

# Chapitre X

## Particules, interactions et phénoménologie

### Sommaire

<b>1</b>	<b>Les particules du modèle standard</b>	<b>2</b>
1.1	Les fermions	2
1.2	Les bosons	3
<b>2</b>	<b>Formalisme théorique et interactions</b>	<b>4</b>
2.1	Lagrangien et équation d'Euler-Lagrange	4
2.2	Interaction électromagnétique	6
2.3	Interaction électrofaible	7
2.4	Mécanisme de Higgs et brisure spontanée de symétrie	12
2.5	Interaction forte	15
<b>3</b>	<b>Succès et limites du modèle standard</b>	<b>18</b>
3.1	Succès	18
3.2	Limites	18
<b>4</b>	<b>Au-delà du modèle standard</b>	<b>21</b>
4.1	La supersymétrie	21
4.2	Modèles à deux doublets de Higgs	22
4.3	L'extension supersymétrique minimale du modèle standard	23
<b>5</b>	<b>Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM</b>	<b>25</b>
5.1	Production de bosons de Higgs	26
5.2	Désintégration de bosons de Higgs	29
5.3	Désintégration des leptons tau	31
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>32</b>

Ce chapitre présente le contexte dans lequel s'inscrit cette thèse. Le modèle standard est le cadre théorique en place en physique des particules. Il permet de décrire les objets fondamentaux qui composent l'Univers, les particules, ainsi que leurs interactions.

Les particules du modèle standard sont présentées dans la section 1. Le formalisme mathématique permettant de décrire leur comportement, faisant apparaître les forces fondamentales, est introduit dans la section 2. Le modèle standard ainsi construit propose une description de l'Univers à la fois précise et robuste.

Le boson de Higgs, dernière particule découverte à ce jour, a ainsi été postulé près de cinquante ans avant d'être observé. De nombreux succès, dont une présentation non exhaustive est proposée dans la section 3.1, couronnent ainsi le modèle standard. Cependant, malgré plusieurs décennies de prédictions correctement vérifiées, certaines observations montrent que le modèle standard ne saurait prétendre au titre de « théorie du tout ».

Ces limitations au modèle standard, dont certaines sont présentées dans la section 3.2, mènent à de nouveaux modèles dits « au-delà du modèle standard », dont il est question dans la section 4. Parmi eux se trouvent des modèles dits « à deux doublets de Higgs », c'est-à-dire avec un secteur de Higgs plus complexe, comme la supersymétrie.

Il existe plusieurs degrés de complexité dans ces nouveaux modèles, aussi seule l'extension supersymétrique minimale du modèle standard, ou MSSM, sera considérée pour l'analyse menée dans

cette thèse. Dans le cadre du MSSM, de nouvelles particules existent et la phénoménologie de ces particules, présentée dans la section 5, motive le choix du type d'événements d'intérêt pour la recherche de cette nouvelle physique.

## 1 Les particules du modèle standard

Une particule est considérée comme fondamentale si elle ne possède pas de sous-structure observée à ce jour. Le modèle standard décrit le comportement de ces particules fondamentales qui peuvent être catégorisées selon plusieurs critères. Le premier d'entre eux est le « spin », une observable quantique intrinsèque aux particules. Les particules de spin demi-entier sont les fermions, celles de spin entier les bosons.

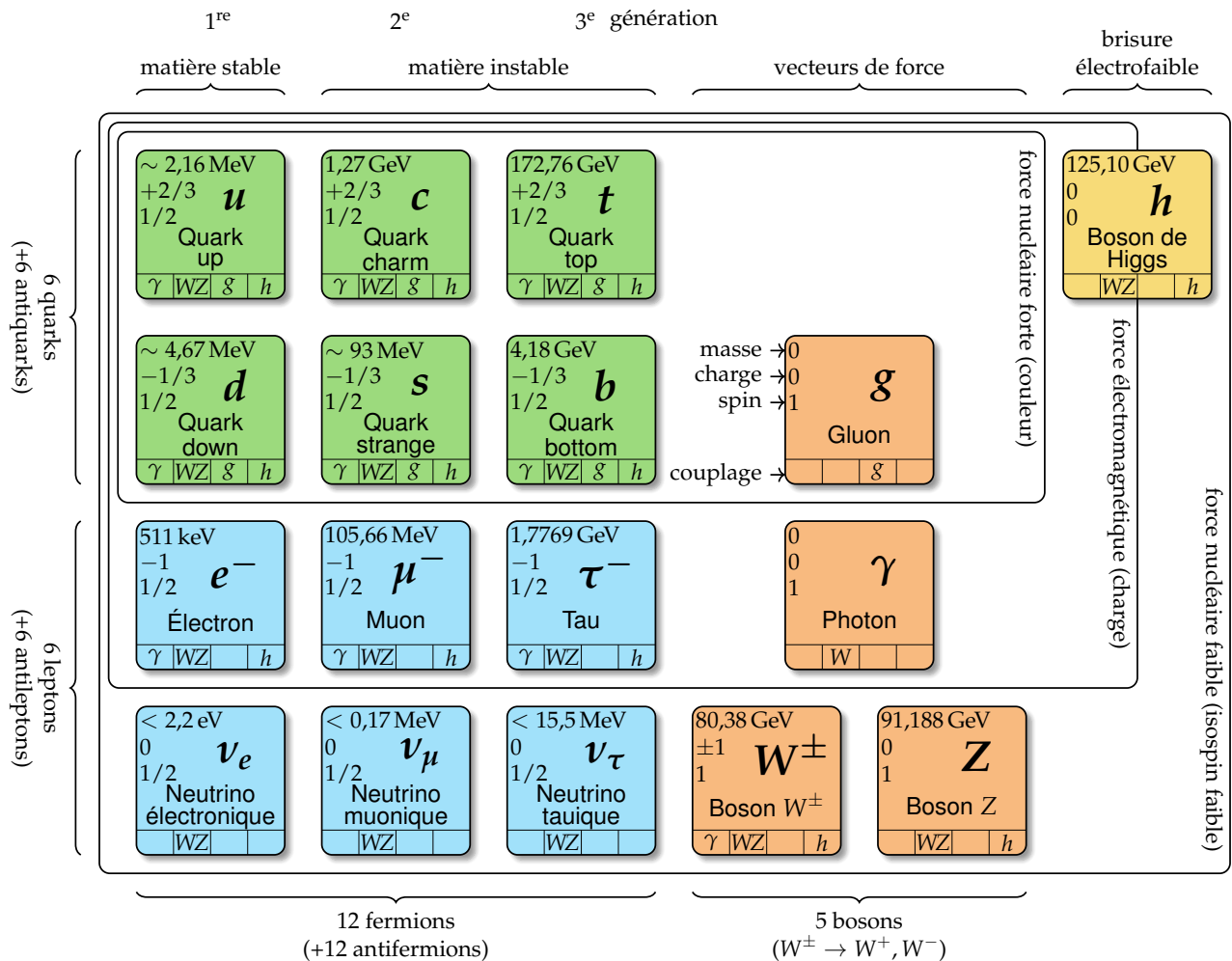


Figure X.1 – Les particules fondamentales du modèle standard.

### 1.1 Les fermions

Les fermions sont les particules fondamentales de spin demi-entier et suivent donc la statistique de Fermi-Dirac. Ainsi, deux fermions ne peuvent pas occuper le même état quantique, c'est-à-dire avoir chacun de leurs nombres quantiques égaux entre eux, comme exposé par le principe d'exclusion de Pauli. Le modèle standard comprend douze fermions constituant la matière, accompagnés de douze antifermions correspondants pour l'antimatière.

Les fermions peuvent se diviser d'une part en deux catégories, les quarks et les leptons, et d'autre part en trois catégories correspondant à trois « générations », comme illustré sur la figure X.1. La première génération (quarks  $u$  et  $d$ , électron  $e^-$  et neutrino électronique  $\nu_e$ ) correspond aux particules

les plus communes ; les deuxièmes et troisièmes générations contiennent des particules analogues, plus massives et instables.

### 1.1.1 Les quarks

Les quarks sont les fermions possédant une charge de couleur. Il existe deux quarks par génération, un quark de type *up* et un quark de type *down*, formant un doublet d'isospin faible. L'isospin faible est un nombre quantique décrit dans la section 2.3. Il y a donc six quarks au total. Les quarks de type *up* (*u*, *c* et *t*) portent une charge électrique  $+\frac{2}{3}e$  avec *e* la charge électrique élémentaire, les quarks de type *down* (*d*, *s* et *b*) une charge  $-\frac{1}{3}e$ . Les antiquarks possèdent une charge électrique opposée ( $-\frac{2}{3}e$  et  $+\frac{1}{3}e$ ). Les quarks sont donc sensibles à l'interaction électromagnétique.

À l'instar de la charge électrique pour l'interaction électromagnétique, la « couleur » rend les quarks sensibles à l'interaction forte. La charge de couleur peut prendre trois valeurs orthogonales, nommées par convention rouge, verte et bleue, car les particules portant une charge de couleur ne sont pas stables à elles seules et se regroupent pour former des particules composites de charge de couleur nulle, ou de couleur « blanche ». C'est ce que l'on appelle le phénomène de « confinement de couleur », décrit dans la section 2.5.3.

Les particules composées de quarks sont les hadrons. Ces particules sont de couleur blanche, ce qui peut être obtenu de deux manières :

- par association d'un quark rouge, un vert et un bleu ; il s'agit d'un « baryon ». Le proton (*uud*) et le neutron (*udd*) sont deux exemples de baryons.
- par association d'un quark et d'un antiquark ; il s'agit d'un « méson ». En effet, un antiquark porte une « anticouleur ». Ainsi, un quark up (*u*) rouge et un antiquark down ( *$\bar{d}$* ) « antirouge » forment un pion chargé  $\pi^+$ .

Enfin, comme tous les fermions, les quarks sont également sensibles à l'interaction faible. Les quarks sont ainsi les seules particules sensibles à toutes les interactions fondamentales décrites par le modèle standard.

### 1.1.2 Les leptons

Les leptons sont les fermions ne possédant pas de charge de couleur. Ils sont donc insensibles à l'interaction forte. En revanche, ils sont tous sensibles à l'interaction faible. Sur le même principe que pour les quarks, il y a un doublet d'isospin faible de deux leptons par génération, soit six leptons au total. Les leptons d'isospin faible haut sont l'électron ( $e^-$ ), le muon ( $\mu^-$ ) et le tau ( $\tau^-$ ), ils portent une charge électrique  $-e$  ( $+e$  pour les antiparticules correspondantes). Les leptons d'isospin faible bas sont les neutrinos. Les neutrinos ne portent pas de charge électrique et interagissent donc uniquement par interaction faible, ce qui en fait des particules difficiles à détecter.

## 1.2 Les bosons

Les bosons sont les particules fondamentales de spin entier. Ils suivent la statistique de Bose-Einstein qui n'interdit pas la présence de plusieurs bosons ayant tous leurs nombres quantiques égaux entre eux, contrairement à la statistique de Fermi-Dirac.

Les bosons de spin 1 sont les bosons de jauge, ou bosons vecteurs, et sont les médiateurs des interactions fondamentales. Ainsi, le photon ( $\gamma$ ) est le boson vecteur de l'interaction électromagnétique. Il est de masse nulle et est électriquement neutre. Les bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$  sont ceux de l'interaction faible. Le boson  $Z$  est électriquement neutre et de masse  $m_Z = 91,19 \text{ GeV}$ , les bosons  $W$  portent une charge électrique de  $\pm e$ , ont une masse de  $m_W = 80,38 \text{ GeV}$  et n'interagissent qu'avec les particules de chiralité gauche et les antiparticules de chiralité droite. La chiralité est définie dans la section 2.3. Enfin, huit gluons ( $g$ ) sont les médiateurs de l'interaction forte. Ils n'ont ni masse ni charge électrique, mais portent une charge de couleur et une charge d'anticouleur. Un gluon peut donc être chargé « rouge et antibleu ». Si un tel gluon interagit avec un quark bleu, par conservation, ce quark est rouge après interaction.

Le boson de Higgs est de spin nul, il s'agit donc d'un boson scalaire. Ce boson est une conséquence du mécanisme de brisure spontanée de symétrie électrofaible, mécanisme donnant leurs masses aux particules. Ce mécanisme est présenté dans la section 2.4.

## 2 Formalisme théorique et interactions

Il ne suffit pas de lister les particules fondamentales pour obtenir un modèle, il faut également décrire leur comportement, c'est-à-dire leur évolution à travers le temps et l'espace. Pour cela, le modèle standard se base sur la théorie quantique des champs. Une particule n'est pas un « objet ponctuel » comme en mécanique classique, mais une excitation d'un champ quantique relativiste. Il s'agit alors de décrire l'évolution de ces excitations.

Les lois de la mécanique classique ne sauraient remplir ce rôle. Le comportement des particules fondamentales est obtenu par l'application des équations d'Euler-Lagrange au lagrangien du modèle standard. Afin de comprendre pourquoi ce formalisme mathématique permet effectivement d'obtenir l'évolution des champs quantiques relativistes décrivant les particules, la section suivante consiste en une brève introduction du lagrangien dans le cas de la mécanique classique, suivie d'une généralisation au cas du modèle standard.

### 2.1 Lagrangien et équation d'Euler-Lagrange

#### 2.1.1 Lagrangien en mécanique Newtonienne

Soit une particule de masse  $m$ , soumise à une force  $F$ , se déplaçant dans le temps le long d'une dimension  $x$ , d'un point  $A$  à  $t = 0$  à un point  $B$  à  $t = \tau$ , comme illustré sur la figure X.2.

Comme cela est enseigné dès les premiers cours de physique, la trajectoire de cette particule peut être déterminée à l'aide du principe fondamental de la dynamique, ou seconde loi de Newton, qui s'exprime simplement dans ce cas sous la forme

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F. \quad (\text{X.1})$$

La position de la particule à tout instant est alors obtenue.

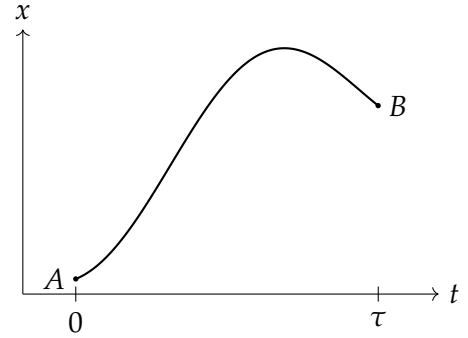
Or, cette méthode ne permet pas de décrire le comportement des particules fondamentales. En effet, à leur échelle, la mécanique quantique prévaut et il n'est pas possible, lorsque l'on observe une particule à un point  $A$  puis à un point  $B$ , de déterminer la trajectoire exacte suivie par cette particule. La particule peut suivre la trajectoire déterminée avec la mécanique classique, c'est-à-dire celle de la figure X.2, comme toute autre trajectoire reliant  $A$  à  $B$ , comme illustré sur la figure X.3.

Si le principe fondamental de la dynamique tel que formulé par Newton ne tient plus dans le contexte de la mécanique quantique, il existe un autre principe physique toujours en place, la conservation de l'énergie. Dans le cas de la particule précédemment décrit, il s'agit de la somme de son énergie cinétique  $T$  et de son énergie potentielle  $V$ , c'est-à-dire

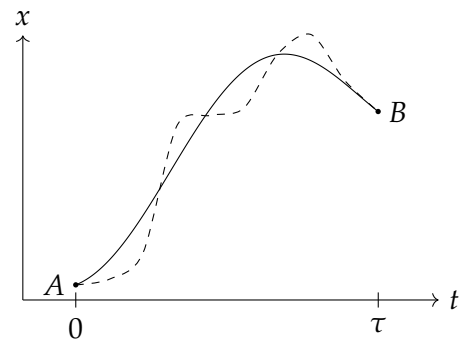
$$E = T + V = C^{\text{te}} \quad (\text{X.2})$$

où  $T$  dépend uniquement de la vitesse de la particule et  $V$  uniquement de sa position. Il en va ainsi de même pour les moyennes temporelles de ces grandeurs,

$$E = \langle E \rangle = \langle T \rangle + \langle V \rangle = C^{\text{te}} \quad (\text{X.3})$$



**Figure X.2** – Une particule se déplace au cours du temps d'un point  $A$  à un point  $B$  le long d'une dimension  $x$ .



