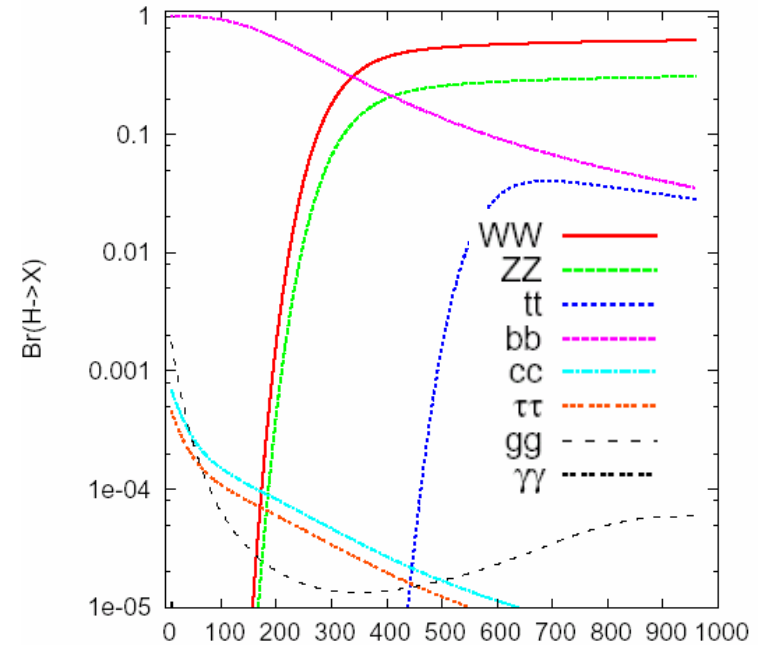
(b) W fusion



(c) Z fusion

- Production du Higgs dans les collisions $\gamma\gamma$
 - Higgs produit en canal s
 - Testera le spin du Higgs
 - Largeur $\Gamma_{\gamma\gamma}$
 - Boucle de W et top
 - Toute déviation / MS prédit une nouvelle particule chargée lourde (Higgs chargé, SUSY, ...) y compris des particules inaccessible directement à ILC / LHC.

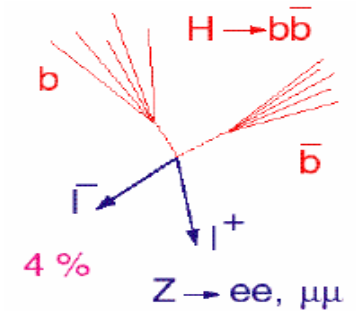
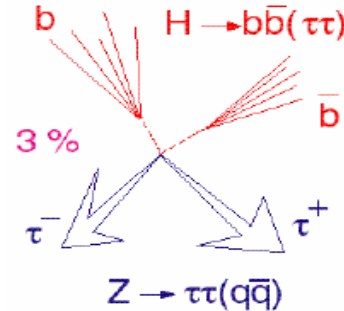
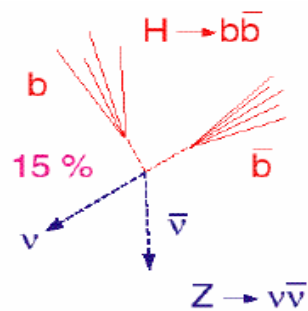
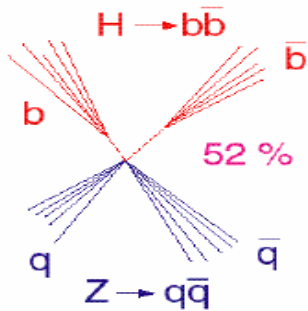
- Dépendance des rapports d'embranchement vis à vis de m_H
 - Entre $m_Z \rightarrow 140$ GeV
 - Se désintègre en paire de fermions
- $$\Gamma(H^0 \rightarrow ff) = [g_{ffH}^2(m_H^2)/4\pi] [N_C/2] [m_H(1 - 4m_f^2/m_H^2)^{3/2}]$$
- Couplage proportionnel à $m_f \Rightarrow bb$ (*dominant*), cc , $\tau\tau$
 - Entre 140 et seuil ZZ
 - $H \rightarrow WW^*$
 - Entre le seuil ZZ et tt
 - $H \rightarrow WW$ et $H \rightarrow ZZ$
 - Largeur totale du Higgs varie fortement avec m_H : ~ 10 MeV à 1 GeV (pour m_H de 140 à 200 GeV/c²)



- Introduction
- Le Higgs dans le *Modèle Standard*
- Les mesures de précision électrofaibles aujourd'hui
- Observation directe du Higgs à ILC
 - Les processus physiques à ILC
 - Mesures de précision sur le Higgs
 - ↳ Mesure de m_h
 - ↳ Mesure des couplages au Z, W, γ
 - ↳ Mesures du couplage aux fermions
 - ↳ Mesure du couplage Yukawa au top
 - ↳ Potentiel du Higgs
 - ↳ Nombres quantiques du Higgs
 - Cas du Higgs dans le MSSM
 - Autres higgs
- Mesures de précision à ILC
- Choix du contexte expérimental
- Conclusion

$$e^+e^- \rightarrow HZ$$

- Seulement 2 bosons dans l'état final
- Section efficace importante
- Signature
 - Leptonique
 - 2 jets, 2 leptons
 - Hadronique
 - 4 jets, dont 2 jets résultant bb

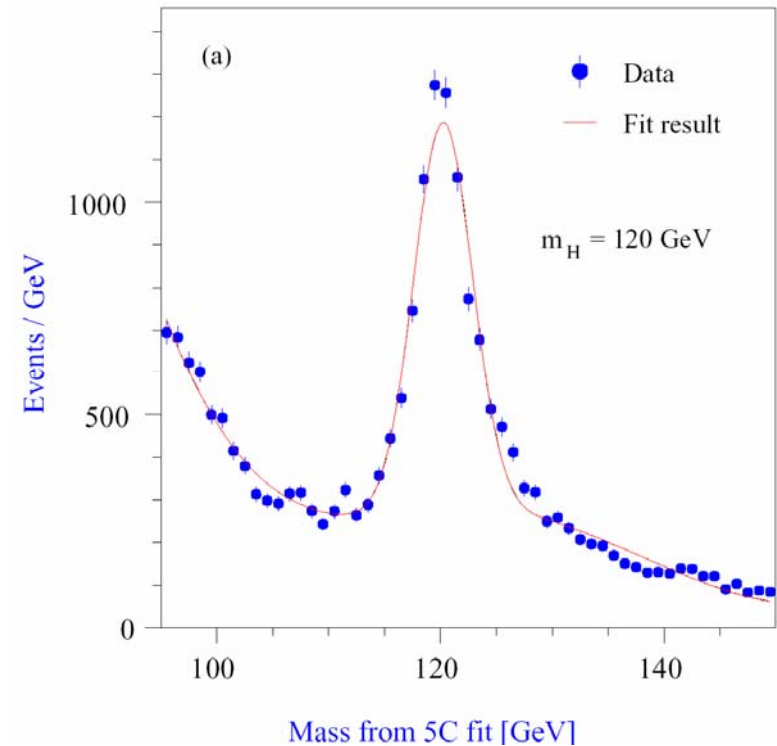


● Reconstruction de l'événement

- Id. du Z
- b-tag du Higgs

- Canal à 4 jets : déterminée par ajustement cinématique à 5 contraintes
 - conservation Energie-Impulsion
 - connaissance de m_Z
 - Résolution attendue $\sim 2 \text{ GeV}/c^2$ /événement

- Canal leptonique : signature claire
 - Résolution attendue $\sim 1,5 \text{ GeV}/c^2$ /événement



