

JJC 2010  
22-26 nov 2010

# Vers un Higgs supersymétrique non-standard

Guillaume Drieu La Rochelle  
LAPTh, Annecy-le-Vieux



I Description du modèle

II Méthode de calcul

III Perspectives sur le Higgs

I Description du modèle

II Méthode de calcul

III Perspectives sur le Higgs



# La quête de la Nouvelle Physique

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

2/28

- A la recherche de nouveaux modèles



# La quête de la Nouvelle Physique

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

2/28

- A la recherche de nouveaux modèles
  - Modèles plus simples (Unification)
  - Modèles plus réalistes (Matière Sombre)



# La quête de la Nouvelle Physique

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

2/28

- A la recherche de nouveaux modèles
  - Modèles plus simples (Unification)
  - Modèles plus réalistes (Matière Sombre)
  - Parce que c'est fun



- A la recherche de nouveaux modèles
  - Modèles plus simples (Unification)
  - Modèles plus réalistes (Matière Sombre)
  - Parce que c'est fun
  
- Et le modèle standard??
  - Relativement élégant
  - Très prédictif
  - Mais...



- **Simplissime**  
Groupes

Jauge

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

Lorentz  $SO(3,1)$





- **Simplissime**

## Groupes & Matière

Jauge

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e_L \end{pmatrix} \quad (-1/2, 2, 0) \quad (1/2)$$

Lorentz  $SO(3, 1)$

$$H \quad (1/2, 2, 0) \quad (0)$$



- **Simplissime**

Groupes	&	Matière	→	Action
Jauge				Automatique : entièrement déterminée par le principe de jauge
$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$		$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e_L \end{pmatrix} \quad (-1/2, 2, 0) \quad (1/2)$		
Lorentz	$SO(3, 1)$	$H \quad (1/2, 2, 0) \quad (0)$		$d \mapsto d + gB$



# Modèle Standard : sa vie, son oeuvre

## • Simplissime

Groupes & Matière  $\longrightarrow$  Action

Jauge

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e_L \end{pmatrix} \quad (-1/2, 2, 0) \quad (1/2)$$

Automatique : entièrement déterminée par le principe de jauge

Lorentz  $SO(3, 1)$

$$H \quad (1/2, 2, 0) \quad (0)$$

$$d \mapsto d + gB$$

- ❖ Donner un VEV au Higgs (bosons faibles massifs)
- ❖ Yukawa à rajouter à la main (fermions massifs)



# Modèle Standard : sa vie, son oeuvre

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

## • Simplissime

Groupes & Matière  $\longrightarrow$  Action

Jauge

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e_L \end{pmatrix} \quad (-1/2, 2, 0) \quad (1/2)$$

Automatique : entièrement déterminée par le principe de jauge

Lorentz  $SO(3, 1)$

$$H \quad (1/2, 2, 0) \quad (0)$$

$$d \mapsto d + gB$$

- ❖ Donner un VEV au Higgs (bosons faibles massifs)
- ❖ Yukawa à rajouter à la main (fermions massifs)

## • Bonne prédictivité (renormalisable)

- Difficile à prendre en défaut

## • Pas suffisant

- Quelques écarts théorie/expérience laissent présager une nouvelle physique
- Higgs préféablement léger (tests de précision électrofaibles), peu réalistes.



# Au-delà du Modèle Standard

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

Matière



# Au-delà du Modèle Standard

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

Matière

- 4<sup>o</sup> Génération
- Un autre scalaire (2HDM)
- Neutrinos droits



# Au-delà du Modèle Standard

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

Matière

- 4<sup>o</sup> Génération
- Un autre scalaire (2HDM)
- Neutrinos droits

Groupe  
de Jauge



# Au-delà du Modèle Standard

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

Matière

- 4<sup>o</sup> Génération
- Un autre scalaire (2HDM)
- Neutrinos droits

Groupe  
de Jauge

- $U(1)'$
- Unification  $SO(10)$





# Au-delà du Modèle Standard

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

Matière

- 4<sup>o</sup> Génération
- Un autre scalaire (2HDM)
- Neutrinos droits

Groupe  
de Jauge

- $U(1)'$
- Unification  $SO(10)$

Groupe  
de Lorentz



# Au-delà du Modèle Standard

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

Matière

- 4° Génération
- Un autre scalaire (2HDM)
- Neutrinos droits

Groupe  
de Jauge

- $U(1)'$
- Unification  $SO(10)$

Groupe  
de Lorentz

- Supersymmetry



# Au-delà du Modèle Standard

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

Matière

- 4° Génération
- Un autre scalaire (2HDM)
- Neutrinos droits

Groupe  
de Jauge

- $U(1)'$
- Unification  $SO(10)$

Groupe  
de Lorentz

- Supersymmetry

Structure  
d'espace-temps



# Au-delà du Modèle Standard

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

3/28

Matière

- 4° Génération
- Un autre scalaire (2HDM)
- Neutrinos droits

Groupe  
de Jauge

- $U(1)'$
- Unification  $SO(10)$

Groupe  
de Lorentz

- Supersymmetry

Structure  
d'espace-temps

- Dimensions supplémentaires
- Plates, Enroulées...



- Susy tout simplement
  - De champs en superchamps

$$\psi_{1/2} \mapsto \Phi_{1/2} = \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_0 \\ \psi_{1/2} \end{pmatrix}$$



- Susy tout simplement
  - De champs en superchamps

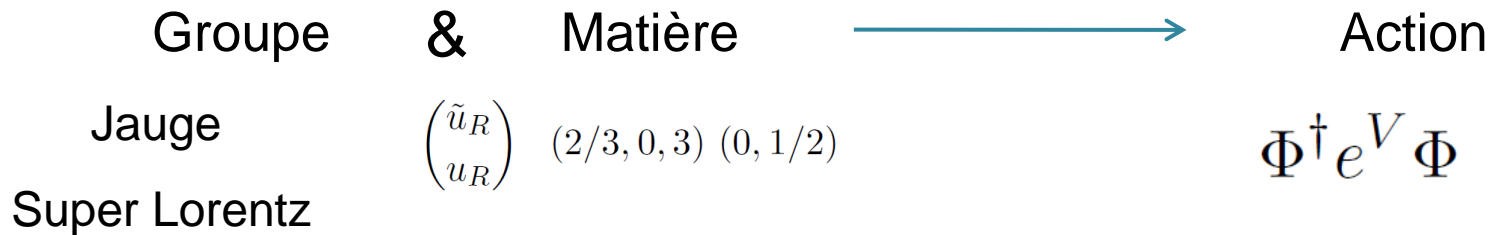
$$\psi_{1/2} \mapsto \Phi_{1/2} = \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_0 \\ \psi_{1/2} \end{pmatrix}$$

Groupe	&	Matière
Jauge	$\begin{pmatrix} \tilde{u}_R \\ u_R \end{pmatrix}$	$(2/3, 0, 3) (0, 1/2)$
Super Lorentz		



- Susy tout simplement
  - De champs en superchamps

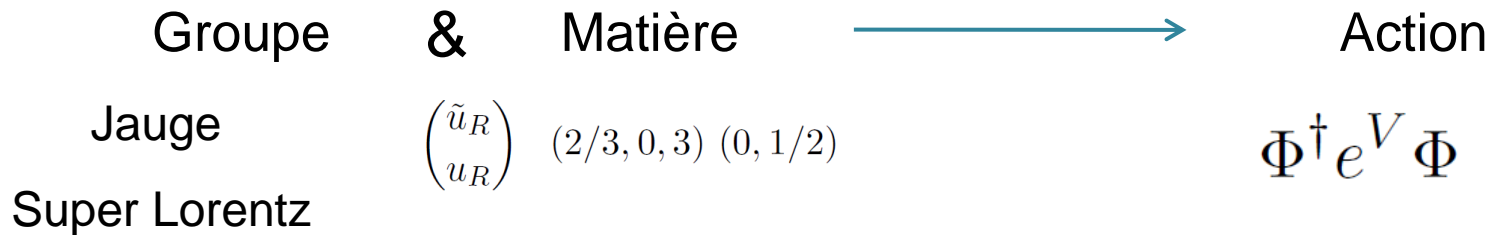
$$\psi_{1/2} \mapsto \Phi_{1/2} = \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_0 \\ \psi_{1/2} \end{pmatrix}$$





- Susy tout simplement
  - De champs en superchamps

$$\psi_{1/2} \mapsto \Phi_{1/2} = \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_0 \\ \psi_{1/2} \end{pmatrix}$$