**Figure X.3** – Variation de la trajectoire d'une particule se déplaçant au cours du temps d'un point  $A$  à un point  $B$ .

avec, en notant  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ ,

$$\langle T \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T(\dot{x}(t)) dt, \quad \langle V \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau V(x(t)) dt. \quad (\text{X.4})$$

Lorsque la trajectoire suivie par la particule varie par rapport à la trajectoire déterminée par la mécanique Newtonienne, ce qui est le cas en mécanique quantique, ces grandeurs sont modifiées. La variation de la valeur moyenne de l'énergie potentielle s'exprime

$$\frac{\delta \langle V \rangle}{\delta x(t')} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{\delta V(x(t))}{\delta x(t')} dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{dV(x(t))}{dx(t)} \delta(t-t') dt = \frac{1}{\tau} \frac{dV}{dx(t)} \Big|_{t=t'} = -\frac{1}{\tau} F(x(t')) \quad (\text{X.5})$$

car la force  $F$  est à  $V$  par  $F = -\frac{dV}{dx}$ . De même, l'énergie cinétique moyenne varie selon

$$\begin{aligned} \frac{\delta \langle T \rangle}{\delta x(t')} &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{\delta T(\dot{x}(t))}{\delta x(t')} dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{dT(\dot{x}(t))}{d\dot{x}(t)} \delta'(t-t') dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \delta(t-t') \frac{d}{dt} \left( \frac{dT(\dot{x}(t))}{d\dot{x}(t)} \right) dt \\ &= -\frac{1}{\tau} \frac{d}{dt} \left( \frac{dT(\dot{x}(t))}{d\dot{x}(t)} \right) \Big|_{t=t'} = -\frac{1}{\tau} m \frac{d^2 x}{dt^2} \Big|_{t=t'} \end{aligned} \quad (\text{X.6})$$

car pour une particule de masse  $m$ , en mécanique newtonienne,  $T = \frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2$ .

Le long de la trajectoire classique, le principe fondamental de la dynamique est vérifié. Alors, les variations autour de la trajectoire classique sont reliées par

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F \Leftrightarrow \frac{\delta \langle T \rangle}{\delta x(t')} = \frac{\delta \langle V \rangle}{\delta x(t')} \Leftrightarrow \frac{\delta}{\delta x(t')} (\langle T \rangle - \langle V \rangle) = 0. \quad (\text{X.7})$$

Ainsi, la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système étudié semble jouer un rôle particulier lorsque l'on s'intéresse aux différentes trajectoires possibles pour ce système. Le lagrangien  $L$  du système étudié est alors défini comme

$$L = T - V. \quad (\text{X.8})$$

### 2.1.2 Équation d'Euler-Lagrange

L'intégrale au cours du temps du lagrangien est appelée action et est définie comme

$$S = \int_0^\tau dt L. \quad (\text{X.9})$$

Compte-tenu de l'équation (X.7), l'action vérifie pour la trajectoire classique

$$\frac{\delta S}{\delta x(t')} = 0, \quad (\text{X.10})$$

ce qui est connu sous le nom de principe de moindre action. Or,

$$\frac{\delta S}{\delta x(t')} = \int_0^\tau dt \left[ \frac{\delta L}{\delta x(t)} \delta(t-t') + \frac{\delta L}{\delta \dot{x}(t)} \delta'(t-t') \right] = \frac{\delta L}{\delta x(t')} - \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{x}(t')}, \quad (\text{X.11})$$

ce qui implique

$$\frac{\delta L}{\delta x(t')} - \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{x}(t')} = 0. \quad (\text{X.12})$$

Cette équation est l'équation d'Euler-Lagrange et permet d'obtenir toutes les équations du mouvement du système, c'est-à-dire de décrire son évolution au cours du temps.

### 2.1.3 Lagrangien, champs et symétries

Le raisonnement précédent peut se généraliser à un espace à une dimension temporelle et trois dimensions spatiales. À partir du lagrangien, il est possible de définir la densité lagrangienne  $\mathcal{L}$  telle que

$$L = \int d^3x \mathcal{L}, \quad S = \int d^4x \mathcal{L} \quad (\text{X.13})$$

où  $x$  désigne la coordonnée dans l'espace de Minkowski, c'est-à-dire l'espace-temps à quatre dimensions. Soit à présent une densité lagrangienne dépendant d'un champ  $\phi(x)$  et de ses dérivées  $\partial_\mu \phi(x)$ . Alors,

$$S = \int d^4x \mathcal{L}(\phi(x), \partial_\mu \phi(x)) \quad (\text{X.14})$$

et du principe de moindre action résultent les équations d'Euler-Lagrange pour  $\mathcal{L}$ ,

$$\frac{\delta S}{\delta \phi} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \phi)} = 0. \quad (\text{X.15})$$

Il s'agit à présent de déterminer la densité lagrangienne  $\mathcal{L}$  du modèle standard. Par la suite, la densité lagrangienne  $\mathcal{L}$  est nommée « lagrangien » dans un souci de praticité.

Un champ quantique peut subir une transformation de jauge locale. Une telle transformation doit laisser la physique inchangée, ainsi le lagrangien du modèle standard est construit pour être invariant sous les transformations de jauges locales du groupe de symétrie

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y. \quad (\text{X.16})$$

De cette construction résultent les interactions fondamentales, discutées ci-après.

## 2.2 Interaction électromagnétique

Le lagrangien libre d'un fermion, c'est-à-dire le lagrangien décrivant le comportement d'un fermion seul, s'exprime

$$\mathcal{L}_{\text{fermion libre}} = \bar{\psi} (i\cancel{\partial} - m) \psi = \bar{\psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi = i\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\bar{\psi} \psi \quad (\text{X.17})$$

où la notation « slash » pour un objet  $k$  signifie  $\cancel{k} = \gamma^\mu k_\mu$ ,  $i$  est l'unité imaginaire ( $i^2 = -1$ ),  $\psi$  le spineur de Dirac correspondant au champ fermionique,  $\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$  son adjoint de Dirac,  $\psi^\dagger$  étant l'adjoint de  $\psi$ ,  $\gamma^\mu$  les matrices de Dirac, définies dans l'annexe A,  $\partial_\mu$  la dérivée partielle par rapport à la coordonnée  $\mu$  dans l'espace-temps de Minkowski et  $m$  la masse de la particule considérée. Le terme  $\gamma^\mu \partial_\mu$ , par convention de sommation d'Einstein exposée dans l'annexe A, correspond à une somme sur les différentes valeurs de  $\mu$ .

Le lagrangien  $\mathcal{L}_{\text{fermion libre}}$  est invariant sous une transformation globale du groupe  $U(1)_{em}$ , c'est-à-dire lorsque la transformation suivante est appliquée au spineur  $\psi$

$$\psi \rightarrow e^{iQ\alpha} \psi, \quad \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} \quad (\text{X.18})$$

où  $\alpha \in \mathbb{R}$  et  $Q$  est l'opérateur de charge électrique. En effet, sous une telle transformation,

$$\bar{\psi} \psi \rightarrow \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} e^{iQ\alpha} \psi = \bar{\psi} \psi \quad (\text{X.19})$$

et

$$\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi \rightarrow \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} \gamma^\mu \partial_\mu (e^{iQ\alpha} \psi) = \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} e^{iQ\alpha} \gamma^\mu \partial_\mu (\psi) + \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} \gamma^\mu \partial_\mu (e^{iQ\alpha}) \psi = \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi \quad (\text{X.20})$$

car  $\alpha$  ne dépend pas de l'espace-temps pour une transformation globale.

En revanche, pour une transformation locale,

$$i\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi \rightarrow i\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi + ie^{-iQ\alpha} \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu (e^{iQ\alpha}) \psi = i\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - \bar{\psi} \gamma^\mu Q \partial_\mu \alpha \psi \quad (\text{X.21})$$

ce qui fait apparaître un terme supplémentaire,  $\bar{\psi}\gamma^\mu Q\partial_\mu\alpha\psi$ , provenant de la transformation du terme  $i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi$  de  $\mathcal{L}_{\text{fermion libre}}$  qui brise ainsi l'invariance de jauge du lagrangien. Afin de rendre le lagrangien invariant sous les transformations locales du groupe  $U(1)_{em}$ , il est possible de remplacer la dérivée usuelle  $\partial_\mu$  par la dérivée covariante  $D_\mu$ , telle que

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu - ieQA_\mu \quad (\text{X.22})$$

où  $e$  est la charge électrique élémentaire et  $A_\mu$  un champ de jauge nouvellement introduit, dont la transformation de jauge permet de supprimer le terme supplémentaire qui brise l'invariance de jauge du lagrangien. En effet, le champ  $A_\mu$  se transforme tel que

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e}\partial_\mu\alpha. \quad (\text{X.23})$$

Ainsi, en réécrivant le lagrangien du fermion de l'équation (X.17) avec la dérivée covariante,

$$\mathcal{L}'_{\text{fermion libre}} = i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi = \mathcal{L}_{\text{fermion libre}} + \bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi, \quad (\text{X.24})$$

le dernier terme se transforme en

$$\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi \rightarrow \bar{\psi}e^{-iQ\alpha}\gamma^\mu eQ\left(A_\mu + \frac{1}{e}\partial_\mu\alpha\right)e^{iQ\alpha}\psi = \bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu Q\partial_\mu\alpha\psi \quad (\text{X.25})$$

et le dernier terme obtenu compense exactement le terme brisant l'invariance de jauge dans l'équation (X.21).

Le nouveau terme introduit par l'utilisation de la dérivée covariante,  $\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi$ , correspond à l'interaction entre un fermion et le champ de jauge  $A_\mu$ , dont l'intensité est directement proportionnelle à la charge électrique du fermion. Toutefois, le champ  $A_\mu$  ne représente pas encore le photon en l'état, il faut permettre au photon de se propager librement. Pour cela, il faut introduire un terme cinétique qui soit invariant de jauge dans le lagrangien, ce qui peut se faire avec

$$\mathcal{L}_{\text{photon libre}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \quad (\text{X.26})$$

avec  $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ . Un terme de masse pour le champ  $A_\mu$  devrait s'écrire sous la forme  $\frac{1}{2}m^2 A^\mu A_\mu$ , ce qui n'est pas invariant de jauge. Par conséquent, le champ  $A_\mu$  est de masse nulle.

Le lagrangien complet pour l'interaction électromagnétique, aussi nommé QED (électrodynamique quantique, *Quantum Electro-Dynamics*), s'exprime alors

$$\mathcal{L}_{QED} = \underbrace{\bar{\psi}(i\not{D} - m)\psi}_{\text{fermions}} - \underbrace{\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}}_{\text{photons}} = \underbrace{\bar{\psi}(i\not{\partial} - m)\psi}_{\mathcal{L}_{\text{fermion libre}}} + \underbrace{\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi}_{\text{interaction}} - \underbrace{\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}}_{\mathcal{L}_{\text{photon libre}}}. \quad (\text{X.27})$$

Le terme d'interaction dans ce lagrangien permet de « connecter » les fermions aux photons dans les diagrammes de Feynman, dont le principe est décrit dans l'annexe B. La « connexion » ainsi obtenue est nommée « vertex ». La structure du terme d'interaction,  $\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi$ , impose ainsi la présence au vertex d'un photon ( $A_\mu$ ), d'un fermion entrant ou d'un antifermion sortant ( $\psi$ ) et d'un fermion sortant ou d'un antifermion entrant ( $\bar{\psi}$ ). Ces possibilités donnent les diagrammes de la figure X.4.

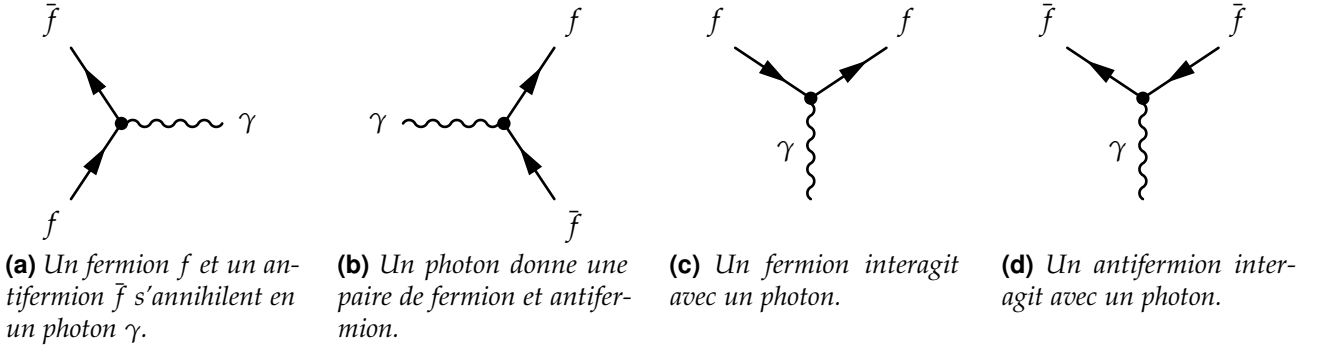
Maintenir l'invariance de jauge locale à l'aide de la dérivée covariante fait émerger l'interaction électromagnétique dans le cas de l'invariance de jauge sous  $U(1)_{em}$ . Dans les sections suivantes, un raisonnement similaire est appliqué afin d'obtenir les interactions électrofaible et forte.

### 2.3 Interaction électrofaible

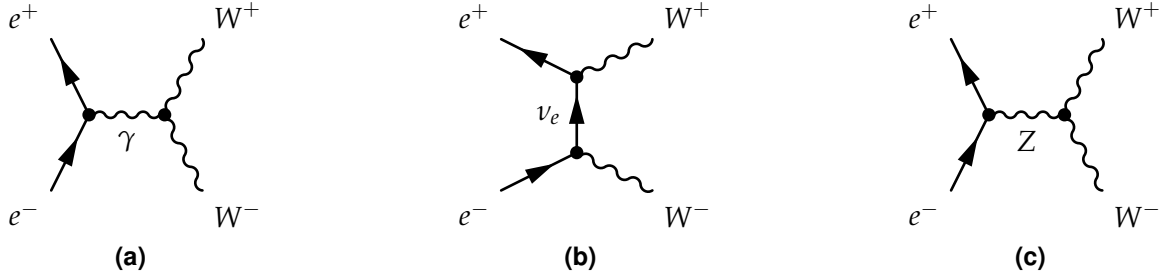
Le modèle standard décrit les interactions électromagnétique et faible comme deux facettes d'une seule et même interaction qui les unifie, l'interaction électrofaible, notée « EW » pour *electroweak*. L'interaction électrofaible a été développée à partir des travaux de Sheldon Glashow [1], Abdus Salam [2] et Steven Weinberg [3], récompensés à ce titre par le prix Nobel de physique en 1979.

Une des raisons pour unifier ces deux forces provient du calcul de la section efficace de production de paire  $W^+W^-$ . La section efficace d'un processus physique ainsi que son lien avec le nombre





**Figure X.4** – Diagrammes de Feynman possibles à partir du terme  $\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi$  du lagrangien  $\mathcal{L}_{QED}$ .



**Figure X.5** – Diagrammes de Feynman de production de paire  $W^+W^-$  à l'arbre.

d'événements de ce processus est abordé dans le chapitre 3. Pour obtenir cette section efficace sans avoir de divergence, ce qui ne saurait représenter la réalité physique, il est nécessaire de considérer les diagrammes des figures X.5a, X.5b et X.5c. L'analogie entre les diagrammes X.5a et X.5c pousse ainsi à unifier les deux forces.

L'interaction électromagnétique repose sur l'invariance de jauge sous les transformations locale du groupe  $U(1)_{em}$ . Dans le cas de l'interaction électrofaible, ce groupe de symétrie est  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ . Dans un premier temps, seul le cas de  $SU(2)_L$  avec les leptons est traité et permet de soulever toute la richesse supplémentaire de ce groupe par rapport à  $U(1)$ . Ensuite,  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  est abordé, toujours avec les leptons. Puis, le traitement des quarks est présenté, donnant alors une description de l'interaction électrofaible.

### 2.3.1 Symétrie $SU(2)_L$ et chiralité

Une des propriétés les plus importantes de l'interaction faible est de violer la symétrie de parité, notée  $P$ . La symétrie  $P$  consiste à remplacer une des trois coordonnées spatiales par son opposé, comme le passage d'un objet à son image par un miroir le ferait. La violation de  $P$  par l'interaction faible, observée expérimentalement avec les désintégrations  $\beta$  [4], peut être expliquée en considérant que les couplages aux bosons  $W$  ne se font qu'avec certains états de chiralité.

