

Contraintes directes et indirectes sur le boson de Higgs

Introduction

- la recherche directe du Higgs

La recherche indirecte du Higgs

- Rappels méthodologiques
- Les observables électrofaibles

Interprétation

- le Modèle Standard
- la Supersymétrie
- Les modèles alternatifs

Perspectives

- TeVatron + LHC + ILC etc...

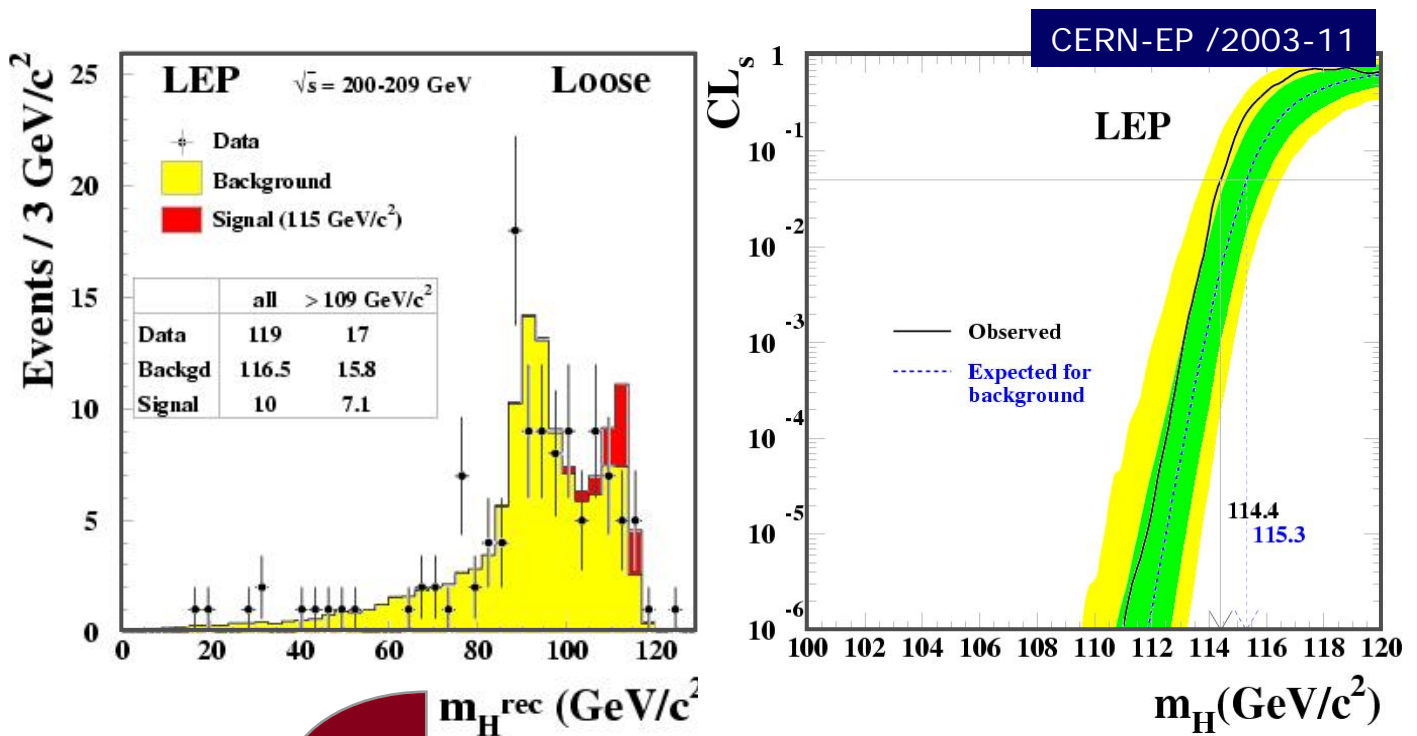
Conclusion

La recherche directe du Higgs

Le boson de Higgs Standard : contraintes expérimentales

Recherches directes à LEP

- Luminosité : $L = 2461 \text{ pb}^{-1}$
- Energie $\sqrt{s} = 189 - 209 \text{ GeV}/c^2$
- Canaux de recherche :
 - $e^+e^- \rightarrow HZ$
 - $HZ \rightarrow b\bar{b}l\bar{l}$
 - $HZ \rightarrow b\bar{b}q\bar{q}$ etc...



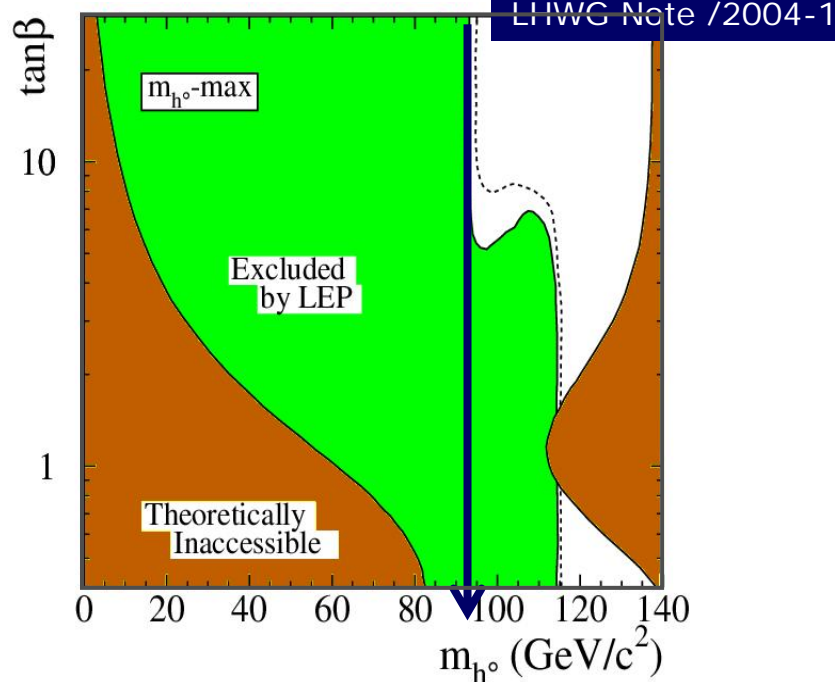
$m_H \geq 114.4 \text{ GeV}/c^2 @ 95\% \text{ CL}$

Le boson de Higgs du MSSM : contraintes expérimentales

Recherche directe de Higgs SUSY

- Luminosité $L = 870 \text{ pb}^{-1}$
- Energie $\sqrt{s} = 200\text{-}209 \text{ GeV}$
- Canaux :
 - $e^-e^+ \rightarrow Zh$
 - $e^-e^+ \rightarrow hA$
 - Dépendance en m_A et $\tan\beta$
- Scénario
 - Mélange maximal entre \tilde{t}_1, \tilde{t}_2

Cas le moins contraint



$m_h \geq 93 \text{ GeV/c}^2 @ 95\% \text{ CL}$
 $m_A \geq 92.4 \text{ GeV/c}^2 @ 95\% \text{ CL}$

**Sur la trace du Higgs...
via les mesures indirectes**

Les mesures indirectes du secteur de Higgs : principe

Choix du contexte théorique

- Théorie renormalisable (Modèle Standard, SUSY etc...)
- Calcul/prédiction de toutes les observables
 - à partir d'un ensemble fini de paramètres
 - à tous les ordres de corrections radiatives

Choix des observables mesurées pour le Higgs

- Observables électrofaibles :
 - clairement définies théoriquement & sensibles au (secteur de) Higgs
 - "précisément" déterminées ($\sim 1/1000$)

Interprétation des mesures dans le cadre théorique

- Ajustement des mesures aux prédictions
 - Optimisation de l'ajustement global ($\chi^2/\text{d.o.f.}$)
...avec la masse du Higgs comme paramètre libre

Choix du contexte théorique : Le Modèle Standard

Le Modèle Standard

- Calcul/prédiction de toutes les observables
 - à partir d'un ensemble fini de paramètres :

m_Z = Masse du boson Z
 G_F = Constante de Fermi
 α_{EM} = Constante de couplage EM
 α_s = Constante de couplage forte

Ordre 0

m_{fermions} = Masse des 6 fermions
 m_H = Masse du Higgs (LIBRE)

∀ ordres

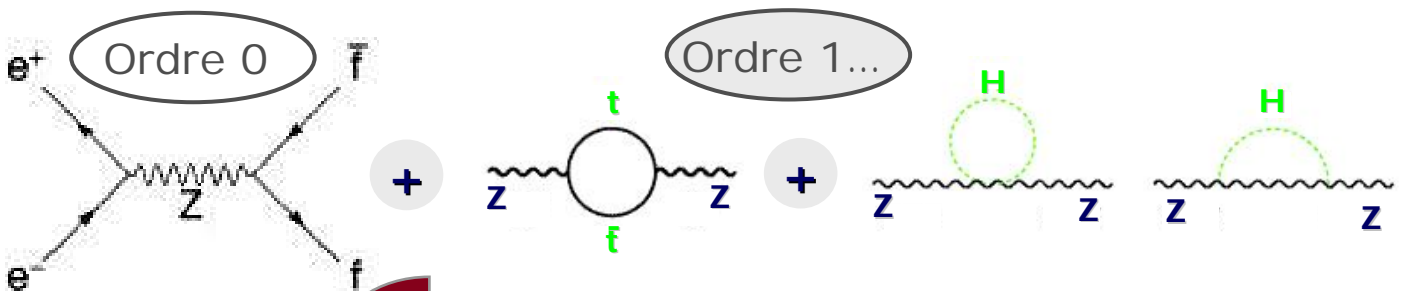
- à tous les ordres de corrections radiatives :

Formalisme des "couplages effectifs" du Z aux fermions & absorbant les corrections radiatives :

$$\mathbf{g}_{Vf} = \sqrt{\rho} (T_f^{(3)} - 2Q_f \sin^2\theta_{\text{eff}})$$

$$\mathbf{g}_{Af} = \sqrt{\rho} T_f^{(3)}$$

...qui absorbe les corrections dues à m_f , m_H :