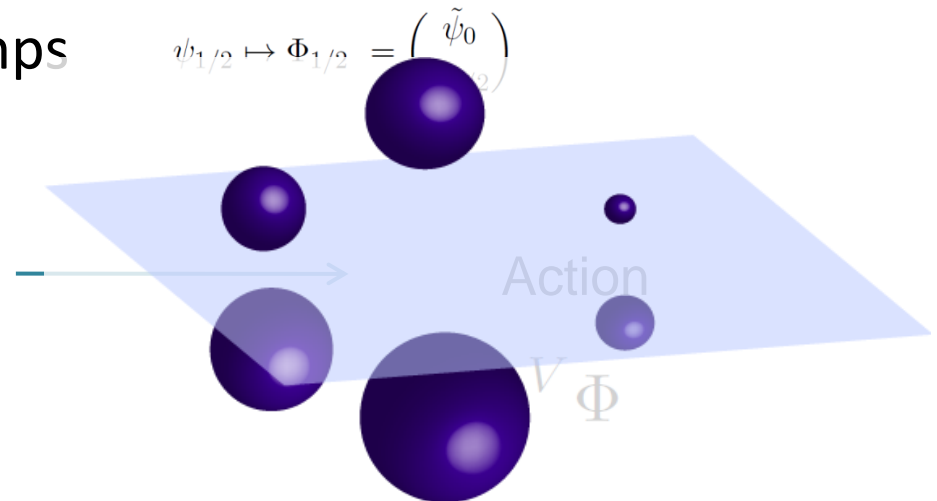
- Remettre les VEV et Yukawa (superpotentiel W)
- Briser la supersymétrie (masses, couplages entre champs)





- Susy tout simplement
  - De champs en superchamps

Groupe	&	Matière
Jauge	$\begin{pmatrix} \tilde{u}_R \\ u_R \end{pmatrix}$	$(2/3, 0, 3) (0, 1/2)$
Super Lorentz		

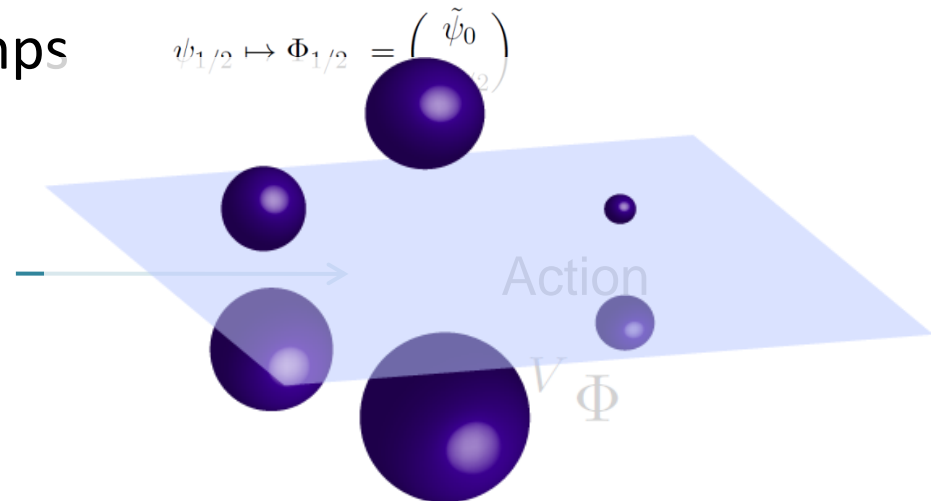


- Remettre les VEV et Yukawa (superpotentiel W)
- Briser la supersymétrie (masses, couplages entre champs)

- Supersymétrie minimale
  - Remplacer chaque champ par un superchamp ( x2 particules)

- Susy tout simplement
  - De champs en superchamps

Groupe	&	Matière
Jauge	$\begin{pmatrix} \tilde{u}_R \\ u_R \end{pmatrix}$	$(2/3, 0, 3) (0, 1/2)$
Super Lorentz		



- Remettre les VEV et Yukawa (superpotentiel W)
- Briser la supersymétrie (masses, couplages entre champs)

- Supersymétrie minimale

- Remplacer chaque champ par un superchamp ( x2 particules)
- Introduire un deuxième Higgs

→ **MSSM**



# Phénoménologie du MSSM

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

5/28

- Avantages du MSSM



- **Avantages du MSSM**
  - Unification des constantes
  - Matière Sombre
  - Higgs léger plutôt compatible avec tests de précision électrofaibles



- **Avantages du MSSM**
  - Unification des constantes
  - Matière Sombre
  - Higgs léger plutôt compatible avec tests de précision électrofaibles
  
- **Faiblesses**
  - Un Higgs léger ( $<135$  GeV) (sans corrections radiatives,  $< 91$  GeV)
  - Toujours pas de superpartenaires
  - Un modèle *has been* (msugra)



# MSSM : un modèle insatisfaisant

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

6/28

- Pas de supersymétrie?



# MSSM : un modèle insatisfaisant

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

6/28

- Pas de supersymétrie?
  - Quid des autres alternatives
    - 4<sup>o</sup> génération, Dimensions supplémentaires.
    - Pas plus convaincants



# MSSM : un modèle insatisfaisant

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

6/28

- Pas de supersymétrie?
  - Quid des autres alternatives
    - 4<sup>e</sup> génération, Dimensions supplémentaires.
    - Pas plus convaincants
- Back to Modèle Standard ?
  - Il y a quelque chose au TeV!
  - Et la matière sombre, alors?





# MSSM : un modèle insatisfaisant

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

6/28

- Pas de supersymétrie?
  - Quid des autres alternatives
    - 4<sup>e</sup> génération, Dimensions supplémentaires.
    - Pas plus convaincants
- Back to Modèle Standard ?
  - Il y a quelque chose au TeV!
  - Et la matière sombre, alors?
- Allons au-delà de la Susy !



Matière

- 4° Génération
- Un autre scalaire

Groupe  
de Jauge

- $U(1)'$
- Unification  $SO(10)$

Groupe  
de Lorentz

- $N > 1$  Supersymmetry

Structure  
d'espace-temps

- Dimensions supplémentaires
- Plates, Enroulées...



Matière

- 4° Génération
- Un autre scalaire

Groupe  
de Jauge

- $U(1)'$
- Unification  $SO(10)$

Groupe  
de Lorentz

$N > 1$  Supersymmetry

Structure  
d'espace-temps

- Dimensions supplémentaires
- Plates, Enroulées...

**Extension Générique**



Matière

- 4° Génération
- Un autre scalaire

Groupe de Jauge

- $U(1)'$
- Unification  $SO(10)$

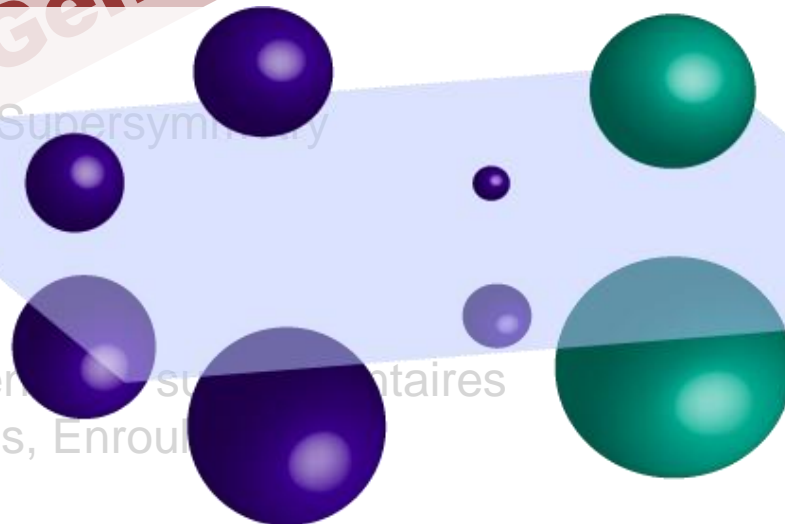
Groupe de Lorentz

Structure d'espace-temps

**Extension Générique**

BMSSM

- Dimerisation des champs scalaires
- Plates, Enroulements



- Modèles trop spécifiques

- NMSSM



- $U(1)'$ MSSM



- MSSM en  $d=5,6$



- ...

➤ Signatures différentes

➤ Etudes dédiées

- Y a-t-il des spécificités communes ?

