

## Scenarii pour la physique des hautes énergies

Journée IRFU en préparation au symposium de Cracovie

4 septembre 2012



energie atomique • énergies alternatives

# Grandes questions



(voir: M. Besançon à Giens 2012)

- **Réalisation de la brisure de la symétrie électrofaible ?**
- **Unitarité de modèle standard à l'échelle du TeV ?**
- **Stabilité de l'échelle électrofaible et naturalité ?**
- **Nature de la matière noire ?**
- **Unification des interactions, y compris la gravitation ?**

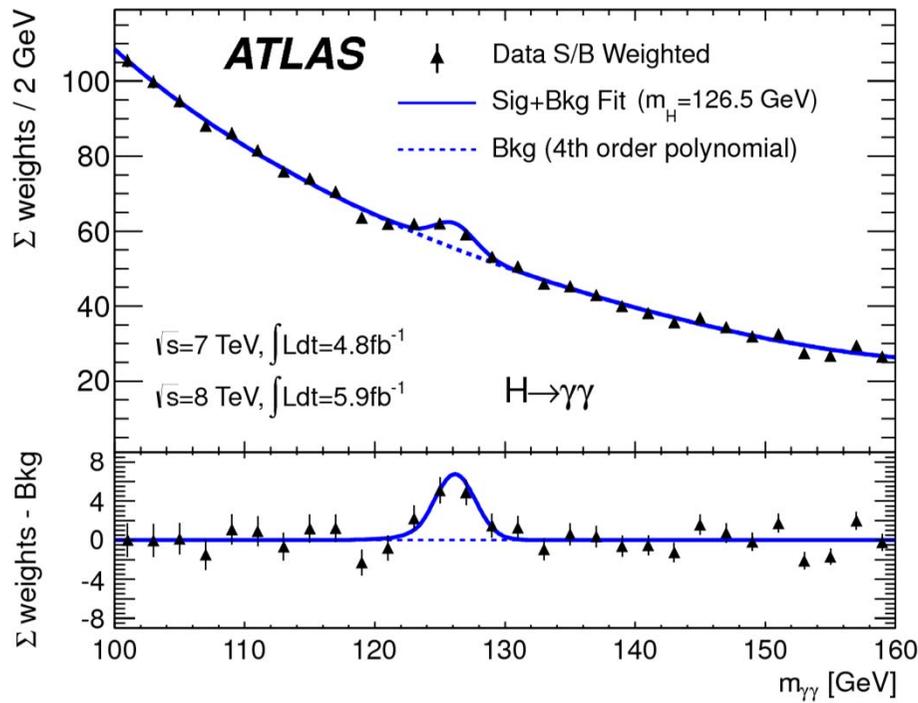
La découverte d'un boson de Higgs à une masse de 125 GeV  
apporte des éléments de réponses aux deux premières questions

encore faut-il déterminer dans quelle mesure l'existence du nouveau boson  
résout les deux questions entièrement (cas du modèle standard)  
ou partiellement (cas de modèles à plusieurs doublets de Higgs)

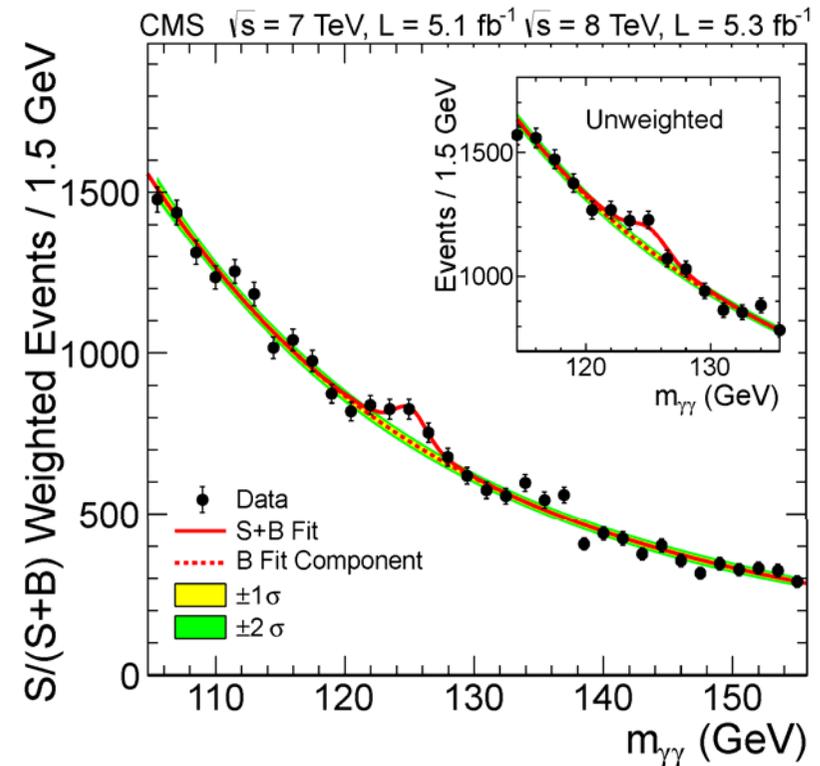
Les autres questions pourraient rester sans réponse après la première phase du LHC

- **Le boson de Higgs a été découvert**  
à une masse de 125 GeV  
*seule particule manquante du MS jusqu'alors*
- **Mesures de précision électrofaibles**  
masse des bosons de jauge, masse du quark top, etc.  
*cohérence des données expérimentales avec prédictions du MS*
- **Pas d'indication de nouvelle physique (NP)**
  - pas d'observation directe de super-particules
  - pas de nouvelle résonance à haute masse
  - pas de désintégration anormale  $B_s \rightarrow \mu\mu$
  - pas de déviations par rapport aux prédictions en physique du top
  - pas de production anormale de di-bosons*contraintes fortes sur les modèles SUSY et NP les plus simples*
- **Peu d'anomalies subsistent**
  - asymétrie avant-arrière dans la production de paires de tops au Tevatron
  - désaccord à  $3\sigma$  dans  $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$  (BABAR), tensions dans  $B \rightarrow \tau \nu$
  - et toujours  $g-2$  du muon...*LHCb a « tué » beaucoup d'anomalies dans le domaine de la saveur*

