

Le boson de Higgs au Collisionneur Linéaire

A stylized illustration of particle collisions, featuring several yellow and red lines representing particle trajectories and energy deposits, set against a light blue background.

Djamel BOUMEDIENE
LPC Clermont-Ferrand



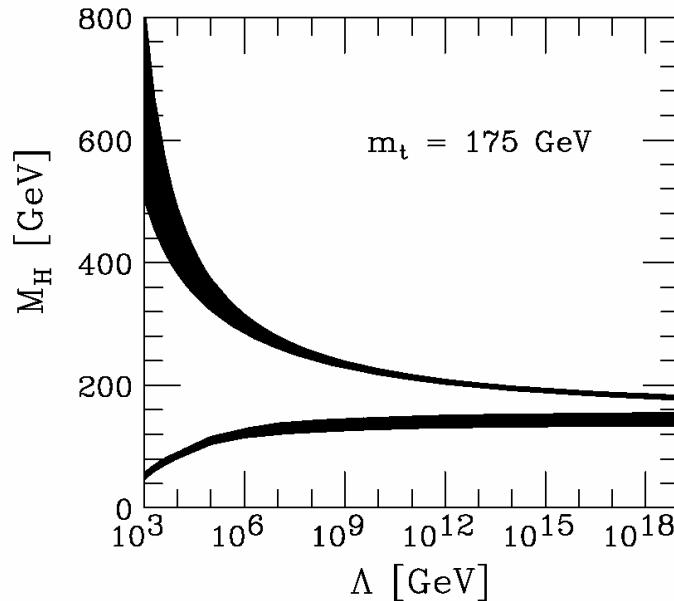
- Introduction
- Le Higgs dans le Modèle Standard
- Les mesures de précision électrofaibles aujourd’hui
- Observation directe du Higgs à ILC
- Mesures de précision électrofaibles à ILC
- Choix du contexte expérimental
- Conclusion

- Dans le MS, le sécteur de Higgs est un doublet de champs scalaires
- Sur les 4 degrès 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 \rightarrow 5 bosons physiques
 - h^0, A^0, H^0, H^\pm
 - Avec A^0 ($CP = -1$)

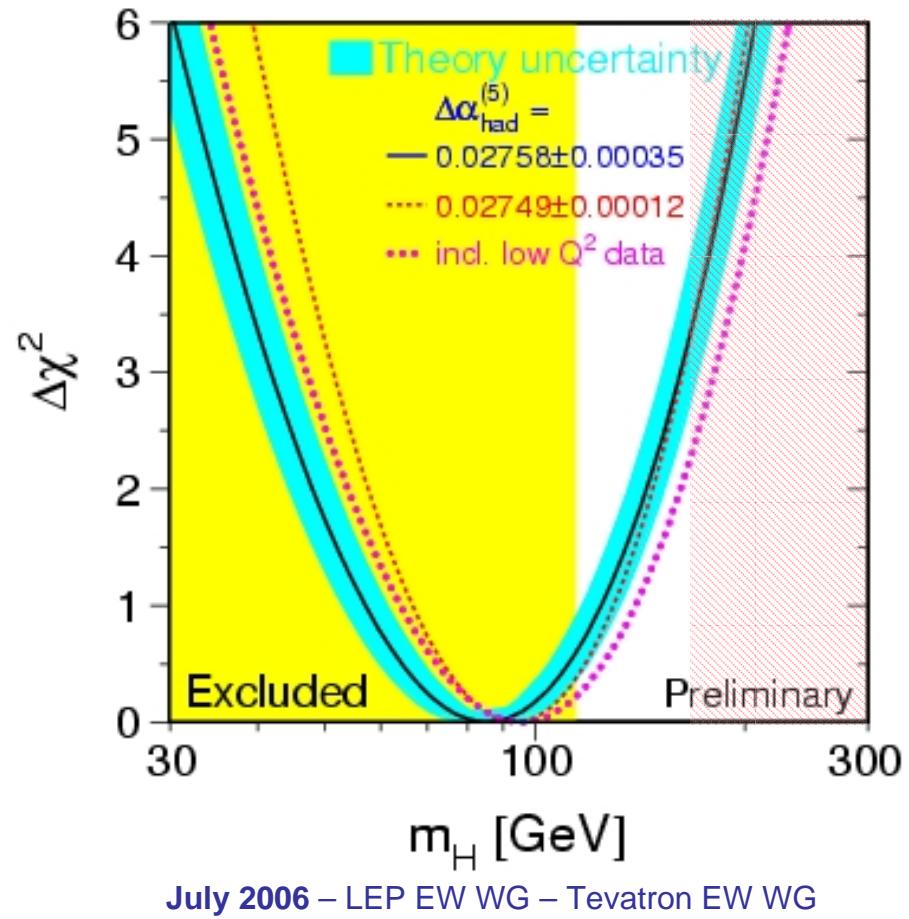
- Introduction
- Le Higgs dans le Modèle Standard
- Les mesures de précision électrofaibles aujourd’hui
 - Limite actuelle sur m_H
 - Mesure de m_W
 - Mesure de m_t
 - Scénarios à considérer
- Observation directe du Higgs à ILC
- Mesures de précision à ILC
- Choix du contexte expérimental
- Conclusion

Limite actuelle sur m_H

$$m_h = 85 \begin{array}{l} +39 \\ -28 \end{array} \text{ GeV/c}^2$$

$$m_h > 114 \text{ GeV/c}^2 \text{ CL 95\%}$$
$$m_h < 166 \text{ GeV/c}^2 \text{ CL 95\%}$$

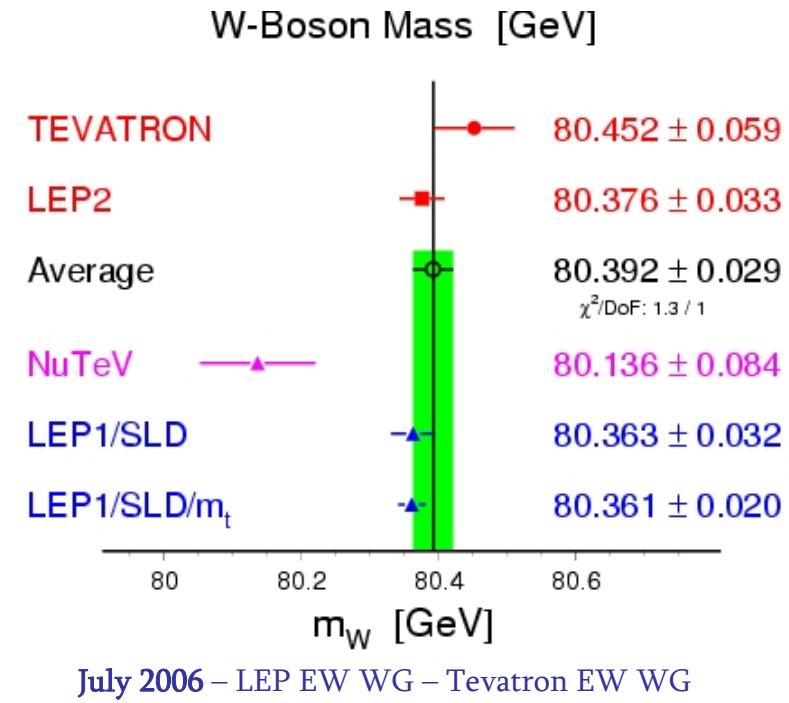
- Les propriétés du Higgs standard + les mesures de précision électrofaible \rightarrow Higgs léger



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

→ 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



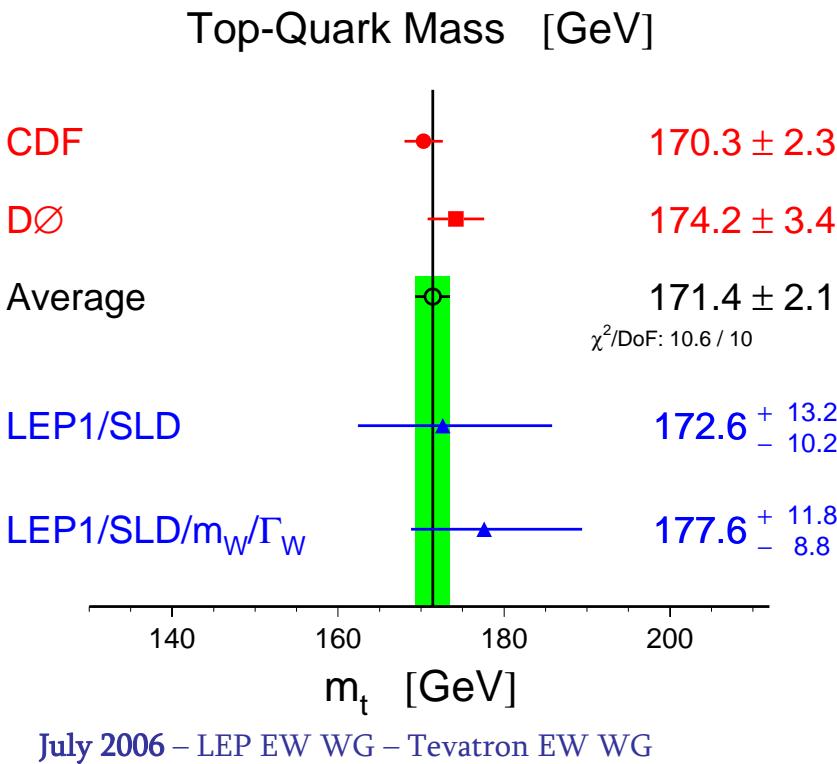
- Mesure de m_t exclusivement au Tévatron

$$\delta m_t = 2.1 \text{ GeV}/c^2$$

- Améliorations attendues :