- Comment se manifeste le caractère susy du modèle dans une expérience (quelles observables)?

- En tant qu'extensions, ces nouveaux modèles laissent plus de degrés de liberté, lesquels sont-ils?

- Découpler la nouvelle physique

- Découpler la nouvelle physique
  - “nouvelle “ : au-delà du MSSM

Standard = MSSM

- Découpler la nouvelle physique
  - “nouvelle “ : au-delà du MSSM
- Particules supplémentaires lourdes
  - $M \sim \text{TeV}$        $E_{\text{process}} < M < M_{\text{extra}}$
  - Processus considéré : production et désintégration du Higgs au LHC
  - M à environ 1 TeV

Standard = MSSM



- Découpler la nouvelle physique

Standard = MSSM

- “nouvelle “ : au-delà du MSSM

- Particules supplémentaires lourdes

- $M \sim \text{TeV}$        $E_{\text{process}} < M < M_{\text{extra}}$

- Processus considéré : production et désintégration du Higgs au LHC

- $M$  à environ 1 TeV

- Simplification des diagrammes de Feynman



- Découpler la nouvelle physique

Standard = MSSM

- “nouvelle “ : au-delà du MSSM

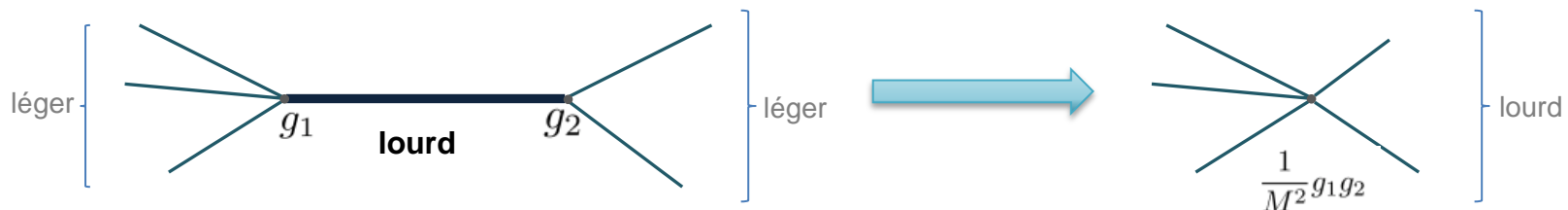
- Particules supplémentaires lourdes

- $M \sim \text{TeV}$        $E_{\text{process}} < M < M_{\text{extra}}$

- Processus considéré : production et désintégration du Higgs au LHC

- $M$  à environ 1 TeV

- Simplification des diagrammes de Feynman



- **Justification**

$$|k| \ll M \quad \frac{1}{k-M} \sim \frac{1}{M} \quad \& \quad \frac{1}{k^2-M^2} \sim \frac{1}{M^2}$$

- **Nouvelle écriture**

- Plus de particules supplémentaires

- Justification

$$|k| \ll M \quad \frac{1}{k-M} \sim \frac{1}{M} \quad \& \quad \frac{1}{k^2-M^2} \sim \frac{1}{M^2}$$

- Nouvelle écriture

- Plus de particules supplémentaires
- Vertex additionnels, avec facteurs  $\frac{1}{M}$

- Justification

$$|k| \ll M \quad \frac{1}{k-M} \sim \frac{1}{M} \quad \& \quad \frac{1}{k^2-M^2} \sim \frac{1}{M^2}$$

- Nouvelle écriture

- Plus de particules supplémentaires
- Vertex additionnels, avec facteurs  $\frac{1}{M}$
- Ce n'est PAS un modèle en soit, mais la réécriture d'un BMSSM

On suppose l'existence d'une théorie BMSSM au TeV

→ On déduit ses conséquences pour le Higgs entre 100 et 200 GeV

- Justification

$$|k| \ll M \quad \frac{1}{k-M} \sim \frac{1}{M} \quad \& \quad \frac{1}{k^2-M^2} \sim \frac{1}{M^2}$$

- Nouvelle écriture

- Plus de particules supplémentaires
- Vertex additionnels, avec facteurs  $\frac{1}{M}$
- Ce n'est PAS un modèle en soit, mais la réécriture d'un BMSSM

On suppose l'existence d'une théorie BMSSM au TeV

→ On déduit ses conséquences pour le Higgs entre 100 et 200 GeV

- Validité d'une EFT

- MSSM étant renormalisable → EFT est prédictive

- Ecriture générique
  - Pas de théorie BMSSM spécifique
  - Inclure tous les vertex possibles

- Ecriture générique
  - Pas de théorie BMSSM spécifique
  - Inclure tous les vertex possibles
- Inclusion au niveau du (super) Lagrangien

$$\frac{c_k}{M^{d_k}} \mathcal{O}_k (\Phi, \Phi^\dagger)$$

Superchamps !!



- Ecriture générique
  - Pas de théorie BMSSM spécifique
  - Inclure tous les vertex possibles
- Inclusion au niveau du (super) Lagrangien

$$\frac{c_k}{M^{d_k}} \mathcal{O}_k (\Phi, \Phi^\dagger)$$

Superchamps !!

- Invariance de Jauge
- Invariance de Lorentz

- Ecriture générique
  - Pas de théorie BMSSM spécifique
  - Inclure tous les vertex possibles
- Inclusion au niveau du (super) Lagrangien

$$\frac{c_k}{M^{d_k}} \mathcal{O}_k (\Phi, \Phi^\dagger)$$

Superchamps !!

- Invariance de Jauge
- Invariance de Lorentz
- Spécialisation de l'étude
  - Secteur du Higgs  $H_1 H_2$
  - Troncature à l'ordre 2 en  $\frac{1}{M}$

- Ecriture générique
  - Pas de théorie BMSSM spécifique
  - Inclure tous les vertex possibles
- Inclusion au niveau du (super) Lagrangien

$$\frac{c_k}{M^{d_k}} \mathcal{O}_k (\Phi, \Phi^\dagger)$$

Superchamps !!

- Invariance de Jauge
- Invariance de Lorentz
- Spécialisation de l'étude
  - Secteur du Higgs  $H_1 H_2$
  - Troncature à l'ordre 2 en  $\frac{1}{M}$

Etudes utilisant ce formalisme

Antoniadis et al. [arXiv:0910.1100](https://arxiv.org/abs/0910.1100)

Carena et al. [arXiv:0909.5434](https://arxiv.org/abs/0909.5434)

# Nouveaux Opérateurs

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

12/28

# Nouveaux Opérateurs

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

12/28

Dimension 5

$$\frac{\zeta_1}{M} (H_1 \cdot H_2)^2$$

# Nouveaux Opérateurs

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

12/28

## Dimension 5

$$\frac{\zeta_1}{M} (H_1 \cdot H_2)^2$$

## Dimension 6

$$\frac{\mathbf{a}_i}{M^2} (H_i^\dagger e^{2gV_i} H_i)^2$$

$$\frac{\mathbf{a}_3}{M^2} (H_1^\dagger e^{2gV_1} H_1)(H_2^\dagger e^{2gV_2} H_2)$$

$$\frac{\mathbf{a}_4}{M^2} (H_1 \cdot H_2)(H_1^\dagger \cdot H_2^\dagger)$$

$$\frac{\mathbf{a}_5}{M^2} (H_1^\dagger e^{2gV_1} H_1)(H_1 \cdot H_2) + \text{h.c.}$$

$$\frac{\mathbf{a}_6}{M^2} (H_2^\dagger e^{2gV_2} H_2)(H_1 \cdot H_2) + \text{h.c.}$$



# Nouveaux Opérateurs

## Dimension 5

$$\frac{\zeta_1}{M} (H_1 \cdot H_2)^2$$

Coefficients effectifs

## Dimension 6

$$\frac{\mathbf{a}_i}{M^2} (H_i^\dagger e^{2gV_i} H_i)^2$$

$$\frac{\mathbf{a}_3}{M^2} (H_1^\dagger e^{2gV_1} H_1)(H_2^\dagger e^{2gV_2} H_2)$$

$$\frac{\mathbf{a}_4}{M^2} (H_1 \cdot H_2)(H_1^\dagger \cdot H_2^\dagger)$$

$$\frac{\mathbf{a}_5}{M^2} (H_1^\dagger e^{2gV_1} H_1)(H_1 \cdot H_2) + \text{h.c.}$$

$$\frac{\mathbf{a}_6}{M^2} (H_2^\dagger e^{2gV_2} H_2)(H_1 \cdot H_2) + \text{h.c.}$$