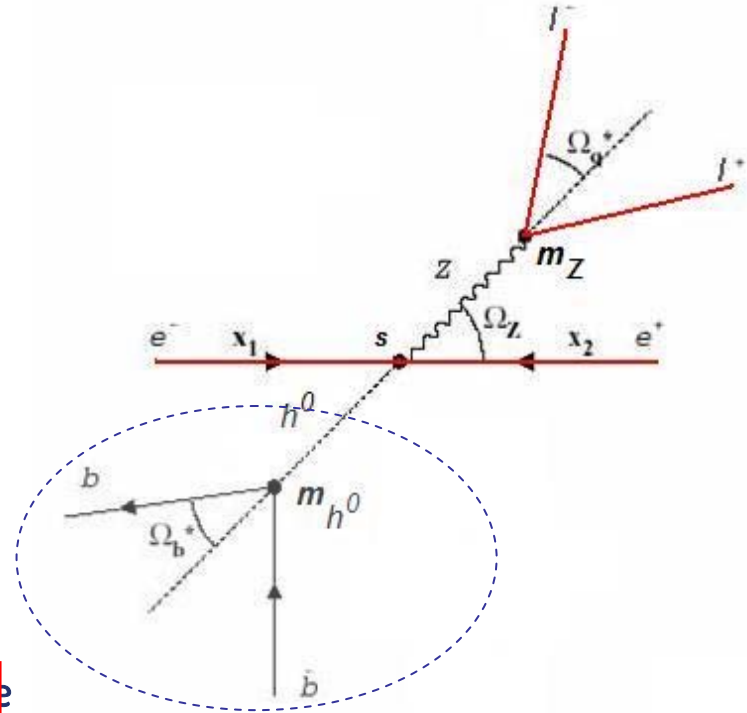
- Mesure de la masse de recul du Higgs (*recoil mass*)

- Hypothèse

- Connaissance de m_Z , \sqrt{s}
- Conservation de l'énergie-impulsion

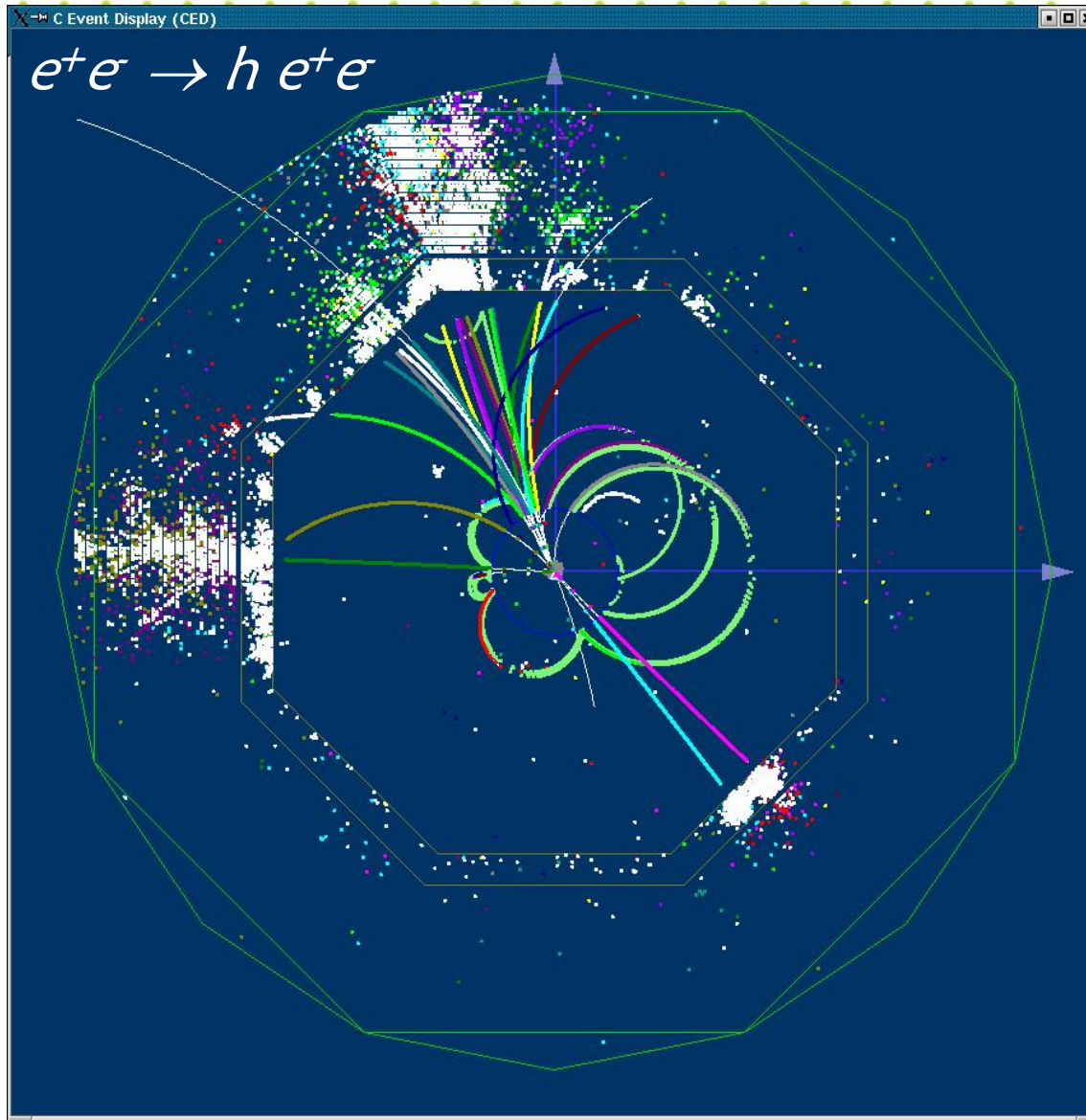
- Nécessite

- Une identification pure du Z
- Une bonne mesure cinématique du Z
→ Emplois du canal hll
- Aucune mesure ne s'effectue sur les produits de désintégration du Higgs

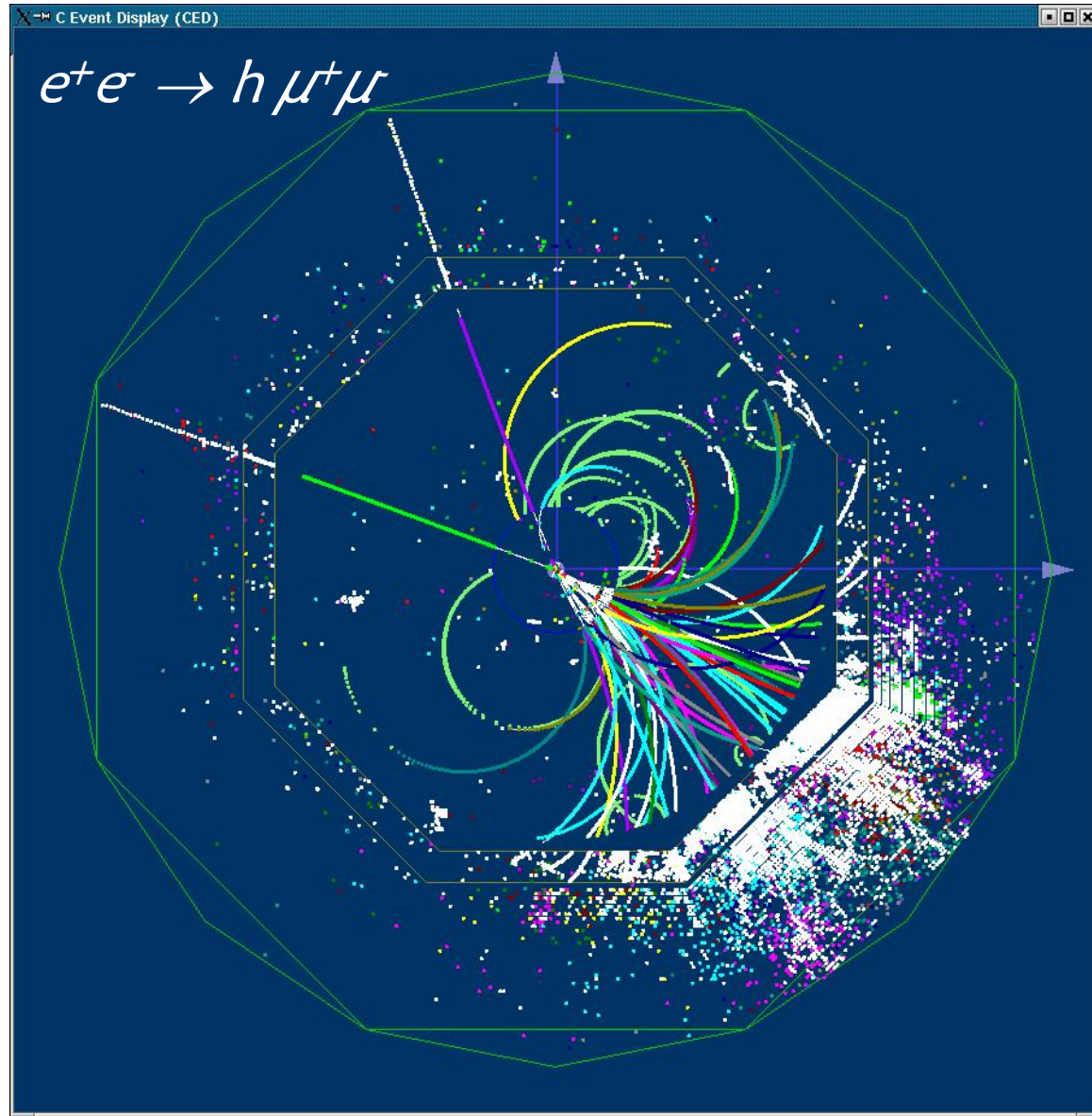


- Avantage :