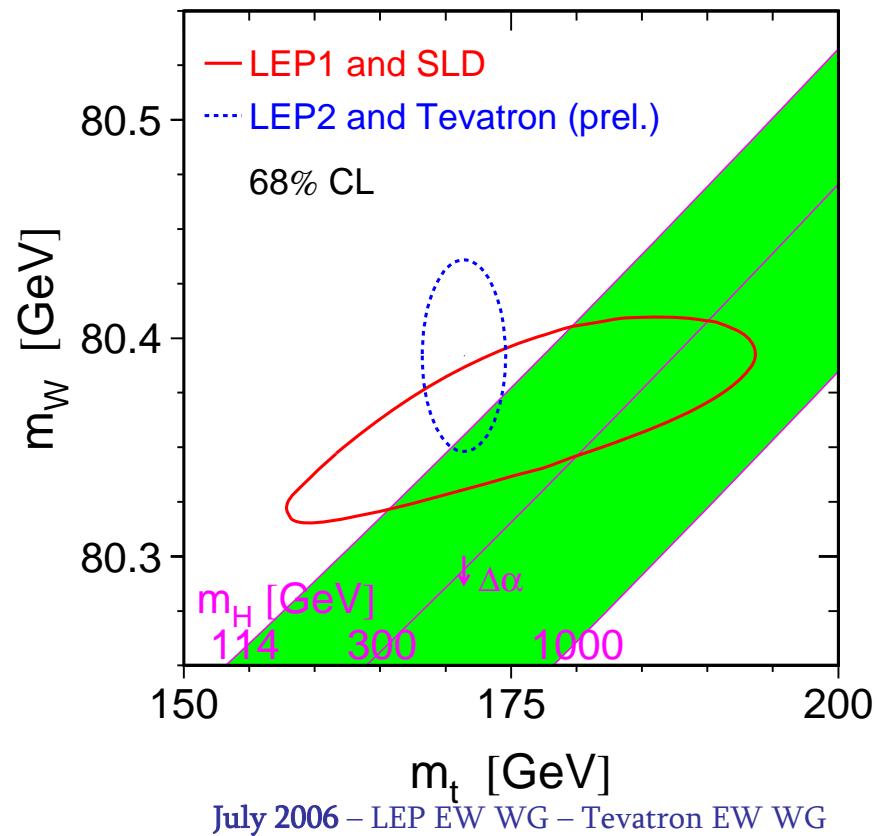
δm_t sera baissée à ~ 1.6 GeV/ c^2 avec les prochaines mesures

- Le test du MS nécessite une meilleure précision sur m_t



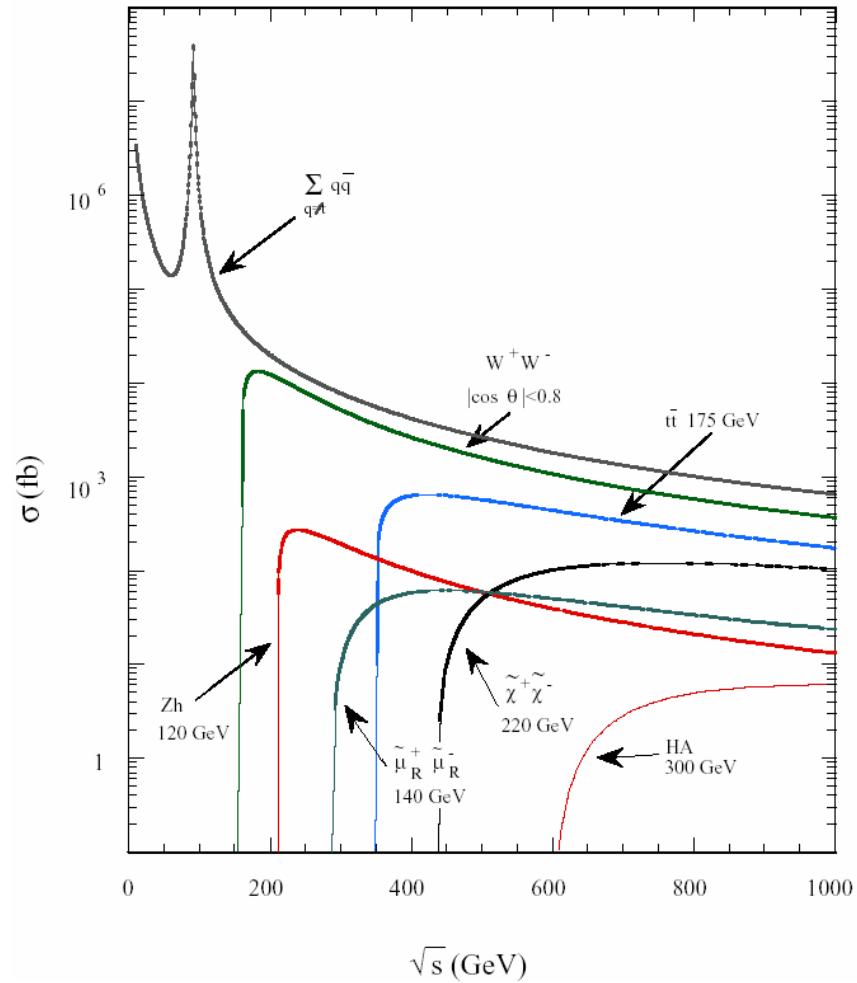
Scénarios à envisager

- 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 $q\bar{q}$)
- 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/c 2) le seuil Zh pour l'étude du Higgs
 - Exemple : le seuil WW pour la mesure m_W avec des bruits de fonds connus

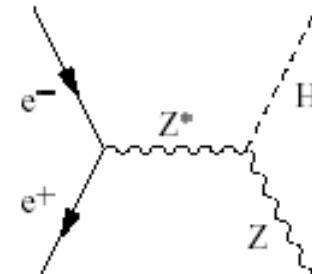


- Processus dominants

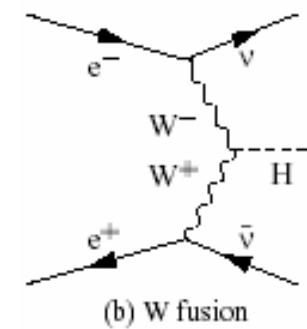
- a) Higgsstrahlung
 - $\sigma \propto 1/s$ \Rightarrow dominant à basses énergies
- b) Fusion de W
 - $\sigma \propto \log(s/m_h^2)$ \Rightarrow dominant à haute énergie
- c) Fusion de Z
 - Pénalisé par le rapport CC / CN
 - σ inférieure d'un ordre de grandeur à Hvv
 - Dans le cas de collisions e^-e^- même section que pour tout e^+e^-

- Nombre d'événements attendus

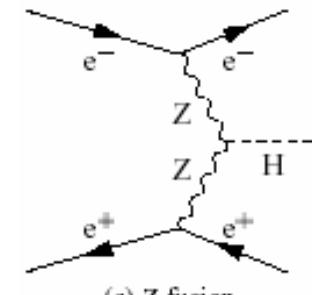
- À $\sqrt{s} = 350$ GeV $m_h = 120$ GeV, $L = 500\text{fb}^{-1}$ 80 000 higgs attendus



(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 , $\tau\tau$

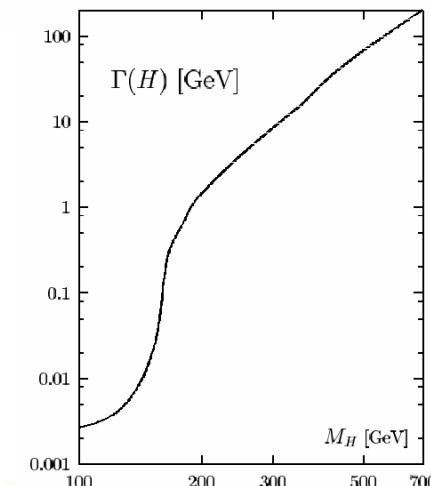
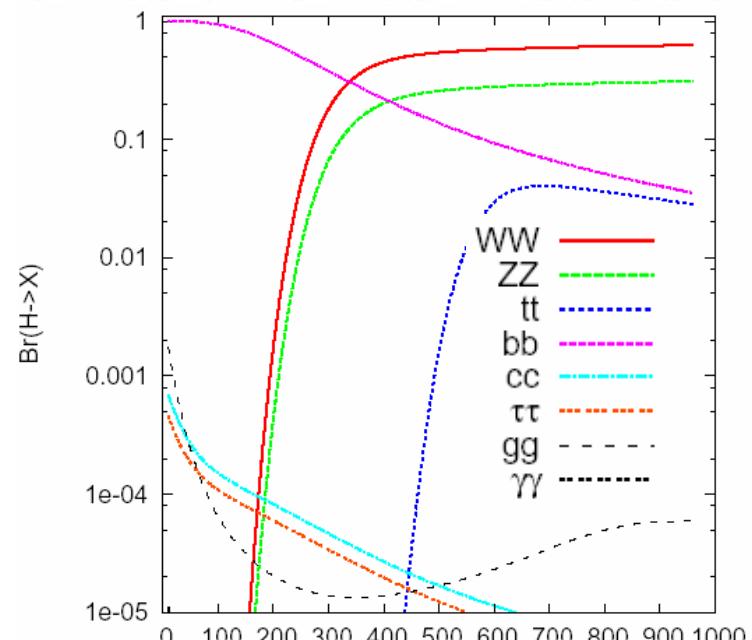
- Entre 140 et seuil ZZ