# Nouveaux Opérateurs

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

12/28

Dimension 5

$$\frac{\zeta_1}{M} (H_1 \cdot H_2)^2$$

Coefficients effectifs

Dimension 6

$$\frac{\mathbf{a}_i}{M^2} (H_i^\dagger e^{2gV_i} H_i)^2$$

$$\frac{\mathbf{a}_3}{M^2} (H_1^\dagger e^{2gV_1} H_1)(H_2^\dagger e^{2gV_2} H_2)$$

$$\frac{\mathbf{a}_4}{M^2} (H_1 \cdot H_2)(H_1^\dagger \cdot H_2^\dagger)$$

$$\frac{\mathbf{a}_5}{M^2} (H_1^\dagger e^{2gV_1} H_1)(H_1 \cdot H_2) + \text{h.c.}$$

$$\frac{\mathbf{a}_6}{M^2} (H_2^\dagger e^{2gV_2} H_2)(H_1 \cdot H_2) + \text{h.c.}$$

Brisure de  
supersymétrie

$$\zeta_i = \zeta_{i0} + \theta^2 m_0 \zeta_{i1}$$

$$a_i = a_{i0} + \theta^2 m_0 a_{i1} + \bar{\theta}^2 m_0 \bar{a}_{i1} + \theta^2 \bar{\theta}^2 m_0^2 a_{i2}$$





I Description du modèle

II Méthode de calcul

III Perspectives sur le Higgs

# Obtention de prédictions

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

14/28

- Observables pertinentes :

# Obtention de prédictions

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

14/28

- Observables pertinentes :

$$m_h \quad g, g \rightarrow h, t\bar{t}h, \dots \quad h \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, \dots$$

# Obtention de prédictions

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

14/28

- Observables pertinentes :

$$m_h \quad g, g \rightarrow h, t\bar{t}h, \dots \quad h \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, \dots$$

- Méthode de calcul : développement de Feynman
  - Pour chaque processus, calculer l'amplitude des diagrammes de Feynman jusqu'à un certain ordre.

# Obtention de prédictions

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

14/28

- Observables pertinentes :

$$m_h \quad g, g \rightarrow h, t\bar{t}h, \dots \quad h \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, \dots$$

- Méthode de calcul : développement de Feynman

- Pour chaque processus, calculer l'amplitude des diagrammes de Feynman jusqu'à un certain ordre.

- Divergences de boucles

- Schéma de régularisation DR

- Calcul en dimension  $d \neq 4$ , puis continuation analytique en  $d=4$

Dimensional Regularisation

- Schéma de renormalisation

- Les contributions des boucles annulent exactement celles des contretermes

On-Shell and MS

# Extractions des paramètres

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

15/28

$$M_W, M_Z, \dots \longrightarrow g_1, g_2, v_1, \dots$$

- Paramètres SM

- Observables usuels  $M_W, M_Z, \alpha_{EM}, \alpha_s$

# Extractions des paramètres

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

15/28

$$M_W, M_Z, \dots \longrightarrow g_1, g_2, v_1, \dots$$

- Paramètres SM

- Observables usuels  $M_W, M_Z, \alpha_{EM}, \alpha_s$

- Paramètres MSSM

- Secteur du Higgs  $M_{A_0}, A\tau\tau, M_{\tilde{\chi}_1} \dots$

- Choix pour  $t_\beta$   $A\bar{\tau}\tau$   $M_H$

- Paramètres BMSSM

- Coefficients libres

# Précision des calculs

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

16/28

- EFT valide  $\longrightarrow$  Nous pouvons atteindre n'importe quelle précision



# Précision des calculs

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

16/28

- EFT valide  $\longrightarrow$  Nous pouvons atteindre n'importe quelle précision
- Erreur sur le développement en boucles

# Précision des calculs

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

16/28

- EFT valide  $\longrightarrow$  Nous pouvons atteindre n'importe quelle précision
- Erreur sur le développement en boucles
  - Nouvelles particules très massives  $\implies$  faible contribution
    - $\longrightarrow$  corrections radiatives du **MSSM** seulement

- EFT valide  $\longrightarrow$  Nous pouvons atteindre n'importe quelle précision
- Erreur sur le développement en boucles
  - Nouvelles particules très massives  $\implies$  faible contribution
    - $\longrightarrow$  corrections radiatives du MSSM seulement
  - Masses, couplage fort : calcul à 2 boucles
  - Interactions du higgs : potentiel effectif
    - b-quark, et self-interactions

- EFT valide  $\longrightarrow$  Nous pouvons atteindre n'importe quelle précision
- Erreur sur le développement en boucles
  - Nouvelles particules très massives  $\implies$  faible contribution
    - $\longrightarrow$  corrections radiatives du MSSM seulement
  - Masses, couplage fort : calcul à 2 boucles
  - Interactions du higgs : potentiel effectif
    - b-quark, et self-interactions
- Erreur sur le développement en  $\frac{1}{M}$ 
  - Troncature à l'ordre 2

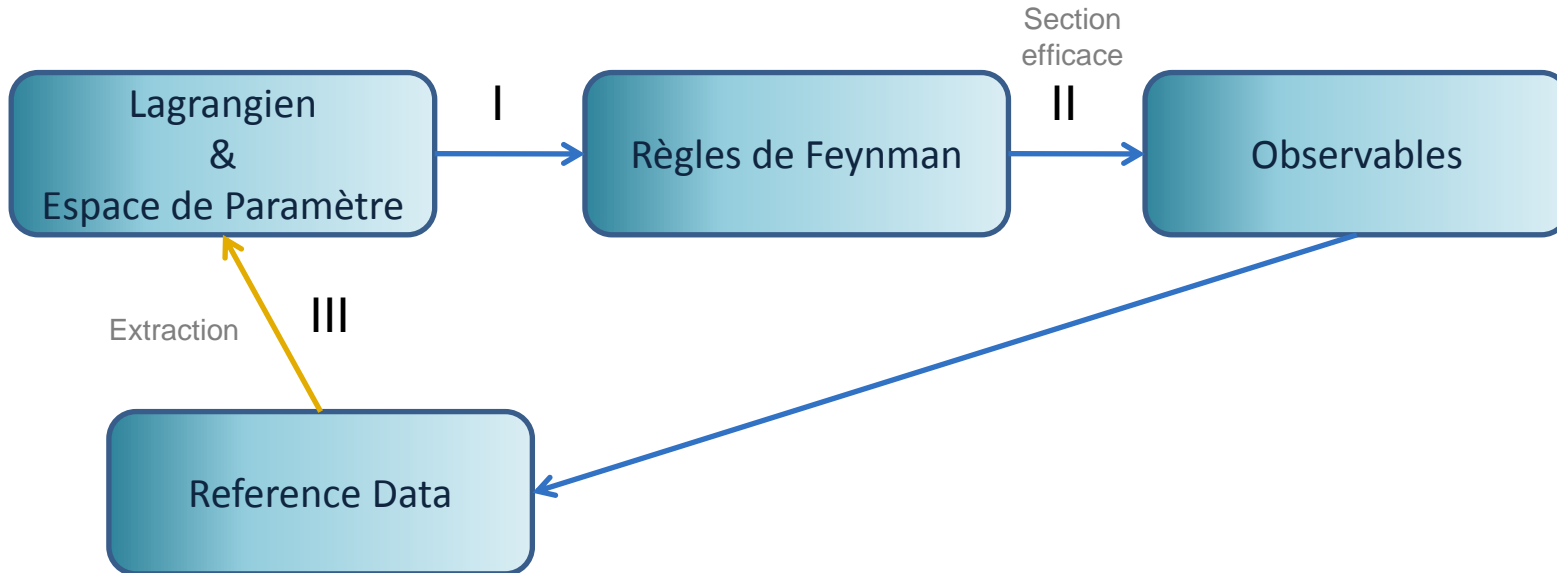
- EFT valide  $\longrightarrow$  Nous pouvons atteindre n'importe quelle précision
- Erreur sur le développement en boucles
  - Nouvelles particules très massives  $\implies$  faible contribution
    - $\longrightarrow$  corrections radiatives du MSSM seulement
  - Masses, couplage fort : calcul à 2 boucles
  - Interactions du higgs : potentiel effectif
    - b-quark, et self-interactions
- Erreur sur le développement en  $\frac{1}{M}$ 
  - Troncature à l'ordre 2
- Le développement en boucle se comporte bien
- C'est loin d'être le cas du développement effectif.