Dans les termes de couplage du lagrangien, un facteur  $\gamma^\mu$  correspond à un couplage vectoriel, comme pour l'électromagnétisme. Un facteur  $\gamma^\mu\gamma^5$  correspond quant à lui à un couplage vectoriel axial. Un facteur  $\gamma^\mu(1 \pm \gamma^5)$  somme ainsi un vecteur à un vecteur axial, ce qui implique une violation de la symétrie de parité. Les expériences montrent que les bosons  $W$  ne sont couplés qu'aux fermions de chiralité gauche et aux antifermions de chiralité droite. Or, il est possible de projeter un spineur  $\psi$  afin d'obtenir sa composante de chiralité gauche  $\psi_L$  à l'aide du projecteur chirale  $\gamma^5$ ,

$$\psi_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\psi. \quad (X.28)$$

Pour les antiparticules décrites par  $\bar{\psi} = \psi^\dagger\gamma^0$ ,

$$\bar{\psi}_L = (\psi_L)^\dagger\gamma^0 = \left(\frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\psi\right)^\dagger\gamma^0 = \psi^\dagger\frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\gamma^0 = \psi^\dagger\gamma^0\frac{1}{2}(1 + \gamma^5) = \bar{\psi}_R, \quad (X.29)$$

d'où le couplage entre fermions de chiralité gauche et antifermions de chiralité droite. Dans la notation  $SU(2)_L$ ,  $L$  signifie ainsi *left*. Les couplages du boson  $Z$  ne sont pas purement en  $(1 - \gamma^5)$ , il est



alors également couplé aux fermions de chiralité droite et aux antifermions de chiralité gauche. Ce comportement du  $Z$  peut être expliqué dans le cadre de la force électrofaible, la force faible à elle seule ne permet pas d'en rendre compte.

La violation de  $P$  par l'interaction faible a également pour conséquence la violation de  $C$ , la symétrie de charge. En effet,  $C$  change une particule de chiralité gauche en une antiparticule de même chiralité, dont les couplages aux bosons de l'interaction faible ne sont pas les mêmes. En revanche, la symétrie  $CP$  change une particule de chiralité gauche en une antiparticule de chiralité droite, ce qui semble être conservé par l'interaction faible. L'étude des désintégrations des kaons a toutefois montré que l'interaction faible viole également la symétrie  $CP$  [5], ce qui a pu être expliquée théoriquement en postulant l'existence d'une troisième génération de quarks [6] observée depuis.

L'introduction de la symétrie  $SU(2)_L$  amène un nouveau nombre quantique, l'« isospin faible », noté  $I$ . Il se comporte mathématiquement comme le spin des particules, d'où son nom *isospin*. Les fermions de chiralité gauche sont rassemblés en doublet d'isospin faible  $I = \frac{1}{2}$ , les fermions de chiralité droite en singlets d'isospin faible  $I = 0$ . Ces derniers sont ainsi invariants sous les transformations de  $SU(2)_L$ , ce qui se traduit physiquement par une insensibilité à l'interaction faible.

Les fermions peuvent être de chiralité droite ou gauche. Dans le cadre actuel du modèle standard, les neutrinos existent toutefois uniquement avec une chiralité gauche. Il n'y a à ce jour aucune raison pour les neutrinos de chiralité droite de ne pas exister. Cependant, ils n'interagissent pas, par construction, avec la matière dans le cadre du modèle standard. Ainsi, il est possible de les retirer du modèle tout en conservant une description cohérente du comportement des particules. Cela mène aux représentations du tableau X.1.

$I$	Quarks gauches	Quarks droits	Leptons gauches	Leptons droits
$\frac{1}{2}$	$\begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix}_L$	-	$\begin{pmatrix} \nu_i \\ \ell_i \end{pmatrix}_L$	-
0	-	$u_{i,R}, d_{i,R}$	-	$\ell_{i,R}$

**Tableau X.1** – Représentation des fermions selon leur chiralité et leur isospin faible. L'indice  $i \in \{1, 2, 3\}$  correspond à la génération des particules. Ainsi, les symboles  $u_i$ ,  $d_i$ ,  $\ell_i$  et  $\nu_i$  correspondent, respectivement, aux quarks d'isospin faible haut ( $u$ ,  $c$ ,  $t$ ), d'isospin faible bas ( $d$ ,  $s$ ,  $b$ ), aux leptons chargés ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ) et aux neutrinos ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ).

### 2.3.2 Symétrie $SU(2)$ et interactions entre bosons

Afin d'alléger les notations, le cas plus général d'un groupe de symétrie  $SU(2)$  est traité. Pour étendre les résultats à  $SU(2)_L$ , il suffit de se souvenir que les couplages ont uniquement lieu entre fermions de chiralité gauche et antifermions de chiralité droite. La méthode reste la même que pour l'électromagnétisme. Sous une transformation de  $SU(2)$ , les spineurs se transforment selon

$$\psi \rightarrow e^{\frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)} \psi, \quad \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi} e^{-\frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)} \quad (\text{X.30})$$

où  $\boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{R}^3$  et  $\boldsymbol{\tau}$  est un vecteur dont les composantes  $\tau_i$  sont les générateurs de  $SU(2)$ . Ces générateurs sont des matrices  $2 \times 2$  s'identifiant aux matrices de Pauli  $\sigma_i$  définies dans l'annexe A. Toutefois, ces générateurs agissent dans le cas de  $SU(2)_L$  sur les doublets d'isospin faible alors que les matrices de Pauli agissent sur le spin d'un fermion. Afin d'éviter les confusions, la notation  $\tau$  est utilisée. L'équation (X.30) est l'analogue directe de l'équation (X.19).

Afin de simplifier les calculs qui suivent, seules les transformations infinitésimales sont considérées. En effet,  $SU(2)$  est un groupe non abélien. Cela signifie deux transformations successives  $a$  et  $b$  de ce groupe ne donnent pas le même résultat selon que soient appliqués  $a$  puis  $b$  ou  $b$  puis  $a$ , c'est-à-dire  $ab - ba \neq 0$ . Ainsi, des termes supplémentaires apparaissent, ou plutôt ne se simplifient pas entre eux. Les transformations précédentes sous leurs formes infinitésimales, c'est-à-dire au premier ordre en  $\boldsymbol{\alpha}$ , s'expriment

$$\psi \rightarrow \left(1 + \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \psi, \quad \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi} \left(1 - \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right). \quad (\text{X.31})$$

Les termes du lagrangien du fermion libre, introduit dans l'équation (X.17), se transforment alors comme

$$-m\bar{\psi}\psi \rightarrow -m\bar{\psi} \left(1 - \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \left(1 + \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \psi = -m\bar{\psi}\psi + \mathcal{O}(\alpha^2) \quad (\text{X.32})$$

et

$$i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi \rightarrow i\bar{\psi} \left(1 - \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \gamma^\mu\partial_\mu \left( \left(1 + \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \psi \right) = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - \bar{\psi}\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \gamma^\mu\partial_\mu\boldsymbol{\alpha}(x)\psi + \mathcal{O}(\alpha^2) \quad (\text{X.33})$$

ce qui fait apparaître, sur le même principe qu'avec l'interaction électromagnétique, un terme supplémentaire brisant l'invariance de jauge du lagrangien. Une nouvelle dérivée covariante peut être définie afin de rétablir l'invariance de jauge,

$$D_\mu = \partial_\mu - \frac{i}{2}g_I\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu(x), \quad (\text{X.34})$$

où l'on introduit  $g_I$  la constante de couplage d'isospin faible, ainsi que trois champs de jauge vectoriels  $W_\mu^i(x)$ ,  $i \in \{1, 2, 3\}$  se transformant tels que

$$\mathbf{W}_\mu \rightarrow \mathbf{W}_\mu + \frac{1}{g_I}\partial_\mu\boldsymbol{\alpha} - (\boldsymbol{\alpha} \wedge \mathbf{W}_\mu). \quad (\text{X.35})$$

Dans ce cas, le lagrangien du fermion libre se réécrit sous la forme

$$\begin{aligned} \mathcal{L}'_{\text{fermion libre}} &= i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{1}{2}g_I\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi \\ &= \mathcal{L}_{\text{fermion libre}} + \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{1}{2}g_I\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu\psi. \end{aligned} \quad (\text{X.36})$$

Ainsi, le terme supplémentaire du lagrangien se transforme tel que

$$\begin{aligned} \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{1}{2}g_I\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu\psi &\rightarrow \bar{\psi} \left(1 - \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \gamma^\mu\frac{g_I}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \left(\mathbf{W}_\mu + \frac{1}{g_I}\partial_\mu\boldsymbol{\alpha} - (\boldsymbol{\alpha} \wedge \mathbf{W}_\mu)\right) \left(1 + \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \psi \\ &= \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{g_I}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu\psi - \bar{\psi}\frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\gamma^\mu\frac{g_I}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{g_I}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu\frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\psi \\ &\quad + \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \partial_\mu\boldsymbol{\alpha}\psi - \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{g_I}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{\alpha} \wedge \mathbf{W}_\mu)\psi + \mathcal{O}(\alpha^2). \end{aligned} \quad (\text{X.37})$$

Or,

$$(\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{a})(\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{b}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) + i\boldsymbol{\tau} \cdot (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}) \Leftrightarrow \boldsymbol{\tau} \cdot (\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}) = i[(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) - (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{a})(\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{b})]. \quad (\text{X.38})$$

Ainsi,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{\alpha} \wedge \mathbf{W}_\mu) &= \frac{1}{2} [\boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{\alpha} \wedge \mathbf{W}_\mu) - \boldsymbol{\tau} \cdot (\mathbf{W}_\mu \wedge \boldsymbol{\alpha})] \\ &= \frac{i}{2} [(\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{W}_\mu) - (\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha})(\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu)] - [(W_\mu \cdot \boldsymbol{\alpha}) - (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu)(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha})] \\ &= \frac{i}{2} [(\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu)(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}) - (\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha})(\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu)]. \end{aligned} \quad (\text{X.39})$$

En combinant les équations (X.37) et (X.39), il vient

$$\bar{\psi}\gamma^\mu\frac{1}{2}g_I\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu\psi \rightarrow \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{g_I}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \partial_\mu\boldsymbol{\alpha}\psi + \mathcal{O}(\alpha^2), \quad (\text{X.40})$$

où le dernier terme obtenu compense exactement le terme brisant l'invariance de jauge dans l'équation (X.33).

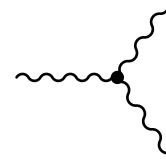
À ce stade, l'analogie avec l'électromagnétisme pousse à introduire  $W_{\mu\nu}$  l'analogue à  $F_{\mu\nu}$  tel que  $W_{\mu\nu} = \partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu$ . Or, les invariances de jauge imposées mènent à utiliser une définition légèrement différente,

$$W_{\mu\nu} = \partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu + g_I(W_\mu \wedge W_\nu). \quad (\text{X.41})$$

Le lagrangien pour  $SU(2)$  s'écrit alors

$$\mathcal{L}_{SU(2)} = \bar{\psi}(i\not{D} - m)\psi - \frac{1}{4}W_{\mu\nu} \cdot W^{\mu\nu}. \quad (\text{X.42})$$

Une nouvelle différence notable et importante vis-à-vis de  $\mathcal{L}_{QCD}$  est la non linéarité de  $W_{\mu\nu}$  par rapport à  $W_\mu$  et  $W_\nu$ . Cette composante non linéaire ouvre la porte aux interactions directes entre les champs  $W_\mu^i$ , c'est-à-dire entre les bosons, ce qui était impossible avec QED. De nouveaux types de vertex, comme celui de la figure X.6, sont donc possibles dans une théorie de jauge avec une symétrie locale  $SU(2)$ .



**Figure X.6** – Diagramme de Feynman correspondant à l'interaction entre trois bosons.

### 2.3.3 Symétrie $SU(2)_L \times U(1)_Y$ et unification électrofaible

Dans la notation  $U(1)_Y$ ,  $Y$  est l'« hypercharge », reliée à  $Q$  la charge électrique et à  $I_3$  la projection de l'isospin faible par la relation de Gell-Mann–Nishijima,

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}, \quad (\text{X.43})$$

dont les résultats pour les différents leptons sont présentés dans le tableau X.2.

Les raisonnements réalisés précédemment peuvent ici être mis à profit. En effet, le cas de  $U(1)_{em}$  est traité dans la section 2.2. Il est possible d'obtenir directement les mêmes résultats pour  $U(1)_Y$  en procédant à l'analogie  $U(1)_{em} \leftrightarrow U(1)_Y$ , avec

$$A_\mu \leftrightarrow B_\mu, \quad F_{\mu\nu} \leftrightarrow F_{\mu\nu}^{(B)}, \quad e \leftrightarrow g_Y, \quad Q \leftrightarrow \frac{1}{2}Y. \quad (\text{X.44})$$

De plus, sachant que  $SU(2)_L$  couple les fermions de chiralité gauche et les antifermions de chiralité droite, les résultats pour  $SU(2)$  sont directement utilisables en ajoutant les projections décrites par les équations (X.28) et (X.29).

La dérivée covariante pour  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  est ainsi

$$D_\mu = \partial_\mu - ig_I I \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - \frac{i}{2} g_Y Y B_\mu, \quad (\text{X.45})$$

pouvant agir sur un doublet d'isospin faible, noté  $L$ , ou un singlet d'isospin faible, noté  $R$ , selon

$$D_\mu L = \left[ \partial_\mu - \frac{i}{2} g_I \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu + \frac{i}{2} g_Y B_\mu \right] L, \quad (\text{X.46})$$

$$D_\mu R = [\partial_\mu + ig_Y B_\mu] R, \quad (\text{X.47})$$

compte-tenu des différentes valeurs de  $Y$  et  $I$  données dans le tableau X.2.

Le lagrangien invariant sous  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  de l'interaction électrofaible s'écrit alors

$$\mathcal{L}_{EW} = i\bar{\psi} \not{D} \psi - \frac{1}{4} \mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(B)} \cdot F^{(B)\mu\nu}. \quad (\text{X.48})$$

Attention toutefois, les champs  $B_\mu$  et  $W_\mu^i$  ne correspondent pas, respectivement, au photon et aux bosons  $W^\pm$  et  $Z$ . Ces quatre bosons sont en fait des combinaisons de ces quatre champs, ce qui est décrit dans la section 2.4.2.

### 2.3.4 Interaction électrofaible pour les quarks

Le lagrangien électrofaible ainsi construit pour les leptons pourrait facilement être réutilisé dans le cas des quarks,  $\psi$  étant un champ décrivant un fermion. Cependant, le lagrangien de l'équation (X.48) ne couple entre eux que des fermions de même génération. Or, il a été observé expérimentalement que l'interaction faible peut également coupler des quarks de générations différentes.

Un mécanisme rendant possible de tels couplages a été introduit par Cabibbo, Kobayashi et Masakawa [6-8]. Le principe est de faire, pour les quarks, la distinction entre les états propres de masse,

Champ	$\nu_e$	$e_L$	$e_R$
$Y$	-1	-1	-2
$I$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$I_3$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0
$Q$	0	-1	-1

**Tableau X.2** – Valeurs des hypercharges, isospins faibles et charges électriques pour les leptons.

c'est-à-dire ceux que l'on observe, et les états propres de l'interaction faible. Ces deux ensembles d'états propres diffèrent ainsi pour les quarks d'isospin faible bas et sont reliés entre eux par la matrice CKM  $\mathcal{M}_{CKM}$ , matrice  $3 \times 3$  unitaire complexe,

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}, \quad (\text{X.49})$$

où  $d'$ ,  $s'$  et  $b'$  sont les états propres de l'interaction faible et  $d$ ,  $s$  et  $b$  ceux de masse. L'élément de matrice  $V_{ij}$  ou son conjugué  $V_{ij}^*$  est ainsi un facteur appliqué au vertex pour le calcul de la section efficace des processus impliquant des quarks et l'interaction faible. Ces coefficients ne sont pas prédits par le modèle standard et sont donc mesurés expérimentalement. Les valeurs de leurs modules sont les suivantes [9]

$$|\mathcal{M}_{CKM}| = \begin{pmatrix} 0,973\,70 \pm 0,000\,14 & 0,2245 \pm 0,0008 & 0,003\,82 \pm 0,000\,24 \\ 0,221 \pm 0,004 & 0,987 \pm 0,011 & 0,0410 \pm 0,0014 \\ 0,0080 \pm 0,0003 & 0,0388 \pm 0,0011 & 1,013 \pm 0,030 \end{pmatrix}. \quad (\text{X.50})$$

Cette matrice a une structure très prononcée, presque diagonale. Le couplage entre les quarks de générations différentes est faible, ce qui se traduit expérimentalement par des durées de vie de certains hadrons contenant des quarks de deuxième et troisième génération suffisamment longs pour qu'ils se propagent sur quelques millimètres, voire quelques mètres.