- $H \rightarrow WW^*$

- Entre le seuil ZZ et tt

- $H \rightarrow WW$ et $H \rightarrow ZZ$

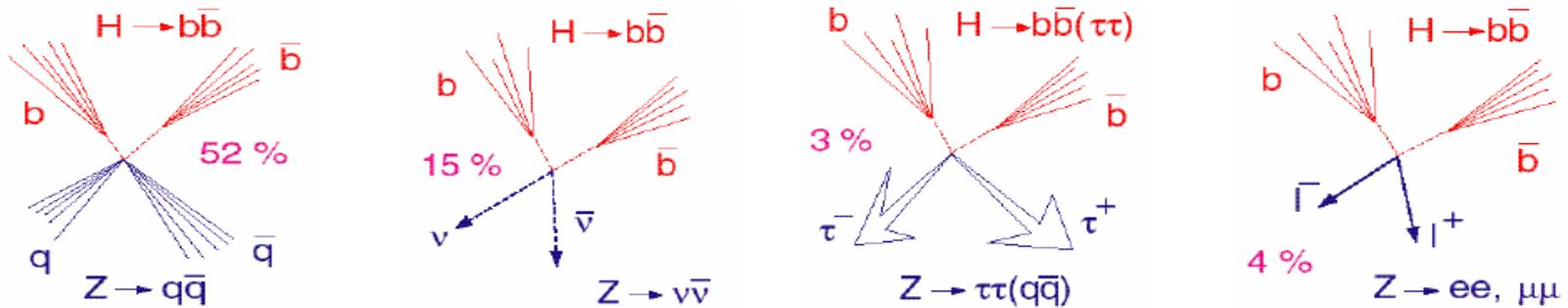
- Largeur totale du Higgs varie fortement avec m_H : ~ 10 MeV à 1 GeV (pour m_H de 140 à 200 GeV/c^2)



- 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

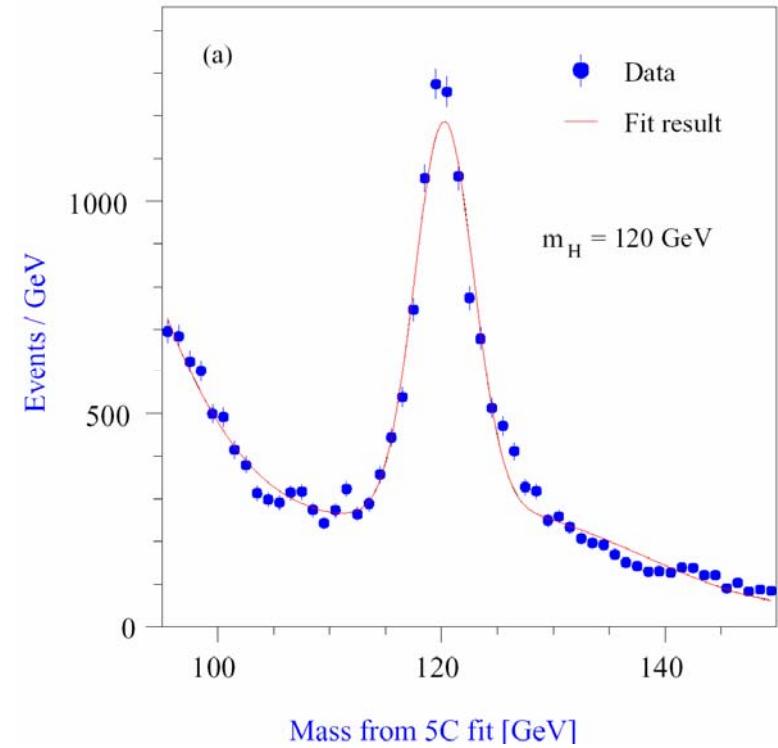
$$e^+e^- \rightarrow HZ$$

- 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

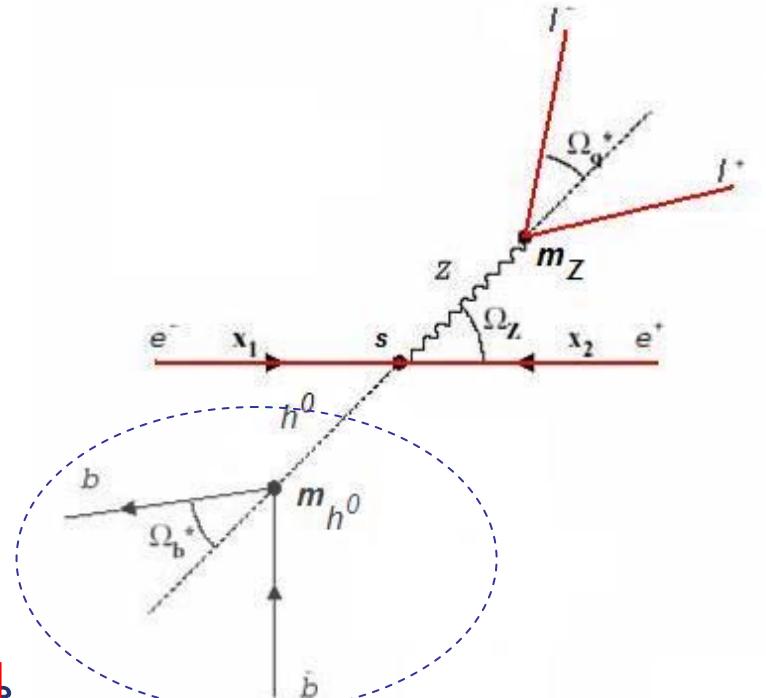
- Id. du Z
- b-tag du Higgs
- Canal à 4 jets : déterminée par ajustement cinématique à 5 contraintes
 - conservation Energie-Impulsion
 - connaissance de m_Z
 - Résolution attendue $\sim 2 \text{ GeV}/c^2/\text{événement}$
- Canal leptonique : signature claire
 - Résolution attendue $\sim 1,5 \text{ GeV}/c^2/\text{événement}$



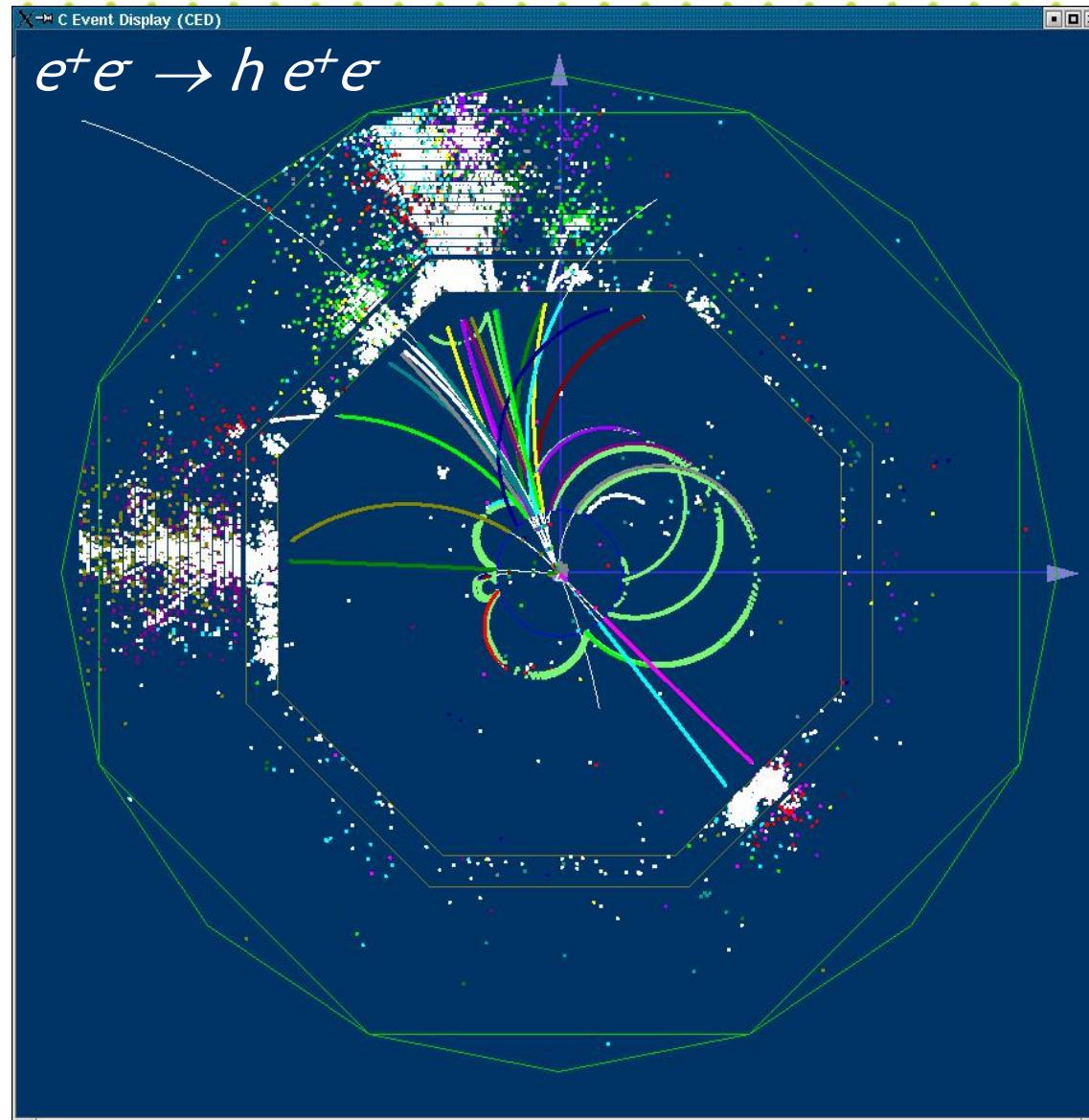
- Mesure de la masse de recul du Higgs
(*recoil mass*)