- Mesure indépendante de toute hypothèse sur la désintégration du Higgs



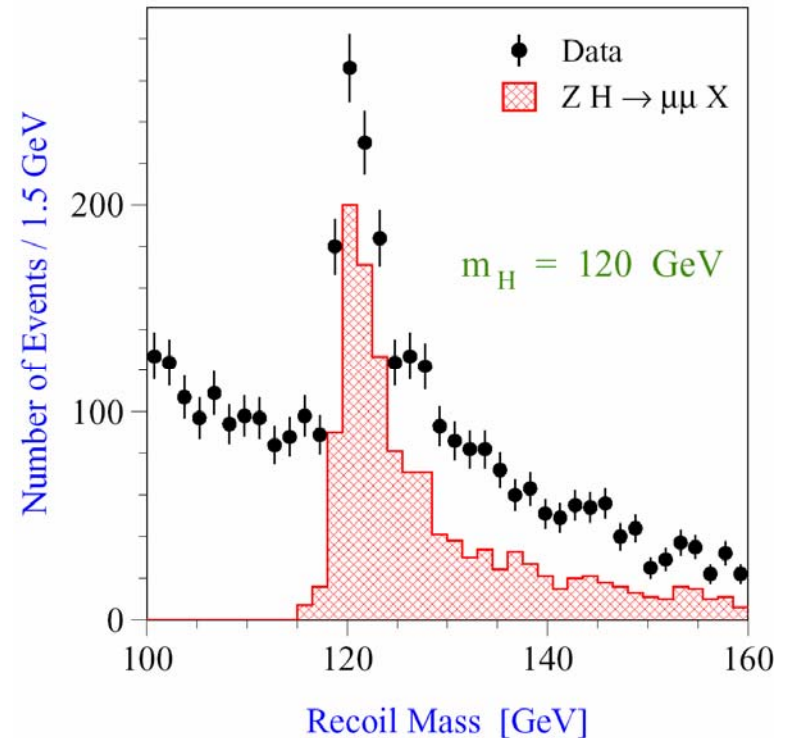
Evénements HZ



Résolutions attendues

– Pour $L=500\text{pb}^{-1}$, $\sqrt{s} = 350 \text{ GeV}$

m_H (GeV/c ²)	Canal	δm_H (MeV/c ²)
120	llqq	± 70
120	qqbb	± 50
120	Combinaiso	± 40
150	ll Masse de Recul	± 90
150	qqWW	± 130
150	Combinaiso	± 70

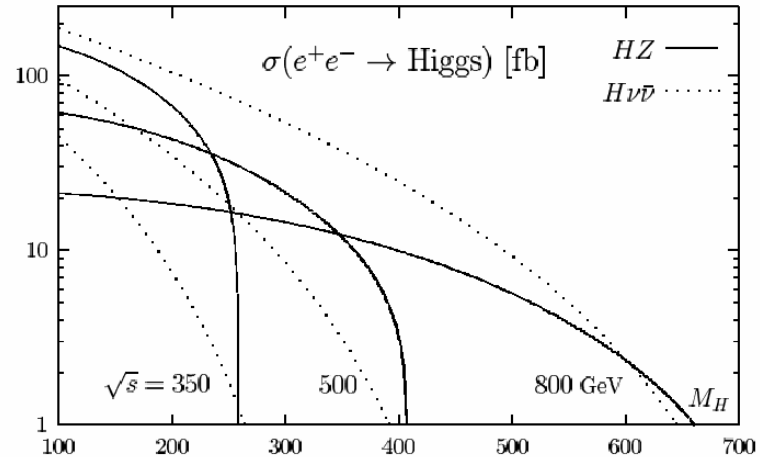


- S'effectue par la mesure des sections efficaces

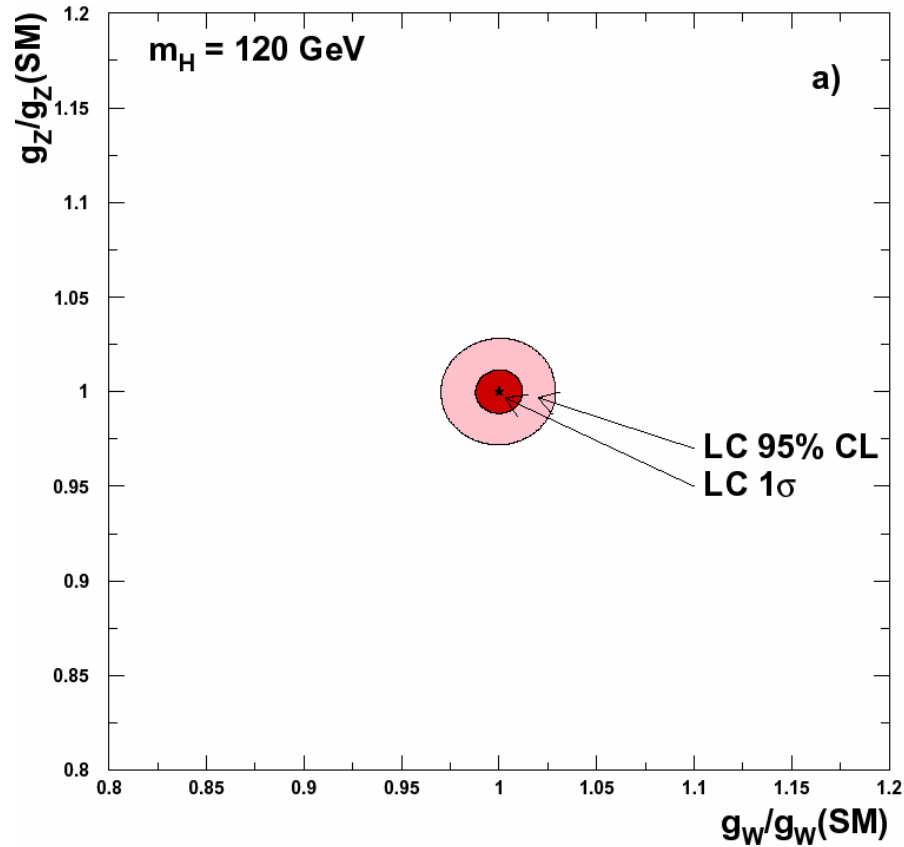
- $ee \rightarrow HZ$ pour g_{HZZ}
- $ee \rightarrow H\nu\nu$ pour g_{HWW}

- Mesure de $\sigma(HZ) \leftrightarrow$ analyse de la masse de recul

- Mesure de $\sigma(H\nu\nu) \leftrightarrow$ signature en $bb\nu\nu$ et énergie manquante