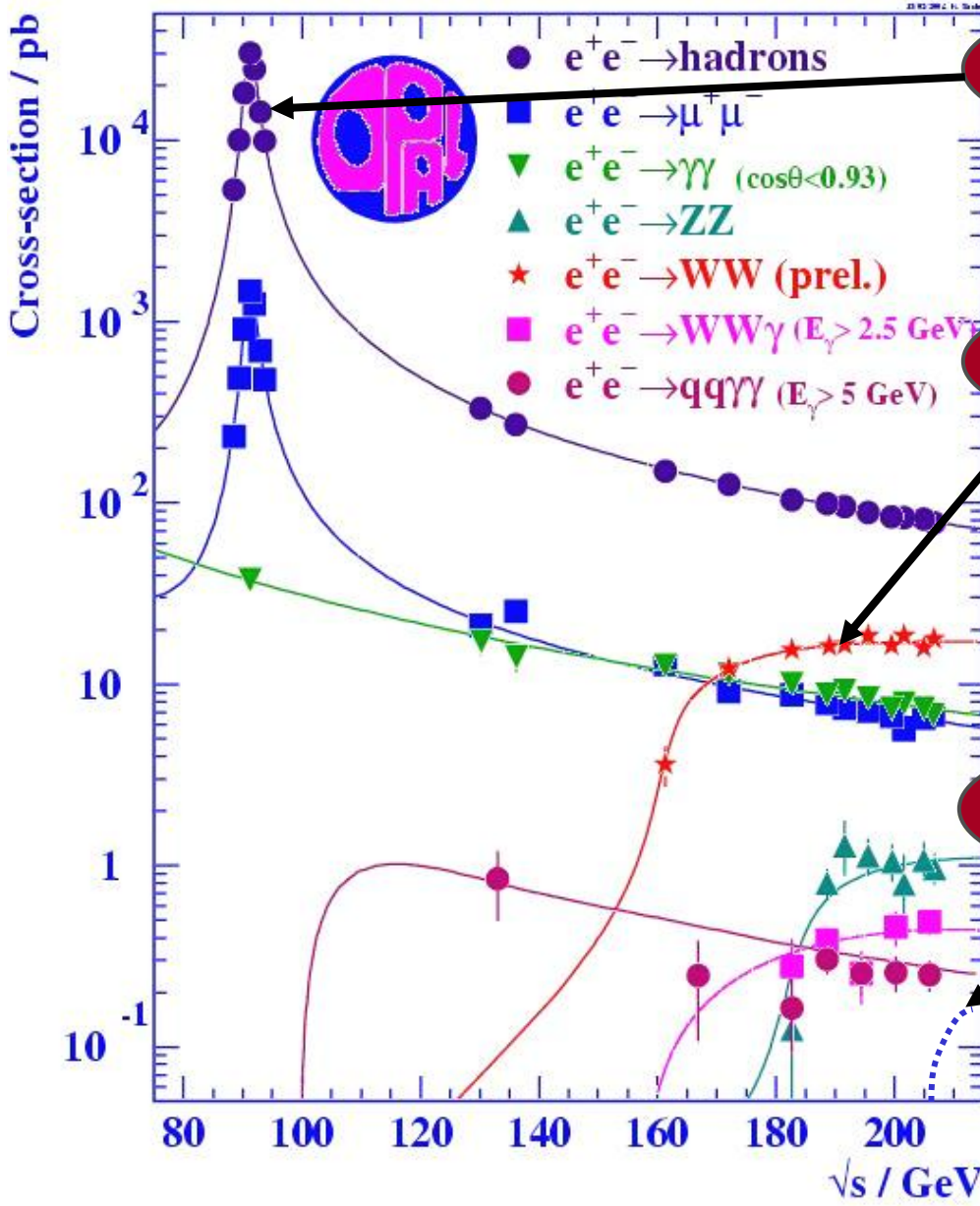


Les corrections électrofaibles :
 - dépendent de m_t et m_H
 - sont de l'ordre de $\sim 1\%$

Choix des observables : LEP + SLAC

Observables électrofaibles

- Mesures de précision (1989-2000) :
 Haute statistique: $L = 160 \text{ pb}^{-1} \times 4$ au "pic du Z"
 $L = 700 \text{ pb}^{-1} \times 4$ entre 130-209 GeV
 Bon contrôle des erreurs systématiques



4 expériences LEP:
~16 millions Z

4 expériences LEP:
~35000 W

4 expériences LEP:
0 Higgs ?

2. Choix des observables : LEP + SLAC

Observables électrofaibles

- Mesures de précision (1989-2000) :

Haute statistique: $L = 160 \text{ pb}^{-1} \times 4$ au "pic du Z"

$L = 700 \text{ pb}^{-1} \times 4$ entre 130-209 GeV

Bon contrôle des erreurs systématiques

Observables du Z	incertitude
Masse m_Z	$\pm 0.002\%$
Largeur Γ_Z	$\pm 0.09\%$
Section efficace	$\pm 0.09\%$
Rapport $\Gamma_{\text{had}}/\Gamma_l$	$\pm 0.12\%$
Asymétrie A_{FB}^{0l}	...
etc...	...

4 expériences LEP:
~16 millions Z

4 expériences LEP:
~35000 W

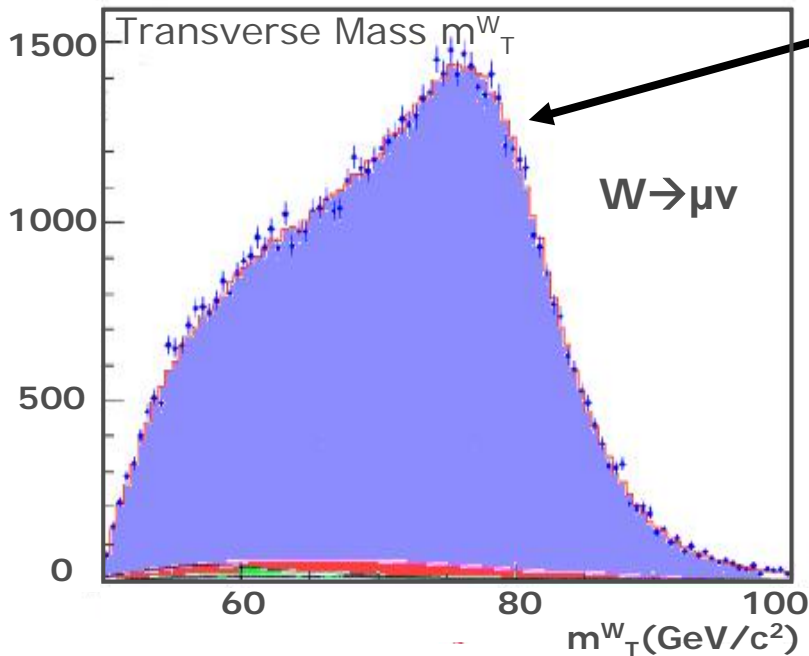
Observables	incertitude
Masse m_W	$\pm 0.05\%$
Largeur Γ_W	$\pm 4.1\%$

4 expériences LEP:
0 Higgs ?

2. Choix des observables : Le TeVatron

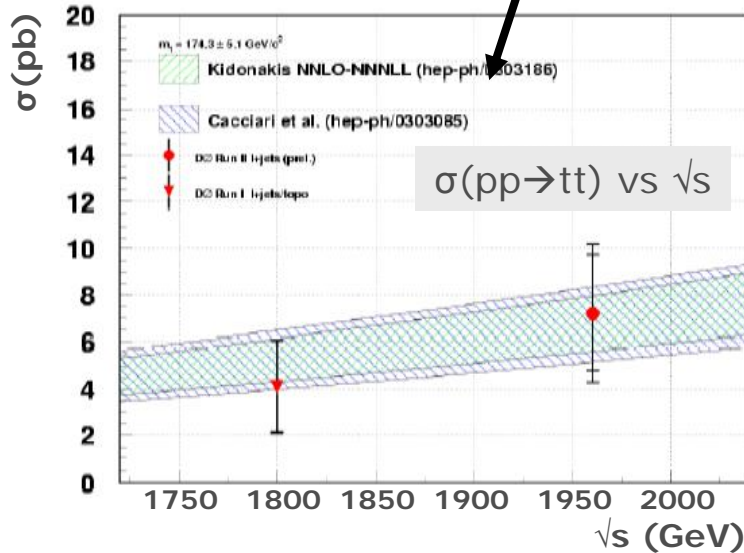
Observables électrofaibles

- Observables de hautes énergies :
 - 2 expériences (DØ, CDF)
 - Mesures réalisées entre 1989-1995
- 3 observables mesurées :



DØ+CDF :
Run1 ~ 140 000 W
Run2 ~ 5.6 millions

DØ+CDF :
Run1 ~ 200 top
Run2 ~ 10000 top



2. Choix des observables : Le TeVatron

Observables électrofaibles

- Observables de hautes énergies :
 - 2 expériences (DØ, CDF)
 - Mesures réalisées entre 1989-1995
- 3 observables mesurées :

Observable	Précision
$m_W(\text{Run1})$	$\pm 0.07\%$
$\Gamma_W(\text{Run1})$	$\pm 5.0\%$
$m_W(\text{Run2})$	$\pm 0.02\% ?$
$\Gamma_W(\text{Run2})$	$\pm 1.5\% ?$

DØ+CDF :
Run1 ~ 140 000 W
Run2 ~ 5.6 millions

DO+CDF :
Run1 ~ 200 top
Run2 ~ 10000 top

Observable	Précision
$m_{\text{top}}(\text{Run1})$	$\pm 2.4\%$
$m_{\text{top}}(\text{Run2})$	$\pm 1.3\% ?$

Observables électrofaibles : la résonance du Z

Observables de la résonance du Z

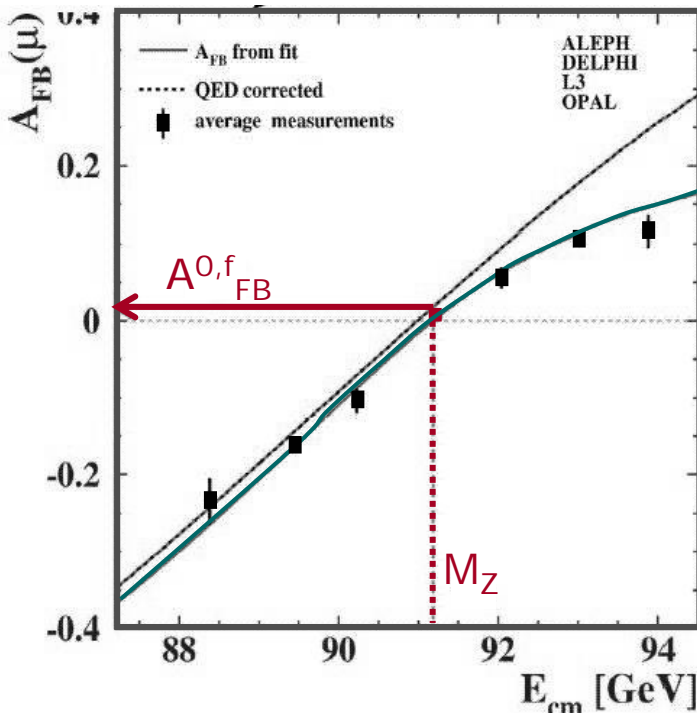
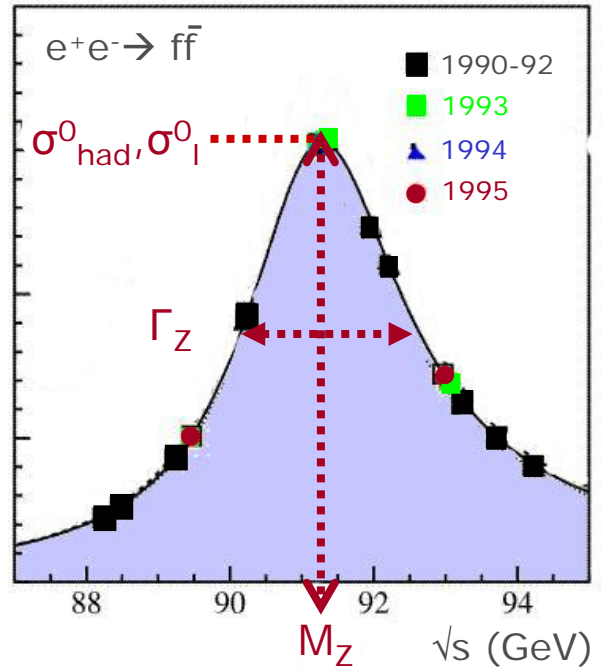
- Courbe de résonance

- Mesure des σ_f
- Extraction de :

$$\sigma_{ff}^0 = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{\Gamma_Z^2}$$

$$R_{I+I-}^0 = \frac{\Gamma_{had}}{\Gamma_{I+I-}}$$

↳ Sensibilité à m_H via :
 $\Gamma_f \propto (g_V^2 + g_A^2)$



- Asymétries au pic

- Mesures de :

$$A_{FB}^{0,f} = \frac{\sigma(\cos\theta > 0) - \sigma(\cos\theta < 0)}{\sigma(\cos\theta > 0) + \sigma(\cos\theta < 0)}$$