- 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

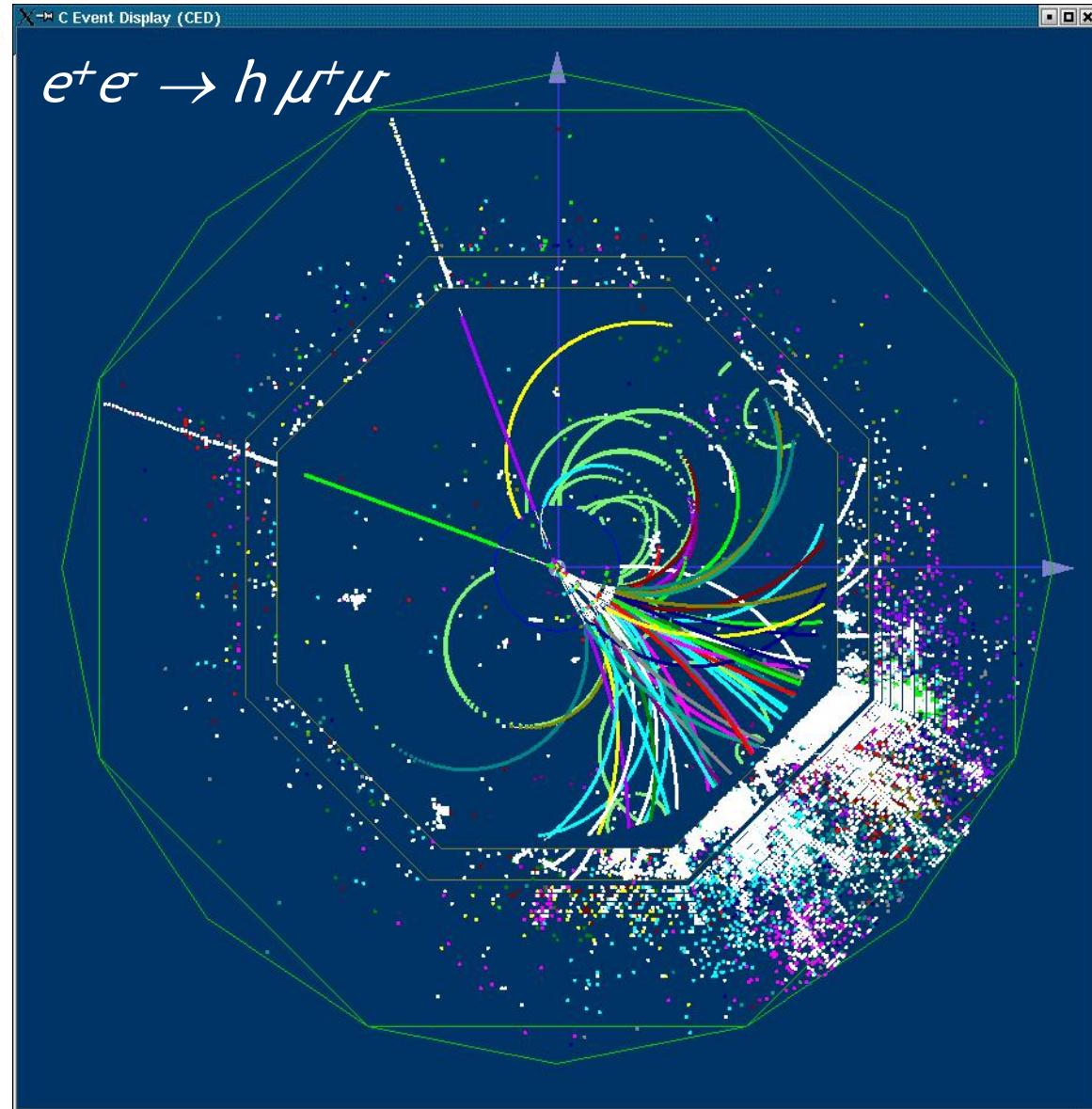
- Avantage :
 - Mesure indépendante de toute hypothèse sur la désintégration du Higgs



Evénements HZ



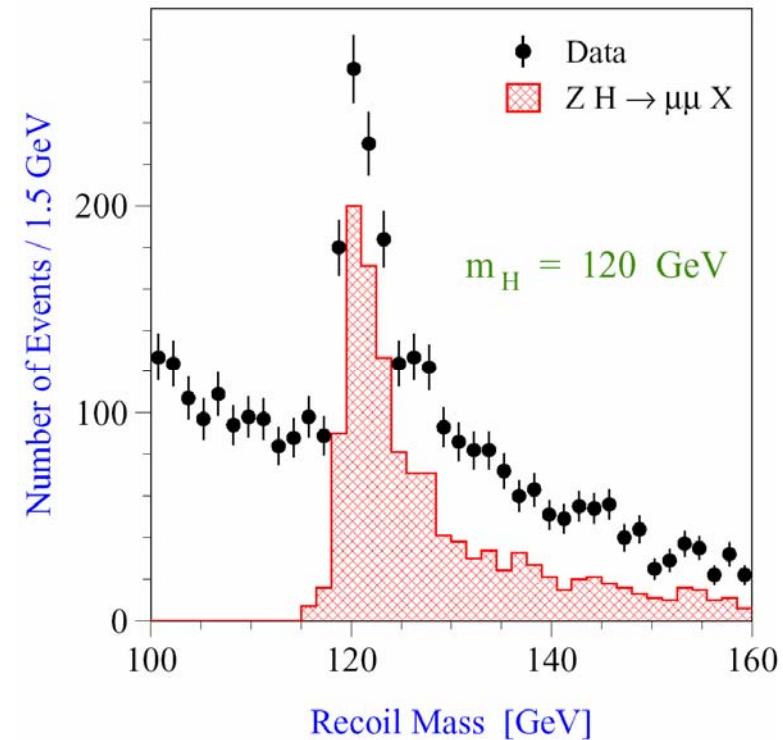
Evénements HZ



➊ Résolutions attendues

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

$m_H (\text{GeV}/c^2)$	Canal	$\delta m_H (\text{MeV}/c^2)$
120	$llqq$	± 70
120	$qqbb$	± 50
120	Combinaison	± 40
150	ll Masse de Recul	± 90
150	$qqWW$	± 130
150	Combinaison	± 70