Lagrangien  
&  
Espace de Paramètre



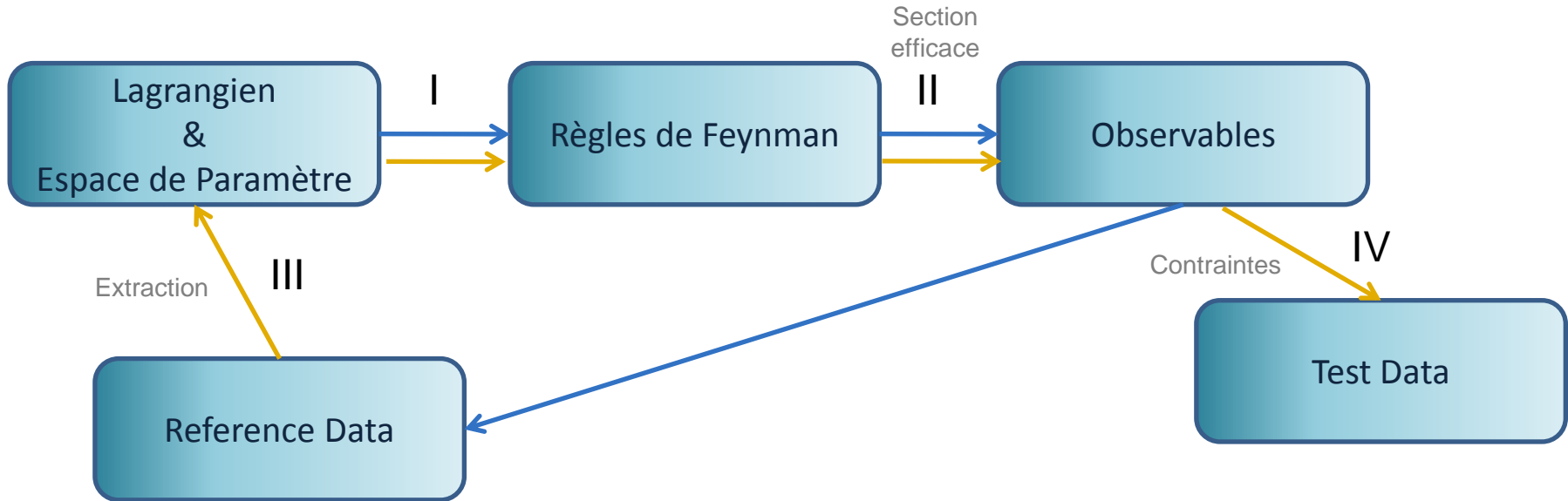
I : LanHEP

II : CalcHEP/SuSpect

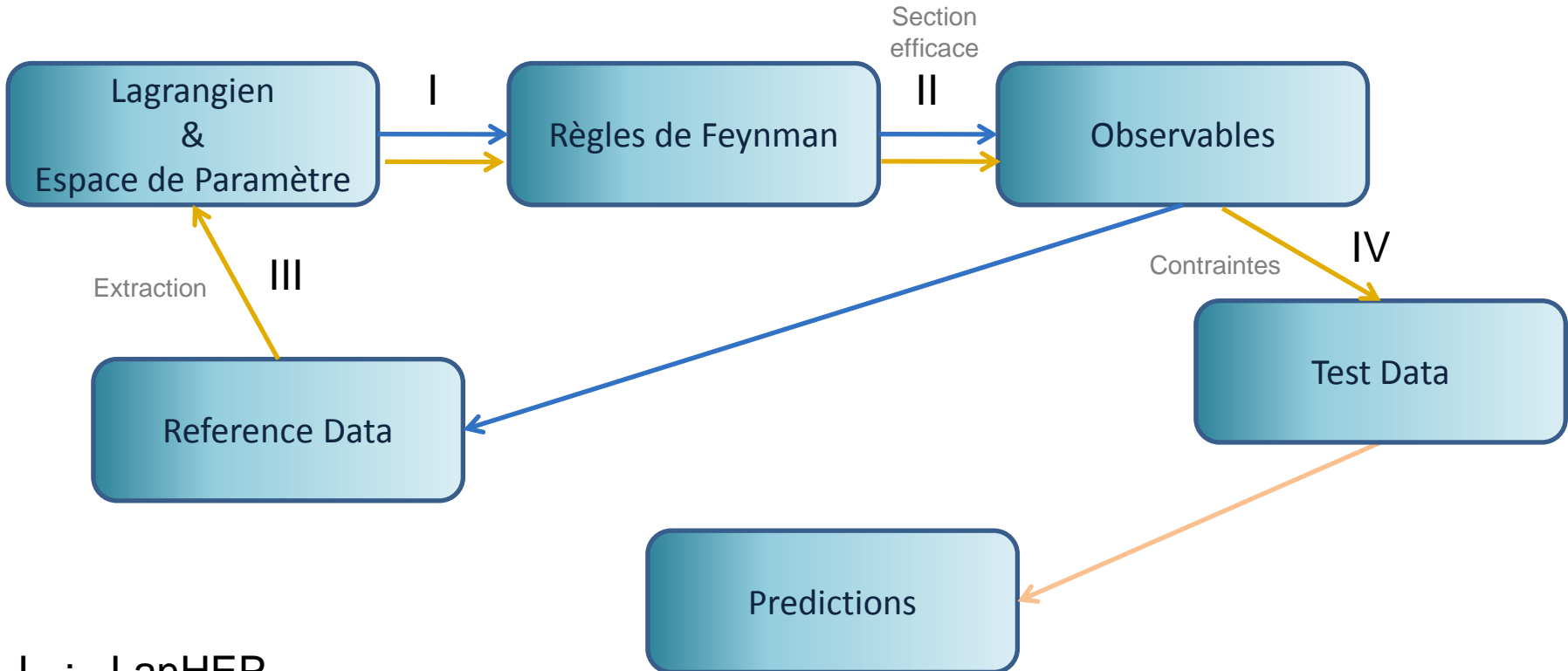


- I : LanHEP
- II : CalcHEP/SuSpect
- III : Mathematica





- I : LanHEP
- II : CalcHEP/SuSpect
- III : Mathematica
- IV : MicrOmegas/HiggsBound/Hdecay



- I : LanHEP
- II : CalcHEP/SuSpect
- III : Mathematica
- IV : MicrOmegas/HiggsBound/Hdecay

# Esquisse de phénoménologie

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

18/28

- Interactions modifiées

- Observables modifiées

# Esquisse de phénoménologie

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

18/28

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Interactions modifiées</li></ul>        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Observables modifiées</li></ul> |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• <math>(h_1, h_2)(W, Z)</math></li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Masses des W,Z</li></ul>        |

# Esquisse de phénoménologie

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

18/28

- Interactions modifiées

- $(h_1, h_2)(W, Z)$

- $(h_1, h_2)(h_1, h_2)$

- Observables modifiées

- Masses des W,Z

- Higgs scalaires :

- Masses

- Couplages avec la matière

# Esquisse de phénoménologie

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

18/28

## • Interactions modifiées

- $(h_1, h_2)(W, Z)$

- $(h_1, h_2)(h_1, h_2)$

- $(\tilde{h}, \tilde{W}, \tilde{B})(\tilde{h}, \tilde{W}, \tilde{B})$

## • Observables modifiées

- Masses des W,Z

- Higgs scalaires :

- Masses

- Couplages avec la matière

- Neutralinos/charginos

- Masses

- Couplages au SM

# Esquisse de phénoménologie

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

18/28

## • Interactions modifiées

- $(h_1, h_2)(W, Z)$
- $(h_1, h_2)(h_1, h_2)$
  
- $(\tilde{h}, \tilde{W}, \tilde{B})(\tilde{h}, \tilde{W}, \tilde{B})$

## • Observables modifiées

- Masses des W,Z
- Higgs scalaires :
  - Masses
  - Couplages avec la matière
- Neutralinos/charginos
  - Masses
  - Couplages au SM

**Mais**  $M_W, M_Z$  sont des **paramètres extraits**

- Donc  $M_W, M_Z$  sont fixés
- Ce sont les couplages faibles qui changent (au cours de l'extraction)