- Extraction de :

$$A_{FB}^{0,f} = \frac{3}{4} A_e A_f$$

↳ Sensibilité à m_H via :
 $A_f \propto g_{Vf} g_{Af} / (g_{Vf}^2 + g_{Af}^2)$

Observables électrofaibles : la résonance du Z

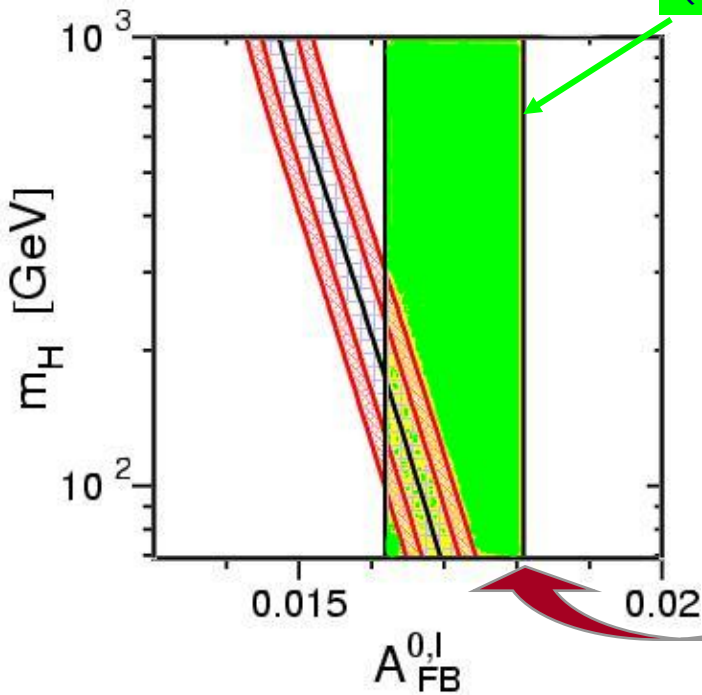
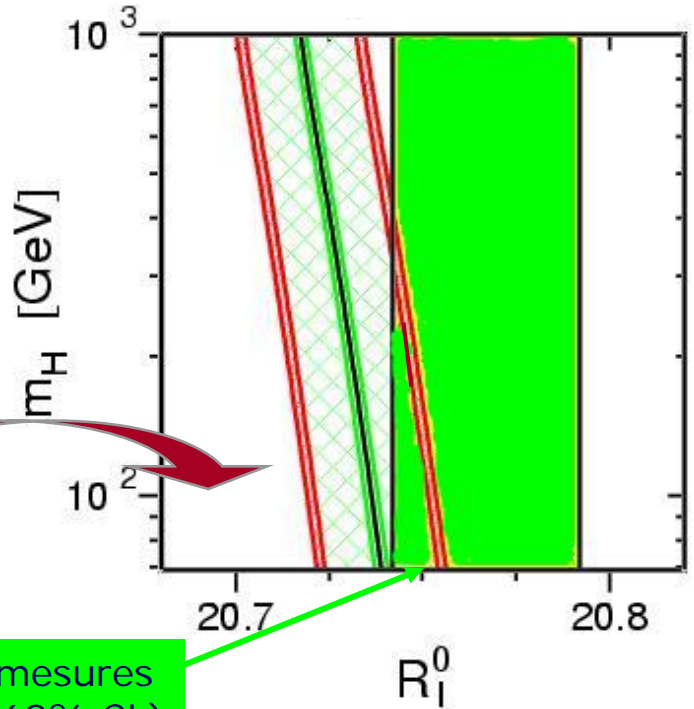
Observables de la résonance du Z

- Courbe de résonance
 - Mesure des σ_f
 - Extraction de :

$$\sigma_{ff}^0 = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{\Gamma_Z^2}$$

$$R_I^0 = \frac{\Gamma_{had}}{\Gamma_{l+l-}}$$

Sensibilité à m_H via :
 $\Gamma_f \propto (g_V^2 + g_A^2)$



- Asymétries au pic

- Mesures de :

$$A_{FB}^{0,f} = \frac{\sigma(\cos\theta > 0) - \sigma(\cos\theta < 0)}{\sigma(\cos\theta > 0) + \sigma(\cos\theta < 0)}$$

- Extraction de :

$$A_{FB}^{0,f} = \frac{3}{4} A_e A_f$$

Sensibilité à m_H via :
 $A_f \propto g_{Vf} g_{Af} / (g_{Vf}^2 + g_{Af}^2)$

Les observables électrofaibles : la masse du boson W (m_W)

Masse du W à LEP

- Canaux de recherches :

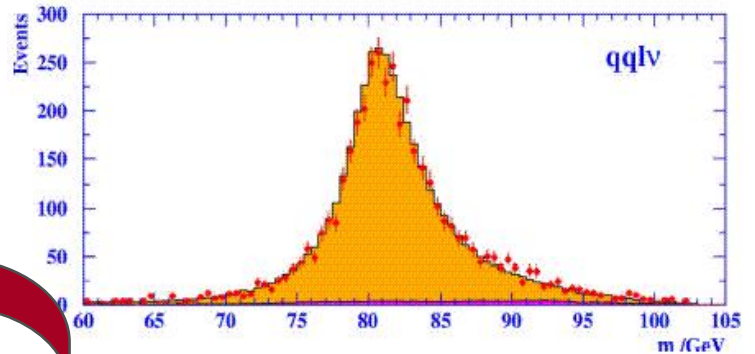
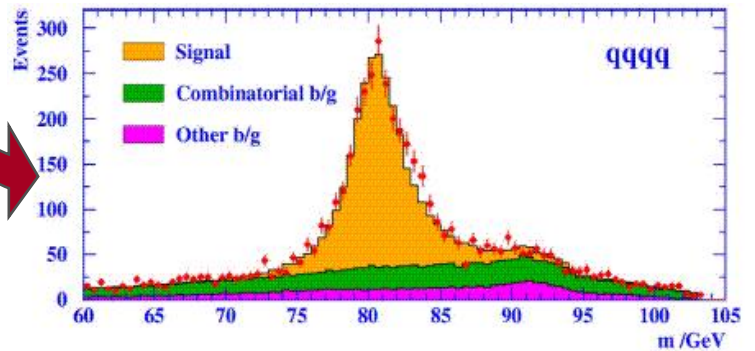
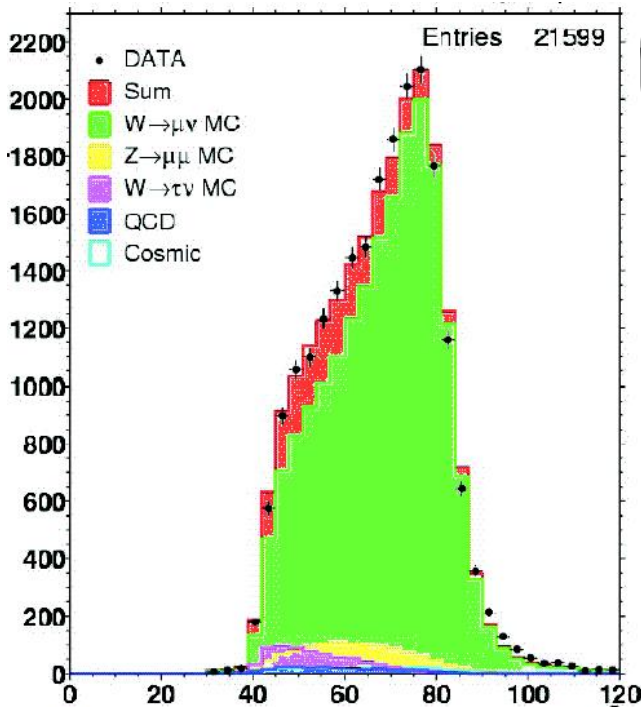
$e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow qqqq, qq\ell\nu, \ell\nu\ell\nu$

Reconstruction de la masse invariante M_{inv}

~36000 événements

Préliminaire

$m_W(\text{LEP}) = 80412 \pm 42 \text{ MeV}/c^2$



Masse du W au TeVatron

- Canaux de recherche

$pp \rightarrow W+X \rightarrow \mu\nu/e\nu + X$

Reconstruction de masse transverse

$\rightarrow m_T = \sqrt{2} E_T^e E_T^\nu \cos\Phi(e,\nu)$

~70000 évts/exp.

Run1 Final

$m_W(\text{Run1}) = 80452 \pm 59 \text{ MeV}/c^2$

$\Delta m_W(\text{Run2}) = \pm 20 \text{ MeV}/c^2$

Les observables électrofaibles : la masse du quark top (m_t)

Masse du quark Top au TeVatron

- Luminosité : $L \approx 110 \text{ pb}^{-1}$

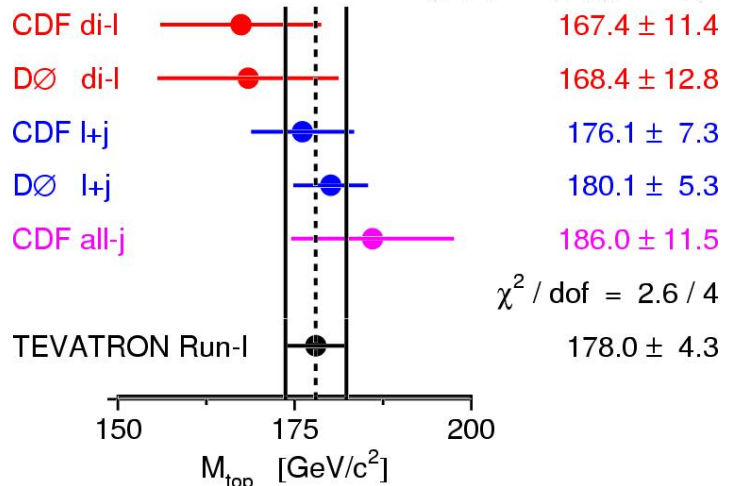
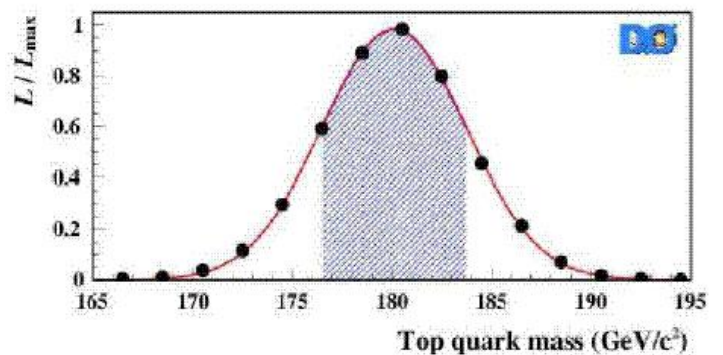
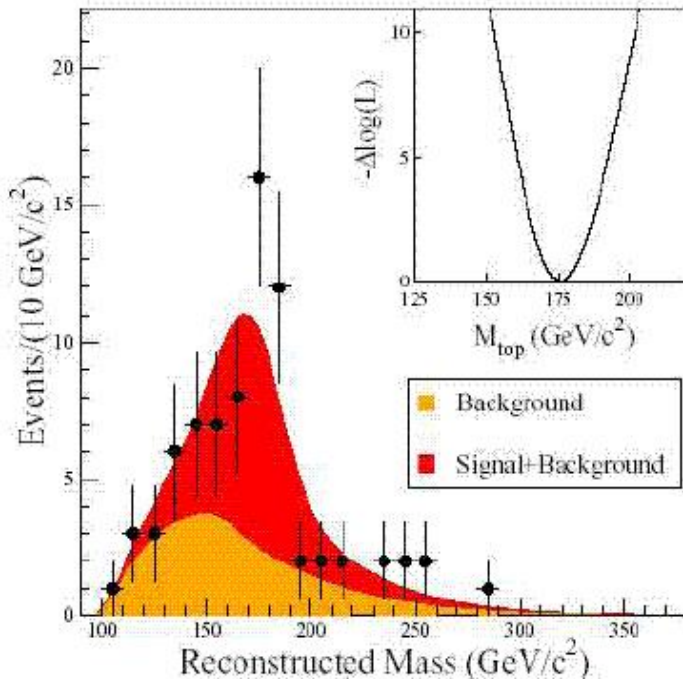
- Canaux de recherche

$pp \rightarrow tt$

$\rightarrow WbWb \rightarrow l\nu b qqb$ « lepton+jets »

$\rightarrow WbWb \rightarrow l\nu b l\nu b$ « di-lepton »