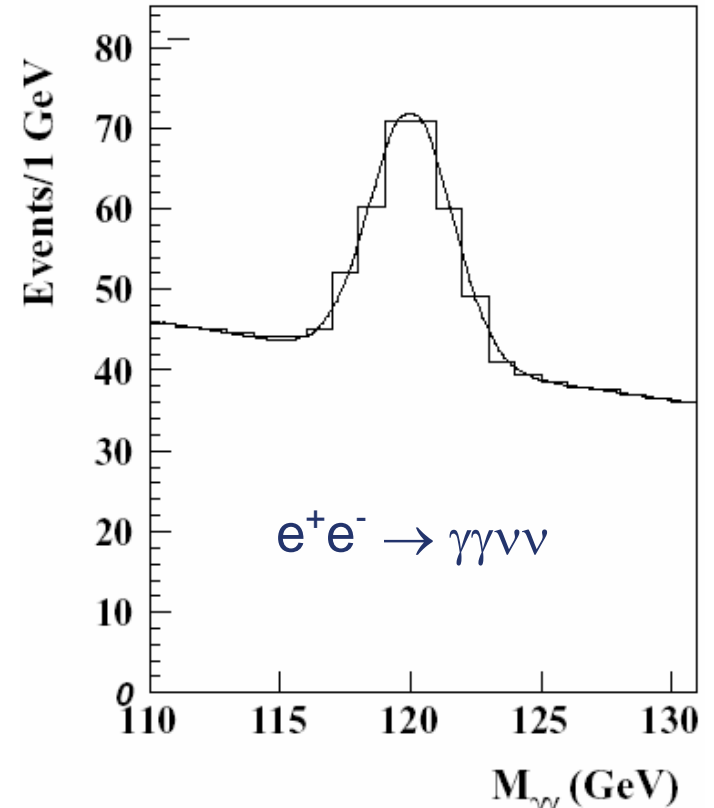


Processus	$m_H = 120 \text{ GeV}$	140 GeV	160 GeV
$\sigma(e^+e^- \rightarrow H^0 Z)$	$\pm 0,025$	$\pm 0,027$	$\pm 0,030$
$\sigma(e^+e^- \rightarrow H^0 \nu\nu)$	$\pm 0,028$	$\pm 0,037$	$\pm 0,130$
$H^0 \rightarrow WW^*$	$\pm 0,051$	$\pm 0,025$	$\pm 0,021$
$H^0 \rightarrow ZZ^*$			$\pm 0,169$

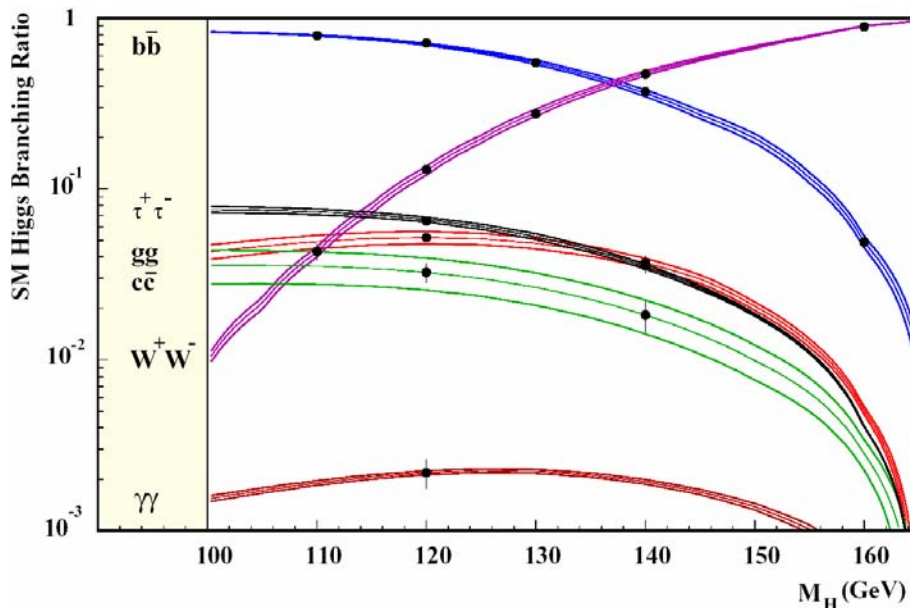


- Couplage aux photons accessible

- par $\gamma\gamma \rightarrow H$
 - Mesure de la section efficace $\gamma\gamma \rightarrow H$
 - Sélection d'événement bb dans un continuum $\gamma\gamma \rightarrow cc, \gamma\gamma \rightarrow bb$
- par les désintégrations $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - mesuré dans $ee \rightarrow \gamma\gamma\nu\nu$
 - Bruit de fond dominant : double bremsstrahlung $Z\gamma\gamma$.
- Précision attendue sur $Br(H \rightarrow \gamma\gamma)$ 26%
pour $m_H=120$ GeV, $L = 500\text{fb}^{-1}$
 $\sqrt{s}=350\text{GeV}$



- Les couplages aux fermions sont entièrement déterminés par les masses
- Une déviation peut être le signe d'un higgs supersymétrique léger h_0



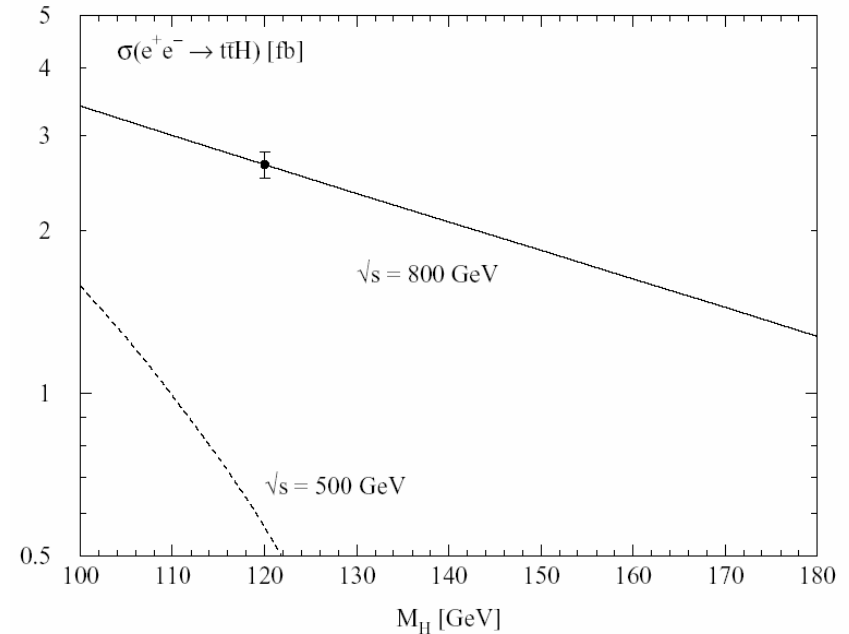
Canal	$m_H=120$ GeV	140GeV
$H^0/h^0 \rightarrow b \bar{b}$	$\pm 0,024$	$\pm 0,026$
$H^0/h^0 \rightarrow c \bar{c}$	$\pm 0,083$	$\pm 0,190$
$H^0/h^0 \rightarrow g g$	$\pm 0,055$	$\pm 0,140$
$H^0/h^0 \rightarrow \tau \tau$	$\pm 0,050$	$\pm 0,080$

Pour $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$, $L=500\text{fb}^{-1}$

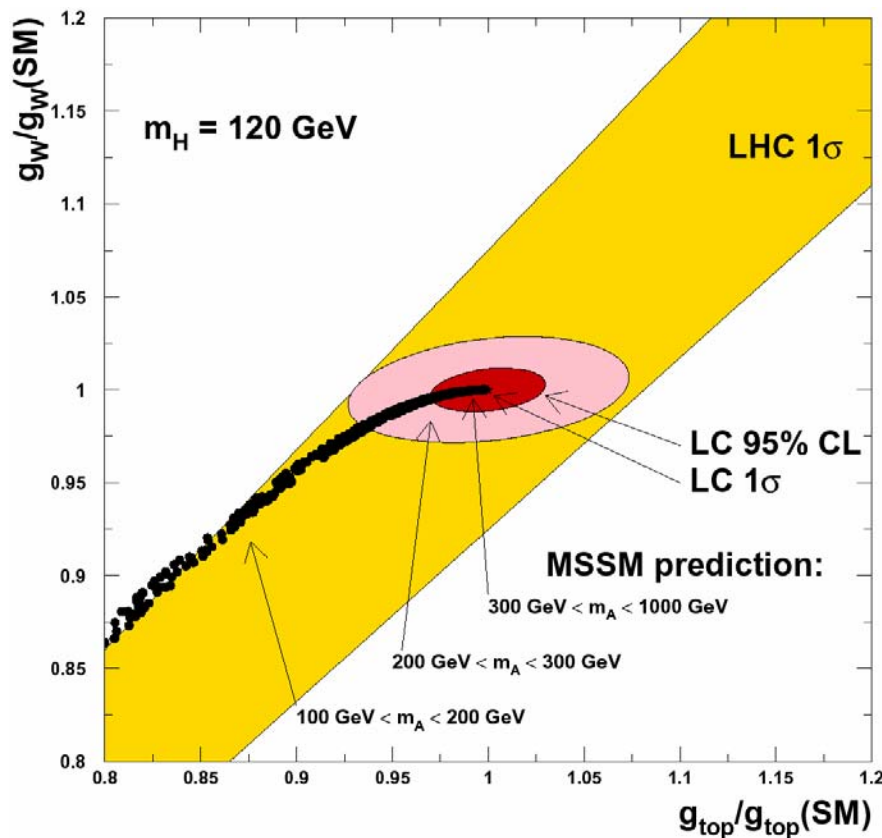
- Couplage le plus fort du MS :
 $g_{ttH}^2 = 0.5$