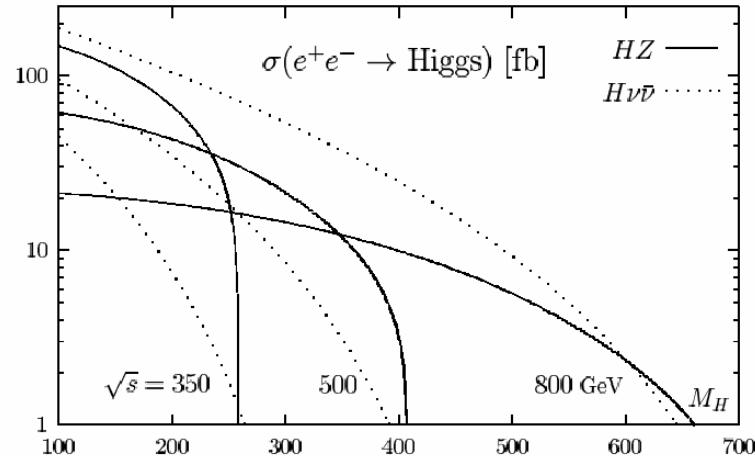


- S'effectue par la mesure des sections efficaces

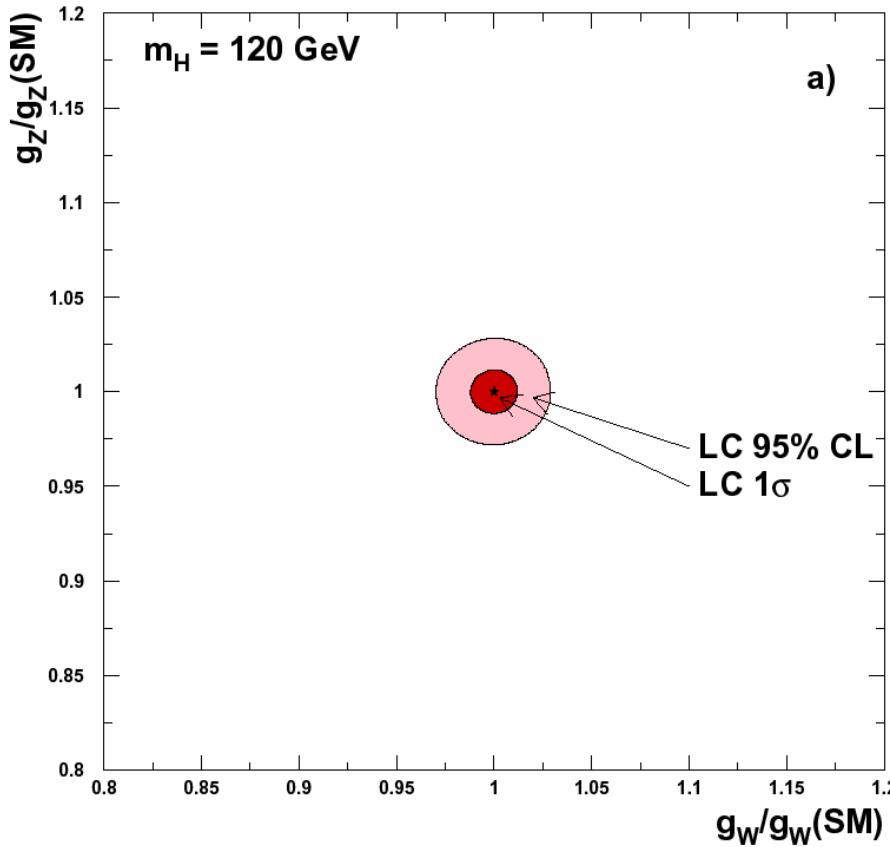
- $ee \rightarrow HZ$ pour g_{HZZ}
- $ee \rightarrow Hvv$ pour g_{HWW}

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

- Mesure de $\sigma(Hvv) \leftrightarrow$ signature en $bbvv$ et énergie manquante

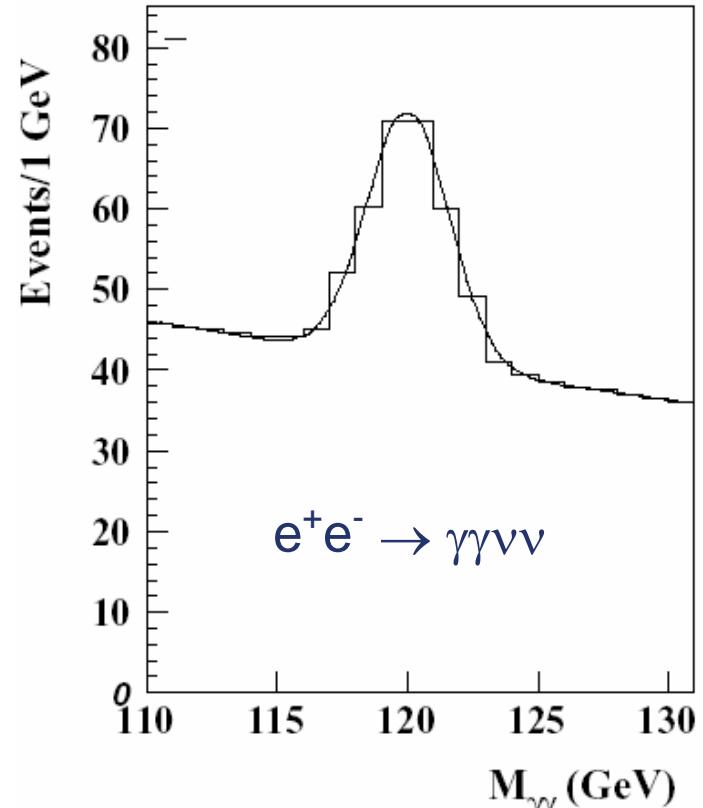


Processus	$m_H = 120 \text{ GeV}$	140 GeV	160 GeV
$\sigma(e^+e^- \rightarrow H^0 Z)$ $\sigma(e^+e^- \rightarrow H^0 vv)$	$\pm 0,025$ $\pm 0,028$	$\pm 0,027$ $\pm 0,037$	$\pm 0,030$ $\pm 0,130$
$H^0 \rightarrow WW^*$ $H^0 \rightarrow ZZ^*$	$\pm 0,051$	$\pm 0,025$	$\pm 0,021$ $\pm 0,169$



● Couplage aux photons accessible

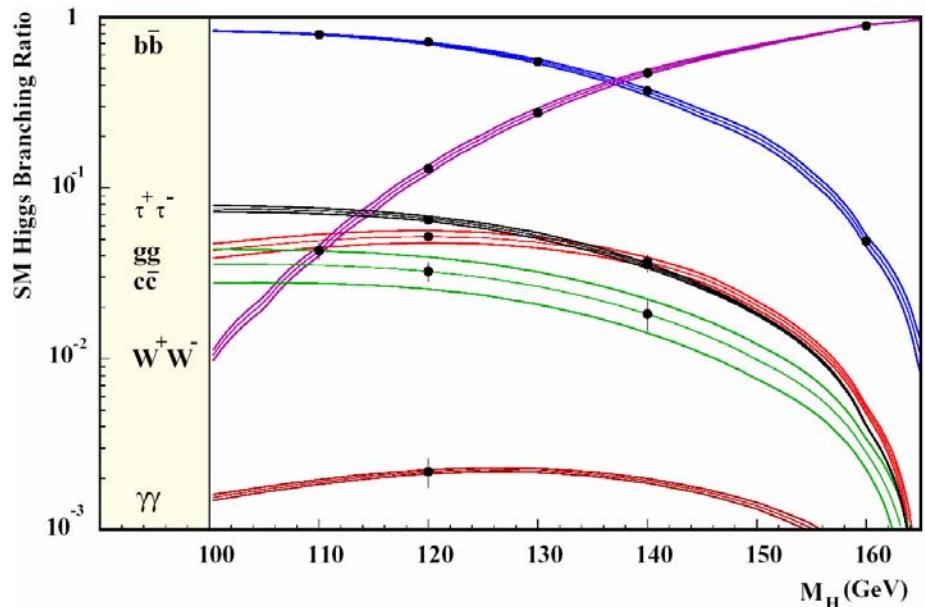
- par $\gamma\gamma \rightarrow H$
 - Mesure de la section efficace $\gamma\gamma \rightarrow H$
 - Sélection d'événement bb dans un continuum $\gamma\gamma \rightarrow cc, \gamma\gamma \rightarrow bb$
- par les désintégrations $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - mesuré dans $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\nu\nu$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



Couplages du Higgs aux fermions

- 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
$H^0/h^0 \rightarrow b \bar{b}$	$\pm 0,024$	$\pm 0,026$
$H^0/h^0 \rightarrow c \bar{c}$	$\pm 0,083$	$\pm 0,190$
$H^0/h^0 \rightarrow g g$	$\pm 0,055$	$\pm 0,140$
$H^0/h^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$	$\pm 0,050$	$\pm 0,080$