Préliminaire



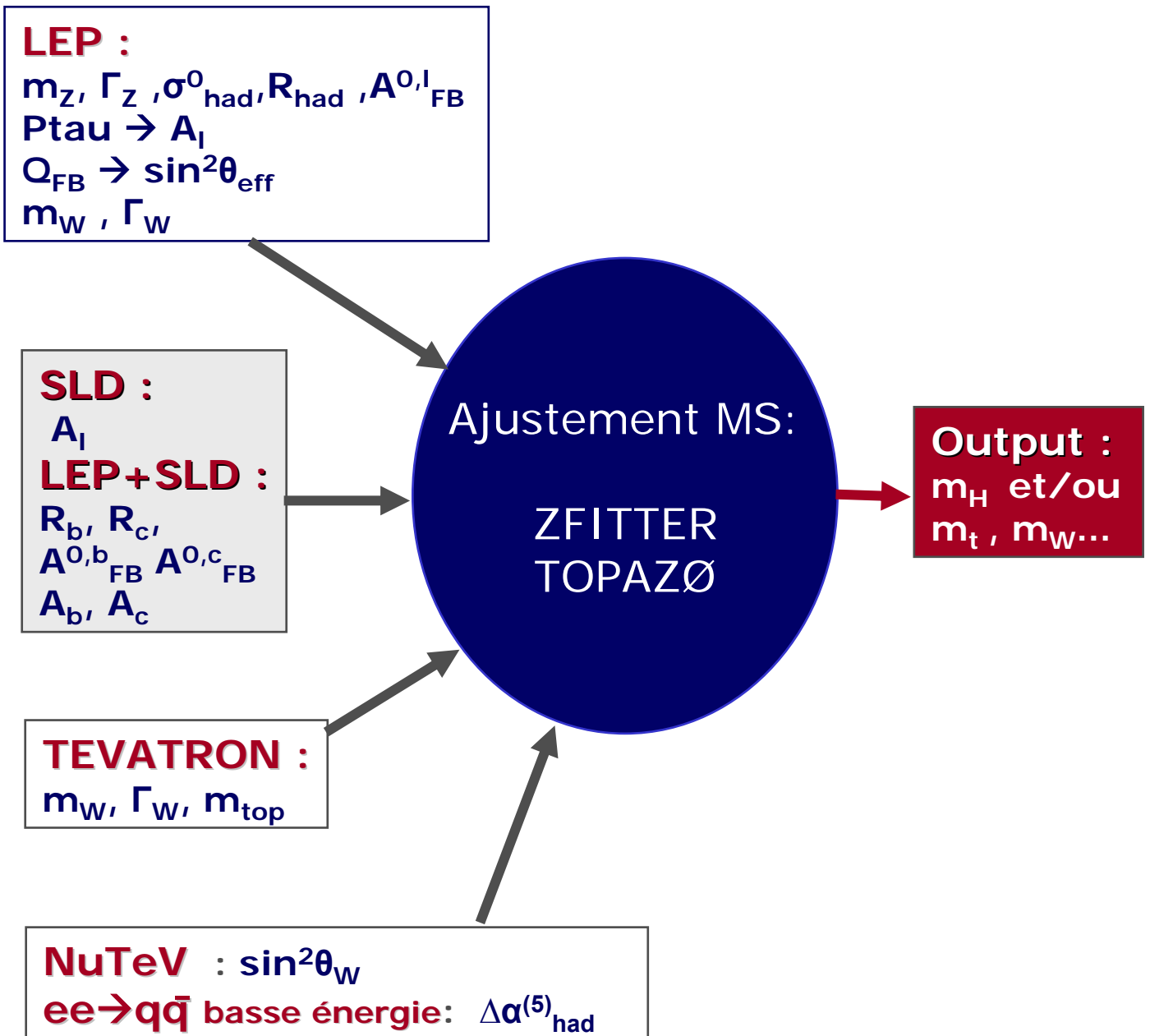
- Combinaison Run1

- Incertitudes = 2.7(stat.) + 3.3(syst.)

$$m_t(\text{Run1}) = 178.0 \pm 4.3 \text{ GeV}/c^2$$

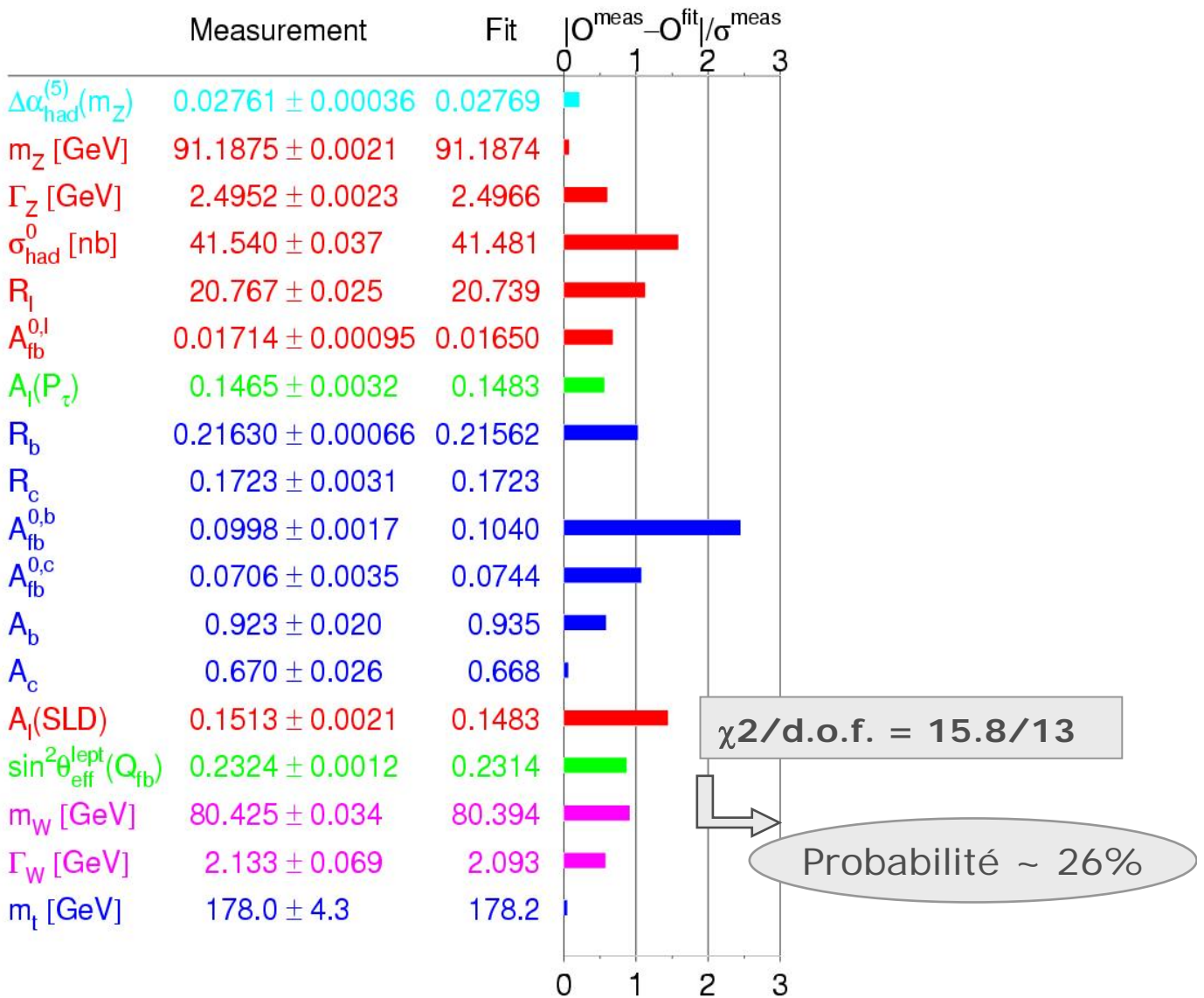
$$\Delta m_t(\text{Run2}) = \pm 2.0 \text{ GeV}/c^2$$

Ajustement des observables au Modèle Standard



Interpretation dans le cadre du Modèle Standard

Ajustement des Mesures



- Interprétation:

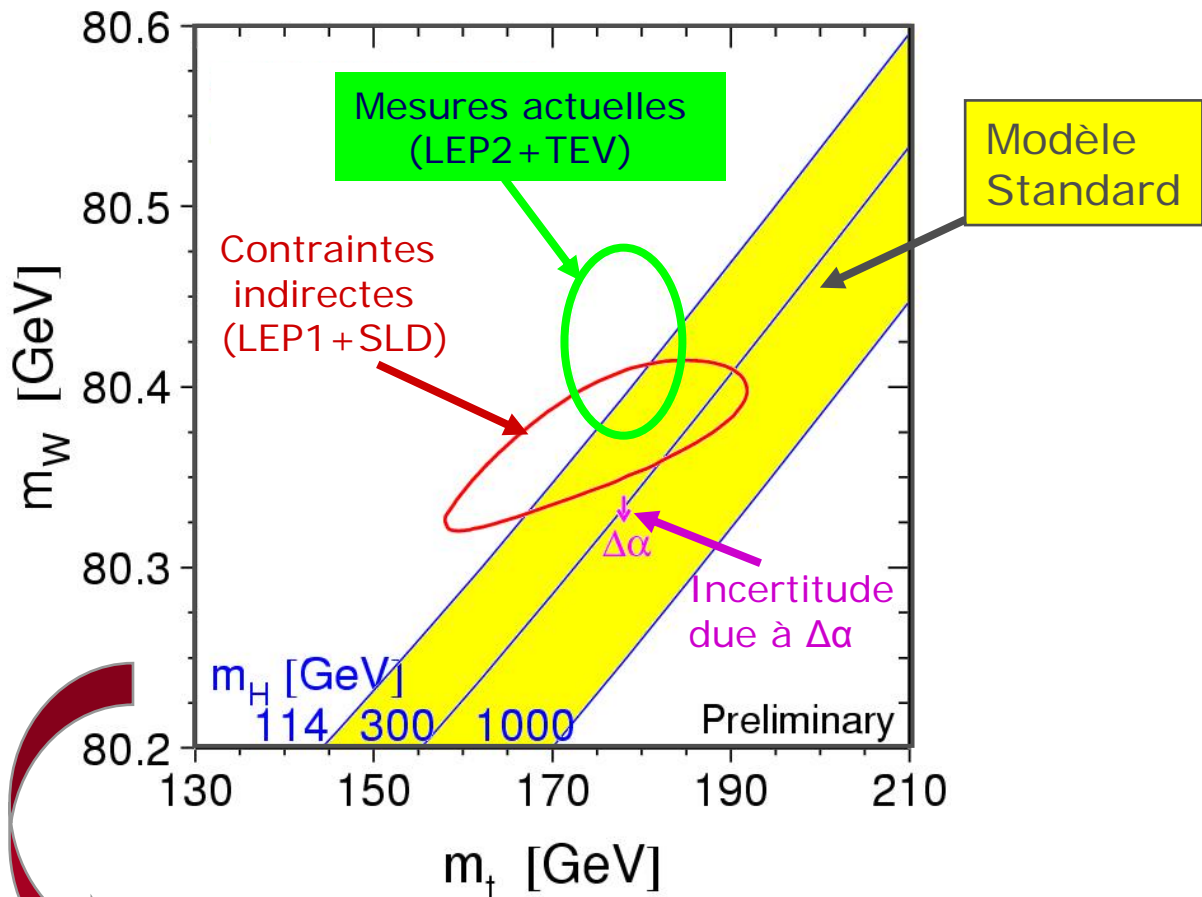
- Aucune mesure n'est à plus de 3σ du MS
- Différence de 2.8σ entre A_{FB}^b et A_l (fluctuation?)
 - A_{FB}^b (2.4σ) augmente m_H , A_l baisse m_H

Les mesures n'ont jamais été en aussi bon accord avec le MS

Interprétation dans le cadre du Modèle Standard

Interprétation dans (m_W, m_t)