- Si $m_H < 2 m_t$
 - Utilisation du processus
 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$
 - @ 500GeV, $m_H=120\text{GeV}$:
 $\sigma \sim 0,5 \text{ fb}$
 - Difficultés :
 - Clusturisation
 - Bruits de fond
 - Précision 5,5% (stat.+sys)

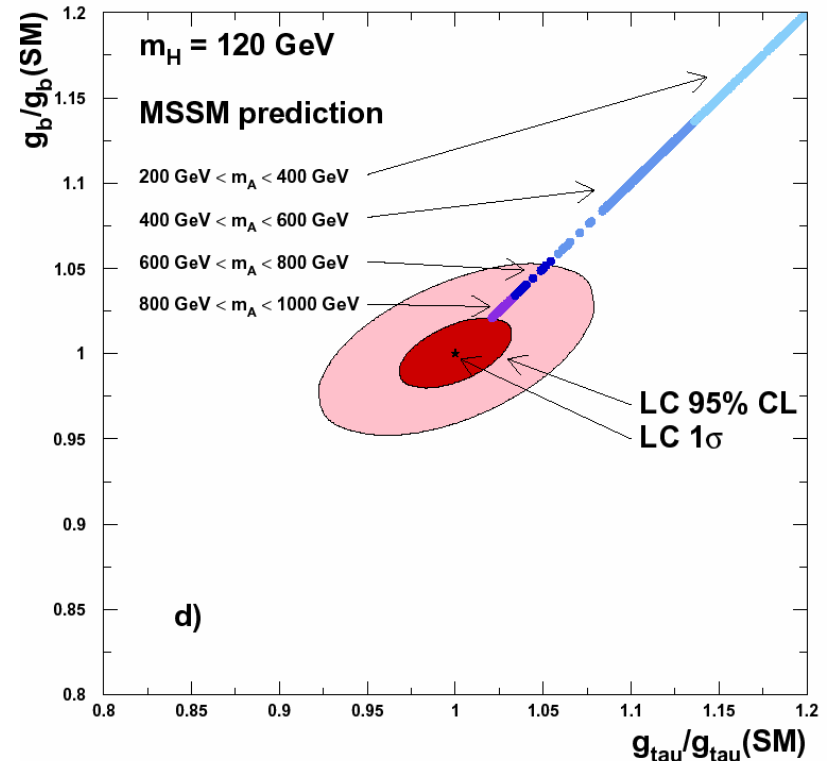
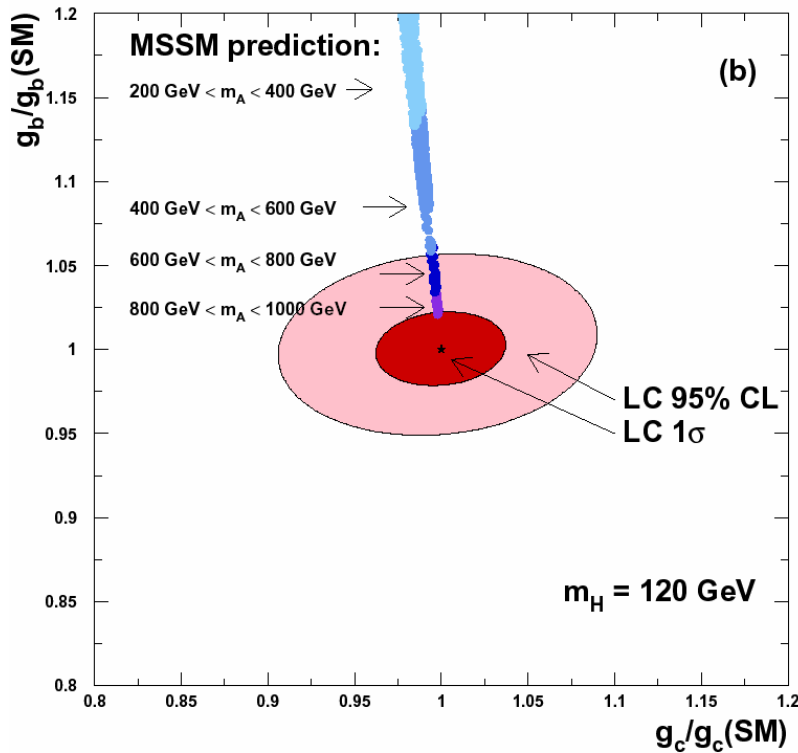
- Si $m_H > 2 m_t$
 - Utilisation du rapport
d'embranchement $H \rightarrow t\bar{t}$
 - Précision attendue 5% ($m_H = 400 \text{ GeV}/c^2$, $L=1000 \text{ fb}^{-1}$)



- g_{HWW} en fonction de g_{Htt}
- Comparaison de la précision attendue aux écarts prédits dans le MSSM
 - $L = 500 \text{ fb}^{-1}$
 - $m_H = 120 \text{ GeV}/c^2$



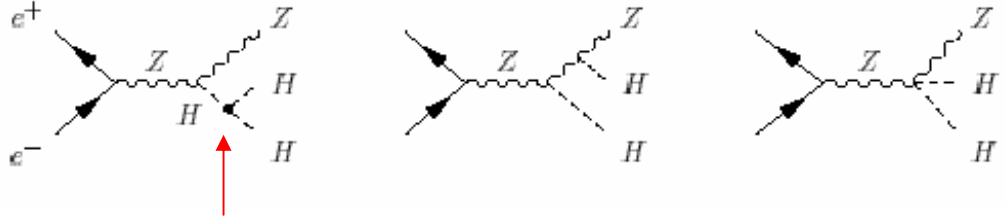
- g_{Hbb} en fonction de g_{Hcc} et g_{Hbb} en fonction de $g_{H\tau\tau}$
- Comparaison de la précision attendue aux écarts prédits dans le MSSM
 - $L = 500 \text{ fb}^{-1}$
 - $m_H = 120 \text{ GeV}/c^2$