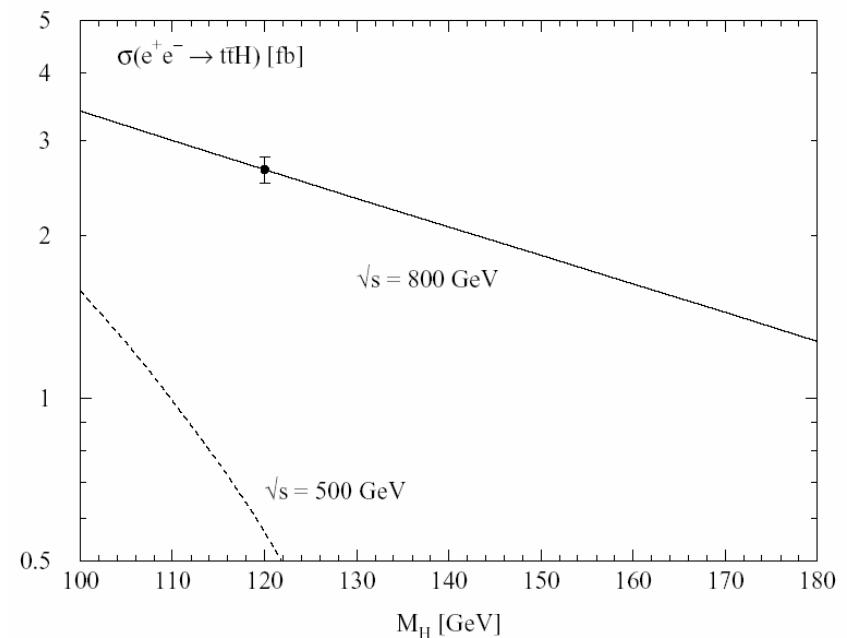


Pour $\sqrt{s} = 500$ GeV, $L=500\text{fb}^{-1}$

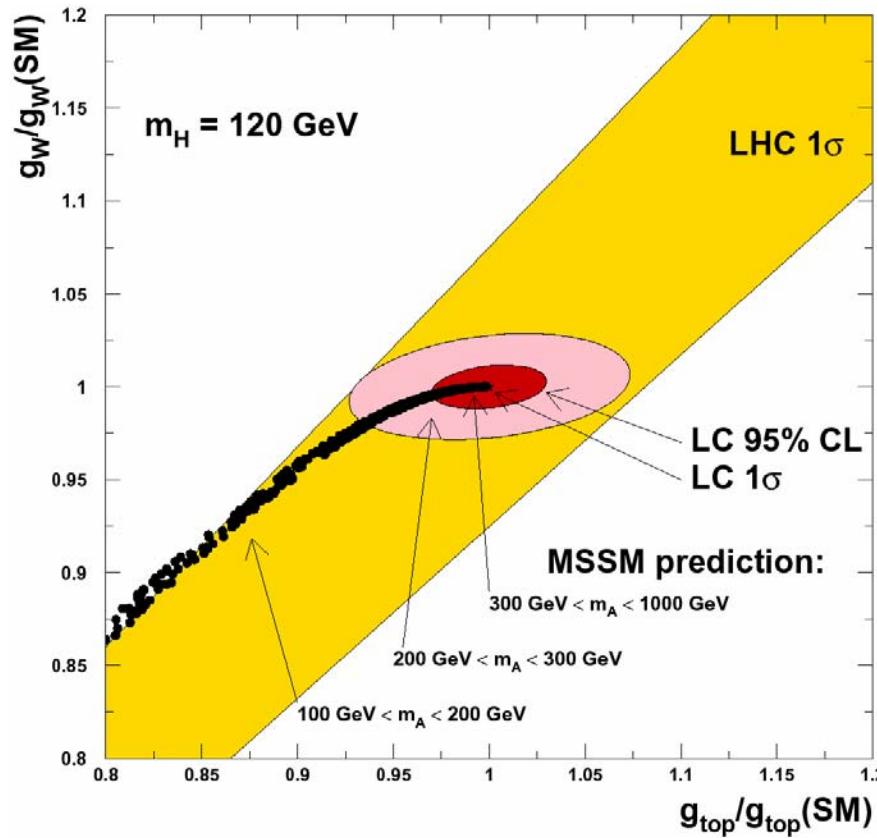
- Couplage le plus fort du MS :
 $g^2_{t\bar{t}H} = 0.5$

- Si $m_H < 2 m_t$
 - Utilisation du processus
 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$
 - @ 500GeV, $m_H = 120$ GeV :
 $\sigma \sim 0.5$ fb
 - Difficultés :
 - Clusturisation
 - Bruits de fond
 - Précision 5,5% (stat.+sys)

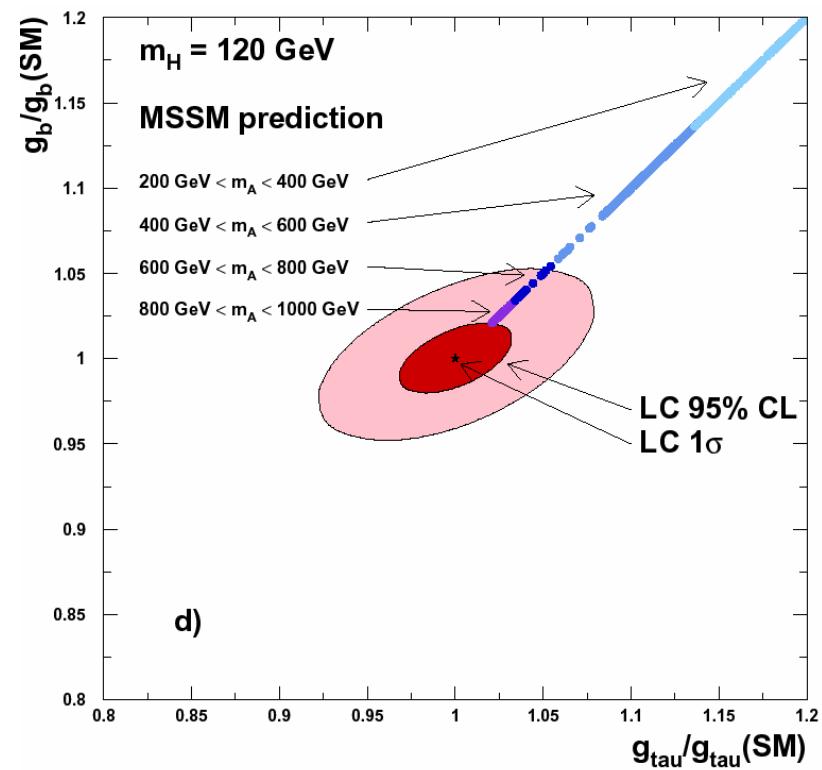
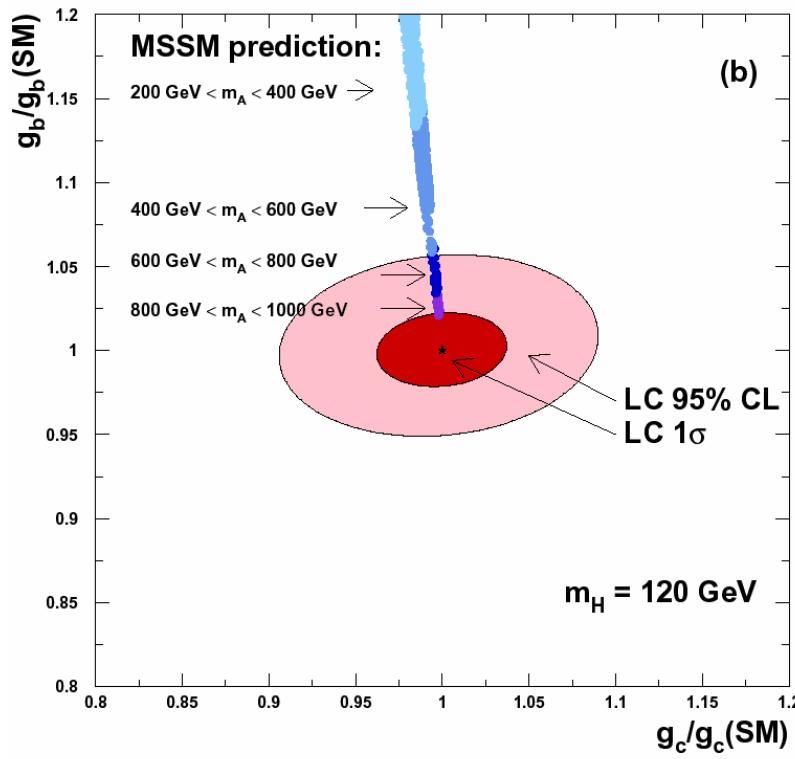
- Si $m_H > 2 m_t$
 - Utilisation du rapport
d'embranchement $H \rightarrow t\bar{t}$
 - Précision attendue 5% ($m_H = 400$ GeV/c², $L=1000$ fb⁻¹)



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

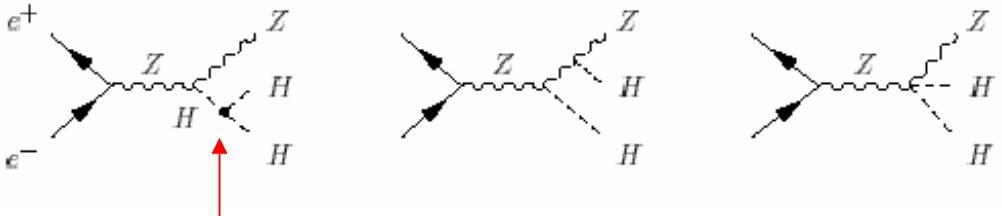


- g_{Hbb} en fonction de g_{Hcc} et g_{Hbb} en fonction de $g_{H\tau\tau}$
- Comparaison de la précision attendue aux écarts prédis dans le MSSM
 - $L = 500 \text{ fb}^{-1}$
 - $m_H = 120 \text{ GeV}/c^2$