- Mesures de m_W et m_t
 - Cohérence entre mesures directes & indirectes
- Comparaison aux prédictions du MS :
 - Les mesures directes favorisent un Higgs léger

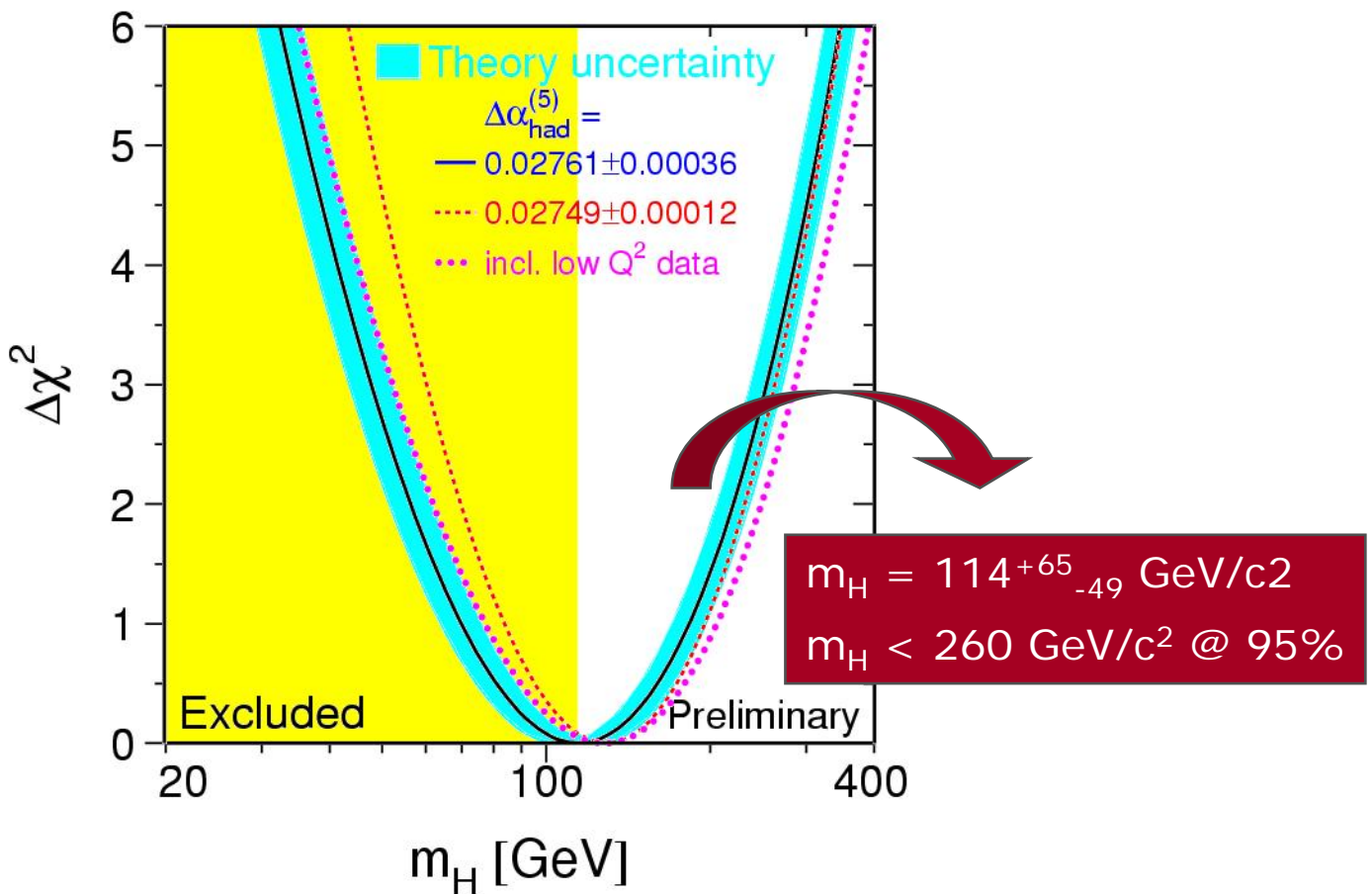


Les mesures de m_t et m_W favorisent de faibles valeurs de m_H

Interprétation dans le cadre du Modèle Standard

Contraintes sur la masse du Higgs

- Ajustement des 17 observables au MS
 → Valeurs les plus probables de m_H (libre)



- Source des incertitudes :

$$[\Delta \log(m_{\text{Higgs}})]^2 = [\Delta_{\text{exp}}]^2 + [\Delta m_t]^2 + [\Delta \alpha]^2 + [\Delta \alpha_s]^2$$

$$[0.21]^2 = [0.12]^2 + [0.13]^2 + [0.10]^2 + [0.04]^2$$

La sensibilité est limitée par les incertitudes sur m_{top}

Interprétation dans le cadre supersymétrique

La supersymétrie

- Extension du MS la plus “attractive” :
 - Unification des constantes de couplages
 - Explication de la forme du potentiel de Higgs
 - Prédiction d’une “LSP” = candidat “matière noire”
- Conséquences phénoménologiques :
 - Doublement du spectre des particules
Fermions + partenaires bosoniques
bosons + partenaires fermioniques
 - Corrections radiatives différentes



Prédiction des observables
électrofaibles \neq MS

- Conséquences sur le secteur de Higgs
 - Plusieurs Higgs (H^+ , H^- , H , h , A)
 - Le spectre des masses de Higgs est PREDIT



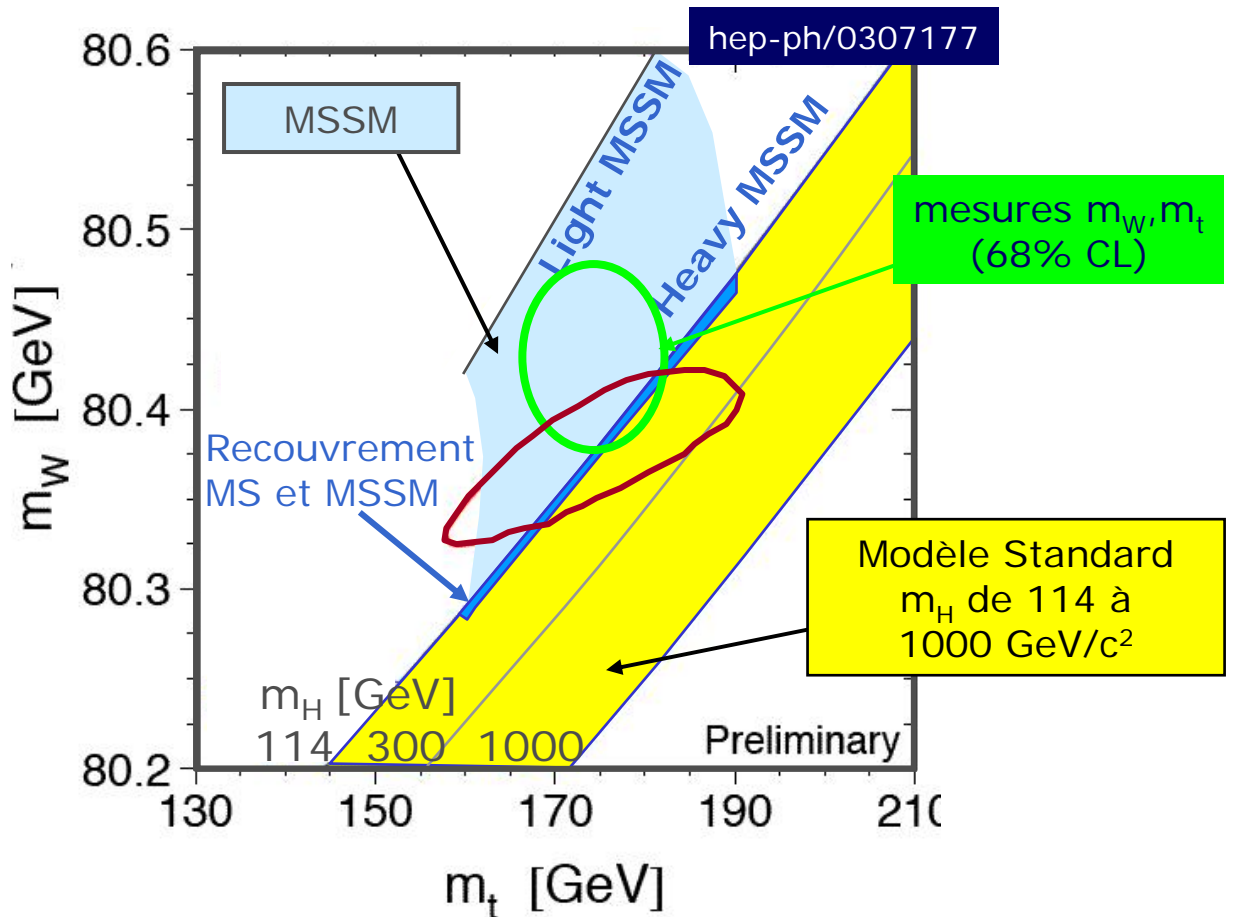
Higgs le plus léger : $m_h < 135 \text{ GeV}/c^2$

- Les observables électrofaibles permettent de tester :
 - Modèle SUSY + supergravité (mSUGRA)
 - Modèle SUSY + Gauge Mediated SB (mGMSB)
 - Modèles SUSY non contraint (~ 100 paramètres)

Interprétation dans le cadre supersymétrique

Interprétation dans (m_W, m_t)

- Comparaison MS vs MSSM
 - Zone SUSY légèrement favorisée vs MS
 - Recouvrement faible entre le MS et le MSSM
 - ➔ Correspondant à $m_h < 135 \text{ GeV}/c^2$



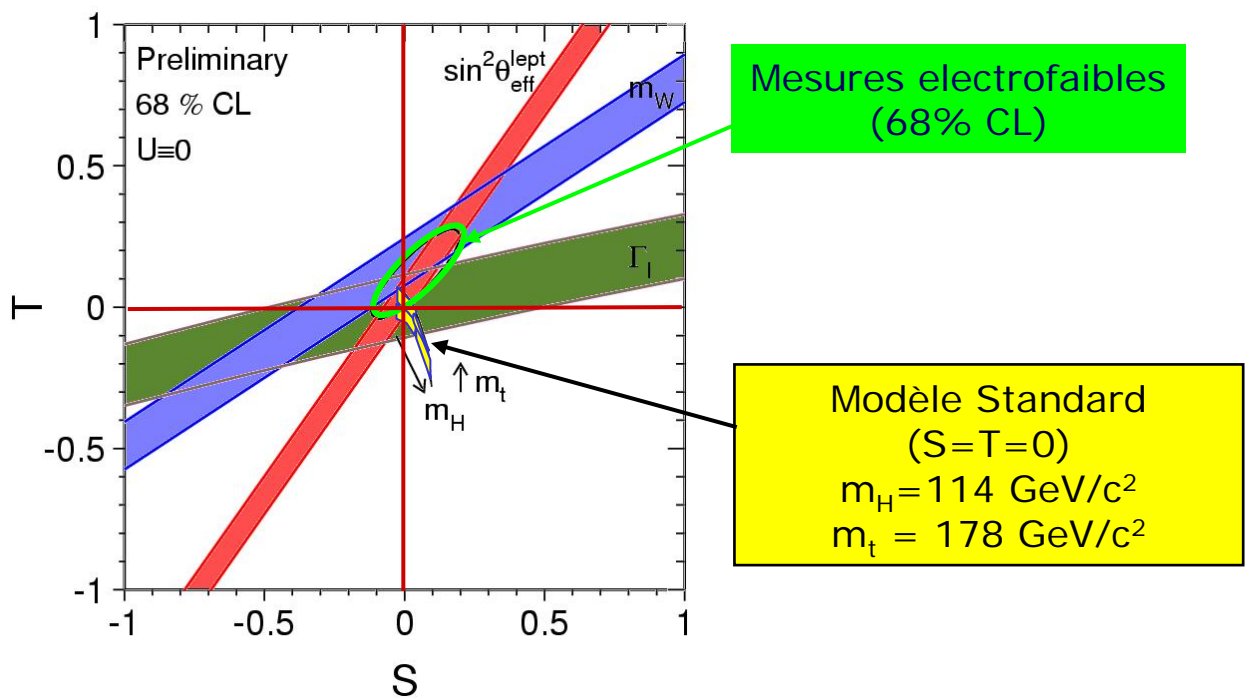
- Zone MSSM non contraint
 - “Light MSSM” : $M_{\text{SUSY}} \sim$ valeur limites inférieures
 - “Heavy MSSM” : $M_{\text{SUSY}} \sim O(\text{TeV}/c^2)$ (limite découplage)