$Z\bar{f}f$  couplage change  $\longrightarrow$  EW Precision Test

# Contraintes de collisionneurs

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

19/28



- LEP ElectroWeak Precision Data
  - En partie considéré pour l'extraction (masses des bosons, couplages)
  - Donne aussi des contraintes sur les coefficients effectifs
    - EWPO S,T,U
      - [LEPEWWG arXiv hep-ex:0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008)
  - Limites d'exclusion du Higgs

- LEP ElectroWeak Precision Data
  - En partie considéré pour l'extraction (masses des bosons, couplages)
  - Donne aussi des contraintes sur les coefficients effectifs
    - EWPO S,T,U
      - [LEPEWWG arXiv hep-ex:0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008)
  - Limites d'exclusion du Higgs
- Recherche du Higgs au Tevatron
  - Contraintes sur la masse et le couplage du Higgs léger
  - Implementé via HiggsBound
    - [arXiv:0811.4169](https://arxiv.org/abs/0811.4169)

# Contraintes astrophysiques

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

20/28

- Densité relique
  - Annihilation de la matière noire (particule stable non standard) en particules standard
  - Estimation de la densité matière noire
  - Contraintes sur la section efficace

- Densité relique
  - Annihilation de la matière noire (particule stable non standard) en particules standard
  - Estimation de la densité matière noire
  - Contraintes sur la section efficace
- Effets BMSSM
  - Changement de masse des neutralinos et du couplage avec la matière
  - Contraintes WMAP

$$0.098 < \Omega_{\chi} h^2 < 0.114$$

- Densité relique
  - Annihilation de la matière noire (particule stable non standard) en particules standard
  - Estimation de la densité matière noire
  - Contraintes sur la section efficace
- Effets BMSSM
  - Changement de masse des neutralinos et du couplage avec la matière
  - Contraintes WMAP

$$0.098 < \Omega_{\chi} h^2 < 0.114$$

Cependant, cet effet reste faible, sauf sur les point de l'espace des paramètres ou les neutralinos deviennent dégénérés.

# Contraintes Théoriques

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

21/28

- Développement EFT tronqué à l'ordre 2 : est-ce suffisant?

# Contraintes Théoriques

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

21/28

- Développement EFT tronqué à l'ordre 2 : est-ce suffisant?

- Compensation accidentelles
  - Singularités
- } Aux premiers ordres

dégénérescences

$$\partial_{\text{eff}} \mathcal{O} \propto \frac{1}{M_{h0}^2 - M_{H0}^2}$$

- Développement EFT tronqué à l'ordre 2 : est-ce suffisant?

- Compensation accidentelles
  - Singularités
- } Aux premiers ordres

dégénérescences

$$\partial_{\text{eff}} \mathcal{O} \propto \frac{1}{M_{h0}^2 - M_{H0}^2}$$

- Estimateur :

- Calcul de la contribution de l'ordre 3 pour un observable donné

$$M_h \longrightarrow \left| \frac{\partial_3 m_h}{m_h|_2} \right| < \epsilon$$



- Développement EFT tronqué à l'ordre 2 : est-ce suffisant?

- Compensation accidentelles
  - Singularités
- Aux premiers ordres

dégénérescences

$$\partial_{\text{eff}} \mathcal{O} \propto \frac{1}{M_{h0}^2 - M_{H0}^2}$$

- Estimateur :

- Calcul de la contribution de l'ordre 3 pour un observable donné

$$M_h \longrightarrow \left| \frac{\partial_3 m_h}{m_h|_2} \right| < \epsilon$$

- Région non perturbative exclue

- Non pour des raisons physique,  
mais le développement effectif n'y est plus valable