Le modèle ainsi construit décrit l'interaction électrofaible pour tous les fermions. Cependant, il n'y a aucun terme de masse dans le lagrangien de l'équation (X.48). En effet, un terme de masse pour les fermions serait de la forme

$$-m\bar{\psi}\psi = -m(\bar{\psi}_R + \bar{\psi}_L)(\psi_R + \psi_L) = -m(\bar{\psi}_R\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L + \bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_L\psi_L) = -m(\bar{\psi}_R\psi_L + \bar{\psi}_L\psi_R). \quad (\text{X.51})$$

Or, ce terme n'est pas invariant sous  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ . Pour les champs  $W_\mu^i$  et  $B_\mu$ , des termes de masse violeraient également la symétrie de jauge. Dès lors, il semble difficile pour un tel lagrangien de décrire les forces électromagnétique et faible.

En réalité, ce lagrangien décrit l'interaction « électrofaible ». Les interactions électromagnétique et faible résultent d'un mécanisme de brisure spontanée de symétrie, qui se trouve dans ce cas être le mécanisme de Higgs. La section suivante montre comment l'introduction du champ de Higgs amène cette brisure de symétrie et comment sont obtenus des fermions massifs, le photon et les bosons  $W^\pm$  et  $Z$ .

## 2.4 Mécanisme de Higgs et brisure spontanée de symétrie

### 2.4.1 Champ de Higgs et brisure de symétrie

Soit un champ complexe, scalaire, massif, le champ de Higgs [10-15], noté  $\phi$ . Il s'agit d'un champ à quatre composantes, qu'il est possible d'écrire sous la forme d'un doublet d'isospin faible,

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_3 + i\phi_4 \\ \phi_1 + i\phi_2 \end{pmatrix}. \quad (\text{X.52})$$

Le champ de Higgs a pour hypercharge  $Y = +1$  et pour isospin faible  $I = \frac{1}{2}$ . Il se transforme ainsi, respectivement sous  $U(1)_Y$  et  $SU(2)_L$ , selon

$$\begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} e^{i\frac{\beta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\beta}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \rightarrow e^{i\frac{1}{2}\tau \cdot \alpha} \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \quad (\text{X.53})$$

La dérivée covariante définie par l'équation (X.45) agit donc sur le champ de Higgs selon

$$D_\mu \phi = \left[ \partial_\mu - \frac{i}{2} g_I \tau \cdot W_\mu - \frac{i}{2} g_Y B_\mu \right] \phi, \quad (\text{X.54})$$

et ce champ de Higgs apporte les termes  $\mathcal{L}_h$  au lagrangien du modèle standard, où

$$\mathcal{L}_h = (D^\mu \phi)^\dagger (D_\mu \phi) - V(\phi) \quad (\text{X.55})$$

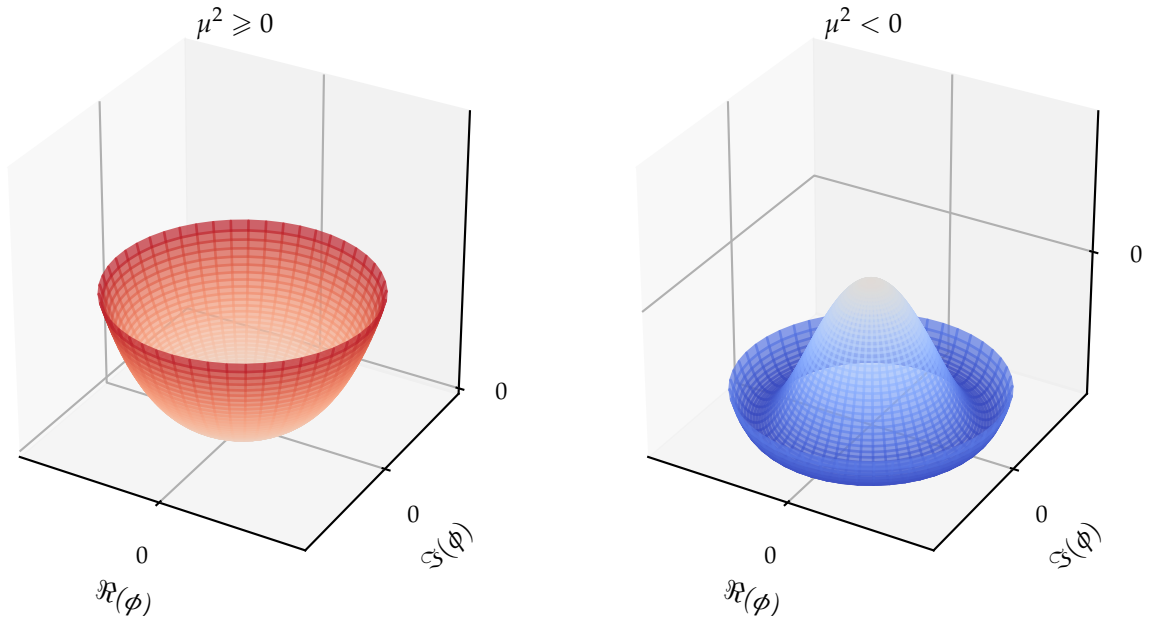
avec

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2, \quad \lambda > 0. \quad (\text{X.56})$$

Il est possible de déterminer le comportement de ce champ autour du minimum du potentiel  $V$ , c'est-à-dire autour de sa position d'équilibre. Soit  $v$  tel que  $v^2 = \phi_1^2 + \phi_2^2 + \phi_3^2 + \phi_4^2$ . Alors, à la position d'équilibre,

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial V}{\partial \phi} \right|_{\text{éq}} = 0 \\ \left. \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} \right|_{\text{éq}} \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \left( 2\mu^2 + 4\lambda \frac{v^2}{2} \right) \frac{v}{\sqrt{2}} = 0 \\ 2\mu^2 + 12\lambda \frac{v^2}{2} \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu^2 \geq 0 \Rightarrow v = 0 \\ \mu^2 < 0 \Rightarrow v^2 = \frac{-\mu^2}{\lambda} \end{cases}. \quad (\text{X.57})$$

Ainsi, dans le cas où  $\mu^2 < 0$ , le potentiel possède une infinité de minimums, situés sur un cercle de rayon  $\frac{|v|}{\sqrt{2}}$ , comme cela est visible sur la figure X.7. La forme de ce potentiel n'est pas sans rappeler celle d'un chapeau mexicain.



**Figure X.7** – Forme du potentiel du Higgs  $V$  selon le signe de  $\mu^2$ .

Le condensat de ce champ dans le vide correspond à la position de ce minimum de ce potentiel,

$$\langle \phi \rangle_0 = \frac{v}{\sqrt{2}} \neq 0, \quad (\text{X.58})$$

ce qui implique le phénomène de brisure spontanée de symétrie.

Le minimum de potentiel pour  $V$  étant dégénéré, c'est-à-dire qu'il y a une infinité de points au minimum, il est possible de briser la symétrie avec n'importe lequel de ces points. Alors, les observables physiques s'obtiennent en réalisant un développement limité autour du point choisi. Le choix le plus simple est nommé « jauge unitaire ». Dans ce cas,

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix} \quad (\text{X.59})$$

où  $h$  correspond à un nouveau champ de Higgs, cette fois-ci physiquement réel.

### 2.4.2 Masses des bosons

Lorsque l'expression (X.59) de  $\phi$  est injectée dans  $\mathcal{L}_h$ , le terme cinétique devient

$$\begin{aligned} (D^\mu \phi)^\dagger (D_\mu \phi) &= \frac{1}{2} \partial_\mu h \partial^\mu h \\ &+ \frac{(v+h)^2}{8} g_I^2 \left( W_\mu^1 + i W_\mu^2 \right) \left( W^{\mu 1} - i W^{\mu 2} \right) \\ &+ \frac{(v+h)^2}{8} \left( g_I W_\mu^3 - g_Y B_\mu \right) \left( g_I W^{\mu 3} - g_Y B^\mu \right) + \mathcal{O}(h^2). \end{aligned} \quad (\text{X.60})$$

Il est possible de développer cette expression et d'identifier les termes quadratiques qui correspondent à des termes de masse pour les bosons physiques, tout en obtenant les combinaisons des champs leurs correspondant,

$$\text{bosons } W^\pm : \quad W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( W_\mu^1 \mp i W_\mu^2 \right), \quad m_W = \frac{1}{2} v g_I, \quad (\text{X.61})$$

$$\text{photon } \gamma : \quad A_\mu = \frac{g_Y W_\mu^3 + g_I B_\mu}{\sqrt{g_I^2 + g_Y^2}}, \quad m_A = 0, \quad (\text{X.62})$$

$$\text{boson } Z : \quad Z_\mu = \frac{g_I W_\mu^3 - g_Y B_\mu}{\sqrt{g_I^2 + g_Y^2}}, \quad m_Z = \frac{1}{2} v \sqrt{g_I^2 + g_Y^2}. \quad (\text{X.63})$$

Ces équations peuvent être réécrites en introduisant l'angle de mélange faible noté  $\theta_W$  [16], tel que

$$\cos \theta_W = \frac{g_I}{\sqrt{g_I^2 + g_Y^2}}, \quad \sin \theta_W = \frac{g_Y}{\sqrt{g_I^2 + g_Y^2}}. \quad (\text{X.64})$$

Alors,

$$\text{photon } \gamma : \quad A_\mu = B_\mu \cos \theta_W + W_\mu^3 \sin \theta_W, \quad m_A = 0, \quad (\text{X.65})$$

$$\text{boson } Z : \quad Z_\mu = W_\mu^3 \cos \theta_W - B_\mu \sin \theta_W, \quad m_Z = \frac{m_W}{\cos \theta_W}. \quad (\text{X.66})$$

Pour le boson de Higgs lui-même, le terme de masse provient de  $V(\phi)$  et donne  $m_h = \sqrt{-2\mu^2}$ .

Les masses des bosons  $W^\pm$ ,  $\gamma$  et  $Z$  ainsi prédites [3] sont expérimentalement confirmées [9, 17-21]. Cependant, la masse du boson de Higgs dépendant de  $\mu$ , paramètre libre de ce modèle, seule une détermination expérimentale permet de l'obtenir. En 2012, les collaborations ATLAS et CMS ont observé un boson [22-24], confirmé comme étant ce boson de Higgs [25, 26]. Sa masse est déterminée à  $125,10 \pm 0,14 \text{ GeV}$  [9].

### 2.4.3 Masses des fermions

Le champ de Higgs peut également interagir avec les fermions. Une telle interaction, entre un champ scalaire et un champ de Dirac, est une interaction de Yukawa et permet d'introduire des termes de masse invariants de jauge pour ces fermions.

Avant la brisure de symétrie, les termes de Yukawa pour un champ  $\psi$  dont la composante d'isospin faible bas correspond à une particule de masse  $m$  s'exprime

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -\frac{m\sqrt{2}}{v} \bar{\psi} \phi \psi = -\frac{m\sqrt{2}}{v} \left( \bar{\psi}_L \phi \psi_R + \bar{\psi}_R \phi^\dagger \psi_L \right), \quad (\text{X.67})$$

donnant après la brisure spontanée de symétrie précédemment décrite les termes de masse pour les fermions d'isospin faible bas,

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -m \bar{\psi} \psi + \frac{m}{v} \bar{\psi} h \psi. \quad (\text{X.68})$$

En effet, la brisure de symétrie dans le cas de la jauge unitaire (X.59) laisse la composante d'isospin faible haut du champ de Higgs nulle. Ce formalisme permet donc d'obtenir les termes de masse pour



les leptons chargés. Les neutrinos étant considérés dans le lagrangien du modèle standard comme des particules de masses nulles, l'ensemble des leptons est donc traité à ce stade.

Dans le cas des quarks en revanche, il faut obtenir des termes de masse pour les quarks d'isospin faible haut. Pour cela, il est possible d'introduire le conjugué de charge du champ de Higgs,

$$\phi^C = i\sigma_2 \phi^* = \begin{pmatrix} \phi^* \\ -\phi^- \end{pmatrix} \quad (\text{X.69})$$

dont l'expression devient après brisure de symétrie dans le cas de la jauge unitaire

$$\phi^C = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} v + h(x) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{X.70})$$

Cette fois, la composante d'isospin faible haut du champ de Higgs n'est pas nulle et permet d'obtenir des termes de masse pour les quarks d'isospin faible haut.

Ainsi, les termes de Yukawa pour les fermions s'expriment

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = y\bar{\psi}\phi\psi + \text{h.c.} = \sum_{i=1}^3 y_i^\ell \bar{\ell}_i \phi \ell_i + \sum_{i=1}^3 y_i^d \bar{d}_i \phi d_i + \sum_{i=1}^3 y_i^u \bar{u}_i \phi^C u_i, \quad y_i^x = -\frac{\sqrt{2}}{v} m_i^x \quad (\text{X.71})$$

où  $i$  correspond à la génération des fermions,  $\ell_i$ ,  $d_i$  et  $u_i$  aux champs listés dans le tableau X.1 et  $m_i^x$  à la masse du fermion de type  $x$  et de génération  $i$ .

## 2.5 Interaction forte

### 2.5.1 La couleur

L'interaction forte est la troisième force fondamentale décrite par le modèle standard. L'analogue de la charge électrique pour l'interaction électromagnétique est, dans le cas de l'interaction forte, la « couleur », concept né de l'observation des baryons  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^-$  [27-29] et  $\Omega^-$  [30]. Dans le modèle des quarks, ces baryons sont composés comme

$$\Delta^{++} = (uuu), \quad \Delta^- = (ddd), \quad \Omega^- = (sss). \quad (\text{X.72})$$

Or, ces baryons sont de spin  $\frac{3}{2}$ . Les quarks possédant un spin  $\frac{1}{2}$ , il faudrait alors que pour chacun de ces baryons, les trois quarks les composant aient leurs nombres quantiques égaux, ce qui va à l'encontre du principe de Pauli.

Il est possible de décrire ces baryons sans violer le principe d'exclusion de Pauli en introduisant un nouveau nombre quantique, la couleur. Les quarks portent ainsi une charge de couleur, pouvant prendre trois valeurs orthogonales, nommées par convention rouge, verte et bleue. Les antiquarks portent une anticouleur. Il suffit alors que chaque quark porte une couleur différente, c'est-à-dire

$$\Delta^{++} = (ruv), \quad \Delta^- = (rd\bar{d}), \quad \Omega^- = (rs\bar{s}). \quad (\text{X.73})$$

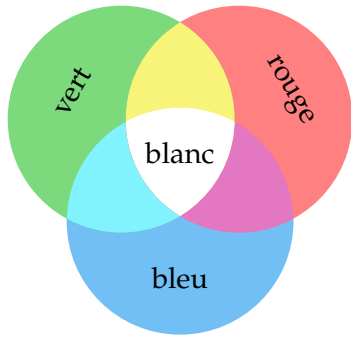
Les baryons ainsi formés de trois quarks (un rouge, un vert et un bleu) portent une charge de couleur globale nulle, ils sont de couleur « blanche », comme cela est visible sur la figure X.8a. Dans le cas des antibaryons formés de trois antiquarks, sur la figure X.8c, c'est l'association des trois anticouleurs qui permet d'obtenir un baryon blanc. Il est également possible de former une particule composite blanche par association d'un quark avec un antiquark portant l'anticouleur correspondante. Les trois combinaisons possibles sont illustrées sur la figure X.8b. Il s'agit alors de mésons.

Les quarks et antiquarks se regroupent ainsi en particules composites, les hadrons (baryons et mésons), dont la neutralité de couleur est confirmée expérimentalement. Ce phénomène est connu sous le nom de « confinement de couleur » et est abordé dans la section 2.5.3.