Le modèle du MSSM est compatible avec les données électrofaibles

Interprétation dans le cadre de Modèles alternatifs

Modèles alternatifs

- Ensemble de modèles
 - Incluant le groupe de jauge $SU(2) \times U(1)$
→ En accord avec les mesures de précision
- Prédiction d'un secteur scalaire modifié
 - Higgs plus lourd ($500-1000 \text{ GeV}/c^2$)
 - Sans Higgs



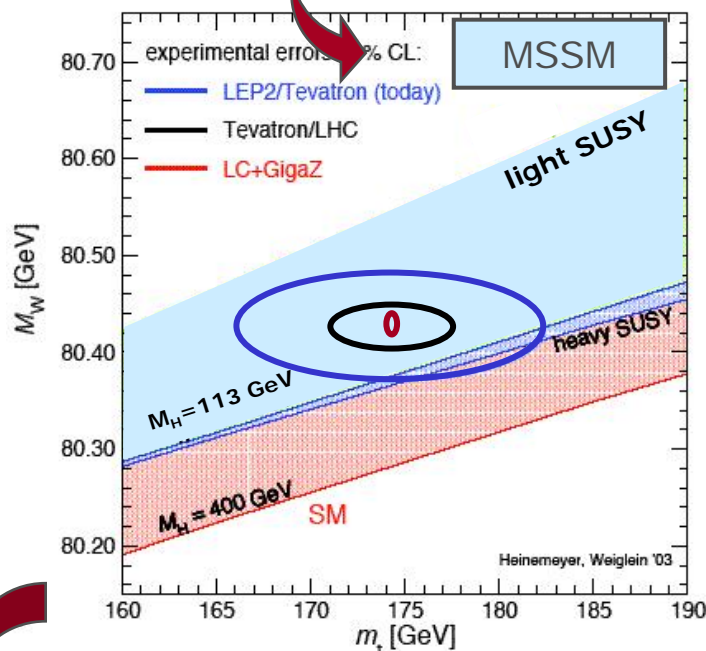
- Accord conservé avec mesures par compensation dans des effets d'un Higgs lourd par :
- de bosons supplémentaires (Z' de $M_{Z'} \approx 1-1.5 \text{ TeV}/c^2$)
→ extension du groupe de jauge ($E_6, SO(10) \dots$)
 - des fermions supplémentaires, doublet et singulet $SU(2)$ avec $M \approx 1-5 \text{ TeV}/c^2$

Interprétation MS versus SUSY : prospectives

Observables électrofaibles

- Gain en sensibilité
 - TeVatron RUN II + LHC (ATLAS+CMS) + ILC

	Now	RunII (2fb ⁻¹)	RunII (8 fb ⁻¹)	LHC (30 fb ⁻¹)	LC
$\Delta\sin^2\theta_{\text{eff}}$	17	78	78	14-20	1.3
δm_W (MeV)	33	27	20	15	7
δm_t (GeV)	5.1	2.7	2.0	1.0	0.13
δm_H (MeV)	---	---	?	100	50



Le LHC et le ILC devraient permettre de distinguer les modeles

Conclusion :

Contraintes sur le boson de Higgs

Les mesures de précision

- Le secteur des interactions électrofaibles des hautes énergies a été sondé précisément par LEP/SLD+TeVatron
→ Sensibilité des mesures aux corrections électrofaibles

Les interprétations

- Le MS décrit avec une précision sans précédent les interactions électrofaibles :
 - Accord remarquable observé avec les prédictions
 - La masse du Higgs est un paramètre libre du MS
L'ajustement global donne :
$$m_H < 260 \text{ GeV}/c^2 @ 95\%$$
- La supersymétrie offre un cadre théorique + satisfaisant. Expérimentalement :
 - L'ajustement aux observables électrofaibles est au moins aussi satisfaisant que pour le MS
 - La masse du boson de Higgs est **prédite** mais en fonction de paramètres non fixés. Cependant :
$$m_H < 135 \text{ GeV}/c^2$$
- Il existe toujours des modèles alternatifs qui garantissent l'accord avec les mesures électrofaibles

Perspectives

Le TeVatron permettra...

- d'affiner le test du MS vs MSSM par une meilleure connaissance de m_{top} et m_W
- Peut-être de mettre en évidence (3σ) un Higgs léger ($< 130 \text{ GeV}/c^2$) pour une luminosité $\sim 8 \text{ fb}^{-1}$

Le LHC permettra ...

- La découverte (5σ) de(s) Higgs(es) et une mesure de ses (leurs) propriétés (masse, largeur, couplages)
- D'apporter les premières réponses quant à l'identification du modèle sous-jacent

Le ILC devrait permettre ...

- La mesure précise des propriétés du(es) Higg(ses)
- Les tests de cohérence des modèles par le biais des mesures de (très grande) précision

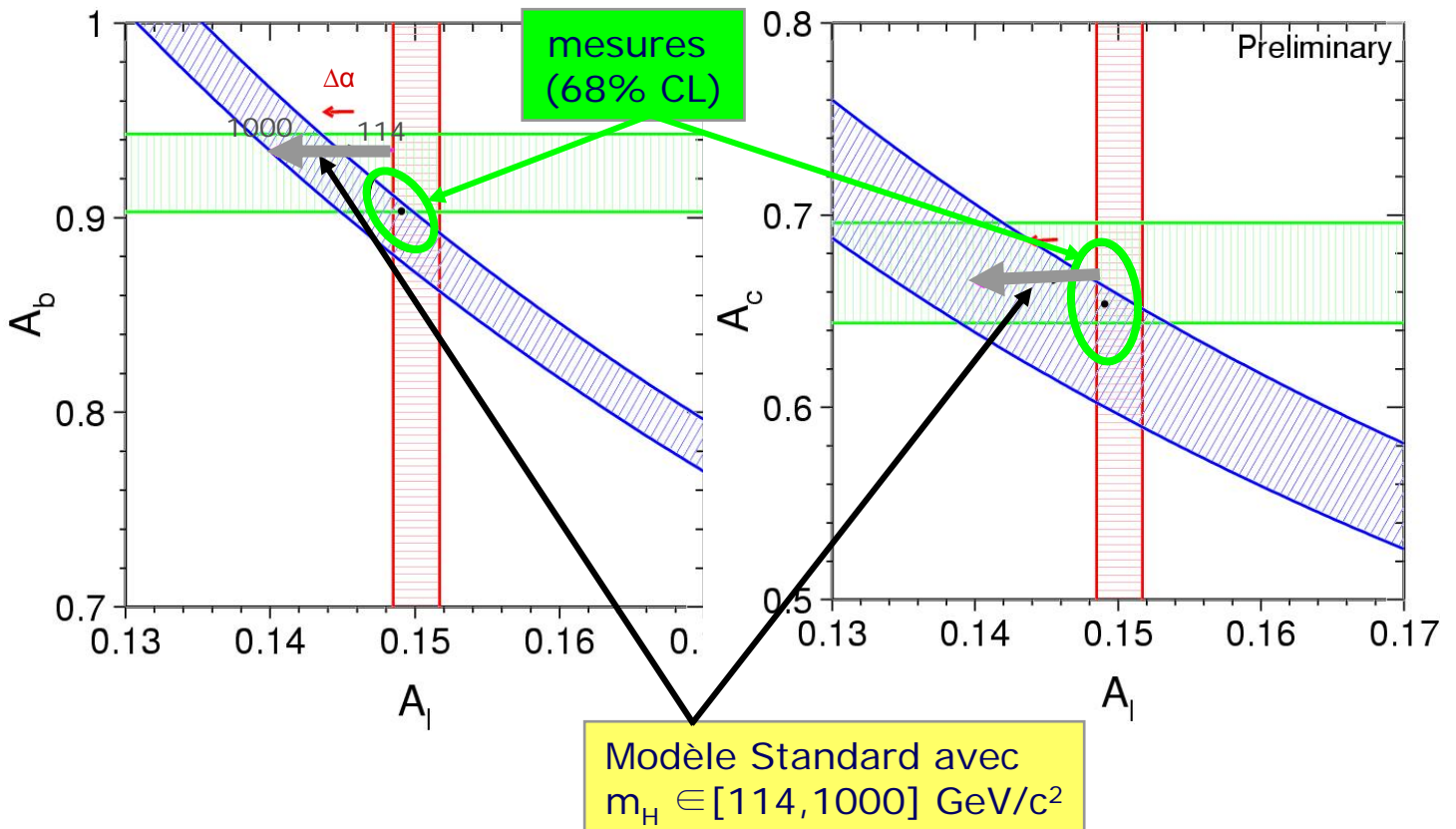
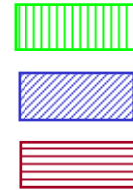
BACKUP SLIDES

Observables électrofaibles : Asymétries des quarks vs leptons

Asymétries des Quarks et leptons

- Quantités mesurées :

- Asymétries A_b et A_c de SLD
- Asymétries $A_{FB}^{0,b}$ et $A_{FB}^{0,c}$ de LEP
- Asymétries A_l de SLD+LEP



- Interprétation

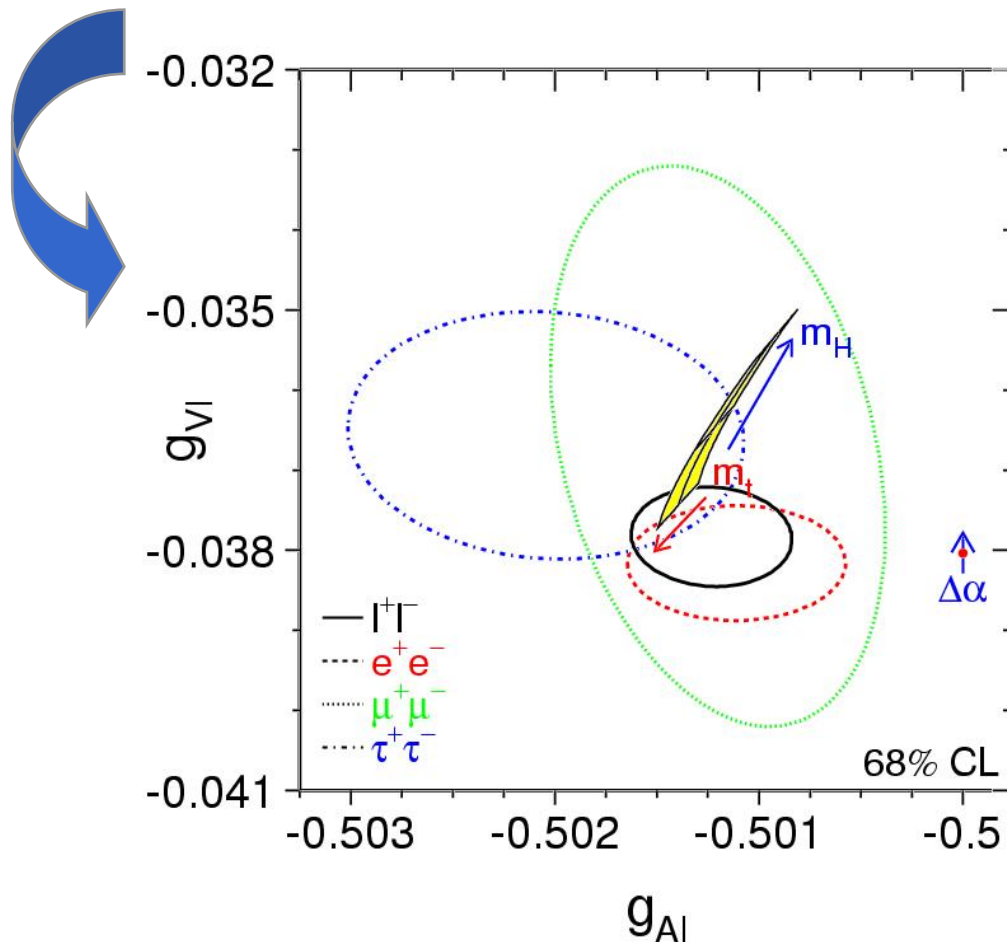
- $A_{FB}^{0,b}$ favorise les hautes valeurs de m_H
- A_l favorise les faibles valeurs de m_H