HHZ

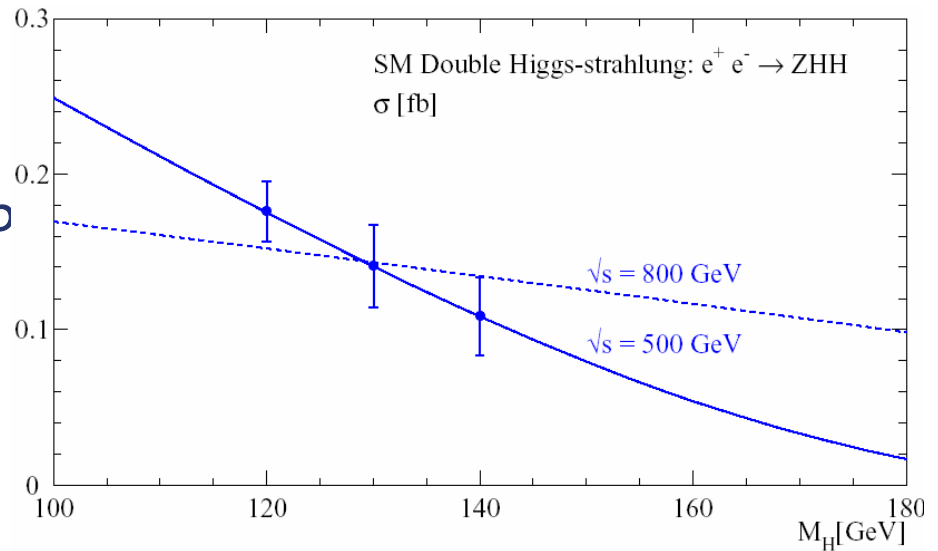
Motivation

- Constitue un test sévère du secteur de Higgs
- Mesure unique



Le canal HHZ

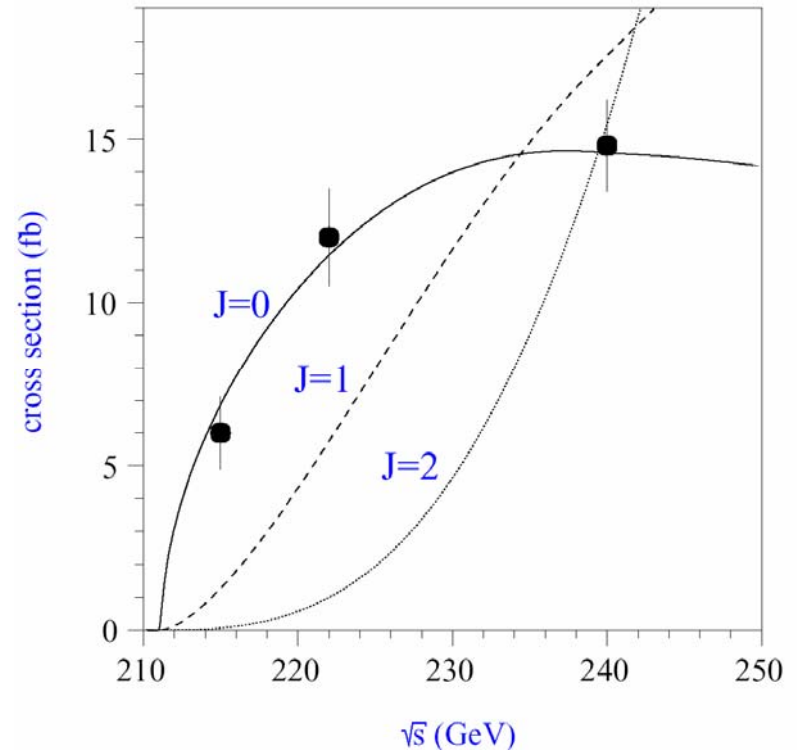
- Contribution d'un couplage trilineaire
- Bruits de fond irréductibles HHZ
- Bruits de fond standard importants



- Sélection des événements HHZ
 - Reconstruction
 - Événements à 6 jets
 - Utilisation du b-tag
 - Utilisation de la cinématique de l'état final
 - Efficacité de la sélection
 - $\varepsilon \sim 30 \%$
 - Nombre d'évts attendus : ~ 120 pour 2ab^{-1}

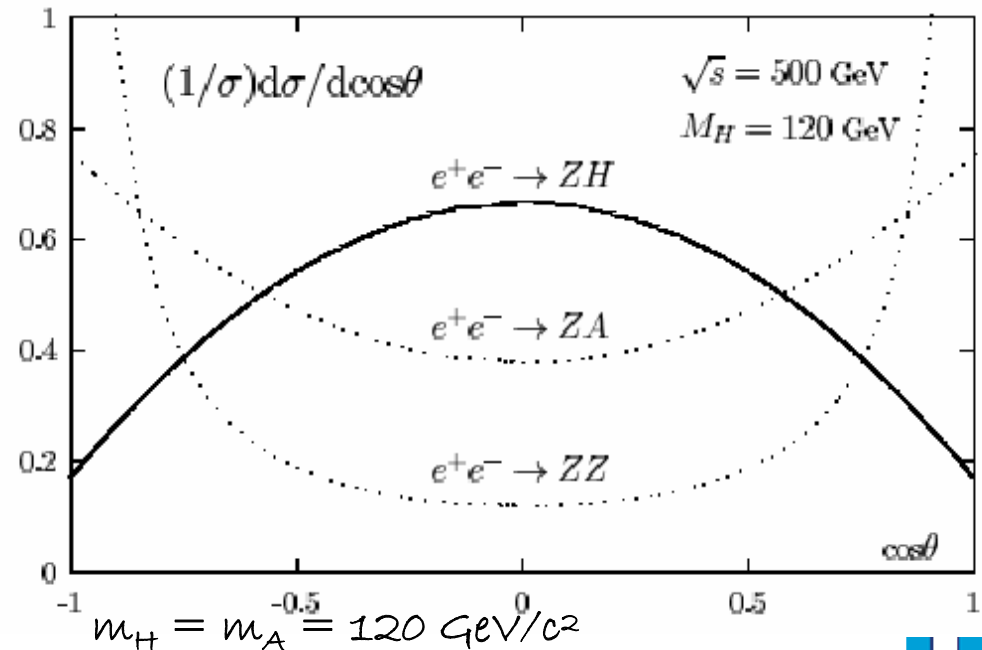
- Précision sur la mesure du couplage
 - $\lambda \sim 18 \%$ @ $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$

- La pente de la section efficace d'un processus $e^+e^- \rightarrow ZX$ pour un boson X de spin J dépend fortement de J
 - $J=0$: $\sigma_{\text{seuil}} \propto \beta_{ZX}$
 - $J>0$: $\sigma_{\text{seuil}} \propto (\beta_{ZX})^k$ $k>1$
- Le spin sera mesuré en mesurant le comportement de la section eff. HZ au seuil
- Précision attendue :
 - Pour 3 énergies, la luminosité requise est 20 fb^{-1}



- Le spin du Higgs peut être mesuré à ILC dans le continuum
 - Comparaison de la dépendance angulaire de la section eff. du processus HZ à celle du processus ZZ
 - Permet de distinguer un Higgs standard H^0 (0^{++}) du Higgs SSM A^0 (0^{-+}) ou d'un mélange des deux (Φ , violant CP).

- MS (ZH):
 - $\propto \sin^2 \theta_Z$
- MSSM (ZA)
 - $\propto (1 + \cos^2 \theta_Z)$



● Higgs violant CP

– Paramètre de mélange libre η

- $M_{ZH \text{ mélange}} = M_{ZH} + i\eta M_{ZA}$
- Asymétrie forward-backward
- Modifie la distribution angulaire des événements $Z\Phi$ par rapport à ZH

– Mesure de η

- Analyse basée sur les produits du Z uniquement
- $m_H = 120 \text{ GeV}/c^2$, $L = 500 \text{ fb}^{-1}$, $\sqrt{s} = 350 \text{ GeV}$
- $\delta \eta = \pm 0,032$

● Higgs chargés :

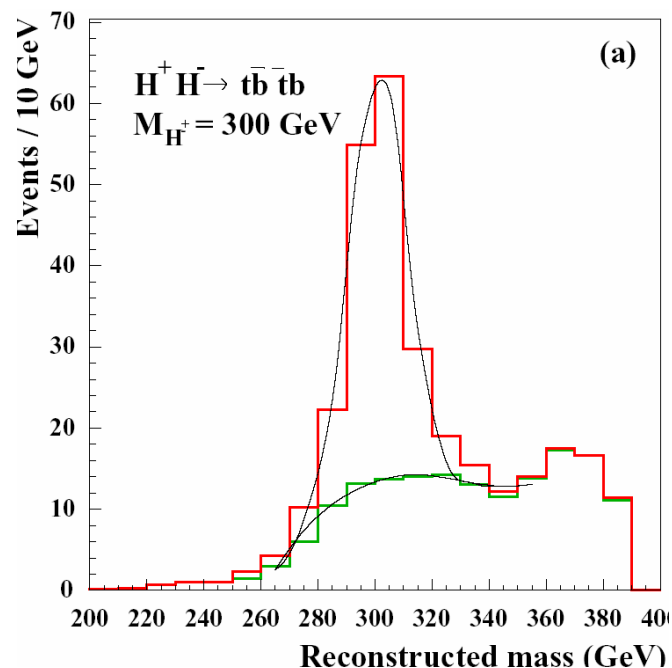
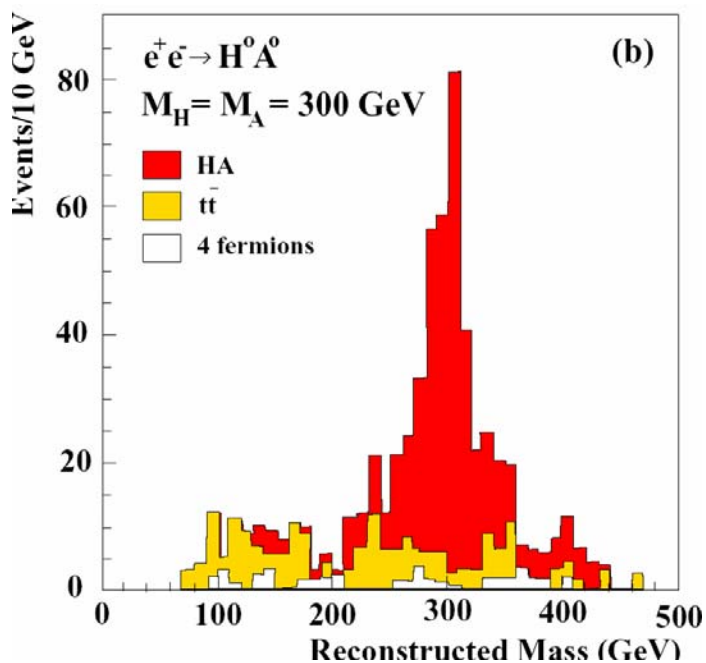
- Canaux de production :
 - $e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow t\bar{t}b\bar{b}$
 - $e^+e^- \rightarrow H^+H^- \rightarrow W^+h^0W^+h^0$ ($m_{H^\pm} > m_t$)
- Sélection d'événements :
 - 8 jets dans l'état final
 - b-tag et contrainte de masse
 - Nb d'evts attendus = 120 (pour 500 fb^{-1})
- Résolution sur la masse : $\delta m_H \sim 1 \text{ GeV}/c^2$ ($L=500 \text{ fb}^{-1}$)