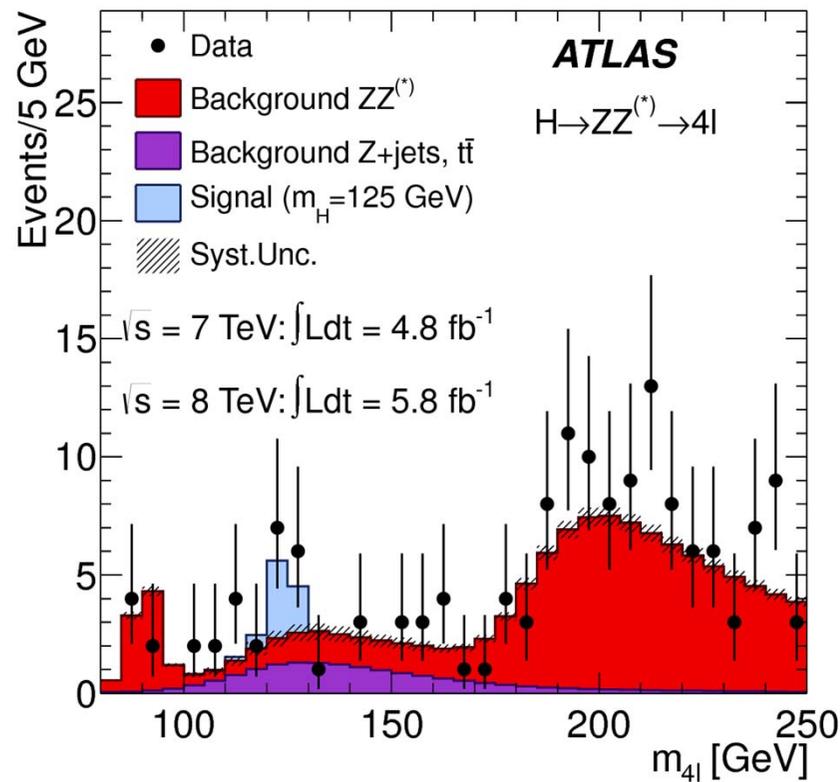
## ATLAS



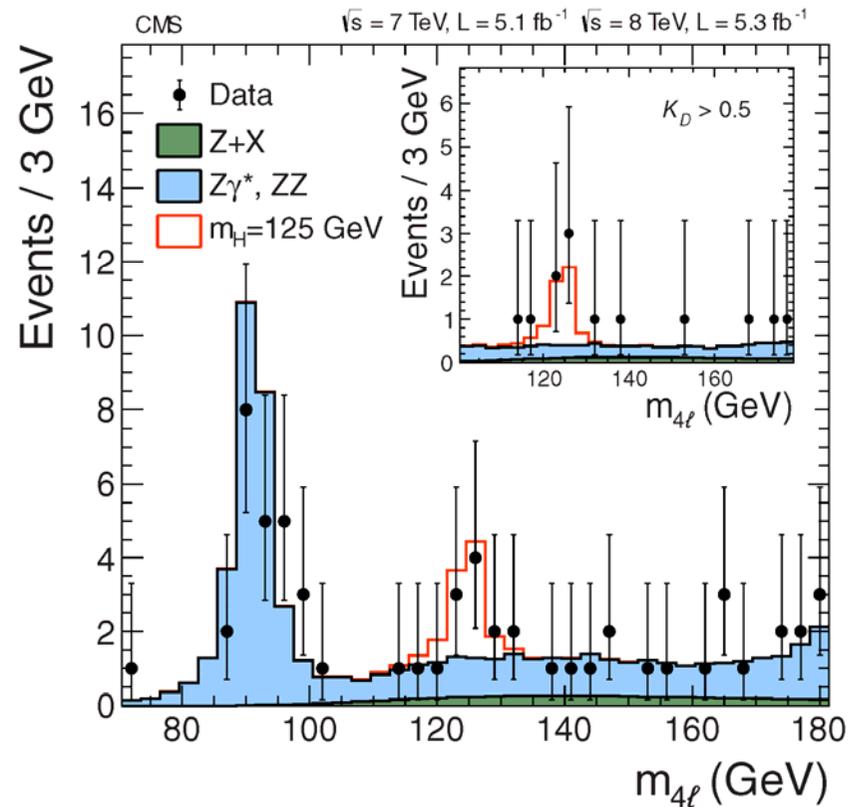
## CMS



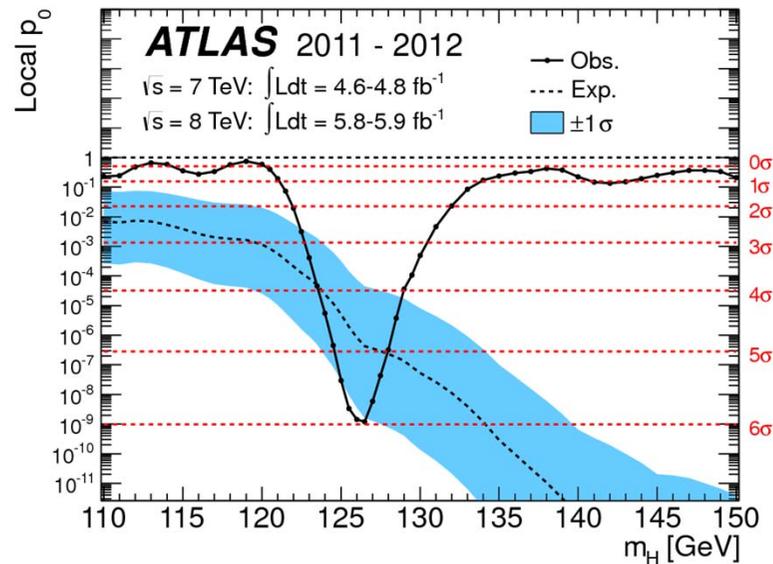
## ATLAS



## CMS



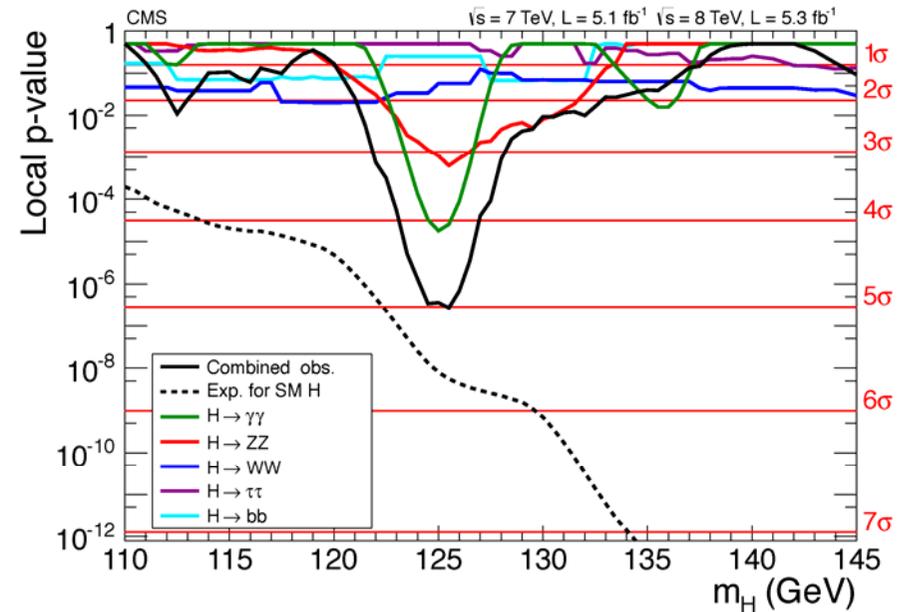
## ATLAS



**6-sigma**

$m = 126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (syst)} \text{ GeV}$

## CMS

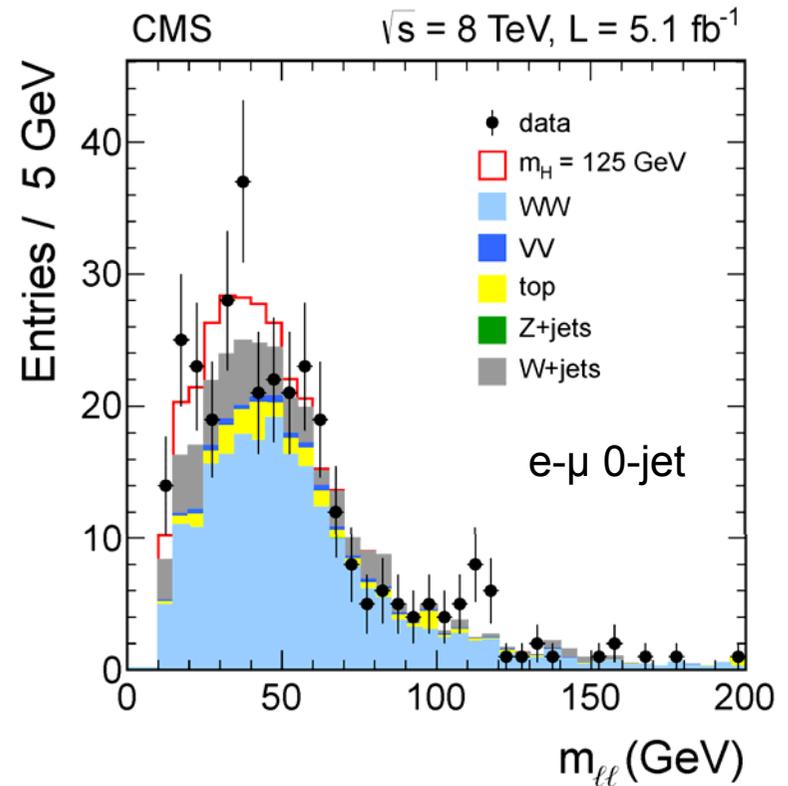
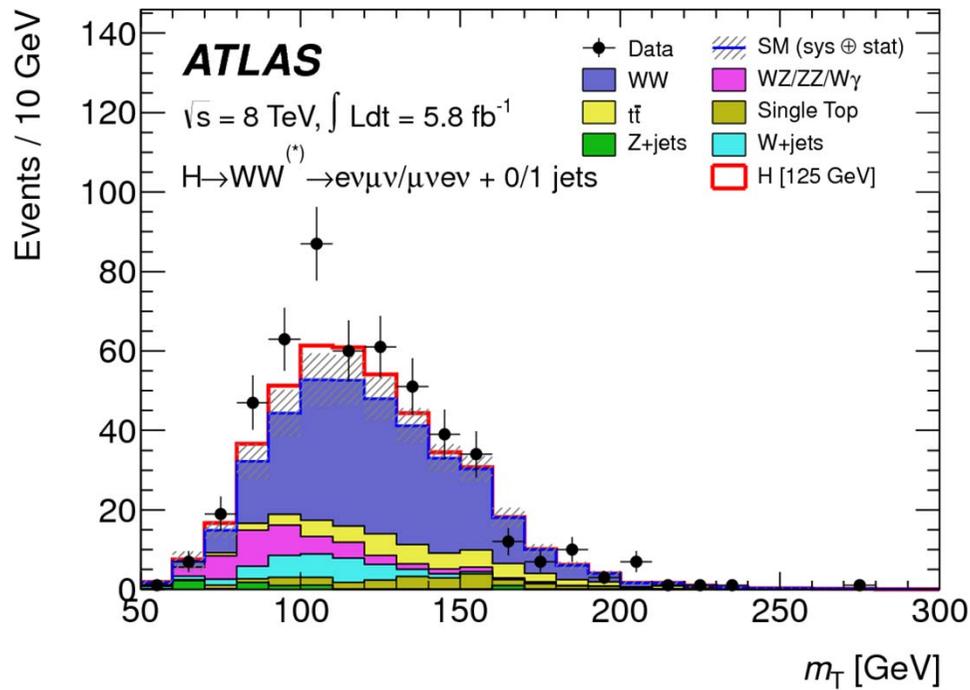


**5-sigma**

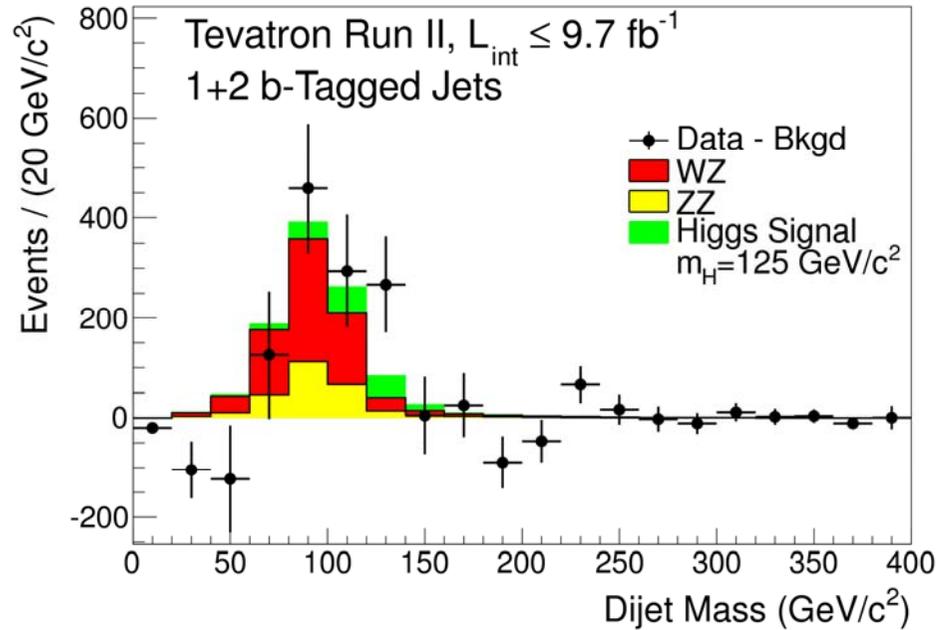
$m = 125.3 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.5 \text{ (syst)} \text{ GeV}$