I Description du modèle

II Méthode de calcul

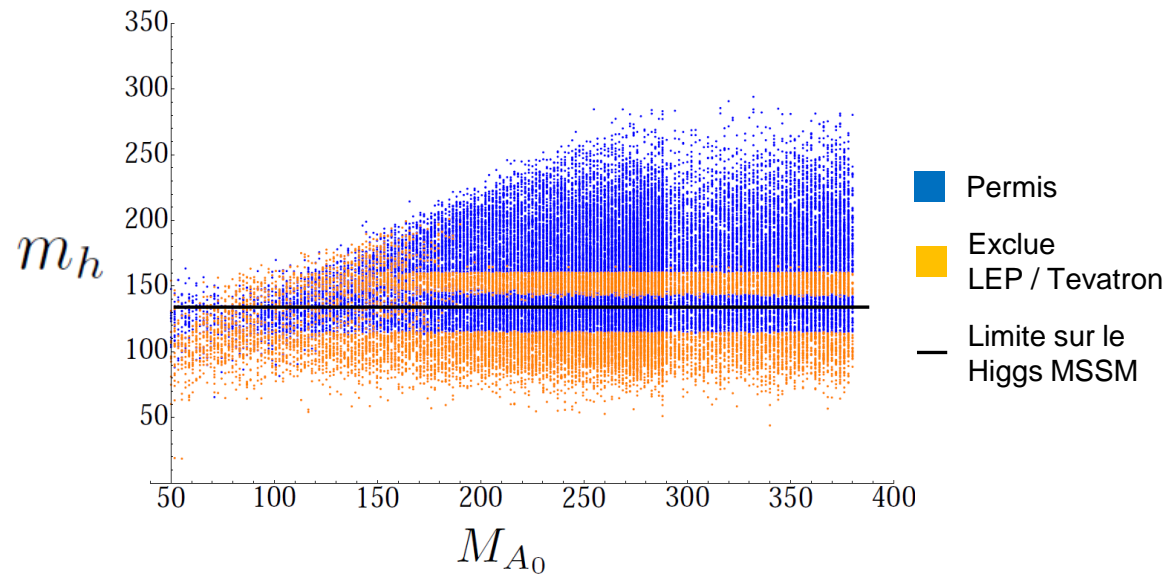
III Perspectives sur le Higgs

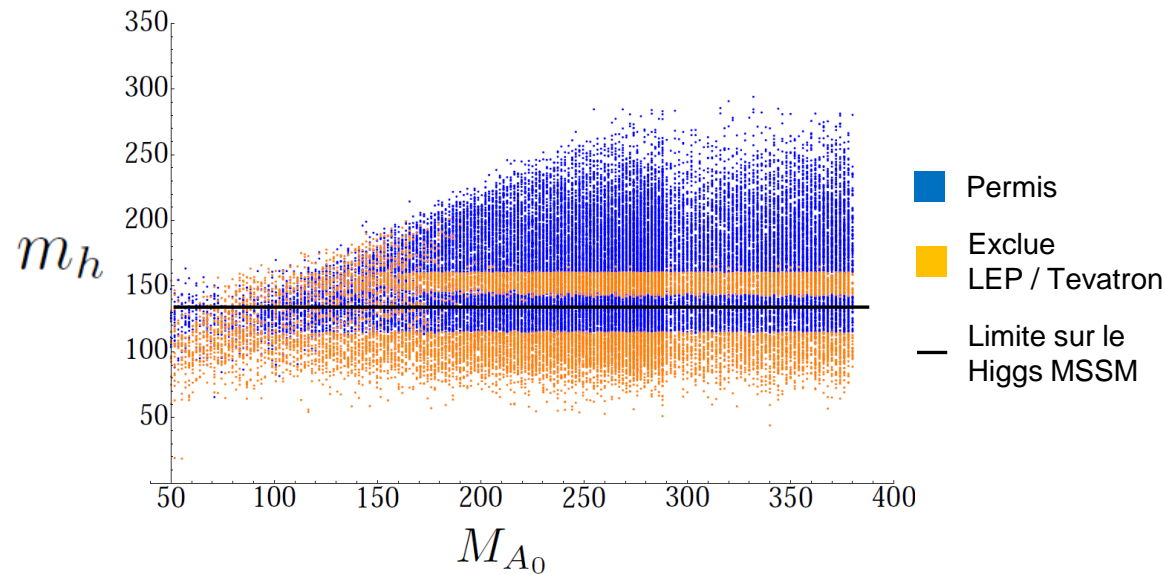
# Susy @ LHC

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

23/28

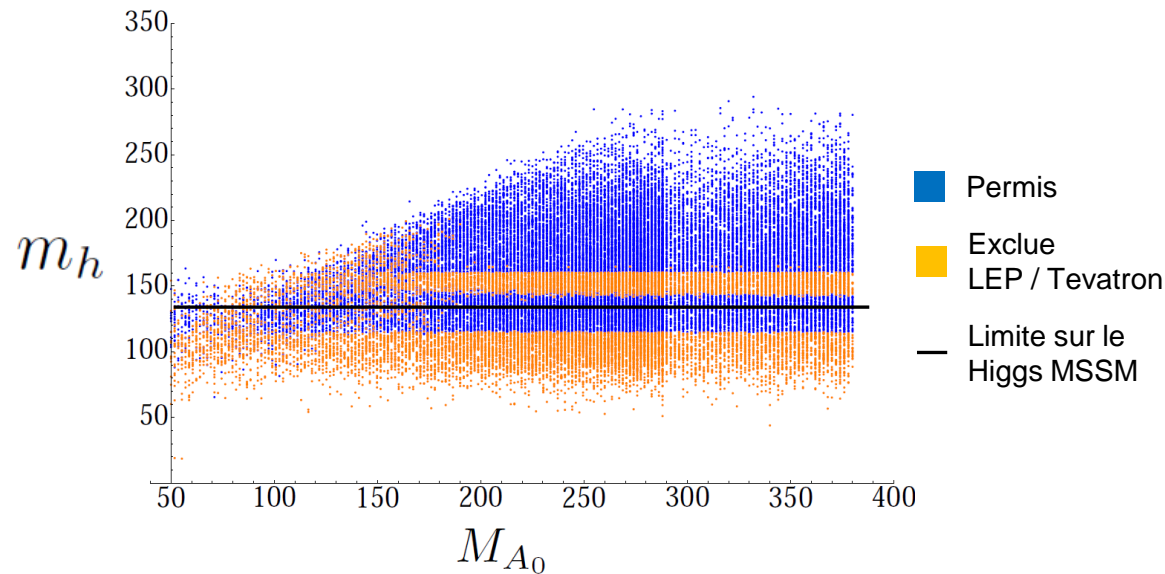




$\tilde{\chi}_1^0$	93	$\tilde{q}_R$	545
$\tilde{\chi}_2^0$	169	$\tilde{q}_L$	562
$\tilde{\chi}_4^0$	385	$\tilde{t}_1$	371
$\tilde{\chi}_1^\pm$	166	$\tilde{b}_1$	514
$\tilde{e}_R$	140	$\tilde{g}$	605
$\tilde{e}_L$	198		
$\tilde{\tau}_1$	137		

## Scenario 1 :

- Un Higgs léger ( $< 135$  GeV)
- Rien d'autre.



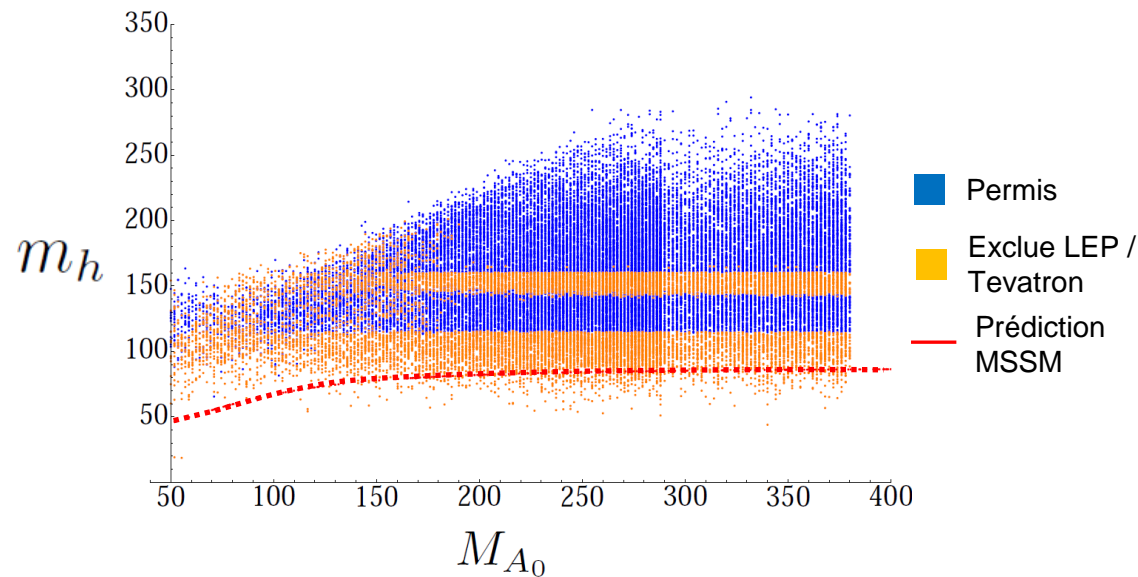
$\tilde{\chi}_1^0$	93	$\tilde{q}_R$	545
$\tilde{\chi}_2^0$	169	$\tilde{q}_L$	562
$\tilde{\chi}_4^0$	385	$\tilde{t}_1$	371
$\tilde{\chi}_1^\pm$	166	$\tilde{b}_1$	514
$\tilde{e}_R$	140	$\tilde{g}$	605
$\tilde{e}_L$	198		
$\tilde{\tau}_1$	137		

## Scenario 1 :

- Un Higgs léger ( $< 135$  GeV)
- Rien d'autre.

## Scenario 1b :

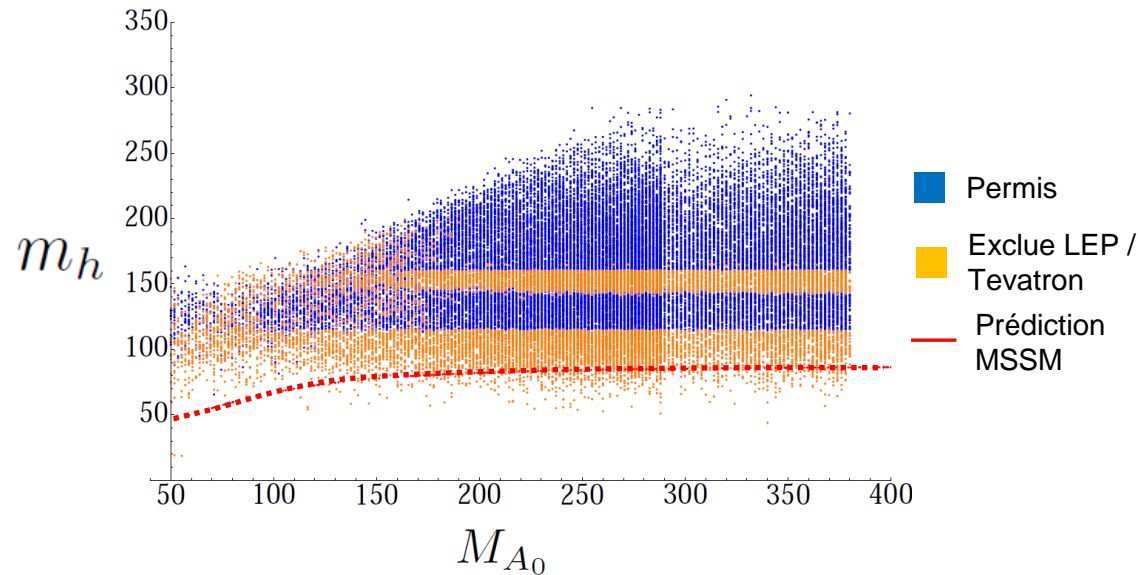
- Un Higgs léger ( $< 135$  GeV)
- une signature supersymétrique.  
2° Higgs, superpartenaire...



mais  $t_\beta = 2$

Scenario 1b :

- Un Higgs léger ( $< 135$  GeV)
- une signature supersymétrique.  
2° Higgs, superpartenaire...