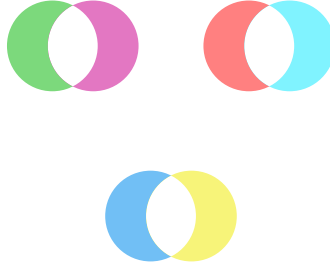
### 2.5.2 Symétrie $SU(3)_C$

Afin de décrire l'interaction forte dans le même formalisme que les autres interactions fondamentales, il faut un groupe de symétrie. Étant donné qu'il existe trois dimensions de couleur (rouge, verte,

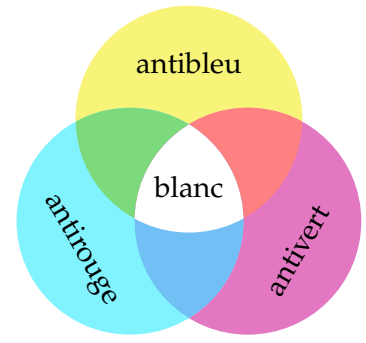




(a) Un baryon est constitué de trois quarks, un de chaque couleur.



(b) Un méson est constitué d'un quark et d'un antiquark de l'anticouleur correspondante.



(c) Un antibaryon est constitué de trois antiquarks, un de chaque anticouleur.

**Figure X.8** – Combinaisons des couleurs des quarks dans les hadrons. La couleur globale est toujours blanche, c'est-à-dire que la charge de couleur globale est nulle.

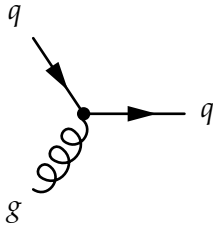
bleue), la théorie quantique des champs associée à l'interaction forte se base sur le groupe  $SU(3)_C$ , où  $C$  signifie « couleur ».

Tout comme  $SU(2)$ ,  $SU(3)$  est un groupe non abélien. Il est possible de reprendre exactement les mêmes calculs que ceux de la section 2.3.2, en procédant aux changements

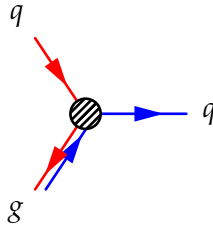
$$\tau \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C})^3 \leftrightarrow \lambda \in \mathcal{M}_3(\mathbb{C})^8, \quad \alpha \in \mathbb{R}^3 \leftrightarrow \theta \in \mathbb{R}^8, \quad g_I \leftrightarrow \alpha_s, \quad W_\mu \leftrightarrow G_\mu, \quad W_{\mu\nu} \leftrightarrow G_{\mu\nu} \quad (\text{X.74})$$

où  $\lambda$  est un vecteur à huit composantes, chacune étant une matrice de Gell-Mann, définies dans l'annexe A,  $G_\mu$  décrit donc huit gluons, bosons vecteurs de l'interaction forte et  $\alpha_s$  est la constante de couplage de l'interaction forte.

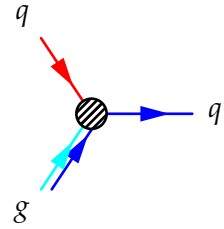
Les gluons portent une couleur et une anticouleur. Lors de chaque interaction, la charge de couleur est conservée, ainsi un quark rouge interagissant avec un gluon bleu-antirouge devient un quark bleu. Le flux de couleur ainsi conservé dans cet exemple est représenté sur la figure X.9.



(a) Diagramme de Feynman de l'interaction.

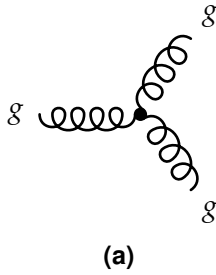


(b) Représentation du flux de couleur conservé.

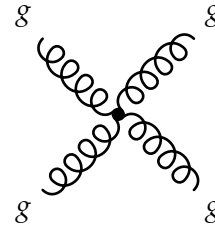


(c) Interprétation en utilisant les antiquarks.

**Figure X.9** – Interaction entre un quark rouge et un gluon bleu-antirouge, donnant un quark bleu.



(a)



(b)

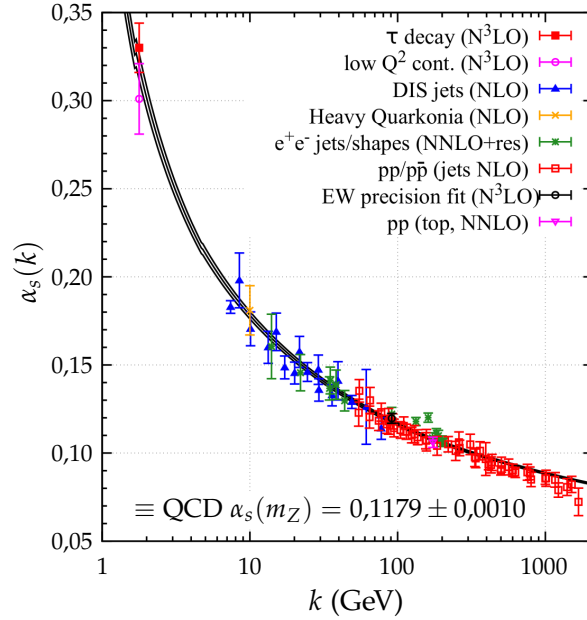
**Figure X.10** – Diagrammes de Feynman correspondant à l'interaction entre trois et quatre gluons.

Le terme non linéaire  $G_\mu \wedge G_\nu$  dans l'expression de  $G_{\mu\nu}$ , obtenue à partir de l'analogie (X.74) appliquée à l'équation (X.41), est lourd de conséquences. Il permet le couplage entre trois et quatre gluons, comme cela est illustré sur la figure X.10, et donne à l'interaction forte toute sa singularité.

En effet, ce terme est responsable du confinement de couleur et de l'initiation de la gerbe partonique qui donne naissance aux jets, ce qui est discuté dans le chapitre 4.

### 2.5.3 Confinement de couleur et liberté asymptotique

Le confinement de couleur force les quarks, particules colorées, à s'associer en formant des particules composites, les hadrons, états liés de charge globale de couleur nulle. Ce phénomène empirique peut s'expliquer par la variation en fonction de l'échelle d'énergie de la constante de couplage de l'interaction forte  $\alpha_s$ , représentée sur la figure X.11.



**Figure X.11** – Mesures de  $\alpha_s$  en fonction de l'échelle d'énergie  $k$  (points) et prédiction théorique (courbe) [9]. Le degré des calculs perturbatifs de QCD utilisés pour extraire  $\alpha_s$  est indiqué entre parenthèses (NLO : next-to-leading order, c'est-à-dire jusqu'à l'ordre suivant le premier degré non nul ; NNLO : un ordre de plus que NLO ; etc.).

Aux basses énergie,  $\alpha_s$  diverge. Ainsi, séparer et isoler des particules colorées mène à une énergie potentielle de couleur suffisamment grande pour créer des paires quark-antiquark. Lorsqu'un quark est issu d'une collision en physique des particules, ce processus se réalise et produit un ensemble collimé de particules, un jet.

De plus, à cause de la valeur élevée de  $\alpha_s$  aux basses énergies, il n'est pas possible de réaliser des calculs perturbatifs pourtant usuels en théorie quantique des champs. D'autres techniques sont toutefois utilisées, comme la méthode de QCD sur réseau. Son principe est de discrétiser l'espace-temps en un réseau de points. Bien que cette méthode requière d'importantes capacités de calcul et beaucoup de temps, elle permet d'obtenir avec succès les masses des hadrons comme cela se voit sur la figure X.12 pour les hadrons légers.

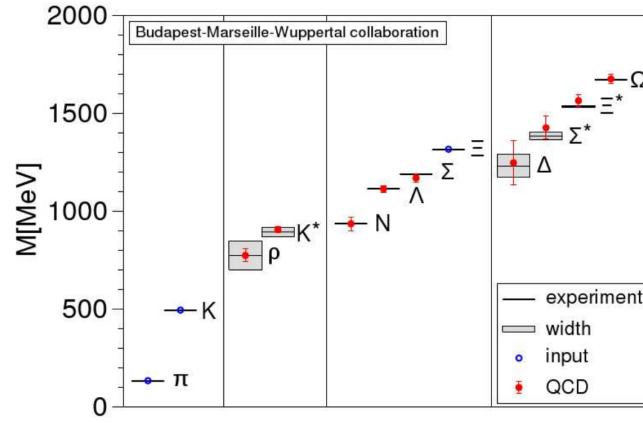
Les valeurs de  $\alpha_s$  à deux échelles d'énergie  $k$  et  $\mu$  sont reliées par la relation

$$\alpha_s(k) = \frac{\alpha_s(\mu)}{1 + \frac{11n_c - 2n_f}{12\pi} \alpha_s(\mu) \ln\left(\frac{k^2}{\mu^2}\right)} \quad (\text{X.75})$$

avec  $n_c$  le nombre de couleurs et  $n_f$  le nombre de saveurs de quarks, c'est-à-dire  $n_c = 3$  et  $n_f = 6$  [32]. Cette relation peut ainsi se réécrire

$$\alpha_s(k) = \frac{6\pi}{21 \ln\left(\frac{k}{\Lambda_{\text{QCD}}}\right)}, \quad \Lambda_{\text{QCD}} = 218 \pm 24 \text{ MeV}, \quad (\text{X.76})$$

avec  $\Lambda_{\text{QCD}}$  l'échelle d'énergie à laquelle  $\alpha_s$  diverge. Il ressort que  $\alpha_s$  décroît lorsque l'échelle d'énergie augmente. Cette diminution de  $\alpha_s$  aux hautes énergies est la « liberté asymptotique » [33, 34], régime où les particules colorées ne sont plus confinées et peuvent se propager comme des particules libres. Aux LHC, les énergies de collision permettent d'atteindre ce régime.



**Figure X.12** – Spectre de masse des hadrons légers [31]. Les lignes horizontales ainsi que les zones grisées sont les valeurs expérimentales et les largeurs de désintégration. Les résultats obtenus en utilisant des calculs de QCD sur réseau sont représentés par des cercles, avec les erreurs associées. Seules les masses des hadrons  $\pi$ ,  $K$  et  $\Xi$  sont sans barre d'erreur, elles sont utilisées pour fixer les paramètres libres du modèle.

### 3 Succès et limites du modèle standard

#### 3.1 Succès

Le modèle standard a été conçu il y a plus de 50 ans et a évolué avec les nouvelles observations expérimentales. Ses succès sont nombreux, notamment de par son pouvoir prédictif. L'existence de bosons massifs  $W$  et  $Z$  est ainsi prédite dès la fin des années 60 [3], leur observation est réalisée en 1983 [17-21]. De même, le quark top postulé en 1973 [6] est observé 22 ans plus tard [35, 36]. Dernier tour de force en date, le boson de Higgs, prédit en 1964 [10-13] et observé en 2012 [22, 23].

Le lagrangien du modèle standard s'écrit à ce jour sous la forme

$$\mathcal{L}_{SM} = \underbrace{-\frac{1}{4}\mathcal{F}_{\mu\nu}\mathcal{F}^{\mu\nu}}_{\text{bosons vecteurs libres}} + \underbrace{i\bar{\psi}\mathcal{D}\psi}_{\text{fermions et interactions}} + \underbrace{(D^\mu\phi)^\dagger(D_\mu\phi) - V(\phi)}_{\text{boson de Higgs et interactions avec les autres bosons}} + \underbrace{(y\bar{\psi}\phi\psi + \text{h.c.})}_{\text{termes de Yukawa (interactions fermions-Higgs)}} \quad (\text{X.77})$$

où « h.c. » signifie conjugué hermitien et

$$\mathcal{F}_{\mu\nu}\mathcal{F}^{\mu\nu} = G_{\mu\nu} \cdot G^{\mu\nu} + W_{\mu\nu} \cdot W^{\mu\nu} + F_{\mu\nu}^{(B)} F^{(B)\mu\nu}, \quad (\text{X.78})$$

$$\mathcal{D} = \gamma^\mu D_\mu = \gamma^\mu \left[ \partial_\mu - ig_I I \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - ig_Y \frac{Y}{2} B_\mu - i\alpha_s \frac{C}{2} \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{G}_\mu \right], \quad (\text{X.79})$$

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2. \quad (\text{X.80})$$

Le modèle standard ainsi construit permet d'expliquer la plupart des phénomènes observés avec une grande précision. Cependant, il ne propose pas d'explications à certaines observations discutées dans la section suivante.

#### 3.2 Limites

La plupart des phénomènes connus sont parfaitement décrits par le modèle standard et son formalisme, mais ils ne le sont pas tous. En effet, certaines observations présentées de manière non exhaustive ci-après laissent à penser que le modèle standard est une théorie effective à basse énergie et qu'il existe une théorie plus fondamentale au-delà à même de pouvoir les expliquer.

**Nombre de générations** Le modèle standard ne permet pas de prédire le nombre de générations, aujourd'hui égal à trois. Ainsi, il est tout à fait possible qu'il existe une quatrième génération de fermions (quarks  $t'$  et  $b'$ , leptons  $\tau'$  et  $\nu_{\tau'}$ ). Seule contrainte connue à ce jour, les mesures sur la largeur du  $Z$  impliquent que seulement trois générations peuvent présenter des neutrinos de masse inférieure à  $\frac{1}{2}m_Z$  [37]. Il faudrait ainsi nécessairement  $\nu_{\tau'} > \frac{1}{2}m_Z$ . Mesurer avec précision les paramètres

de la matrice CKM permet de tester la présence d'une génération supplémentaire de fermions, cette matrice devant être unitaire.

**Masse des neutrinos** Dans le lagrangien du modèle standard (X.77), les neutrinos ne possèdent pas de masse. Or, des oscillations entre saveurs de neutrinos ont été observées [38, 39]. Ces oscillations impliquent d'une part que les neutrinos possèdent une masse, et d'autre part que les états propres de l'interaction faible ne sont pas les états propres de masse des neutrinos.

Donner une masse aux neutrinos demande d'introduire des neutrinos de chiralité droite, non présents dans le modèle standard. Des telles particules, par construction, n'interagissent ni par interaction forte (pas de charge de couleur), ni par interaction électromagnétique (pas de charge électrique), ni par interaction faible (particules de chiralité droite). Plusieurs hypothèses, comme le mécanisme de Seesaw [40-44], sont avancées afin de décrire de tels neutrinos stériles. Il n'existe à ce jour aucun résultat expérimental permettant de conclure sur la validité de ces hypothèses.

Les états propres de l'interaction faible des neutrinos peuvent être reliés à leurs états propres de masse à l'aide de la matrice PMNS [45], pour Pontecorvo, Maki, Nakagawa et Sakata, analogue à la matrice CKM introduite dans la section 2.3.4. Dans ce cas,

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad (\text{X.81})$$

où  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$  sont les états propres de l'interaction faible et  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  et  $\nu_3$  ceux de masse.

**Nombre de paramètres libres** Le modèle standard tel que décrit dans la section 2 comporte 19 paramètres libres, listés dans le tableau X.3. Une théorie comportant moins de paramètres libres propose plus de prédictions, sur la masse des particules par exemple, ce qui permet de réaliser plus de comparaisons aux données expérimentales. Parmi ces 19 paramètres libres, 15 (les masses des 6 quarks et

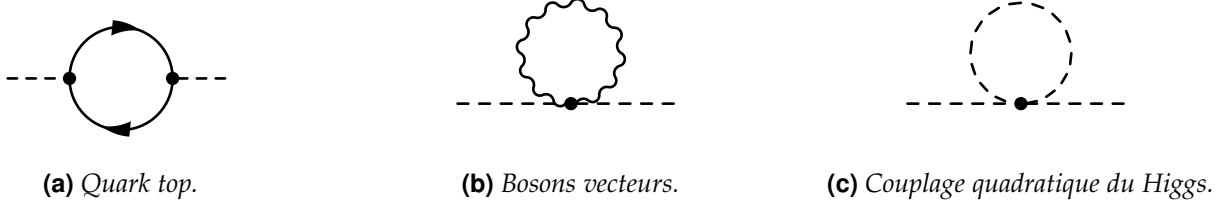
Grandeur	Symbole	Valeur
Masse du quark up	$m_u$	$2,16^{+0,49}_{-0,26}$ MeV
Masse du quark down	$m_d$	$4,67^{+0,48}_{-0,17}$ MeV
Masse du quark strange	$m_s$	$93^{+11}_{-5}$ MeV
Masse du quark charm	$m_c$	$1,27^{+0,02}_{-0,035}$ GeV
Masse du quark bottom	$m_b$	$4,18^{+0,03}_{-0,02}$ GeV
Masse du quark top	$m_t$	$172,76 \pm 0,30$ GeV
Masse de l'électron	$m_e$	$0,510\,998\,946\,1 \pm 0,000\,000\,003\,1$ MeV
Masse du muon	$m_\mu$	$105,658\,374\,5 \pm 0,000\,002\,4$ MeV
Masse du tau	$m_\tau$	$1776,86 \pm 0,12$ MeV
Angle de mélange CKM I-II	$\theta_{12}$	$13,091 \pm 0,028$ °
Angle de mélange CKM II-III	$\theta_{23}$	$2,323^{+0,048}_{-0,035}$ °
Angle de mélange CKM I-III	$\theta_{13}$	$0,2068^{+0,0063}_{-0,0052}$ °
Phase de violation CP CKM	$\delta_{\text{CKM}}$	$68,53^{+2,58}_{-2,46}$ °
Phase de violation CP forte	$\theta_{\text{QCD}}$	$< 10^{-10}$
Constante de couplage $U(1)_Y$	$g_Y$	$0,349\,70 \pm 0,000\,19$
Constante de couplage $SU(2)_L$	$g_I$	$0,652\,95 \pm 0,000\,12$
Constante de couplage $SU(3)_C$	$\alpha_s$	$0,1179 \pm 0,0010$
Condensat du champ de Higgs	$v$	$246 \pm 6 \times 10^{-5}$ GeV
Masse du boson de Higgs	$m_h$	$125,10 \pm 0,14$ GeV

**Tableau X.3** – Valeurs expérimentales des 19 paramètres libres du modèle standard [9].

des 3 leptons chargés, la masse du Higgs, son condensat dans le vide et les quatre paramètres de la matrice CKM) sont reliés au boson de Higgs. C'est pourquoi l'étude du boson de Higgs est un enjeu majeur en physique des particules.