Observables électrofaibles : couplages effectifs leptoniques

Couplages effectifs leptoniques

- Quantités mesurées pour $Z \rightarrow l l^+$
 - Γ_l Largeurs de désintégration Γ_l
 - A_l (polarisation du tau)
 - A_l (asymétrie F/B $A_{FB}^{0,l}$)
 - A_l (asymétrie LR/FB faisceaux polarisés)
- Universalité des 3 leptons

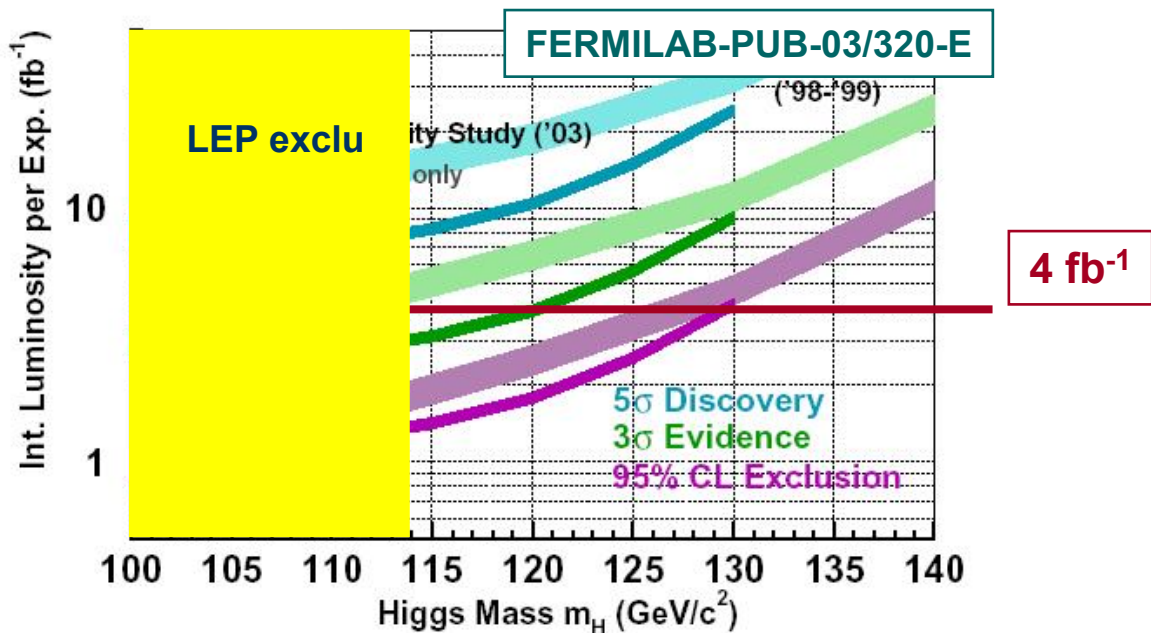
LEP1 + SLD



La recherche Higgs au TeVatron : Bilan Revisité ...

Perspectives

- Re-analyses (2003) faites en utilisant les données Run IIa
 - Canaux $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ et $ZH \rightarrow \nu\nu b\bar{b}$
 - Ré-estimation des fonds
 - Paramétrage de l'efficacité d'étiquetage des b
 - Etudes de résolution $M_{b\bar{b}}$

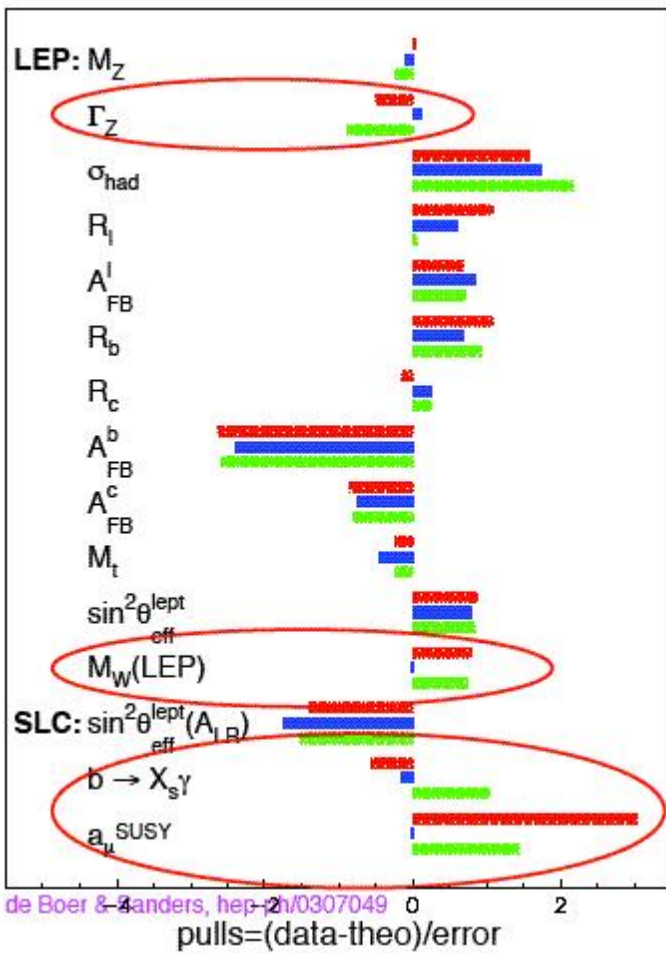


- Le "Run IIa" est défini par la durée de vie des détecteurs de Vertex
 - Dégradation attendue des performances $\sim 4 \text{ fb}^{-1}$

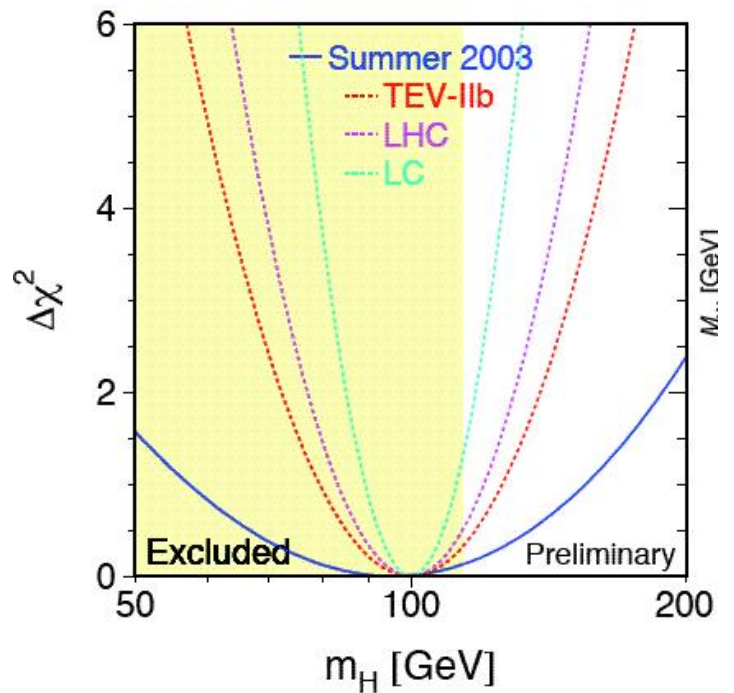


→ La direction de FermiLab a renoncé à l'upgrade des détecteurs de Vertex (début 2003)
 → Il n'est donc pas impossible de retrouver une position similaire à celle de LEP-II d'ici 2007, avec les indices d'un signal statistiquement insuffisamment significatif

Interprétation dans le cadre supersymétrique



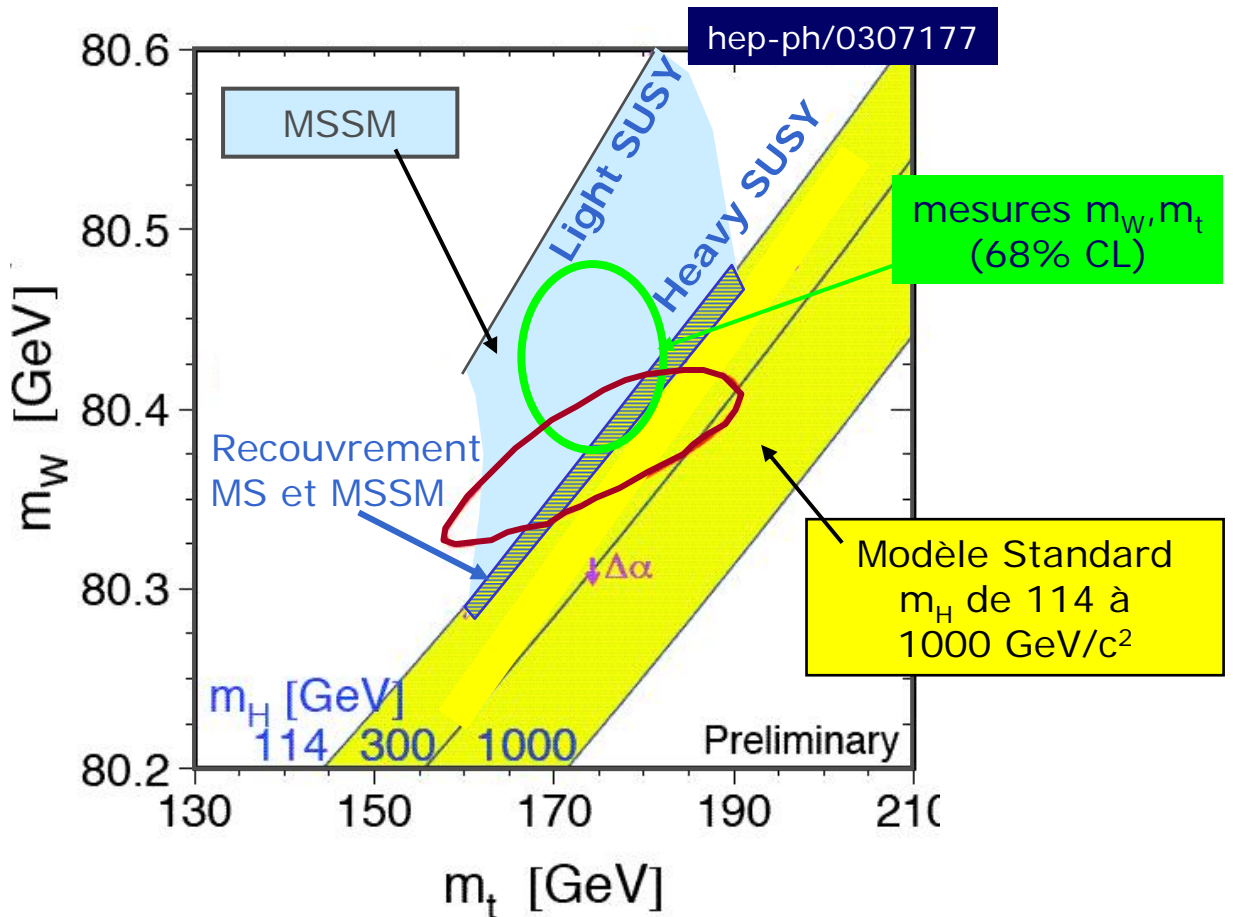
█ SM: $\chi^2/\text{d.o.f} = 27.2/16$
█ MSSM: $\chi^2/\text{d.o.f} = 16.4/12$
█ CMSSM: $\chi^2/\text{d.o.f} = 23.2/16$