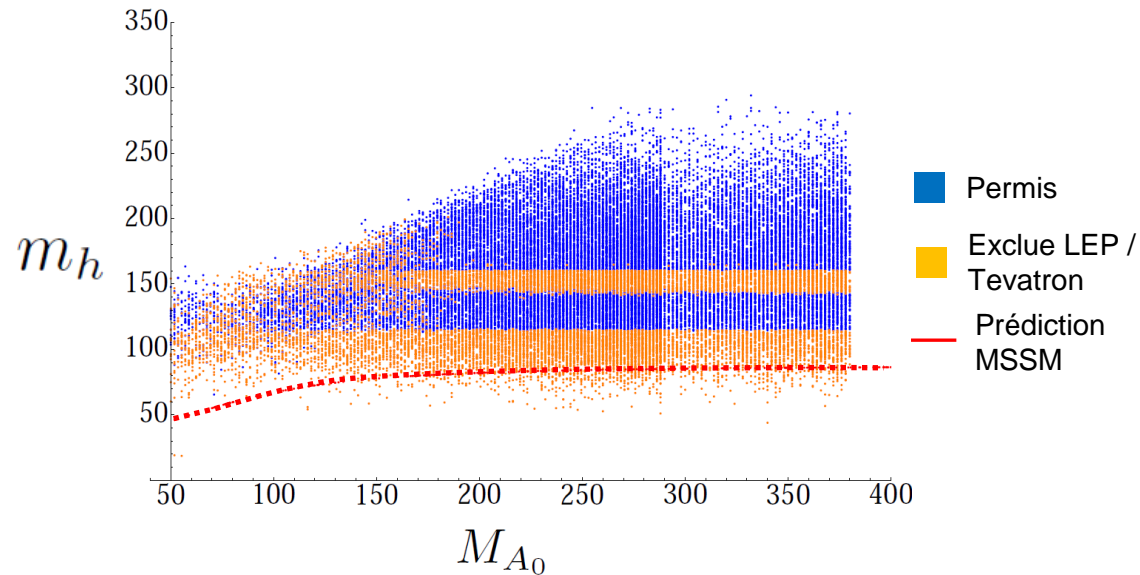
mais  $t_\beta = 2$

D'où l'importance d'extraire sa valeur

Scenario 1b :

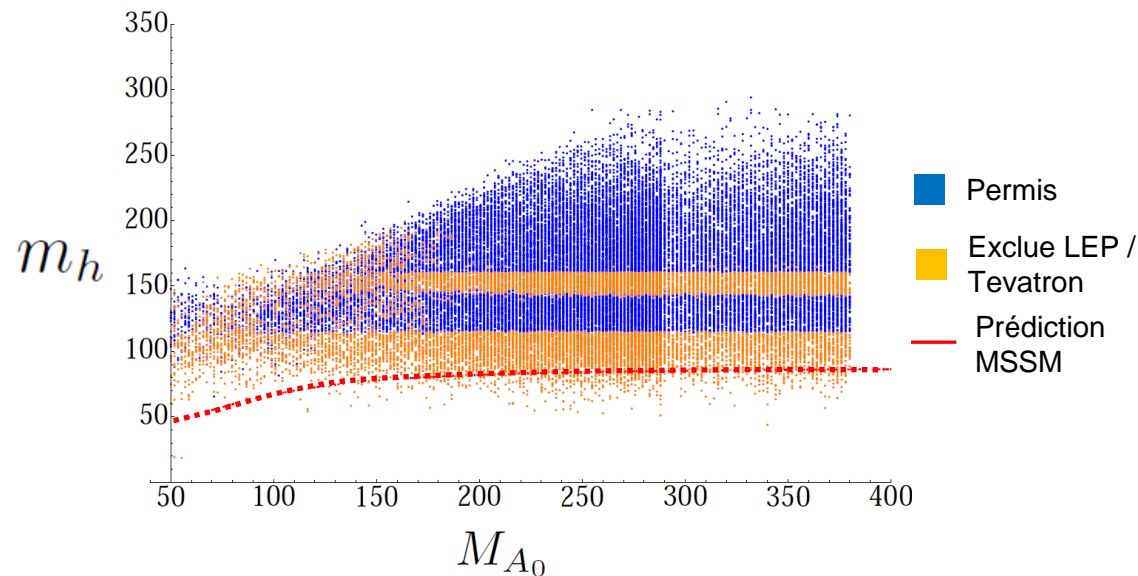
- Un Higgs léger ( $< 135$  GeV)
- une signature supersymétrique.  
2° Higgs, superpartenaire...





## Scenario 2 :

- Un Higgs lourd ( $> 135$  GeV)
- Une signature nouvelle physique
  - Superparticules ?

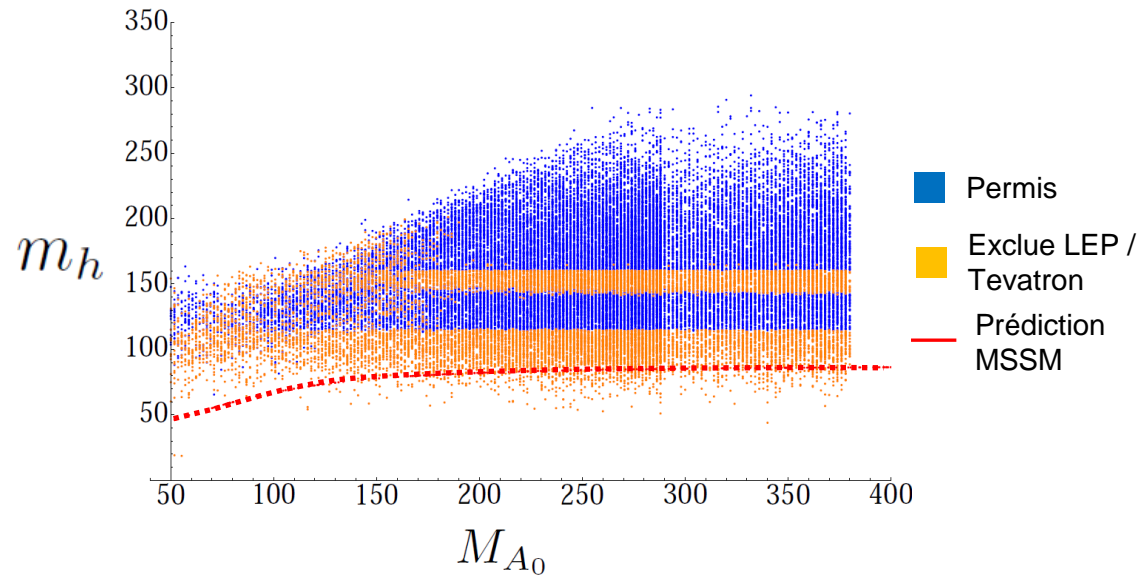


## Scenario 2 :

- Un Higgs lourd ( $> 135$  GeV)
- Une signature nouvelle physique
  - Superparticules ?

## Scenario 3 :

- Un Higgs lourd ( $> 135$  GeV)
- Résultat préliminaire : rien d'autre



## Scenario 2 :

- Un Higgs lourd ( $> 135$  GeV)
- Une signature nouvelle physique
  - Superparticules ?

## Scenario 3 :

- Un Higgs lourd ( $> 135$  GeV)
- Résultat préliminaire : rien d'autre

Quelle difference avec le Modèle Standard ?

# Recherche d'un Higgs SM-like

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

26/28

- Etude en cours :

# Recherche d'un Higgs SM-like

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

26/28

- Etude en cours :
- Observables
  - Masses :  $m_{h,H}$
  - Production du Higgs :  $g, g \rightarrow h, t\bar{t}h, Wh, Zh$
  - Désintégration du Higgs :  $h \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, b\bar{b}, \tau\bar{\tau}$
- Espace de Paramètres
  - paramètres MSSM
  - coefficients effectifs  $\zeta, a, \dots \in [-1, 1]$
  - $M = 1 \text{ Tev}$

# Recherche d'un Higgs SM-like

JJC 2010

G. Drieu La Rochelle : Vers un Higgs supersymétrique non-standard

26/28

- Etude en cours :
- Observables
  - Masses :  $m_{h,H}$
  - Production du Higgs :  $g, g \rightarrow h, t\bar{t}h, Wh, Zh$
  - Désintégration du Higgs :  $h \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, b\bar{b}, \tau\bar{\tau}$
- Espace de Paramètres
  - paramètres MSSM
  - coefficients effectifs  $\zeta, a, \dots \in [-1, 1]$
  - $M = 1 \text{ Tev}$
- Comparaison avec le Model Standard :
  - Même observables, masse du Higgs pris en input ( $> 135 \text{ GeV}$ )

# Conclusion

- Résumé
  - Le formalisme EFT nous permet d'inclure de façon générique l'effet de toute nouvelle physique, pourvu que celle-ci soit suffisamment découplée.
  - Les conséquences de cette nouvelle physique sont sensiblement contraintes par les expériences actuelles.
  - Néanmoins, la physique du Higgs change considérablement vis à vis du MSSM.
- Perspectives
  - Généraliser ces opérateurs à d'autres secteurs.
  - Fixer les valeurs des coefficients, non plus pour rendre compte d'une extension du MSSM, mais pour ajouter les corrections radiatives dus aux particules supersymétriques.
  - Potentiel effectif pour la densité relique.