L'introduction de neutrinos massifs, précédemment évoquée, apporte trois nouveaux paramètres libres, les masses des trois neutrinos. De plus, la matrice PMNS permettant de décrire leurs oscillations demande quatre paramètres libres, analogues aux quatre paramètres reliés à la matrice CKM dans le tableau X.3. Il y a donc potentiellement 26 paramètres libres pour un modèle standard incluant les neutrinos massifs.

**Ajustement fin** Le calcul de la masse du boson de Higgs demande d'introduire des diagrammes de Feynman avec des boucles, comme ceux de la figure X.13.



**Figure X.13** – Diagrammes de Feynman des contributions aux corrections radiatives à la masse du boson de Higgs.

Dans ce cas, la masse effective du boson de Higgs  $m_h$  s'exprime à partir de la masse « nue »  $m_{h0}$  à laquelle sont apportées des corrections [46] :

$$\text{du top, figure X.13a} \quad -\frac{3}{8\pi^2} y_t^2 \Lambda^2 \quad \sim -(2 \text{ TeV})^2 \quad (\text{X.82})$$

$$\text{des bosons vecteurs, figure X.13b} \quad +\frac{1}{16\pi^2} g^2 \Lambda^2 \quad \sim +(0,7 \text{ TeV})^2 \quad (\text{X.83})$$

$$\text{du Higgs, figure X.13c} \quad +\frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 \quad \sim +(0,5 \text{ TeV})^2 \quad (\text{X.84})$$

où  $y_t^2$  est la constante de couplage de Yukawa du quark top défini équation (X.71),  $g$  la constante de couplage de l'interaction associée au boson vecteur considéré,  $\lambda$  la paramètre du terme quadratique du potentiel de Higgs (X.56) et  $\Lambda$  l'échelle d'énergie de la « nouvelle physique », c'est-à-dire l'échelle d'énergie où le modèle standard n'est plus valable.

La masse du boson de Higgs s'exprime alors

$$m_h^2 = m_{h0}^2 - \frac{3}{8\pi^2} y_t^2 \Lambda^2 + \frac{1}{16\pi^2} g^2 \Lambda^2 + \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \dots \quad (\text{X.85})$$

Le boson de Higgs a été observé avec une masse de  $125,10 \pm 0,14 \text{ GeV}$ . Or, les corrections sont de l'ordre du TeV. Les paramètres dont elles dépendent devraient donc être ajustés jusqu'à la 32<sup>e</sup> décimale, ce qui semble peu naturel.

**Gravitation** Le modèle standard ne propose aucune description de la gravitation. La relativité générale permet de décrire la gravitation à l'échelle macroscopique avec succès, mais cette théorie n'est pas quantifiée. En l'état actuel, l'ajout de la gravitation au modèle standard introduit des infinis qui le rendent non renormalisable. Le modèle standard est donc valide uniquement pour des échelles où la gravitation est négligeable face aux autres interactions (électromagnétique, faible et forte). C'est le cas dans les expériences de physique des particules ; aucune d'entre elles n'a observé d'effet gravitationnel dans ses résultats.

**Matière noire et énergie noire** La matière noire est, par hypothèse, de la matière interagissant gravitationnellement mais pas électromagnétiquement. Son existence est postulée suite à l'observation des galaxies, dont les courbes de vitesses de rotation ne peuvent être expliquées à ce jour avec la relativité générale et la matière ordinaire seulement. Des effets de lentille gravitationnelle vont également en ce sens [47]. Le modèle standard ne propose aucun candidat pour la matière noire. D'autres observations cosmologiques montrent que l'expansion de l'Univers s'accélère. Cette accélération implique l'existence d'une énergie, l'énergie noire, inexpliquée par le modèle standard. Les mesures cosmologiques [48] indiquent que l'Univers est ainsi composé de 68 % d'énergie noire et 27 % de matière noire. Le modèle standard ne décrit donc que 5 % du contenu de l'Univers.

**Asymétrie matière-antimatière** Pour chaque particule de matière, il existe une antiparticule, dont les nombres quantiques sont opposés. Or, l'Univers est composé presque exclusivement de matière. La force électrofaible propose un mécanisme violant la symétrie  $CP$  pouvant mener à une asymétrie entre matière et antimatière, lié à la phase complexe de la matrice CKM,  $\delta_{\text{CKM}}$ . Cependant, cet effet est trop faible pour expliquer à lui seul l'asymétrie effectivement observée.

## 4 Au-delà du modèle standard

Le modèle standard souffre ainsi de lacunes malgré ses prédictions précises. Des modèles sont développés afin de les combler, ils sont dits « au-delà » du modèle standard (BSM, *Beyond Standard Model*). Un des modèles BSM les plus prometteurs est la supersymétrie (SUSY), présentée dans la section 4.1. La SUSY nécessite d'introduire un second doublet de Higgs, elle est ainsi un cas particulier de modèle à deux doublets de Higgs (2HDM, *2 Higgs Doublets Model*). Les 2HDM sont abordés dans la section 4.2. Puis, le modèle le plus simple de SUSY, l'extension supersymétrique minimale du modèle standard (MSSM, *Minimal Supersymmetric extension of Standard Model*), est présenté section 4.3.

### 4.1 La supersymétrie

La supersymétrie (SUSY) [49-51] introduit une nouvelle symétrie entre fermions et bosons. Ces deux types de particules ne sont plus indépendants, ce sont des saveurs, ou manifestations, d'un champ quantique plus complexe. À chaque particule du modèle standard correspond alors une nouvelle particule du fait de cette symétrie, nommée « superpartenaire ». Les fermions du modèle standard ont des superpartenaires de spin entier, c'est-à-dire des bosons, les « sfermions ». Les bosons du modèle standard ont des superpartenaires de spin demi-entier, c'est-à-dire des fermions, les « bosi-nos ». Une particule et son superpartenaire ont les mêmes nombres quantiques à l'exception de leurs spins.

De nouvelles interactions sont potentiellement possibles, dans lesquelles les nombres baryonique  $B$  et leptonique  $L$  ne sont pas conservés et  $B - L$  non plus. Or, ce type d'interactions rendent le proton instable, ce qui n'est pas observé expérimentalement. Une nouvelle symétrie est ainsi introduite afin de supprimer ces interactions violant la conservation de  $B - L$ , la parité  $R$ . L'opérateur de parité  $R$  est défini comme

$$P_R = (-1)^{3(B-L)-2s} \quad (\text{X.86})$$

où  $s$  correspond au spin de la particule. Les particules du modèle standard possèdent une parité  $R$  égale à 1, leurs superpartenaires une parité  $R$  égale à  $-1$ . La conservation de cette nouvelle parité permet non seulement de garder le proton stable, mais rend également stable la particule supersymétrique de plus basse masse, notée LSP (*Lightest Supersymmetric Particle*).

La SUSY est un des modèles BSM les plus prometteurs. Ce type de modèle permet en effet de résoudre, s'il est confirmé expérimentalement, de nombreuses lacunes du modèle standard. Les trois forces fondamentales décrites par le modèle standard pourraient être unifiées grâce à ce modèle. Dans la section 2.3, l'unification des forces électromagnétique et faible est déjà réalisée. Toutefois, la force électrofaible et la force forte ne semblent pas s'unifier à haute énergie. Or, les interactions avec les superpartenaires introduits par la SUSY modifient le comportement des constantes de couplage des trois forces fondamentales de manière à les unifier à haute énergie. La SUSY propose également un candidat pour la matière noire dans le cas où la LSP est de charge électrique nulle, potentiellement un neutralino ou un sneutrino. De plus, la SUSY permet de résoudre le problème de l'ajustement fin. La divergence quadratique de la masse du Higgs est naturellement supprimée par les diagrammes à boucles des superpartenaires dont les contributions ont des signes opposées à celles des particules, les fermions ayant des contributions positives et les bosons des contributions négatives [52].

Toutefois, il est impossible de mettre en place la SUSY sans un second doublet de Higgs. Dans le modèle standard, la masse des quarks d'isospin faible haut est obtenue dans la section 2.4.3 à l'aide du conjugué de charge du doublet de Higgs. Cependant, le potentiel supersymétrique contenant les termes de Yukawa, nécessaires à l'obtention des masses des fermions, n'autorise pas l'utilisation du conjugué de charge du doublet de Higgs afin de donner une masse aux quarks d'isospin faible



haut [46]. Un second doublet de Higgs, couplé aux fermions d'isospin faible haut, doit nécessairement être introduit [46, 52]. La SUSY est donc un cas particulier de modèle à deux doublets de Higgs.

## 4.2 Modèles à deux doublets de Higgs

Les modèles à deux doublets de Higgs (2HDM, *2 Higgs Doublets Model*) introduisent un second doublet de Higgs. Ainsi, au lieu d'avoir uniquement le doublet  $\phi$  défini par (X.52), il en existe deux,  $\phi_1$  et  $\phi_2$ . Le potentiel de Higgs (X.56) du modèle standard est remplacé par le potentiel scalaire le plus général possible brisant spontanément  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  en  $U(1)_{em}$  [52, 53],

$$\begin{aligned} V(\phi_1, \phi_2) = & \lambda_1 \left( \phi_1^\dagger \phi_1 - \frac{1}{2} v_1^2 \right)^2 + \lambda_2 \left( \phi_2^\dagger \phi_2 - \frac{1}{2} v_2^2 \right)^2 \\ & + \lambda_3 \left[ \left( \phi_1^\dagger \phi_1 - \frac{1}{2} v_1^2 \right) + \left( \phi_2^\dagger \phi_2 - \frac{1}{2} v_2^2 \right) \right]^2 + \lambda_4 \left[ (\phi_1^\dagger \phi_1)(\phi_2^\dagger \phi_2) - (\phi_1^\dagger \phi_2)(\phi_2^\dagger \phi_1) \right] \\ & + \lambda_5 \left[ \Re(\phi_1^\dagger \phi_2) - \frac{1}{2} v_1 v_2 \cos \xi \right]^2 + \lambda_6 \left[ \Im(\phi_1^\dagger \phi_2) - \frac{1}{2} v_1 v_2 \sin \xi \right]^2 \\ & + \lambda_7 \left[ \Re(\phi_1^\dagger \phi_2) - \frac{1}{2} v_1 v_2 \cos \xi \right] \left[ \Im(\phi_1^\dagger \phi_2) - \frac{1}{2} v_1 v_2 \sin \xi \right]. \quad (\text{X.87}) \end{aligned}$$

Le dernier terme de (X.87) peut être éliminé en redéfinissant les phases des champs scalaires. Les paramètres  $\lambda_i$  sont réels et dans le cas de la SUSY,  $\lambda_5 = \lambda_6$ . Dans le cas  $\sin \xi \neq 0$ , le secteur de Higgs du modèle viole la symétrie  $CP$ . Le minimum du potentiel ainsi construit est tel que

$$\langle \phi_1 \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \end{pmatrix}, \quad \langle \phi_2 \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 e^{i\xi} \end{pmatrix}. \quad (\text{X.88})$$

Il est possible de définir, à ce stade, une variable importante dans la suite, le rapport des condensats des doublets de Higgs dans le vide,

$$\tan \beta = \frac{\langle \phi_2 \rangle_0}{\langle \phi_1 \rangle_0} = \frac{v_2}{v_1} \quad (\text{X.89})$$

avec  $0 \leq \beta \leq \pi/2$ . Il est aussi possible de définir

$$v^2 = v_1^2 + v_2^2. \quad (\text{X.90})$$

De ce formalisme découle l'existence de cinq bosons de Higgs massifs,

$$\text{deux Higgs chargés :} \quad H^\pm = -\phi_1^\pm \sin \beta + \phi_2^\pm \cos \beta, \quad m_{H^\pm}^2 = \frac{1}{2} \lambda_4 v^2, \quad (\text{X.91})$$

$$\text{un Higgs pseudo-scalaire :} \quad A = \sqrt{2} (-\Im(\phi_1^0) \sin \beta + \Im(\phi_2^0) \cos \beta), \quad m_A^2 = \frac{1}{2} \lambda_6 v^2, \quad (\text{X.92})$$

ainsi que deux bosons de Higgs scalaires neutres dont les champs quantiques sont mélangés par la matrice

$$\mathcal{M} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 4v_1^2(\lambda_1 + \lambda_3) + v_2^2 \lambda_5 & (4\lambda_3 + \lambda_5)v_1 v_2 \\ (4\lambda_3 + \lambda_5)v_1 v_2 & 4v_2^2(\lambda_2 + \lambda_3) + v_1^2 \lambda_5 \end{pmatrix}. \quad (\text{X.93})$$

Ces deux bosons de Higgs sont

$$h = \sqrt{2} \left( -\Re(\phi_1^0 - v_1/\sqrt{2}) \sin \alpha + \Re(\phi_2^0 - v_2/\sqrt{2}) \cos \alpha \right), \quad (\text{X.94})$$

$$H = \sqrt{2} \left( \Re(\phi_1^0 - v_1/\sqrt{2}) \cos \alpha + \Re(\phi_2^0 - v_2/\sqrt{2}) \sin \alpha \right), \quad (\text{X.95})$$

où l'angle de mélange  $\alpha$  s'obtient par

$$\sin 2\alpha = \frac{2\mathcal{M}_{12}}{\sqrt{(\mathcal{M}_{11} - \mathcal{M}_{22})^2 + 4\mathcal{M}_{12}^2}}, \quad \cos 2\alpha = \frac{\mathcal{M}_{11} - \mathcal{M}_{22}}{\sqrt{(\mathcal{M}_{11} - \mathcal{M}_{22})^2 + 4\mathcal{M}_{12}^2}} \quad (\text{X.96})$$



avec  $-\pi/2 \leq \alpha \leq 0$  et dont les masses à l'ordre le plus bas s'expriment, avec  $m_h \leq m_H$ ,

$$m_{h,H}^2 = \frac{1}{2} \left( \mathcal{M}_{11} + \mathcal{M}_{22} \mp \sqrt{(\mathcal{M}_{11} - \mathcal{M}_{22})^2 + 4\mathcal{M}_{12}^2} \right). \quad (\text{X.97})$$

Enfin,  $v$  est fixée par la masse du  $W$ ,

$$m_W = \frac{1}{2} v g_I. \quad (\text{X.98})$$

Le 2HDM ainsi construit possède 6 paramètres libres :

- $m_h, m_H, m_A, m_{H^\pm}$  les masses des bosons de Higgs;
- $\tan \beta$  le rapport des condensats des doublets de Higgs dans le vide;
- $\alpha$  l'angle de mélange des Higgs.

Ce modèle peut être affiné par les observations expérimentales. Par exemple, le changement de saveur par courant neutre (FCNC, *Flavor-Changing Neutral Currents*), n'est pas observé expérimentalement Afin d'être compatible avec ce fait expérimental [52],

- soit les masses des bosons de Higgs sont élevées, de l'ordre du TeV, supprimant ainsi suffisamment le FCNC pour rester dans les limites observées;
- soit tous les fermions portant une même charge électrique ne sont couplés qu'à un seul doublet de Higgs au plus.

La masse du Higgs du modèle standard n'étant pas de l'ordre du TeV, la seconde option est choisie.