● Higgs neutres :

- Canal de production :
 - $e^+e^- \rightarrow H^0A^0 \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$:
- Sélection avec b-tag
- Résolution attendue sur la masse :
 $\delta m_A/m_A \sim 0,3\%$

Pour $\sqrt{s} = 800 \text{ GeV}$, $L=500 \text{ fb}^{-1}$

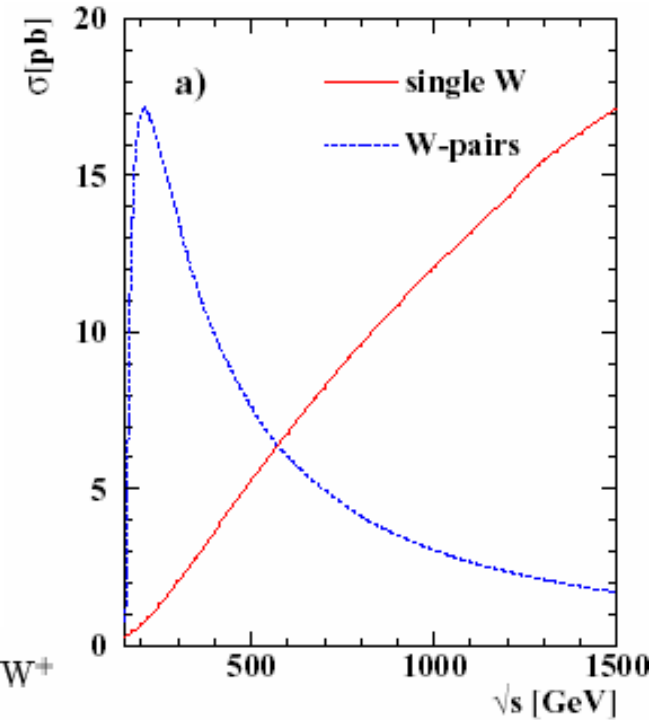
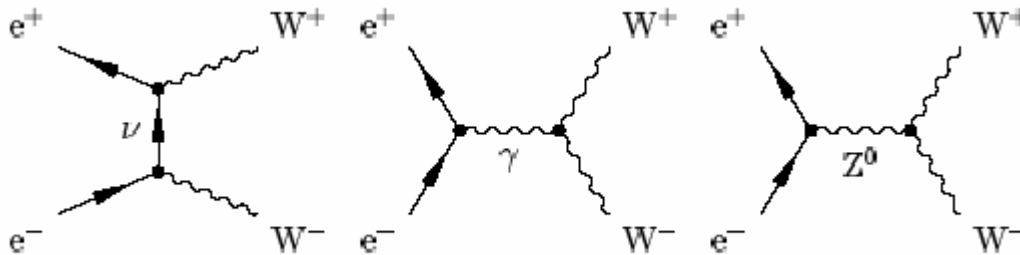




- Introduction
- Le Higgs dans le Modèle Standard
- Les mesures de précision électrofaibles aujourd'hui
- Observation directe du Higgs à ILC
- Mesures de précision à ILC
 - ↳ Mesure de m_W
 - ↳ Mesure de m_{top}
 - ↳ Contrainte du MS
- Choix du contexte expérimental
- Conclusion

● Processus de production

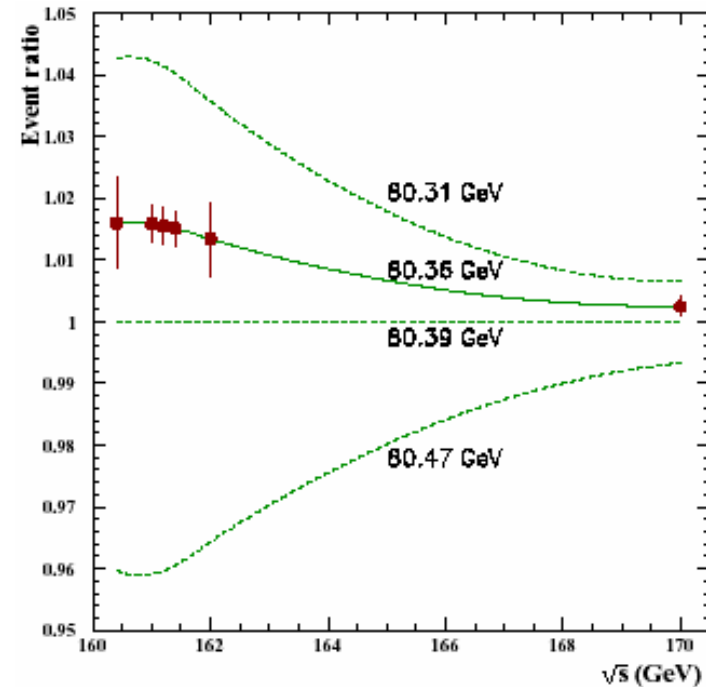
- Production de paires de W
 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$
 - Diminue en $1/s$
- Production de single- W $e^+e^- \rightarrow W\bar{\nu}_e$
 - Augmente en $\log(s)$
- Sections efficaces proches aux énergies d'ILC



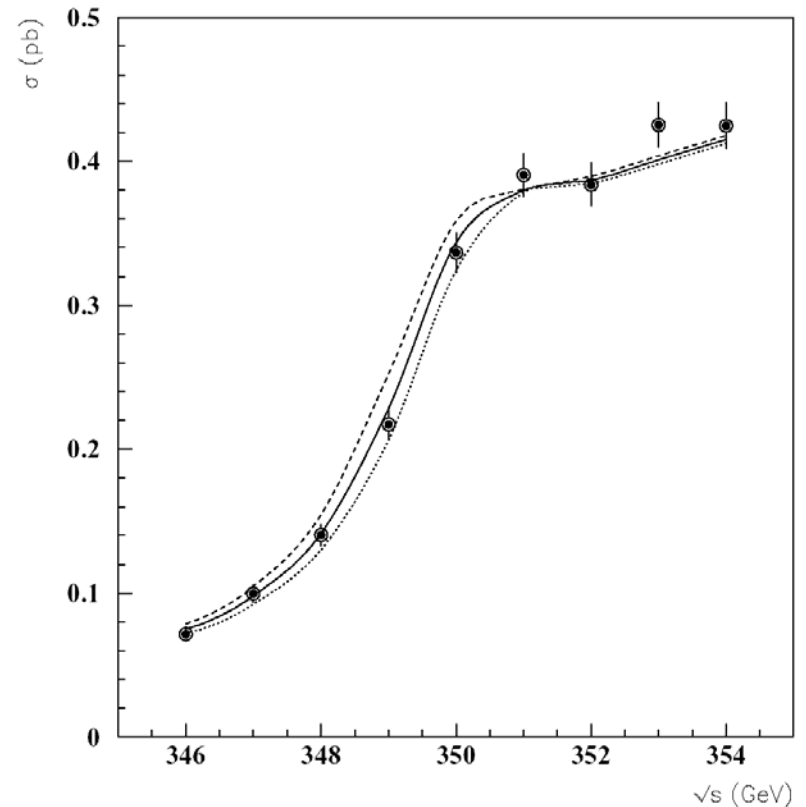
- Mesure de m_W
 - La mesure optimale s'effectue au seuil de production des paires de W
 - Exploite la dépendance $\sigma \leftrightarrow m_W$
 - Avec 100fb^{-1} (1 an)
 - $\delta m_W = 6 \text{ MeV}/c^2$