## ATLAS

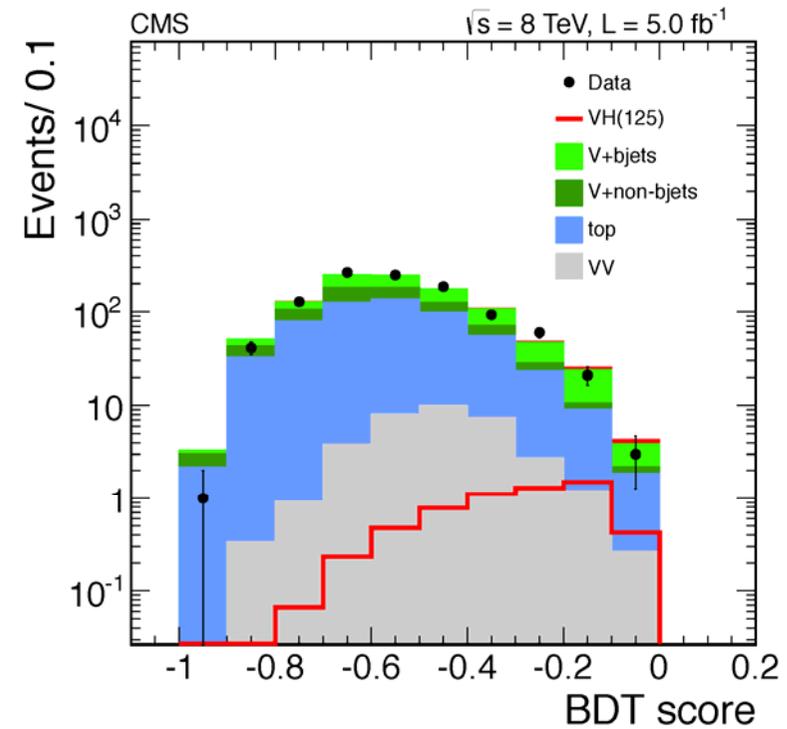
## CMS



## CDF+DØ



## CMS





# Higgs par mode

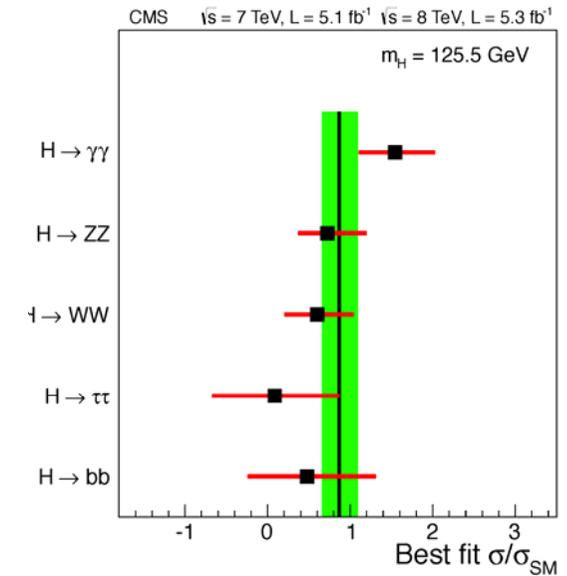
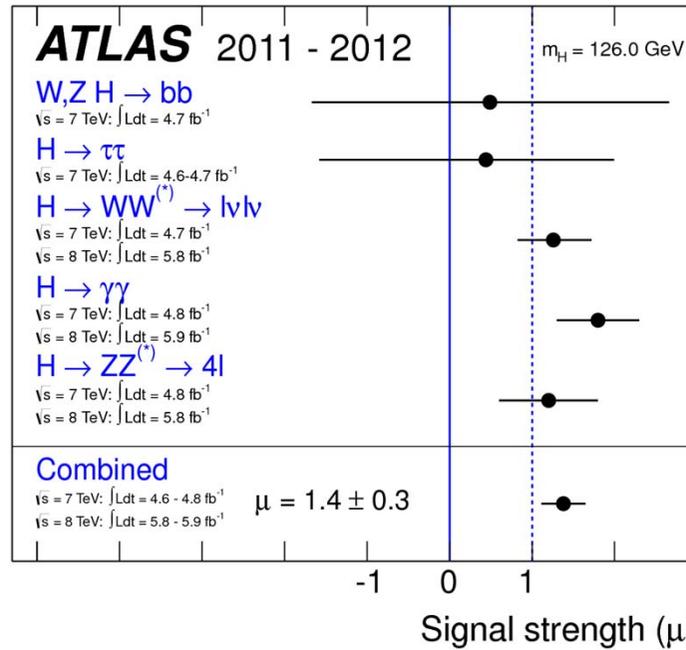
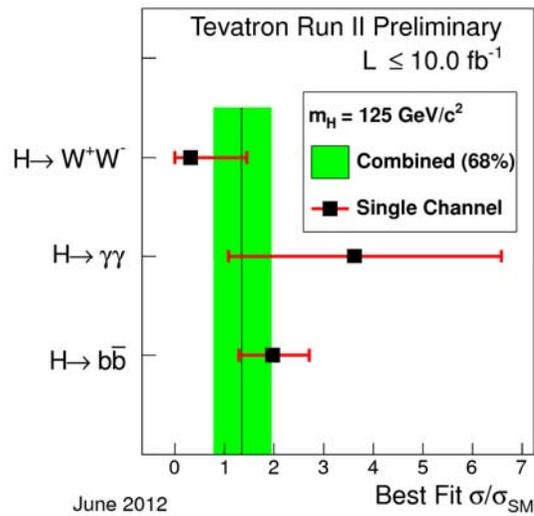


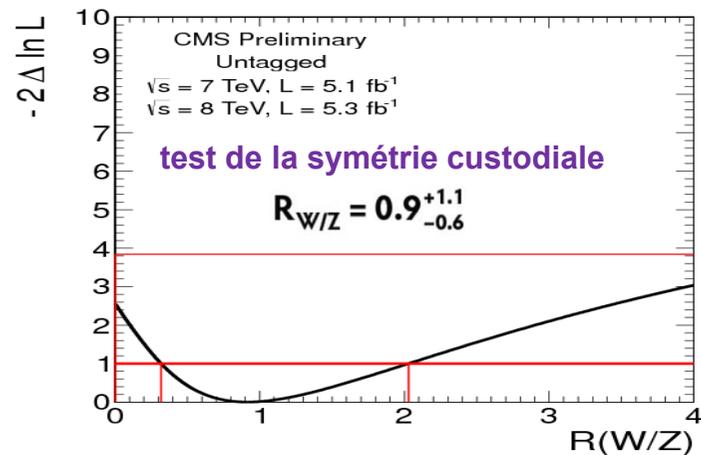
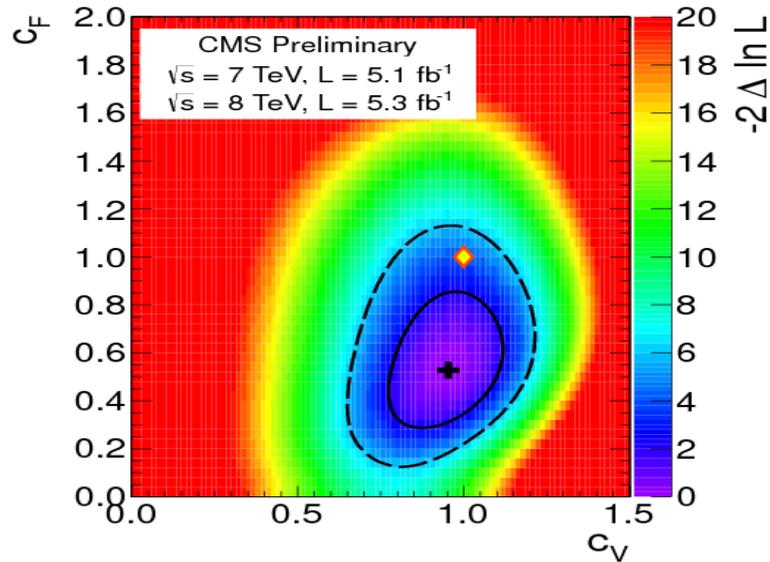
energie atomique • energies alternatives

## CDF+DØ

## ATLAS

## CMS





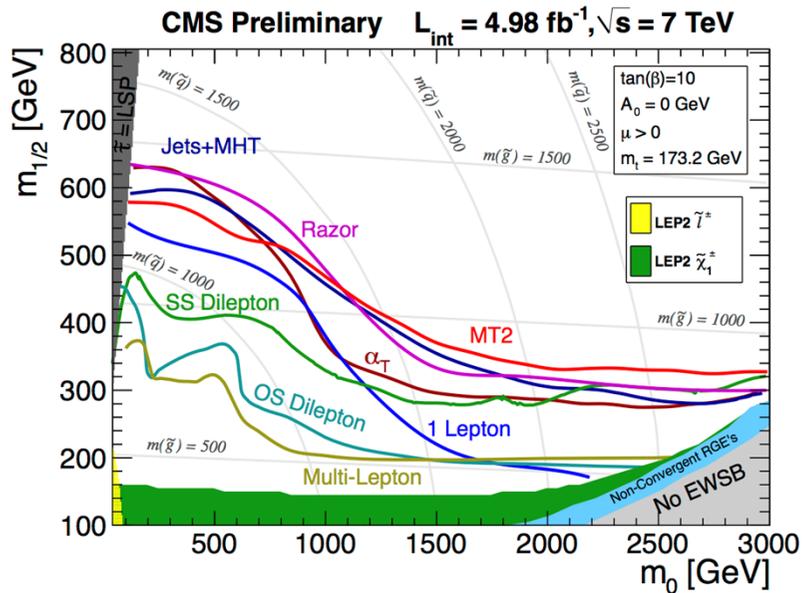
### Faits expérimentaux

- **Couplage aux photons**  
boson, spin pair (0 ou 2)
- **Couplage aux W et Z**  
et respect de la symétrie custodiale
- **Pas d'indication de production anormale**  
fusion de gluons dominante au LHC  
indication de production associée WH au Tevatron
- **Evidence de couplage au quark b**  
au Tevatron
- **Masse en accord avec les**  
mesures de précision électrofaibles

### Hypothèses 2013 (20 fb<sup>-1</sup> par exp.)

1. le nouveau boson a des propriétés compatibles avec celles du boson de Higgs du MS
2. des désaccords significatifs sont mis à jour
  - productions VBF et associées anormales
  - excès confirmé dans la désintégration en 2 photons
  - pas de désintégration en 2 leptons-tau
  - désintégration en 2 quarks b non confirmée
  - etc.