Dans les modèle de type I, les fermions ne sont pas couplés à  $\phi_1$ , mais le sont à  $\phi_2$ . Dans le cas des modèles de type II, les fermions d'isospin faible bas sont ainsi couplés à  $\phi_1$  et ceux d'isospin faible haut à  $\phi_2$ . Les intensités des couplages des fermions et des bosons avec  $h, H$  et  $A$  ainsi obtenues, par rapport à celles avec le boson de Higgs du modèle standard, sont présentées dans le tableau X.4.

Couplage avec	$h$	$H$	$A$
Bosons vecteurs	$\sin(\beta - \alpha)$	$\cos(\beta - \alpha)$	0
Fermions hauts	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\cot \beta$
Fermions bas	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$	$\tan \beta$

**Tableau X.4** – Couplages des bosons de Higgs neutres des modèles de type II par rapport aux couplages du boson de Higgs du modèle standard [52].

Les modèles à deux doublets de Higgs sont donc une extension du modèle standard ajoutant une nouvelle physique, par exemple l'existence de nouveaux bosons de Higgs. Ces modèles, par rapport à d'autres possibilités explorées, apportent le moins de nouveaux paramètres arbitraires possibles, ce qui est un critère important dans l'élaboration d'une nouvelle théorie. Enfin, ils doivent être introduits dans les modèles supersymétriques pour que ceux-ci respectent les observations expérimentales.

### 4.3 L'extension supersymétrique minimale du modèle standard

L'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM [54, 55] est un modèle supersymétrique et donc, à ce titre, un cas particulier de modèle à deux doublets de Higgs. Il s'agit du modèle le plus simple permettant d'introduire la supersymétrie tout en étant compatible avec les observations expérimentales à ce jour. Dans le MSSM, les deux doublets de Higgs s'expriment en fonction de  $\phi_1$  et  $\phi_2$  introduits dans la section traitant de la supersymétrie comme [52]

$$H_d = \begin{pmatrix} \phi_1^{0*} \\ -\phi_1^- \end{pmatrix}, \quad H_u = \begin{pmatrix} \phi_2^+ \\ \phi_2^0 \end{pmatrix}. \quad (\text{X.99})$$

L'expression du potentiel de Higgs général des 2HDM (X.87) devient

$$\begin{aligned} V(H_d, H_u) = & \mu_d^2 H_d^\dagger H_d + \mu_u^2 H_u^\dagger H_u - \mu^2 (H_d \wedge H_u + \text{h.c.}) \\ & + \frac{g_I^2 + g_Y^2}{8} (H_d^\dagger H_d - H_u^\dagger H_u)^2 + \frac{g_I^2}{2} (H_d^\dagger H_u)^2 \end{aligned} \quad (\text{X.100})$$

en posant [46, 52, 53]

$$\lambda_2 = \lambda_1, \quad (\text{X.101a})$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{8}(g_I^2 + g_Y^2) - \lambda_1, \quad (\text{X.101b})$$

$$\lambda_4 = 2\lambda_1 - \frac{1}{2}g_Y^2, \quad (\text{X.101c})$$

$$\lambda_5 = \lambda_6 = 2\lambda_1 - \frac{1}{2}(g_I^2 + g_Y^2), \quad (\text{X.101d})$$

$$\mu_d^2 = \mu^2 \tan \beta - \frac{1}{2}m_Z^2 \cos(2\beta), \quad (\text{X.101e})$$

$$\mu_u^2 = \mu^2 \cot \beta + \frac{1}{2}m_Z^2 \cos(2\beta), \quad (\text{X.101f})$$

$$\mu^2 = -\frac{1}{2}v_1 v_2 (g_I^2 + g_Y^2 - 4\lambda_1). \quad (\text{X.101g})$$

Afin d'assurer la stabilité du vide, le potentiel ne doit pas pouvoir être infiniment bas, ce qui implique  $\mu_u^2 + \mu_d^2 > 2\mu^2$  si  $|\phi_1^0| = |\phi_2^0|$ . La brisure spontanée de symétrie donnant leurs masses aux bosons de l'interaction faible est présente si  $\mu^4 > \mu_u^2 \mu_d^2$ . Alors, les condensats dans le vide des deux doublets de Higgs sont

$$\langle H_d \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \langle H_u \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 \end{pmatrix}. \quad (\text{X.102})$$

Les masses des bosons de Higgs s'expriment alors à l'ordre le plus bas

$$m_A^2 = \mu^2 (\tan \beta + \cot \beta) = \frac{2\mu^2}{\sin 2\beta}, \quad (\text{X.103})$$

$$m_{H^\pm}^2 = m_A^2 + m_W^2, \quad (\text{X.104})$$

$$m_{h,H}^2 = \frac{1}{2} \left( m_A^2 + m_Z^2 \mp \sqrt{(m_A^2 + m_Z^2)^2 - 4m_A^2 m_Z^2 \cos^2 2\beta} \right), \quad (\text{X.105})$$

et l'angle de mélange des Higgs scalaires neutres vérifie

$$\cos 2\alpha = -\frac{m_A^2 - m_Z^2}{m_H^2 - m_h^2} \cos 2\beta, \quad \sin 2\alpha = -\frac{m_A^2 + m_Z^2}{m_H^2 - m_h^2} \sin 2\beta. \quad (\text{X.106})$$

Enfin, la masse du  $W$  vérifie toujours (X.98) et celle du  $Z$  peut être exprimée en fonction des paramètres du MSSM. Ainsi,

$$m_W = \frac{1}{2}v g_I \Leftrightarrow m_W^2 = \frac{1}{4}v^2 g_I^2, \quad m_Z^2 = \frac{\mu_d^2 - \mu_u^2 \tan^2 \beta}{\tan^2 \beta - 1}. \quad (\text{X.107})$$

À l'ordre le plus bas, les masses des bosons de Higgs dépendent donc seulement de deux paramètres libres,  $m_A$  et  $\tan \beta$  défini par (X.89). Il est à noter que l'équation (X.105) implique l'existence d'un boson de Higgs neutre de masse inférieure à  $m_Z = 91,19 \text{ GeV}$ . Toutefois, ceci n'est vrai qu'à l'ordre le plus bas. La prise en compte des corrections radiatives change les expressions de ces masses, en particulier les corrections dues au quark top et à son superpartenaire le stop. La correction à la masse du boson de Higgs léger est ainsi donnée par [46]

$$m_h^2 \rightarrow m_h^2 + \delta m_h^2 \simeq m_Z^2 + \frac{3m_t^4}{2\pi^2 v^2} \left[ \ln \frac{m_S^2}{m_t^2} + \frac{X_t^2}{m_S^2} \left( 1 - \frac{X_t^2}{12m_S^2} \right) \right] \quad (\text{X.108})$$

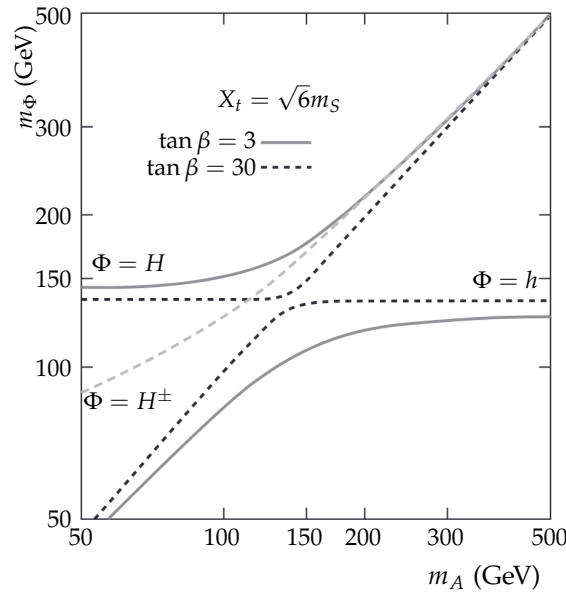
où

$$X_t = A_t - \mu \cot \beta \quad (\text{X.109})$$

est le paramètre de mélange du stop avec  $A_t$  la constante de couplage entre les Higgs et le stop et

$$m_S = \sqrt{m_{\tilde{t}_1} m_{\tilde{t}_2}}. \quad (\text{X.110})$$

est l'échelle d'énergie de la SUSY, définie comme la moyenne géométrique des masses des stops. Il existe en effet deux états propres de masse du stop,  $\tilde{t}_1$  et  $\tilde{t}_2$ , mélanges des stops de chiralité droite et gauche. La présence de nombreux paramètres libres du MSSM mène à proposer des « scénario » dans lesquels les paramètres intervenant dans les corrections d'ordres supérieurs sont fixés [56, 57]. Il ne reste alors que deux paramètres libres,  $m_A$  et  $\tan \beta$ . Les valeurs des masses corrigées de  $h$ ,  $H$  et  $H^\pm$  sont tracées sur la figure X.14 en fonction de  $m_A$  pour  $\tan \beta = 3$  et 30 dans le cas de mélange



**Figure X.14** – Masses des bosons de Higgs du MSSM en fonction de  $m_A$  pour  $\tan \beta = 3$  et 30 dans le cas de mélange maximal du stop avec  $m_{\tilde{t}} = 2$  TeV et les autres paramètres de la SUSY fixés à 1 TeV [46].

maximal du stop avec  $m_{\tilde{t}} = 2$  TeV et les autres paramètres de la SUSY fixés à 1 TeV [46]. Ainsi, pour  $m_A \lesssim 125$  GeV,  $H$  joue le rôle du modèle standard et il existe un Higgs léger. Pour  $m_A \gtrsim 125$  GeV,  $h$  joue le rôle du modèle standard et les bosons de Higgs supplémentaires sont de masses plus élevées.

Les particules du MSSM et leurs superpartenaires sont résumés dans le tableau X.5. Un test expérimental est possible par la recherche d'un signal correspondant aux bosons de Higgs supplémentaires, ce qui est un des sujets de cette thèse. L'étude de la phénoménologie de ces bosons de Higgs, présentée ci-après, permet de déterminer les conditions favorables à la recherche d'un tel signal.

Particules				Superpartenaires			
Type	Spin	Particules	Symboles	Type	Spin	Particules	Symboles
Fermions	$\frac{1}{2}$	quarks	$q$	Sfermions	0	squarks	$\tilde{q}$
		leptons	$\ell$			sleptons	$\tilde{\ell}$
Bosons	1	gluon	$g$	Bosinos	$\frac{1}{2}$	gluino	$\tilde{g}$
		bosons $W^\pm$	$W^+, W^-$			winos	$\tilde{W}^+, \tilde{W}^-$
		photon	$\gamma$			photino	$\tilde{\gamma}$
		boson $Z$	$Z$			zino	$\tilde{Z}$
	0	Higgs	$h, H, A, H^\pm$			Higgsinos	$\tilde{h}, \tilde{H}, \tilde{A}, \tilde{H}^\pm$

**Tableau X.5** – Particules et leurs superpartenaires. La présence de plusieurs bosons de Higgs est justifiée par la nécessité d'un second doublet de Higgs. Ce formalisme est décrit dans la section 4.2.

## 5 Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM

Pour concevoir une analyse de physique des particules à même de tester le MSSM, il faut dans un premier temps déterminer la manifestation du MSSM à observer. Comme cela a été développé dans la section précédente, le MSSM implique l'existence de quatre bosons de Higgs supplémentaires, en particulier deux nouveaux bosons de Higgs neutres,  $H$  et  $A$ . Si de tels bosons existent, un signal leur correspondant doit pouvoir être observé.

Au premier ordre, les masses des bosons de Higgs s'expriment en fonction de deux paramètres uniquement,  $m_A$  et  $\tan \beta$ . Les couplages des trois bosons de Higgs neutres du MSSM aux autres

particules, par rapport aux couplages du boson de Higgs du modèle standard, sont présentés dans le tableau X.4 en fonction de  $\alpha$  et  $\beta$ . Or,  $\alpha$  et  $\beta$  sont reliés par les équations (X.106), donnant

$$\tan 2\alpha = \frac{m_A^2 + m_Z^2}{m_A^2 - m_Z^2} \tan 2\beta. \quad (\text{X.111})$$

Les observations expérimentales semblent favoriser  $m_A \gg m_Z$  [25, 26, 58, 59]. Dans ce cas,  $H$  et  $A$  sont de masses similaires et  $h$  doit jouer le rôle du boson de Higgs du modèle standard observé expérimentalement en 2012 [22-24]. Cette situation correspond à la limite découplée, dans laquelle

$$\lim_{m_A \gg m_Z} \tan 2\alpha = \tan 2\beta \quad (\text{X.112})$$

d'après (X.111). Alors, dans la limite découplée,  $\alpha \sim \beta$  ou  $\alpha \sim \beta \pm \frac{\pi}{2}$ . Or,  $\beta \geq 0$  et  $\alpha \leq 0$  et  $\tan \beta$  est contraint par [60]

$$1 < \tan \beta \lesssim \frac{m_t}{m_b} \simeq 42. \quad (\text{X.113})$$

Il ne reste donc plus que la possibilité  $\alpha \sim \beta - \frac{\pi}{2}$ . Dans la limite découplée, les couplages du tableau X.4 deviennent alors ceux du tableau X.6.

Couplage avec	$h$	$H$	$A$
Bosons vecteurs	$\sim 1$	$\sim 0$	0
Fermions hauts	$\sim 1$	$\sim -\cot \beta$	$\cot \beta$
Fermions bas	$\sim 1$	$\sim \tan \beta$	$\tan \beta$

**Tableau X.6** – Couplages des bosons de Higgs neutres dans la limite découplée du MSSM par rapport aux couplages du boson de Higgs du modèle standard.

Les couplages ainsi obtenus dans le tableau X.6 présentent trois caractéristiques d'intérêt :

- le boson de Higgs le plus léger,  $h$ , se comporte comme le boson de Higgs du modèle standard, ce qui le rend tout à fait cohérent avec les observations actuelles ;
- les bosons de Higgs neutres massifs  $H$  et  $A$  présentent peu voire aucun couplage aux bosons vecteurs, par exemple la désintégration  $A \rightarrow ZZ$  est impossible mais  $A \rightarrow Zh$  est possible ;
- les bosons de Higgs neutres massifs  $H$  et  $A$  sont couplés de manières similaires aux fermions.

Lorsque  $\tan \beta$  augmente, les couplages de  $H$  et  $A$  aux fermions d'isospin faible bas sont augmentés et ceux aux fermions d'isospin faible haut supprimés. La production des bosons de Higgs neutres supplémentaires, tout comme leurs désintégrations, s'en trouvent donc intrinsèquement liées à la présence de fermions d'isospin faible bas.

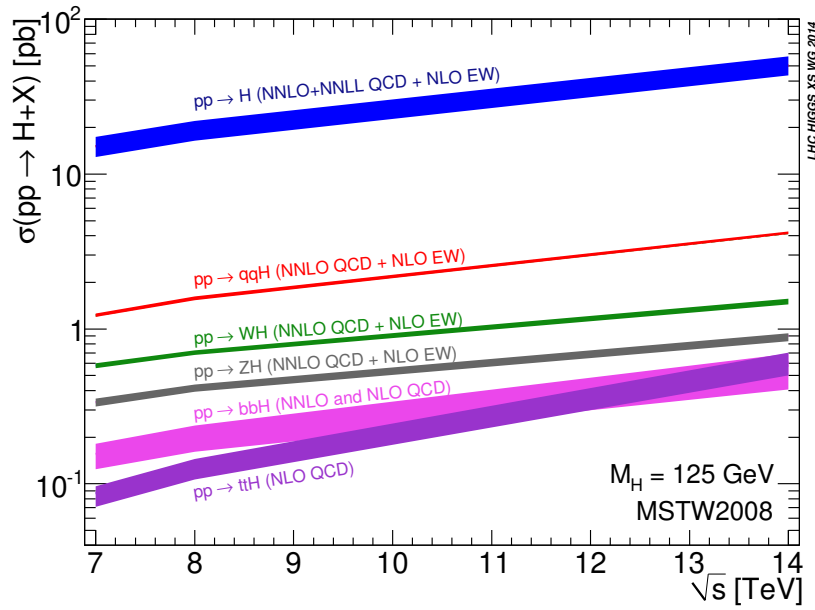
## 5.1 Production de bosons de Higgs

La production de bosons de Higgs au LHC peut être réalisée selon plusieurs modes dont une mesure précise des sections efficaces a pu être réalisée dans le cadre du modèle standard [61-64]. Ces sections efficaces sont représentées en fonction de l'énergie de collision dans le centre de masse sur la figure X.15. Les processus correspondants à ces différents modes sont présentés dans la section 5.1.1 ci-après. Puis, la production des bosons de Higgs du MSSM est discutée dans la section 5.1.2.