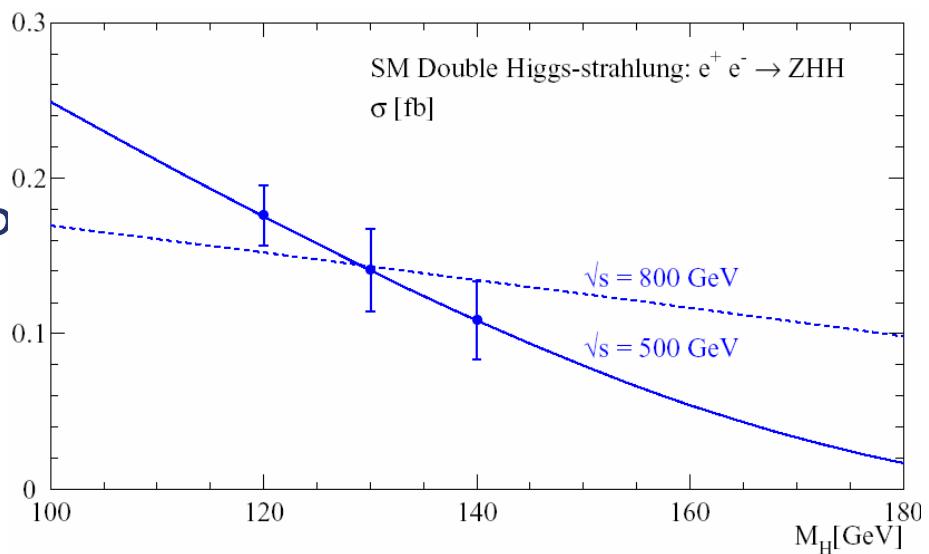
● Motivation

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



● Le canal HHZ

- Contribution d'un couplage trilinéaire
- Bruits de fond irréductible 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

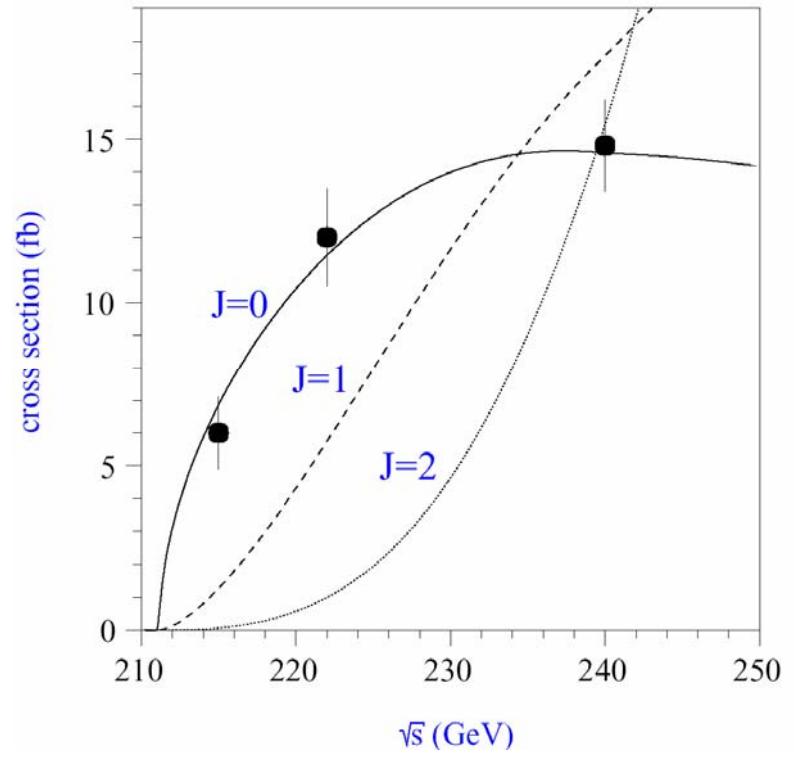
- Efficacité de la sélection

- $\varepsilon \sim 30\%$
 - Nombre d'évts attendus : ~ 120 pour 2ab^{-1}

- Précision sur la mesure du couplage

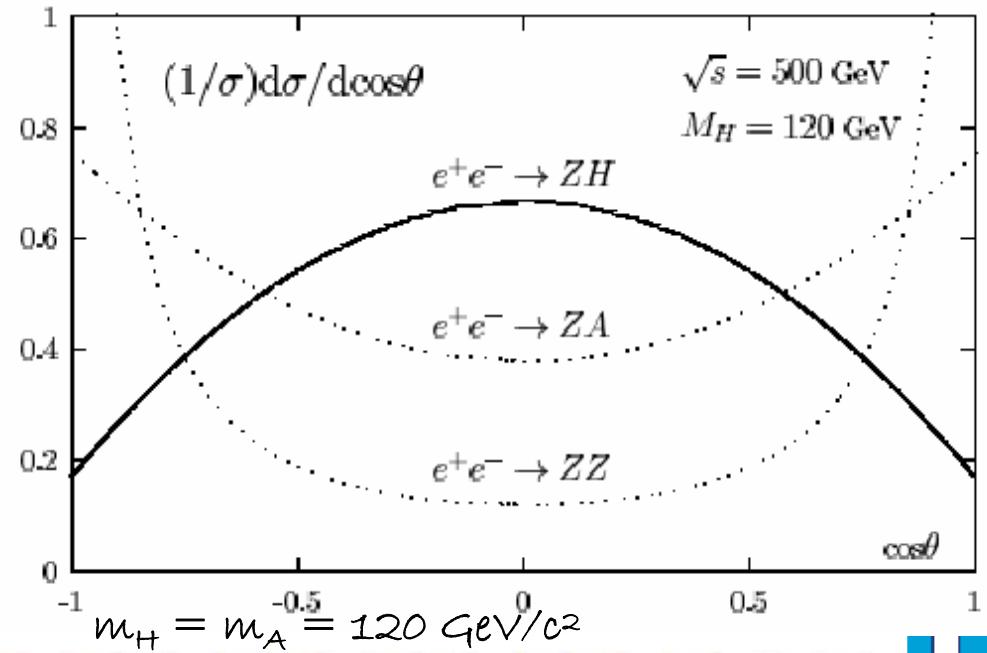
$$\lambda \sim 18\% \text{ @ } \sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$$

- 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 , violent CP).

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



● Higgs violent 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
- $m_H = 120 \text{ GeV}/c^2$, $L = 500 \text{ fb}^{-1}$, $\sqrt{s} = 350 \text{ GeV}$
- $\delta \eta = \pm 0,032$

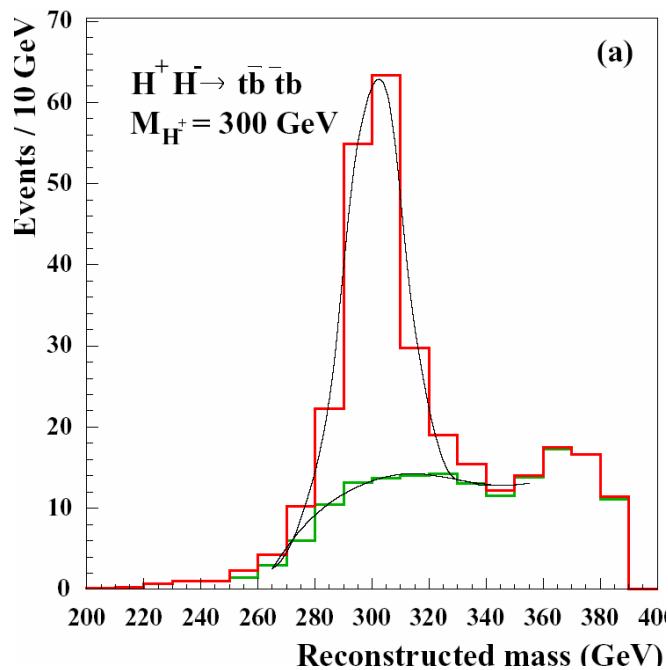
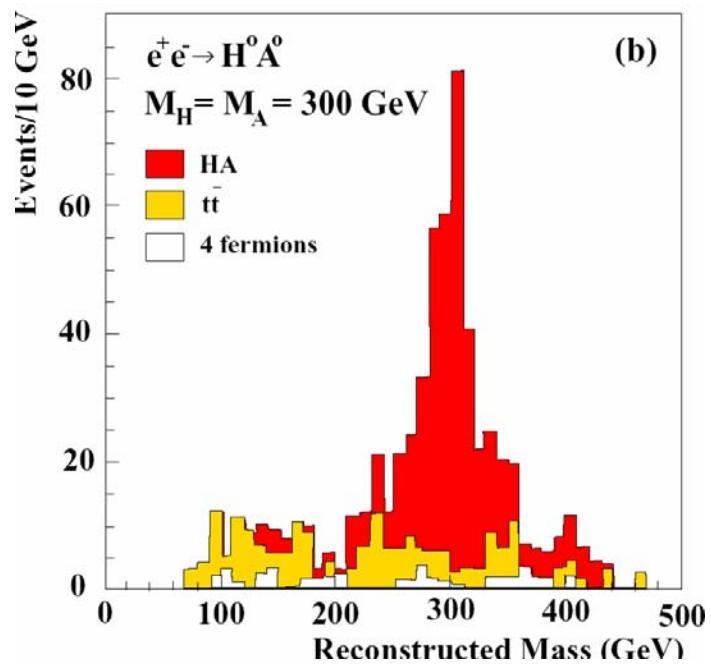
- Higgs chargés :

- 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 :
 $\delta m_A/m_A \sim 0,3\%$