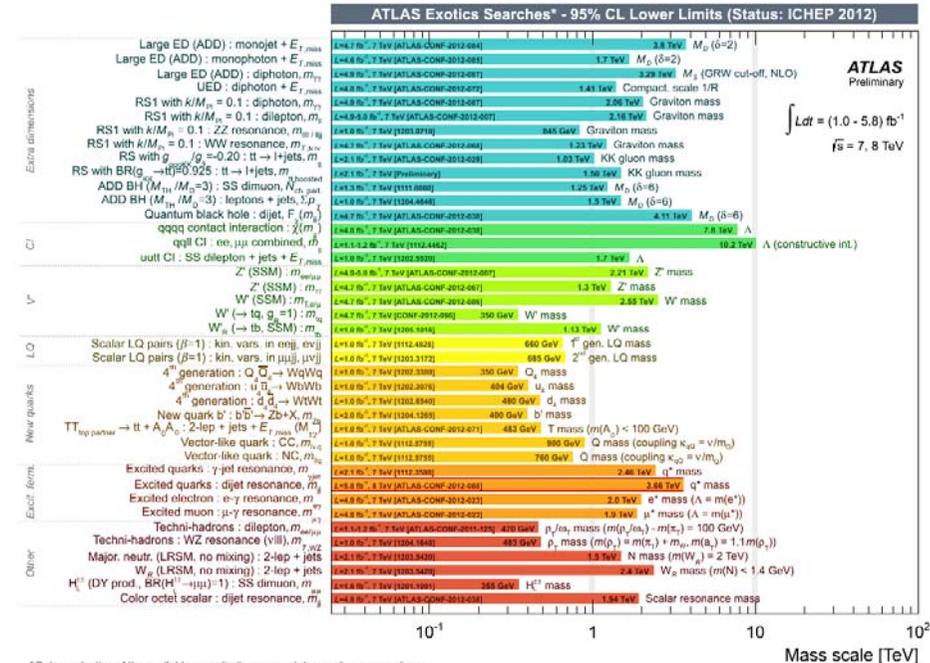
Selon moi, H1 plus probable...



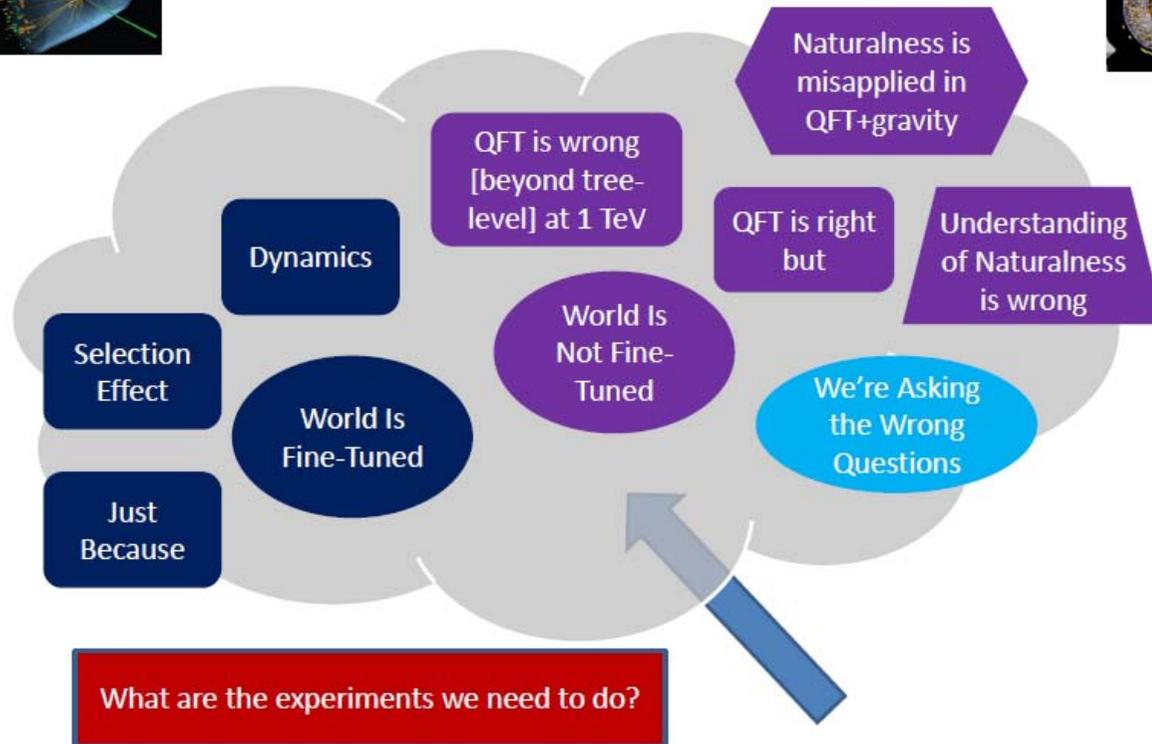
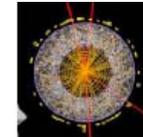
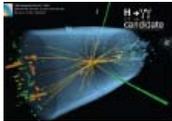
espace des paramètres de plus en plus restreint pour les modèles de brisure de SUSY les plus simples

sauf surprise, on n'en apprendra pas beaucoup plus (qualitativement) du run à 8 TeV

importance cruciale de la montée en énergie à 13-14 TeV



limites directes sur de nouvelles particules massives de l'ordre de 1 TeV (voie s) ou de 500 GeV (production par paire)



Standard Model successfully describes all LHC and pre-LHC particle physics data to within available precision

De quelles expériences avons-nous besoin ?

1. expériences **aux plus hautes énergies possibles** (*frontière en énergie*)
2. expériences **de précision** pour mettre à jour des déviations par rapport aux prédictions du MS

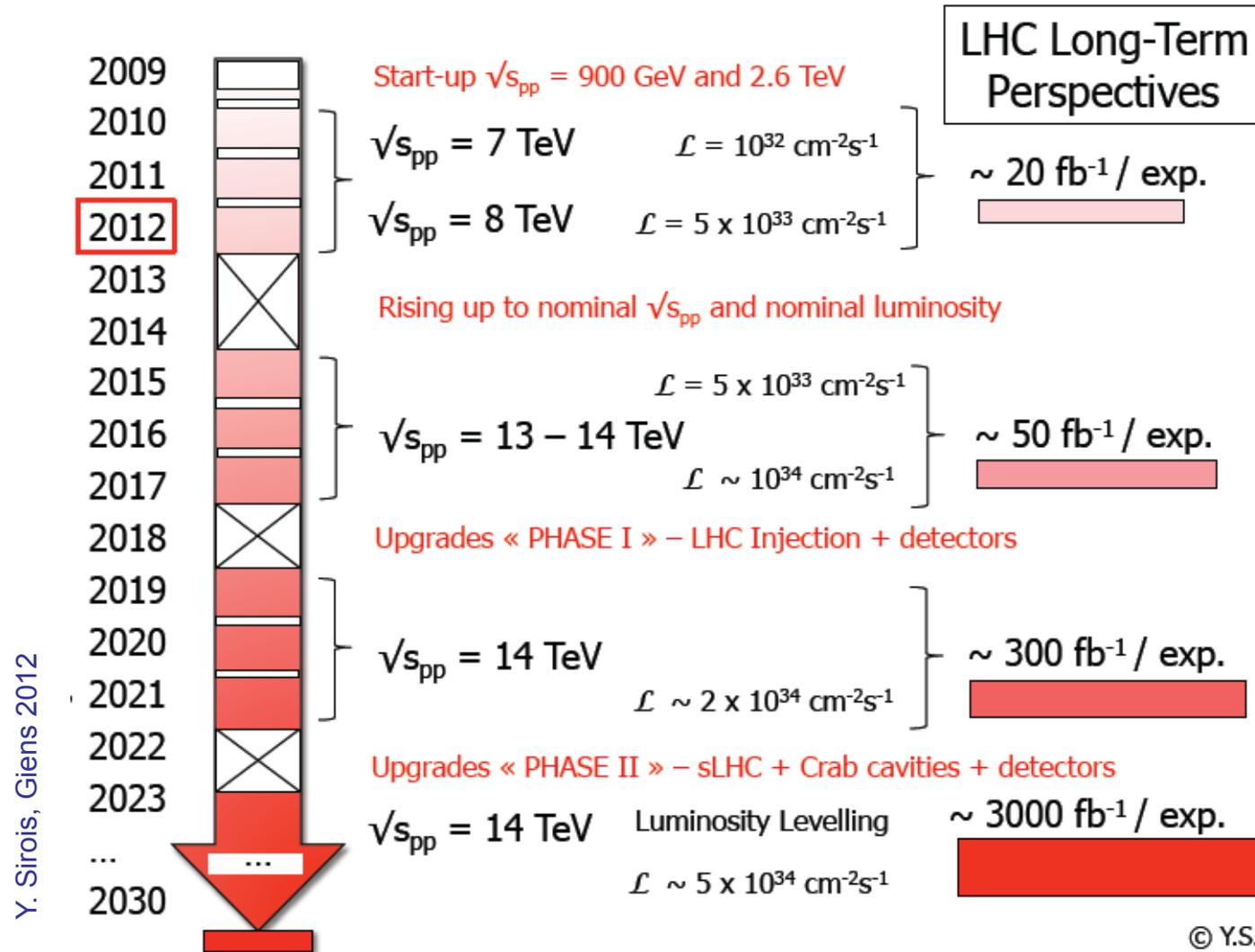
L'histoire de la physique **des particules** nous enseigne l'importance de cette **complémentarité**

Matt Strassler @ HH2012

# Feuille de route du LHC



La frontière  
en  
énergie



© Y.S.