Interprétation dans le cadre supersymétrique

Interprétation dans (m_W, m_t)

- Comparaison MS vs SUSY
 - Zone SUSY légèrement favorisée vs MS
 - Recouvrement faible entre le MS et le MSSM
 - ➔ Correspondant à $m_h < 135 \text{ GeV}/c^2$



- Zone SUSY: MSSM non contraint
 - "Light SUSY" : $M_{\text{SUSY}} \sim$ valeur limites inférieures
 - "Heavy SUSY" : $M_{\text{SUSY}} \sim O(\text{TeV}/c^2)$ (limite découplage)

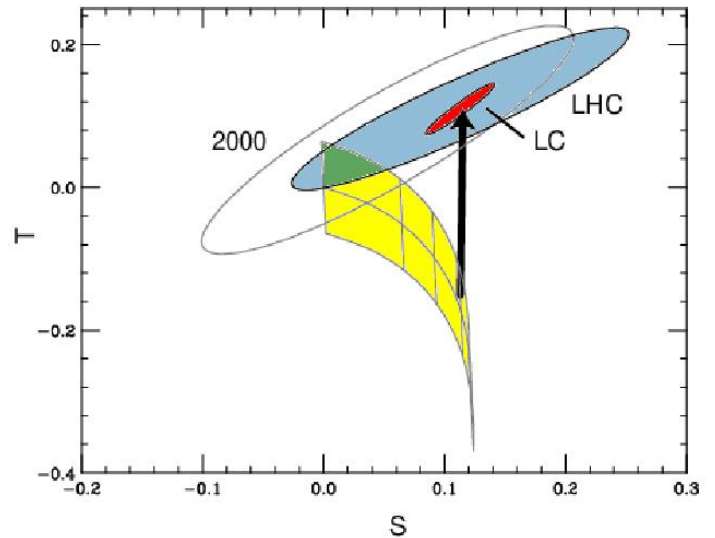
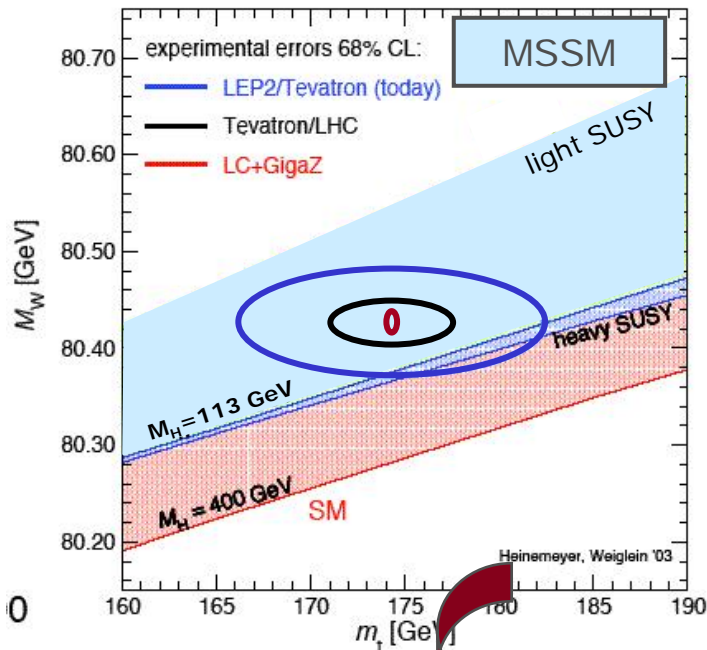
Les modèles SUSY sont légèrement favorisés vs le MS

Interprétation MS versus SUSY : prospectives

Observables électrofaibles

- Gain en sensibilité
 - TeVatron RUN II + LHC (ATLAS+CMS) + ILC

	Now	RunII (2fb ⁻¹)	RunII (8 fb ⁻¹)	LHC (30 fb ⁻¹)	LC
$\Delta\sin^2\theta_{\text{eff}}$	17	78	78	14-20	1.3
δm_W (MeV)	33	27	20	15	7
δm_t (GeV)	5.1	2.7	2.0	1.0	0.13
δm_H (MeV)	---	---	?	100	50



Le LHC et le ILC devraient
permettre de distinguer les modes

Les observables électrofaibles : la masse du quark top (m_t)

Masse du quark Top au TeVatron

- Luminosité : $L \approx 110 \text{ pb}^{-1}$

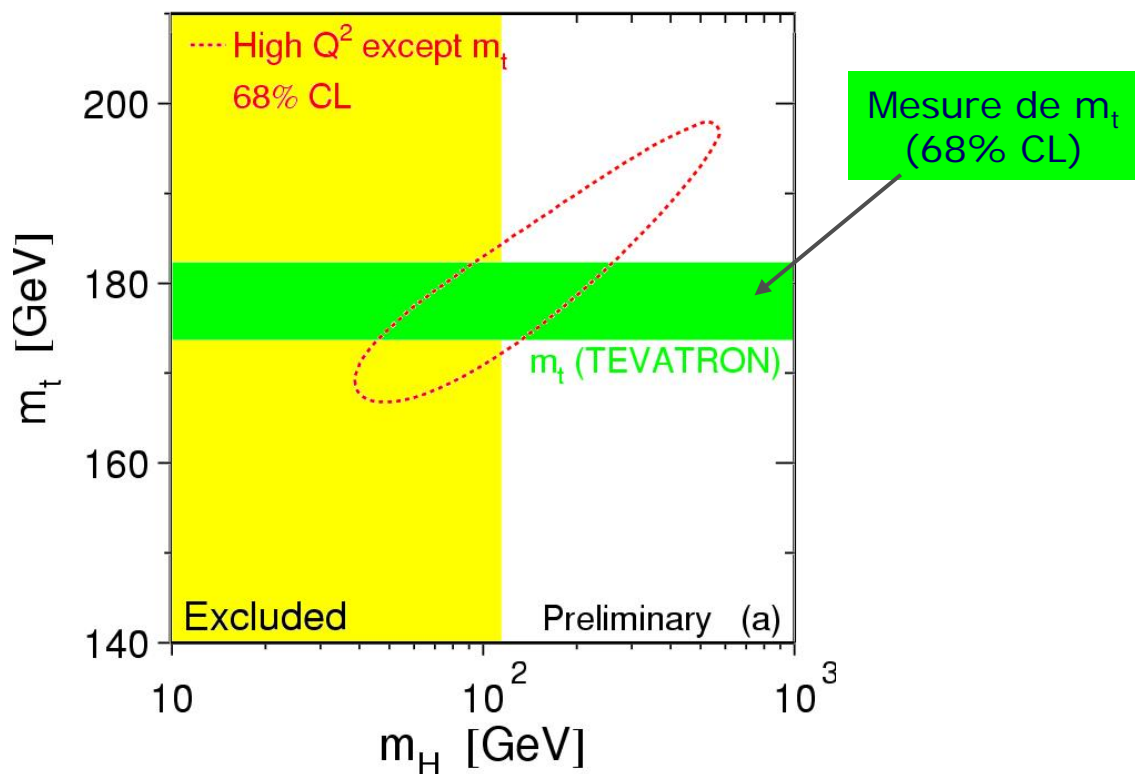
- Canaux de recherche

Préliminaire

$pp \rightarrow tt$

$\rightarrow WbWb \rightarrow l\nu b \text{ qq}b \llcorner \text{ lepton+jets} \llcorner$

$\rightarrow WbWb \rightarrow l\nu b \text{ l}\nu b \llcorner \text{ di-lepton} \llcorner$



- Combinaison Run1

- Incertitudes = 2.7(stat.) + 3.3(syst.)

$$m_t(\text{Run1}) = 178.0 \pm 4.3 \text{ GeV}/c^2$$

$$\Delta m_t(\text{Run2}) = \pm 2.0 \text{ GeV}/c^2$$

Les observables électrofaibles : la masse du boson W (m_W)

Masse du W à LEP

- Canaux de recherches :

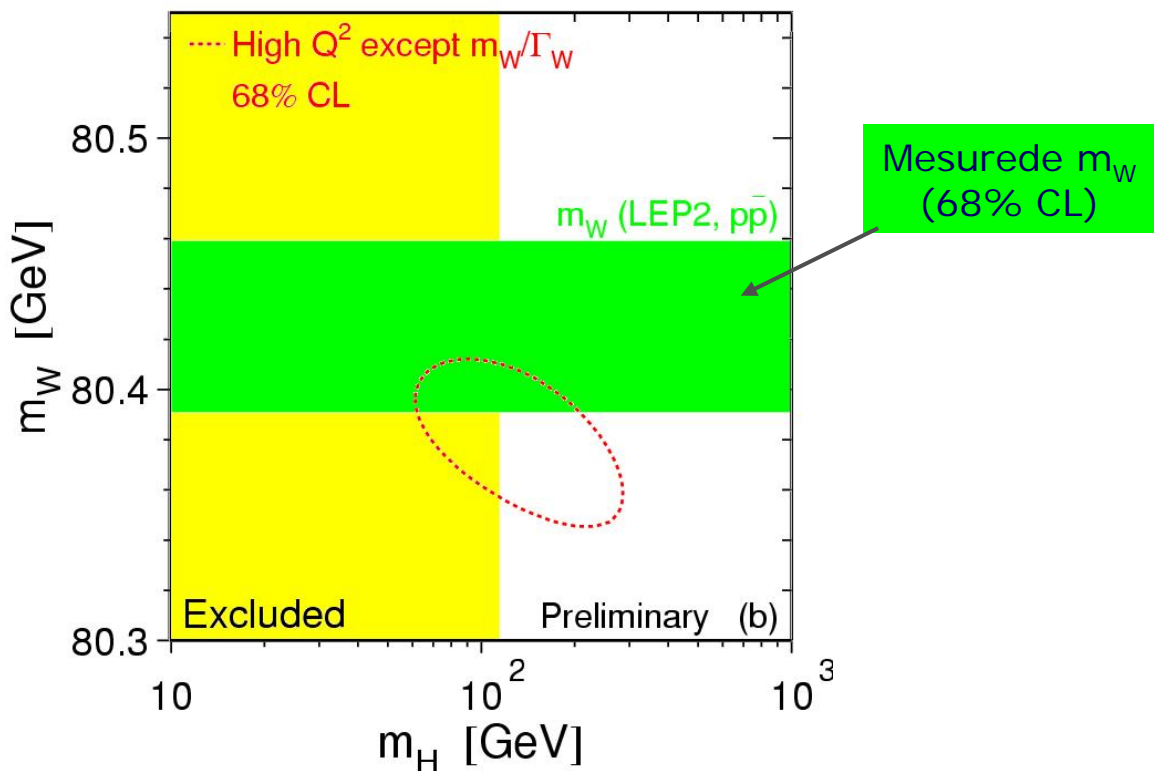
$e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow qqqq, qq\ell\nu, \ell\nu\ell\nu$

Préliminaire

Reconstruction de la masse invariante M_{inv}

~36000 événements

$$m_W(\text{LEP}) = 80412 \pm 42 \text{ MeV}/c^2$$



Masse du W au TeVatron

- Canaux de recherche

$pp \rightarrow W+X \rightarrow \mu\nu/e\nu + X$

Reconstruction de masse transverse

$\rightarrow m_T = \sqrt{2} E_T^e E_T^\nu \cos\Phi(e,\nu)$

~70000 évts/exp.

Run1 Final

$$m_W(\text{Run1}) = 80452 \pm 59 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Delta m_W(\text{Run2}) = \pm 20 \text{ MeV}/c^2$$