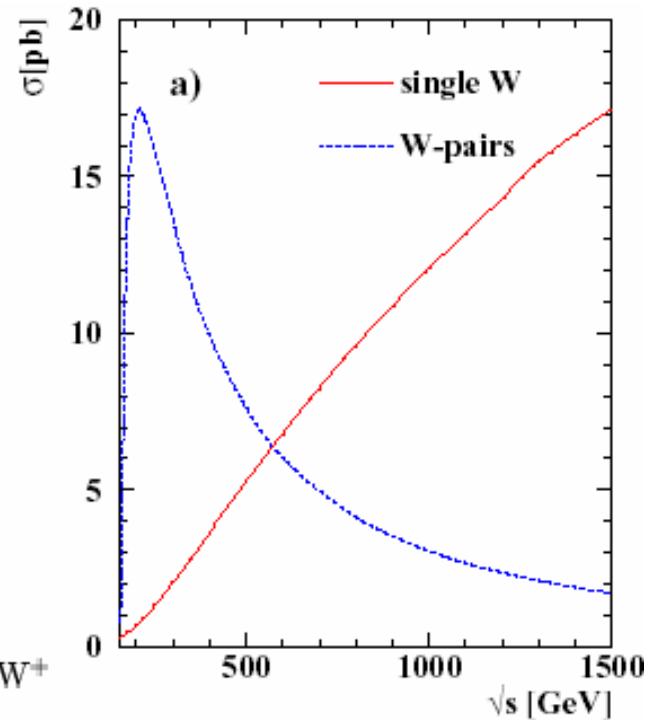
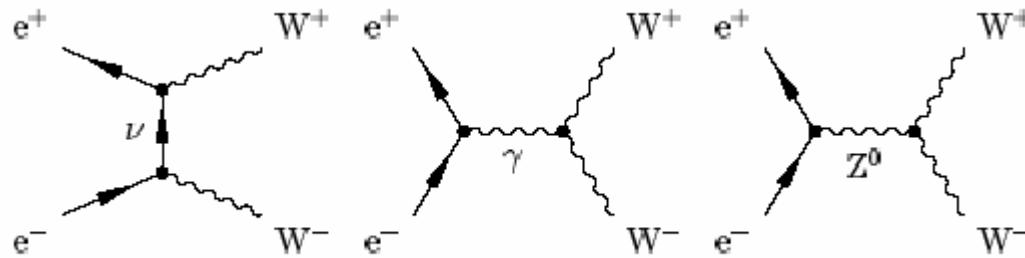
Pour $\sqrt{s} = 800 \text{ GeV}$, $L=500 \text{ fb}^{-1}$



- 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 $e^+e^- \rightarrow We\nu$
 - Augmente en $\log(s)$
- Sections efficaces proches aux énergies d'ILC

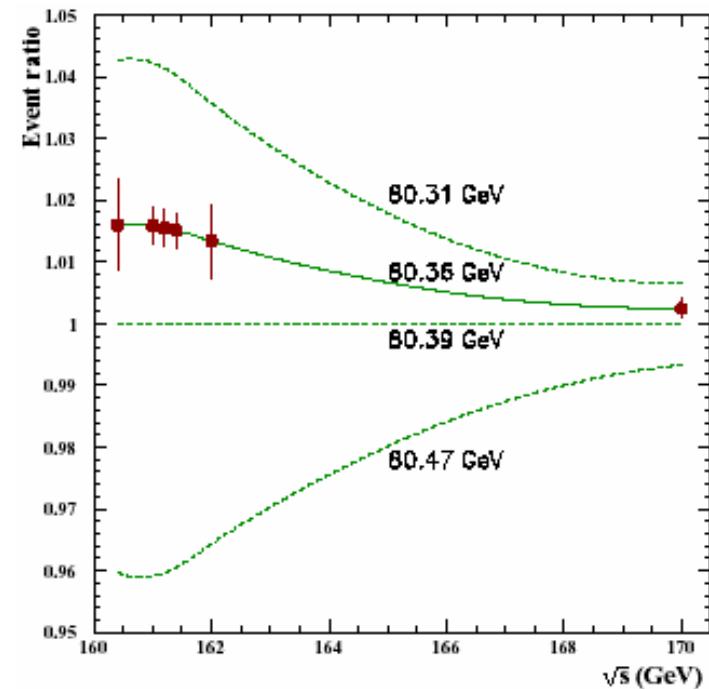


● Mesure de m_W

- 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)
 - $\delta m_W = 6 \text{ MeV}/c^2$

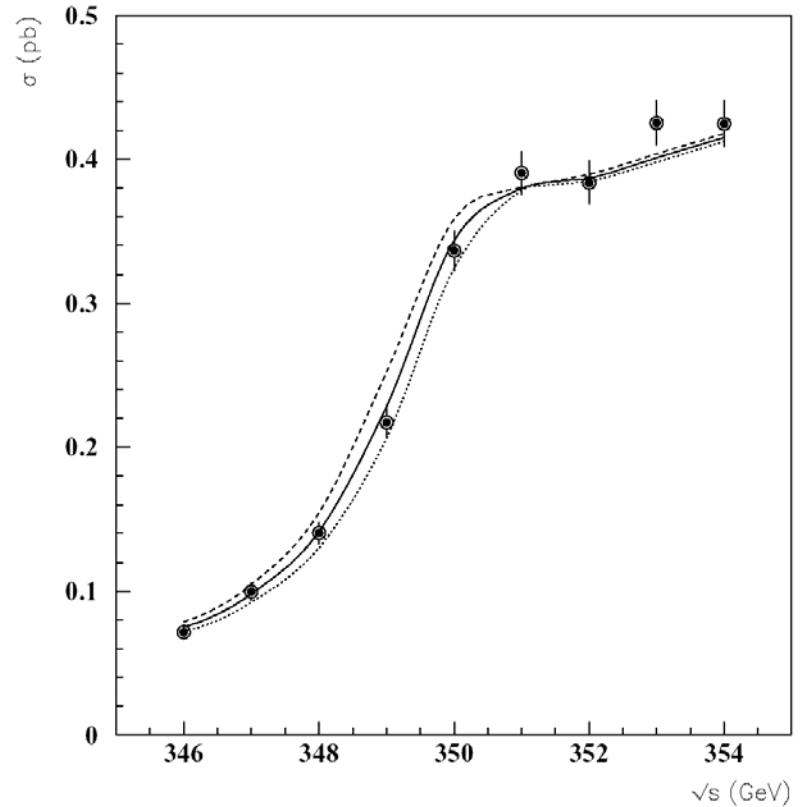
● Avantage :

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



Mesure de m_{top}

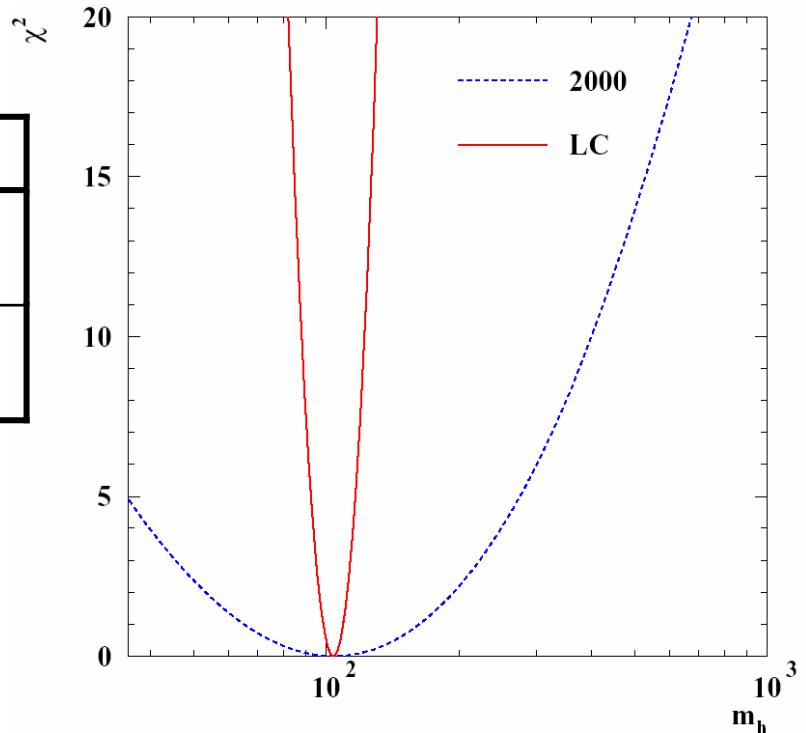
- Production de top au seuil (de 340GeV à 350GeV)
 - Mesure de m_t au seuil $ee \rightarrow tt$
- Canal de désintégration dominant $t \rightarrow b W^+$
- Précision attendue pour $L=100\text{fb}^{-1}$
 $\delta m_t \sim 100 \text{ MeV}/c^2$



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

Paramètres	Lumi., \sqrt{s}	Précision
m_W	100 fb^{-1} variable	$\pm 6 \text{ MeV}/c^2$
m_{top}	100 fb^{-1} variable	$\pm 100 \text{ MeV}/c^2$

- 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
 - $Zh \rightarrow Z\ell\ell$ 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 prédictée \Rightarrow pas de trigger

Conclusion

- 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