# HL-LHC@14TeV, 300 fb<sup>-1</sup>



energie atomique • energies alternatives

2015-2021

## Boson de Higgs

- mesures (peu précises) des couplages

## Chaque mesure

apporte des informations sur

- le mode de production :  
 $gg \rightarrow H, ttH, WH, ZH, VBF$
- le canal de désintégration :  
 $H \rightarrow WW, ZZ, \gamma\gamma, bb, \tau\tau$

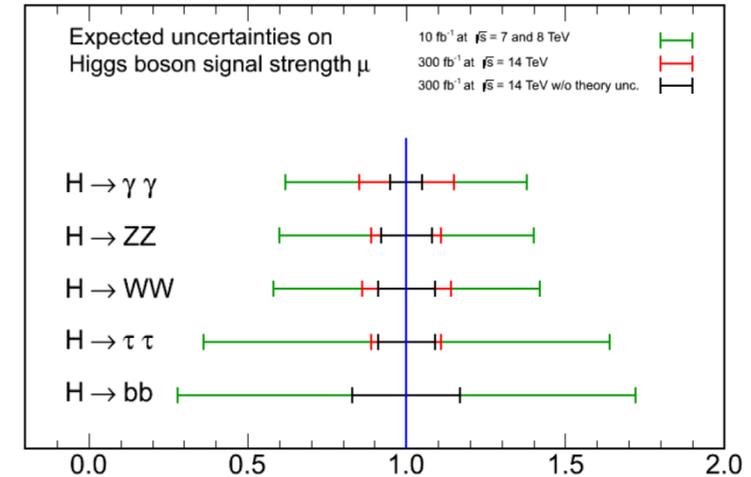
## Supersymétrie & Nouvelle physique

- Intensification des recherches de s-partenaires de la troisième génération

## Modèle standard

- $B_s \rightarrow \mu\mu$ , etc.
- Masse du top, masse du W, etc.
- Processus rares : top, dibosons, etc.

CMS Projection



mH = 125	10/fb 7&8 TeV	300/fb 14 TeV
C $\gamma$	0.27	0.05
C $v$	0.26	0.05
C $g$	0.49	0.11
C $q$	0.53	0.12
C $l$	0.41	0.05

2023-2033

## HL-LHC@14TeV: 3000 fb<sup>-1</sup> en 10 ans

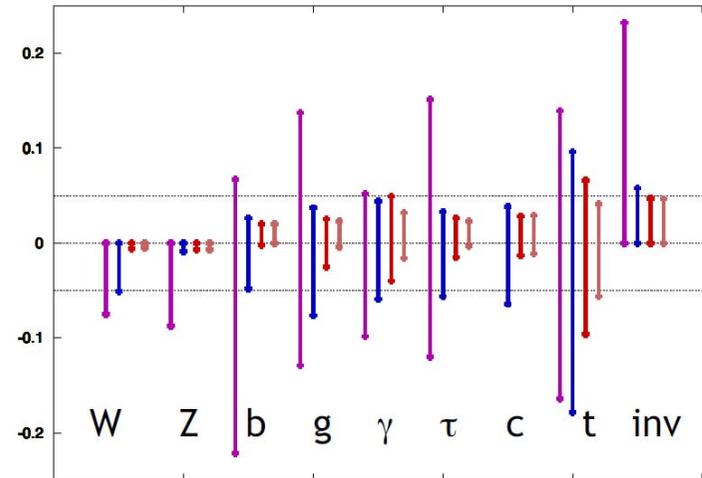
conditions expérimentales dantesques  
(200 événements de pile-up par croisement)

- signatures limitées statistiquement (ZZ\*)
- désintégrations super rares  
H → μμ (~7σ), H → Zγ (~10σ)
- mise en évidence de la production HH et contraintes sur l'auto-couplage (?)
- étude de la diffusion des W à haute énergie
- sensibilité accrue à haute masse (20-40%)

## Le HL-LHC est le seul choix possible à moyen terme pour le CERN...

- le secteur de Higgs est un « cas de physique » clair pour **HL-LHC**
- seules des données expérimentales peuvent indiquer la voie à suivre vers la NP
- le boson de Higgs devient la passerelle la plus prometteuse vers la NP
- le LHC est **la seule machine à la frontière en énergie**,  
il faut exploiter au maximum son potentiel de découverte

$g(\text{hAA})/g(\text{hAA})|_{SM}-1$  LHC/HLC/ILC/ILCTeV



Michael Peskin @HH2012

LHC → HL-LHC  
l'amélioration sur la précision des couplages du Higgs est assez modeste

Est-ce suffisant pour sortir du brouillard ?

## Evolution du LHC

- 2014-2017 – LHC :  $\sim 50 \text{ fb}^{-1}$  @ 13-14 TeV
- 2019-2021 – HL-LHC phase 1 ( $\rightarrow 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) :  $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$  @ 14 TeV
- 2023-2033 – HL-LHC phase 2 ( $\rightarrow 5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) :  $\rightarrow 3000 \text{ fb}^{-1}$  @ 14 TeV

## Successeur du LHC au CERN ?

- HE-LHC  $\rightarrow 300 \text{ fb}^{-1}$  @ 33 TeV

## Collisionneurs e+e- ?

- ILC linéaire 250  $\rightarrow$  500  $\rightarrow$  800 GeV
- CLIC linéaire 500  $\rightarrow$  1400  $\rightarrow$  3000 GeV
- LEP3 synchrotron 250 GeV
- un nouvel anneau de 80 km ? (idée proposée par Roy au SPC)

## Autres projets ?

- LHeC ep 400 x 3500 GeV
- collisionneurs  $\gamma\gamma$  et  $\mu\mu$
- ...



# ILC, LEP-3, CLIC



## ILC

- une machine froide, cavités supra, gradient  $\sim 30$  MV/m
- technologie mature (XFEL)
- 500 GeV correspond à 30 km
- consommation électrique  $>100$  MW
- possibilité de 2 détecteurs en push-pull

## LEP-3

- une machine à 240 GeV dans le tunnel du LHC
- possibilité d'utilisation de cavités ILC
- consommation électrique  $\sim 20$  MW
- 2 points d'interaction

## CLIC

- un schéma à deux faisceaux, gradient  $\sim 100$  MV/m
- technologie d'avenir, en développement
- 500 GeV  $\rightarrow$  14 km, 1 TeV  $\rightarrow$  25 km, 3 TeV  $\rightarrow$  48 km
- consommation électrique ??

## 1. Décision de ne pas construire de machine électron

- HL-LHC seule machine à la frontière HE au moins jusqu'en 2033
- précision relativement modeste sur les couplages du Higgs  
MAIS vérification du couplage du Higgs aux fermions dans au moins deux familles avec l'observation  $H \rightarrow \mu\mu$
- mesure de l'auto-couplage du Higgs possible, mais au mieux imprécise
- potentiel de découverte important de nouvelle physique
- en fonction des découvertes au LHC *circa* 2018,  
décision en faveur d'un CLIC ou d'un HE-LHC (horizon 2040)

## 2. Décision de construire un ILC à 250 GeV (upgradable à 500/800 GeV)

*(la décision doit avoir lieu avant 2015 pour un démarrage vers 2025)*

- un programme de physique au moins jusqu'en 2040
- ... complémentaire du HL-LC
- une précision de l'ordre du pourcent sur la plupart des couplages
- un accès au couplage au charme (quark deuxième famille) et aux gluons
- mesure directe de la largeur invisible

## 3. Décision de construire un LEP3 à 240 GeV

- même physique de précision (à moindre coût)  
sauf masse du top, masse du W, couplage Htt, auto-couplage, etc.
- compatibilité avec le HL-LHC ?