- **Avantage :**

- La mesure au seuil ne dépend pas d'une nouvelle physique ou d'un couplage trilineaire anormal
- La mesure au seuil est robuste



- Production de top au seuil (de 340GeV à 350GeV)
 - Mesure de m_t au seuil
 $ee \rightarrow tt$
- Canal de désintégration dominant
 $t \rightarrow b W^+$
- Précision attendue pour $L=100\text{fb}^{-1}$
 $\delta m_t \sim 100 \text{ MeV}/c^2$





Resume des mesures de precision a

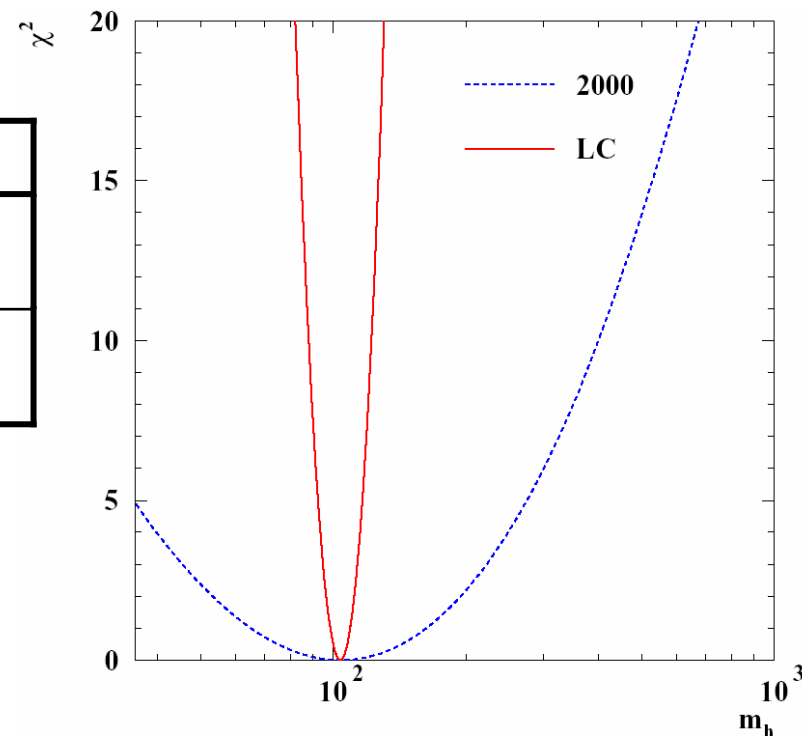
ILC

Paramètres	m_H	Lumi., \sqrt{s}	Précision
m_H	120 GeV/c ²	500 fb ⁻¹ 350 GeV	±40 MeV/c ²
m_H	150 GeV/c ²	500 fb ⁻¹ 350 GeV	± 70 MeV/c ²
$\Gamma_{H \rightarrow WW}$	120 GeV/c ²	500 fb ⁻¹ 350 GeV	± 0,061
Γ	160 GeV/c ²	500 fb ⁻¹ 500 GeV	± 0,134
Spin	120 GeV/c ²	30 fb ⁻¹ \sqrt{s} variable	Déterminé
η (Φ violant CP)	120 GeV/c ²	500 fb ⁻¹ 350 GeV	± 0,032
g_{HWW}	120 GeV/c ² 140	500 fb ⁻¹ 500 GeV	± 0,012 ± 0,020
g_{HZZ}	120 GeV/c ² 140	500 fb ⁻¹ 500 GeV	± 0,012 ± 0,013
g_{Htt}	120 GeV/c ² 140	1000 fb ⁻¹ 800 GeV	± 0,030 ± 0,061
g_{Hbb}	120 GeV/c ² 140	500 fb ⁻¹ 500 GeV	± 0,022 ± 0,022
g_{Hcc}	120 GeV/c ²	500 fb ⁻¹ 500 GeV	± 0,037
$g_{H\tau\tau}$	120 GeV/c ²	500 fb ⁻¹ 500 GeV	± 0,033



Paramètres	Lumi., \sqrt{s}	Précision
m_W	100 fb ⁻¹ variable	± 6 MeV/c ²
m_{top}	100 fb ⁻¹ variable	± 100 MeV/c ²

- Exploitation des mesures de précision d'ILC dans la contrainte du Modèle Standard

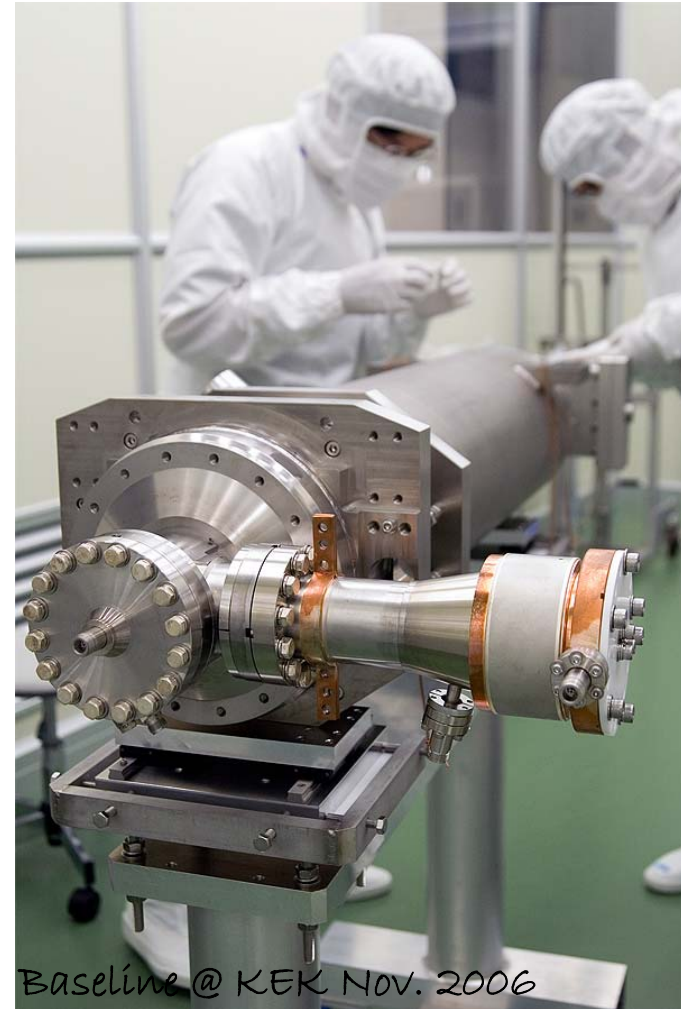


Ces mesures peuvent être effectuées sans hypothèse de modèle

- Introduction
- Le Higgs dans le *Modèle Standard*
- Les mesures de précision électrofaibles aujourd'hui
- Observation directe du Higgs à ILC
- Mesures de précision à ILC
- Choix du contexte expérimental
 - Le collisionneur e^+e^-
 - Les concepts de détecteurs
 - L'acquisition
- Conclusion

- Le collisionneur
 - Collisions e^+e^-
 - Beamstrahlung spread
 - 2,4 – 3,7%
 - Polarisation
 - e^- 80% e^+ 60%
 - Collisions ajustables en énergie
 - 500 GeV à 1 TeV
 - Option GigaZ
 - Luminosité
 - 3 à 5 ab^{-1}
 - Collisions $\gamma\gamma$, $e\gamma$, e^+e^-

- R&D très active



- Concepts de détecteurs établis en fonction de la physique :
 - Pour les mesures de précision et la compréhension d'une nouvelle physique
 - $Zh \rightarrow Zll$ Bonne résolution sur les impulsions
 - $Br(h \rightarrow bb \ cc \ gg)$ Bon vertexing et bonne identification des saveurs
 - $Zhh \rightarrow qq \ bb \ bb$ Bonne calorimétrie, particle flow
 - $ee \rightarrow vvhh$ Bonne herméticité
 - Pour le potentiel de découverte
 - Voir une physique non prédite \Rightarrow pas de trigger

- ILC offrira une opportunité unique de mesurer avec précision les propriétés du Higgs et du secteur électrofaible
- ILC possède une souplesse qui lui permettra de s'adapter à des données provenant d'autres expériences
- ILC fournira des mesures indépendantes des modèles