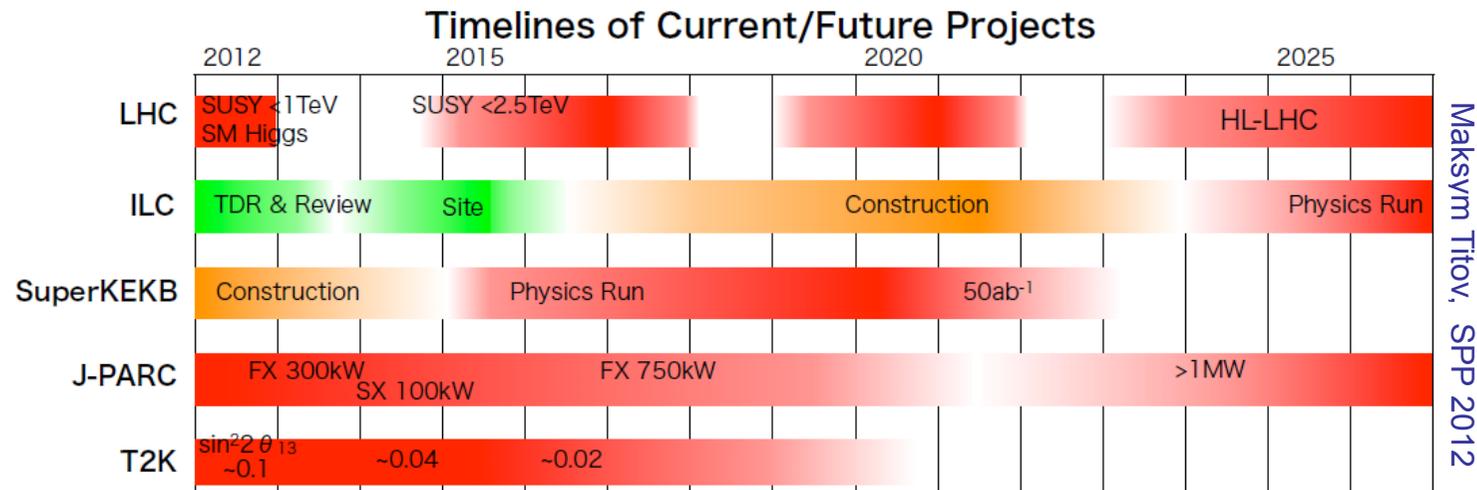
## Recommandation du Sous-comité aux Projets Futurs

If a new particle such as a Higgs boson with mass below around 1 TeV with mass 125 GeV is confirmed at the LHC Japan should *will* take the leadership in early realization of an  $e^+e^-$  linear collider

本小委員会は日本の高エネルギー物理学の基幹となる大規模将来計画に関して、以下の提言をする。

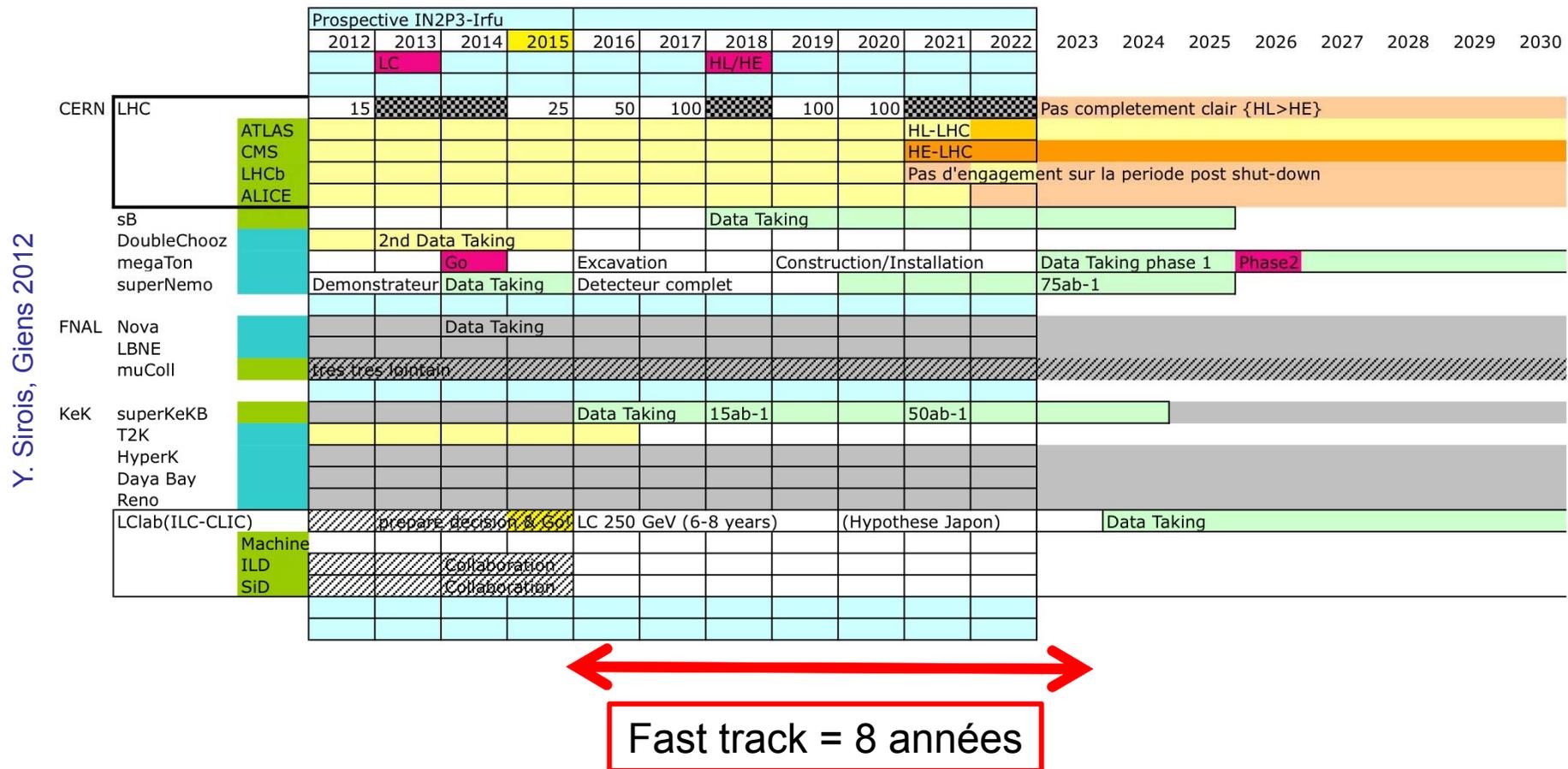
- LHCにおいて1TeV程度以下にヒッグスなどの新粒子の存在が確認された場合、日本が主導して電子・陽電子リニアコライダーの早期実現を目指す。特に新粒子が軽い場合、低い衝突エネルギーでの実験を早急に実現すべきである。一方でLHCおよびそのアップグレードによって間断なく新物理の探究を続けていく。新粒子・新現象のエネルギースケールがより高い場合には、必要とされる衝突エネルギーを実現するための加速器開発研究を重点強化する。

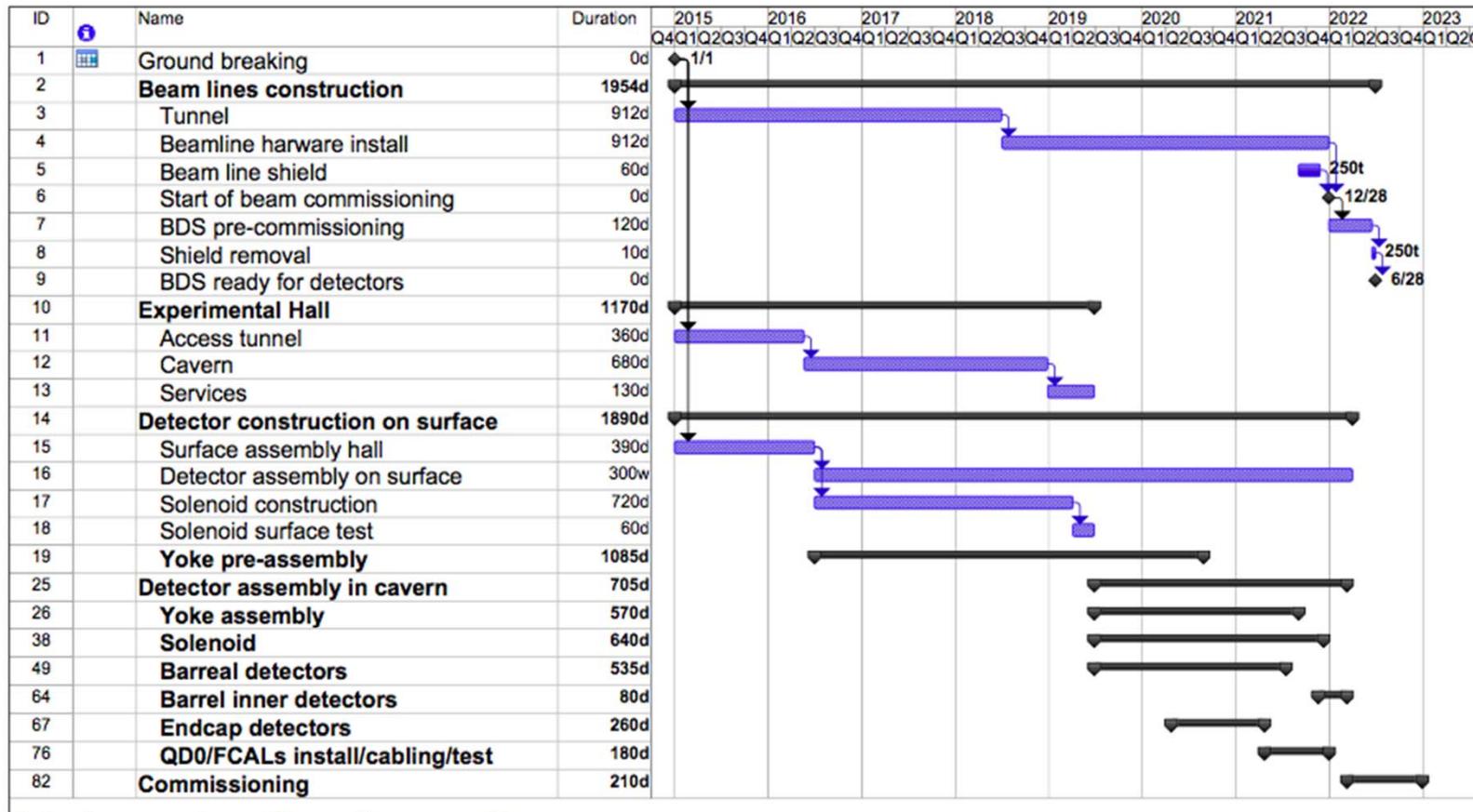
Higgs = ヒッグス



**Machine à 250 GeV**, upgradable à 500-600 GeV (au Japon)

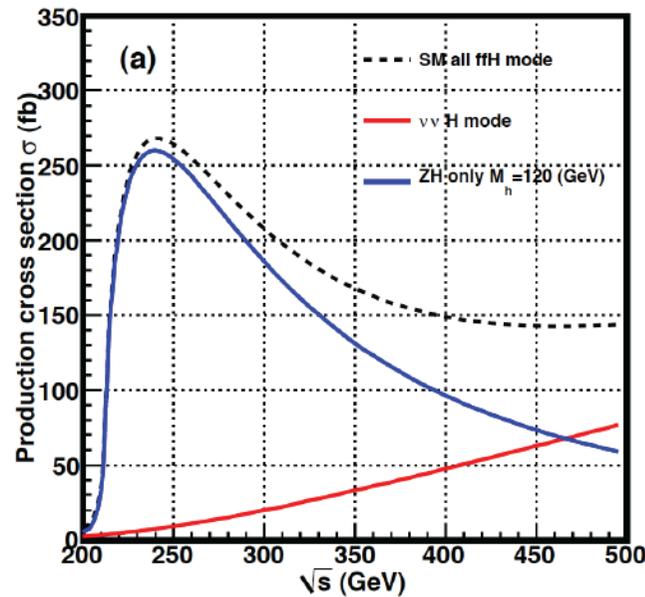
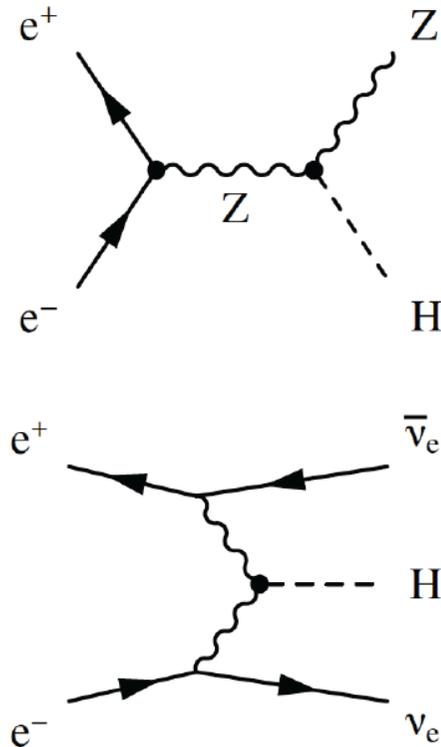
Prise de décision : 2013 – construction : 2015-2022 – prises de données : 2023



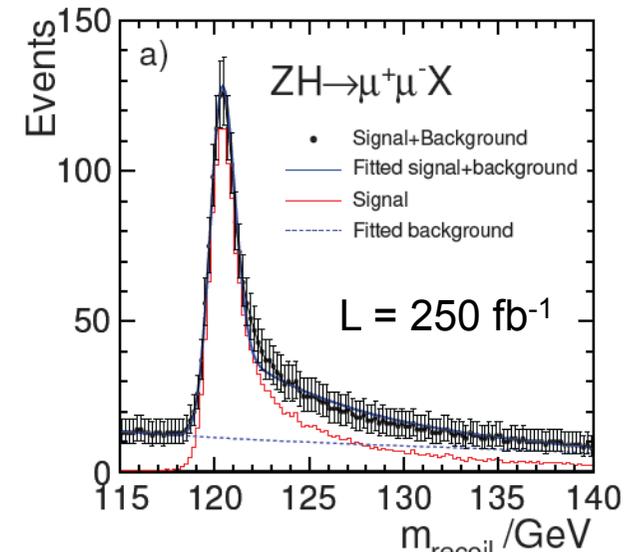


François Lediberder IPNO 2012

- Total construction time: ~8 years
- Detector underground construction: ~3 years



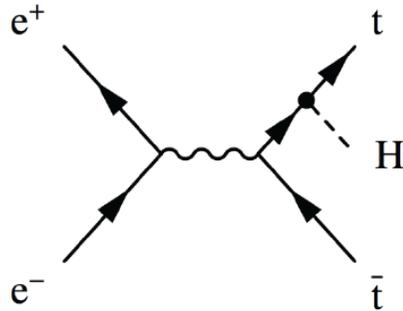
pour  $m_H = 125$  GeV,  
section efficace @ 250 GeV = 250 fb



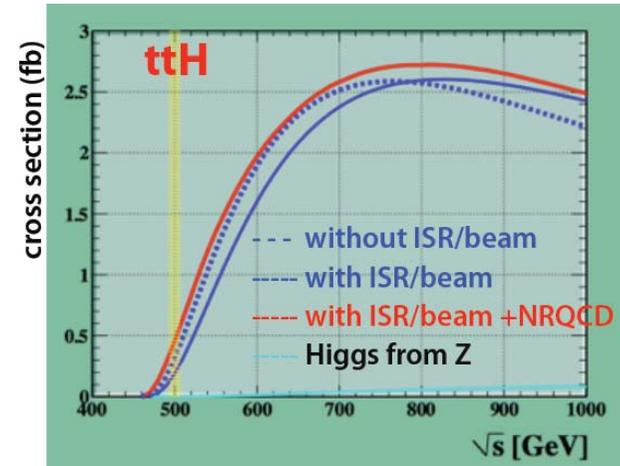
$\Delta(g_{HZZ})/g_{HZZ}$  1.5 %

Energy/GeV	250
H→bb: $\Delta(\text{BR})/\text{BR}$	2.7 %
H→cc: $\Delta(\text{BR})/\text{BR}$	9 %
H→gg: $\Delta(\text{BR})/\text{BR}$	10 %
H→ττ: $\Delta(\text{BR})/\text{BR}$	~6 %
H→WW*: $\Delta(\text{BR})/\text{BR}$	~5 %

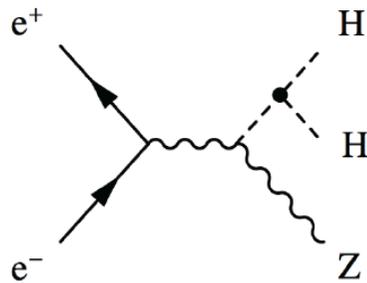
## Couplage de Yukawa au quark top



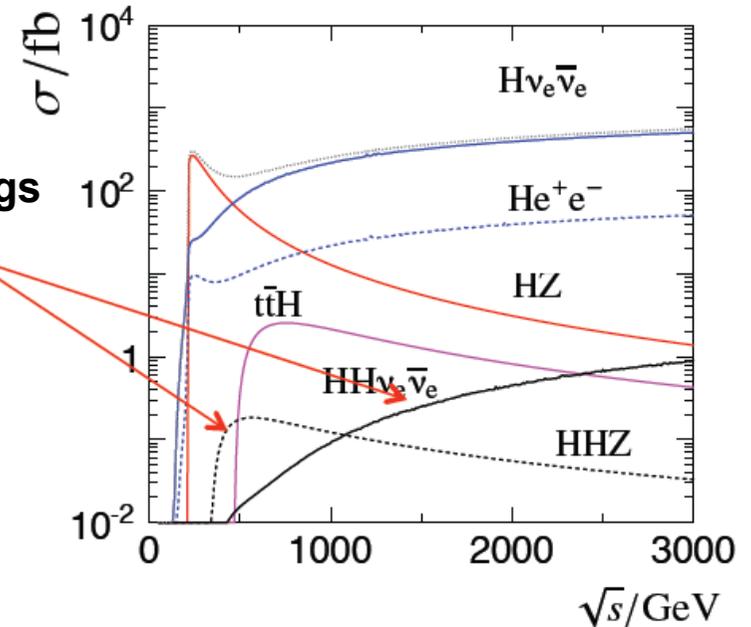
Energy/GeV	500
$\Delta(g_{Htt})/g_{Htt}$	$\sim 10\%$ ?



## Auto-couplage du boson de Higgs



Energy/GeV	500
$\Delta\lambda/\lambda$	$< 50\%$

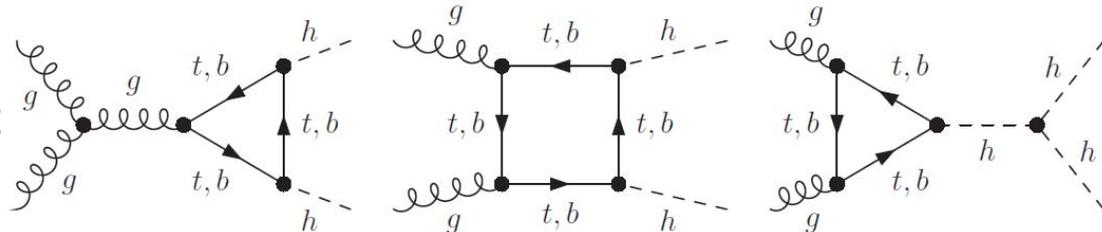


### Section efficace (NLO)

33 (206) fb à 14 (33) TeV

$\lambda=0 \times \text{SM}$  : supérieure d'un facteur 2

$\lambda=2 \times \text{SM}$  : inférieure d'un facteur 2



Incertitudes théoriques : 15-20%

(échelles renormalisation/factorisation)

### Modes envisagés au HL-LHC

(études en cours)

hh →		BR	Comment
bbγγ	ok	0.26%	Possible
bbμμ	?	0.025%	Maybe possible
bbττ	?	3.7%	More studies needed
bb2l2ν	no		Top background
bb4l	?	0.014%	Low rate
YYYY	no	0.00052%	Very low rate
...	?		

### HH → γγbb

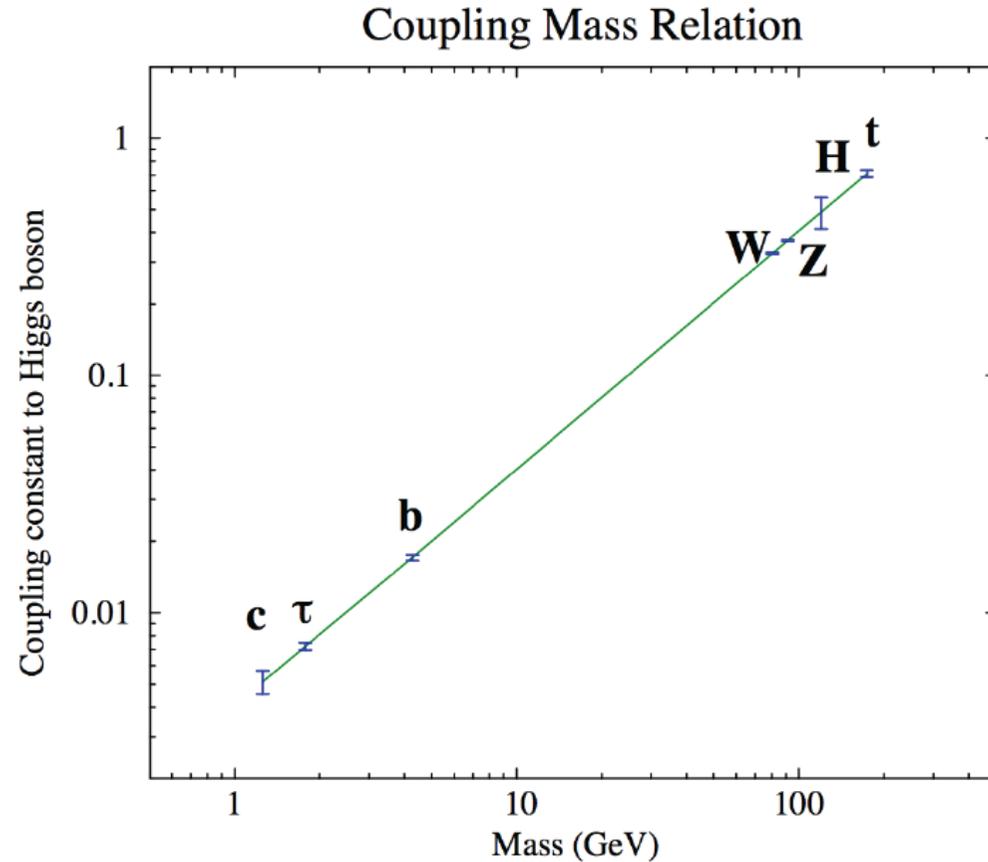
- $\sigma \times \text{BR} = 0.09 \text{ fb} \rightarrow N(3000/\text{fb}) = 270$
- bruits de fond
  - γγbb ( $\sigma \times \text{BR} = 110 \text{ fb}$ )
  - H(γγ)bb ( $\sigma \times \text{BR} = 0.12 \text{ fb}$ )
  - H(γγ)tt ( $\sigma \times \text{BR} = 1.7 \text{ fb}$ )
- événements sélectionnés (étude ATLAS)
  - signal : 12 ( $\lambda=1$ ), 18 ( $\lambda=0$ ), 6 ( $\lambda=2$ )
  - bruit de fond principal : 18 Htt

(probablement pessimiste,  
mais ordre de grandeur correct)

# ILC: Couplages du Higgs

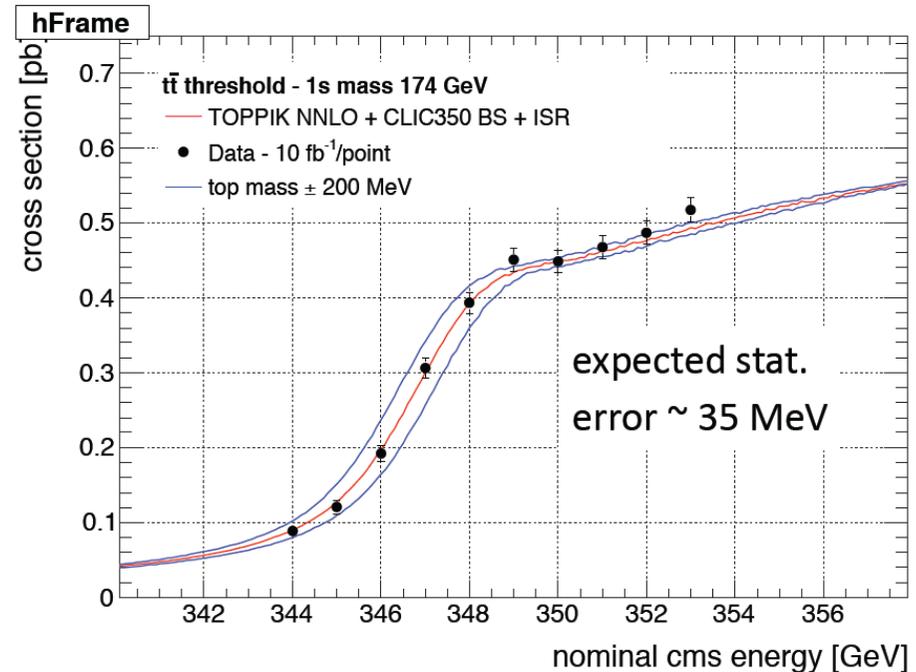


	250	500
$g_{HWW}$	?	1.2 %
$g_{HZZ}$	1.5 %	
$g_{Hbb}$	1.3 %	
$g_{Hcc}$	4.5 %	
$g_{H\tau\tau}$	~3 %	
$g_{Htt}$	-	10 %
$g_{H\mu\mu}$	-	
$\lambda_{(HHH)}$	-	<50 %



## Scan au seuil du top

Des effets QCD d'états liés  $t\bar{t}$  amplifient la section efficace au seuil, mais conduisent à des incertitudes théoriques



## Mesures directes, LC@500 GeV et 100 fb<sup>-1</sup>

	masse	largeur
tout hadronique ( bqq bqq ) :	90 MeV	60 MeV
semi-leptonique ( bln bqq ) :	120 MeV	100 MeV



- **L'étude de précision des couplages du boson de Higgs** est une (la) priorité en HEP
- Les propriétés du boson de Higgs permettent de **sonder la physique au-delà de l'échelle du TeV** par le biais des corrections radiatives. Pour y être sensible, il faut atteindre des **précisions de l'ordre du pourcent**.  
Au HL-LHC on pourra atteindre des précisions entre 5 et 10% pour certains couplages à l'horizon 2030
- Un **ILC@250 GeV avec  $250 \text{ fb}^{-1}$  (trois ans)**, permet un gain d'un **facteur au moins 4 en précision**. De plus, on peut étudier avec précision les modes où le LHC rencontre des difficultés expérimentales : bb, cc, gg, WW\*.  
Le HL-LHC est supérieur à l'ILC pour des désintégrations rares comme  $\gamma\gamma$ , ZZ\*,  $\mu\mu$
- Grâce à la polarisation, le **spin-parité du boson de Higgs** peut être déterminé par un scan rapide de la région au seuil.  
Pas si simple au LHC (analyse angulaire ZZ\*)
- Un **ILC@250 GeV** permet de mesurer la **largeur invisible du boson de Higgs**  
Seule une mesure indirecte est possible au LHC
- Dans une deuxième phase, un à **ILC@370-600 GeV** permet de mesurer la **masse du top** à mieux que 200 MeV et le couplage Htt, et d'observer l'**auto-couplage du Higgs**.  
La mise en évidence de la production multiple de bosons de Higgs au HL-LHC est difficile mais possible. La mesure de l'auto-couplage au HL-LHC est marginale

Un ILC doit se placer dans une *première phase* au pic de production du Higgs selon  $e^+e^- \rightarrow HZ$   
**240-250 GeV** pour  $m_H = 125$  GeV

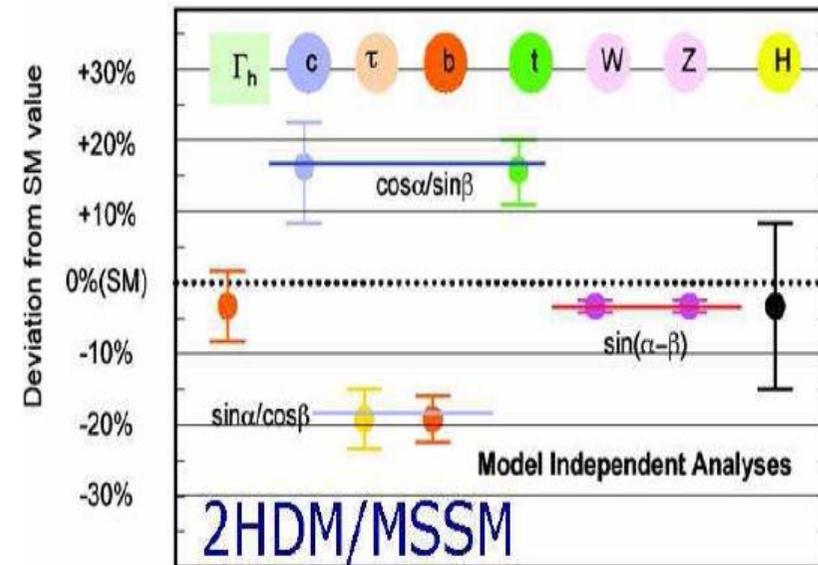
Un ILC doit impérativement être une machine capable d'atteindre **500-600 GeV** dans une *deuxième phase*

Le ILC *n'est pas* une machine à la « frontière » en énergie

Le ILC une **machine de précision** pour la **physique du Higgs**

**ILC = Super Usine à Higgs**

La décision de construire une telle machine à un tel coût (> G\$10) est nécessairement **géo-politique**. En tant que physiciens, nous devons exprimer clairement notre **enthousiasme** pour le **programme de physique de l'ILC** afin que le **scénario 2** devienne ... **réalité !**



*exemple de détermination de la nature SUSY du boson de Higgs*