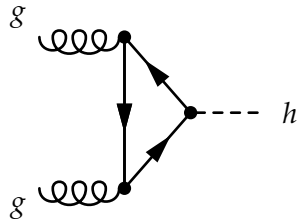
### 5.1.1 Dans le cadre du modèle standard

Le mode de production principal du boson de Higgs du modèle standard  $h$  au LHC est la fusion de gluon, avec près de 85 % des bosons de Higgs produits ainsi. Ce mode est noté  $ggh$  et est représenté figure X.16a. L'interaction entre gluons et Higgs est réalisée par une boucle de quarks. Or, comme cela est vu dans la section 2.4.3, page 14, le couplage du Higgs aux fermions est proportionnel à la masse du fermion. Le quark top est donc dominant dans cette boucle.

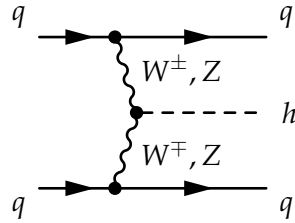
Le second mode de production de Higgs le plus important au LHC est la fusion de boson vecteur, noté VBF (*Vector Boson Fusion*) et représenté sur les figures X.16b et X.16c. Deux quarks produisent



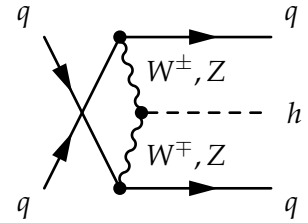
**Figure X.15** – Sections efficaces des modes de production du boson de Higgs du modèle standard [61-64].



**(a)** Production par fusion de gluons (ggh).

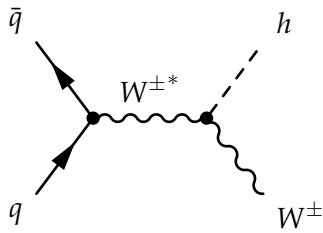


**(b)** Production par fusion de bosons vecteurs (VBF h) en voie t.

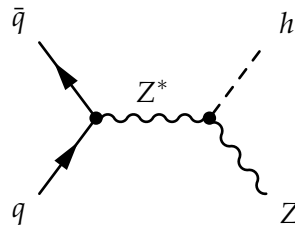


**(c)** Production par fusion de bosons vecteurs (VBF h) en voie u.

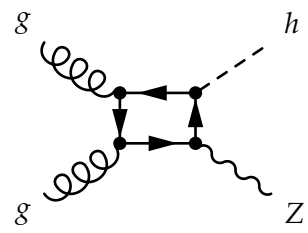
**Figure X.16** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard par fusion de gluons (ggh) et fusion de bosons vecteurs (VBF).



**(a)** Production en association avec un boson W (Wh).

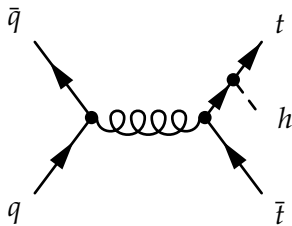


**(b)** Production en association avec un boson Z (Zh).

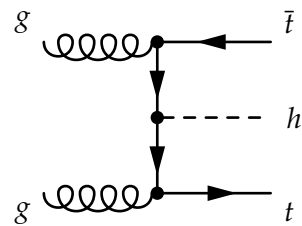


**(c)** Production par fusion de gluons associée à un boson Z (ggZh).

**Figure X.17** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un boson vecteur (VH).



**(a)**



**(b)**

**Figure X.18** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un quark top (tth).

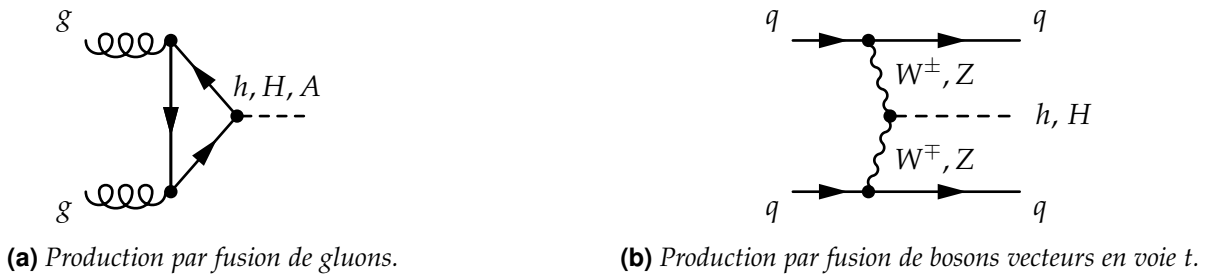
chacun un boson vecteur ( $W^+$  et  $W^-$  ou deux  $Z$ ). Ces deux bosons fusionnent en un boson de Higgs. Bien que la section efficace du VBF soit dix fois moindre que celle du  $ggh$ , les deux quarks de l'état final donnent deux jets très caractéristiques, dont le processus de formation à partir des quarks est abordé dans le chapitre 4. Le calcul de la section efficace de ce processus inclu les corrections QCD (chromodynamique quantique, *Quantum ChromoDynamic*), abordée dans la section 2.5, au NNLO et les corrections électrofaibles au NLO [64, 65]. Les notations NLO, NNLO, N<sup>3</sup>LO, etc. signifient *next-to-leading order*, c'est-à-dire jusqu'à l'ordre suivant le premier degré non nul; *next-to-next-to-leading order*, un ordre de plus que NLO; etc.

La production d'un boson de Higgs peut également se faire en association avec un boson vecteur, c'est le mode VH. Une paire quark-antiquark produit un boson vecteur de haute énergie ( $W$  sur la figure X.17a ou  $Z$  sur la figure X.17b). Ce boson émet alors un Higgs, d'où la dénomination « Higgsstrahlung » parfois utilisée pour le mode VH. Les sections efficaces de ces processus sont calculées en prenant en compte les corrections QCD NNLO et les corrections électrofaibles au NLO [64]. Une fusion de gluons peut également amener à une production d'un Higgs en association avec un  $Z$ , c'est le cas du processus de la figure X.17c.

Enfin, il est possible de produire un Higgs en association avec des fermions lourds, en particulier des quarks top ( $t\bar{t}h$ ) ou bottom ( $b\bar{b}h$ ) avec lesquels la production de Higgs est accompagnée de jets. Le mode  $t\bar{t}h$  est illustré sur la figure X.18. Ces processus contribuent peu à la production de boson de Higgs au LHC dans le cadre du modèle standard. Cependant, la phénoménologie du MSSM peut rendre les modes de production en association avec des quarks  $b$  significatifs voire dominants.

### 5.1.2 Dans le cadre du MSSM

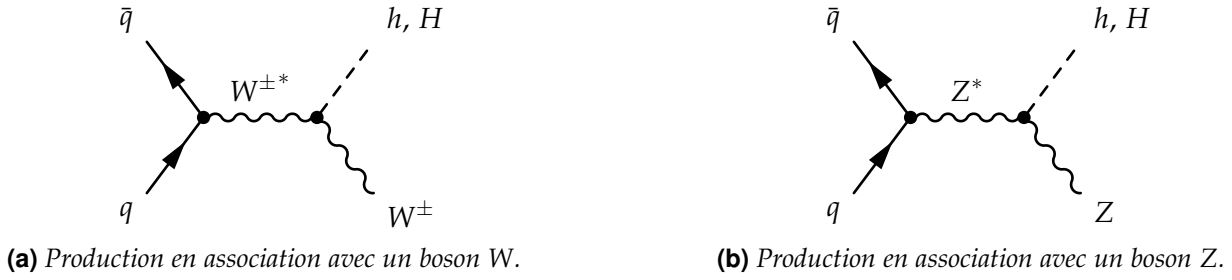
Dans la limite découplée du MSSM, compte-tenu des couplages des bosons de Higgs  $h$ ,  $H$  et  $A$  du tableau X.6, les processus présentés dans la section précédente sont modifiés. Ainsi, la fusion de gluons de la figure X.16a permet, dans le MSSM, de produire  $h$ ,  $H$  et  $A$ . Il s'agit toujours du mode dominant tant que  $\tan\beta$  ne prend pas de valeur élevée. Dans le cas de la production de  $h$  et  $H$ , la boucle peut également contenir des contributions des squarks stop et sbottom s'ils ont des masses suffisamment basses [66]. Le mode VBF, dont les processus sont présentés sur les figures X.16b et X.16c, permet de produire  $h$  et  $H$ , mais pas  $A$ . Les corrections aux ordres supérieurs de ces diagrammes dues à la QCD supersymétrique sont faibles et celles dues à la force électrofaible supersymétrique de l'ordre du pourcent [61]. Ces nouveaux processus sont représentés sur la figure X.19.



**Figure X.19** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du MSSM par fusion de gluons ( $ggH$ ) et fusion de bosons vecteurs (VBF).

Dans le mode VH, le Higgs émis peut également être un  $H$ . Les processus de la figure X.17 sont ainsi modifiés en ceux de la figure X.20. Les corrections aux ordres supérieurs de ces diagrammes dues à la QCD supersymétrique sont faibles et celles dues à la force électrofaible supersymétrique ne sont pas connues [61].

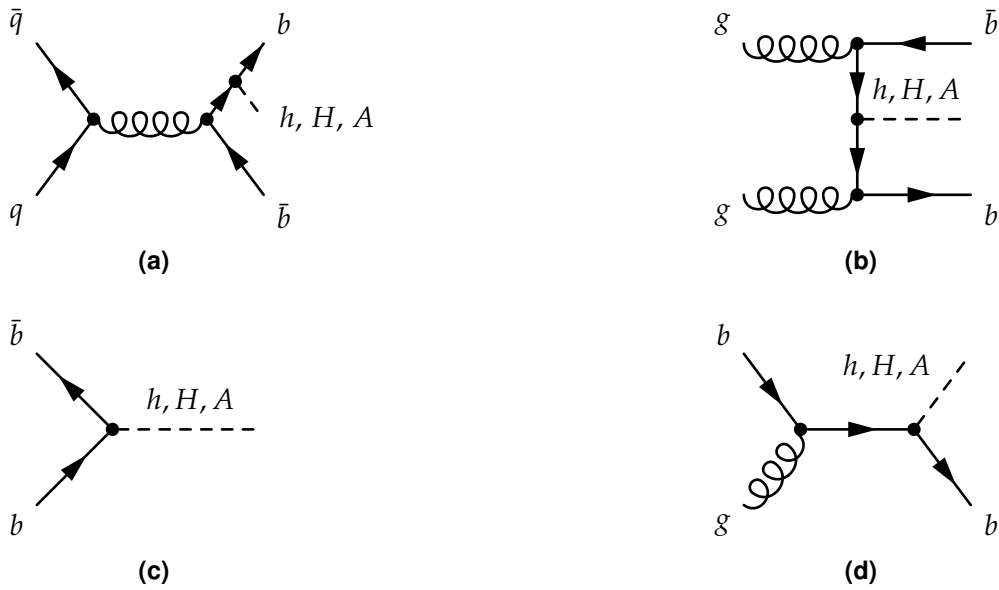
Pour de grandes valeurs de  $\tan\beta$ , la production de Higgs lourds en association avec des quarks  $b$  est un mode dominant. Plusieurs processus participent à ce mode. Sur les figures X.21a et X.21b se trouvent les processus analogues à ceux du mode  $t\bar{t}h$  du modèle standard présentés figures X.18a et X.18b. Des processus comme ceux des figures X.21c et X.21d sont également envisageables si le quark  $b$  est considéré comme présent au sein du proton, c'est le « schéma à cinq saveurs » ou 5fs (*5-flavor scheme*). Les sections efficaces des processus du mode  $b\bar{b}h$  sont calculées au NLO dans le 4fs



**Figure X.20** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du MSSM en association avec un boson.

et au NNLO pour le 5fs.

Les processus des figures X.21a et X.21b présentent deux jets de quarks  $b$  associés à la production d'un boson de Higgs, celui de la figure X.21d un jet de quark  $b$ . L'identification de ces jets est donc un enjeu dans les analyses testant les cas de hautes valeurs de  $\tan \beta$ .



**Figure X.21** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du MSSM en association avec un quark  $b$ .

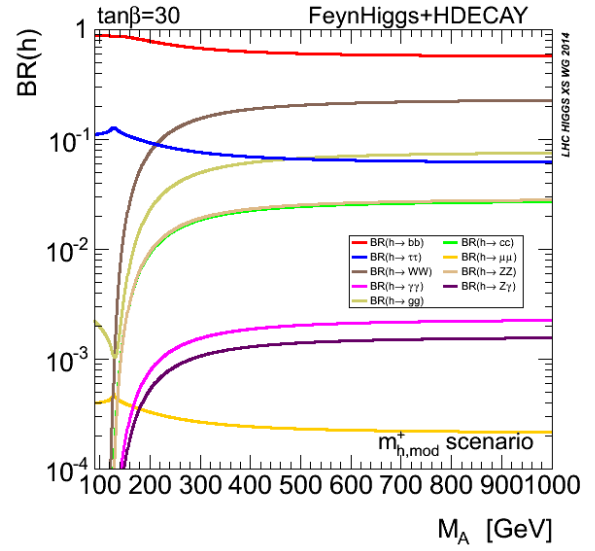
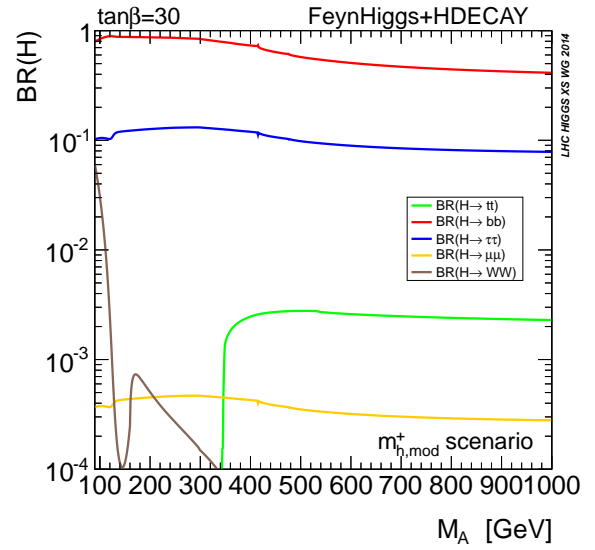
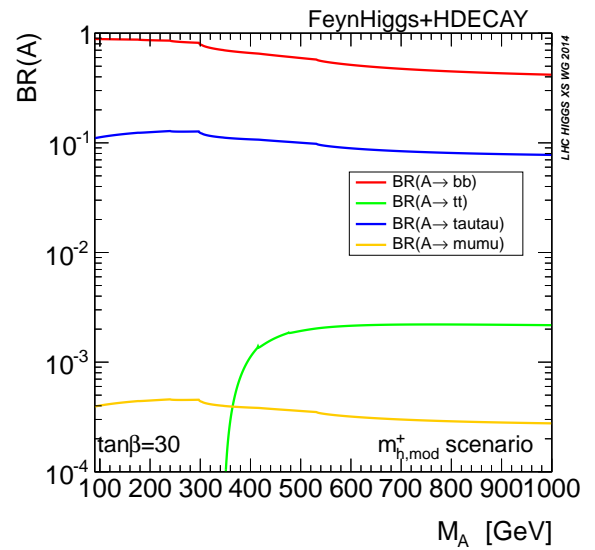
## 5.2 Désintégration de bosons de Higgs

Les bosons de Higgs ont une durée de vie très courte, de l'ordre de  $10^{-22}$  s pour le boson de Higgs du modèle standard par exemple [9]. Leur propagation se fait ainsi sur des distances ne pouvant excéder quelques dizaines de femtomètres, c'est-à-dire  $10^{-14}$  m, soit moins que le diamètre du noyau d'un atome d'or. Il est donc impossible d'observer directement la présence d'un boson de Higgs, comme cela peut se faire avec d'autres particules plus stables comme les kaons, les muons, les électrons ou les protons pour ne citer qu'eux. Pour détecter ces bosons, il faut donc détecter leurs produits de désintégration.

La désintégration des bosons de Higgs peut se faire sous différentes formes ayant différents rapports de branchement ou  $\mathcal{BR}$  (*Branching Ratio*), c'est-à-dire différentes probabilités de survenir vis-à-vis des autres formes. La topologie des événements correspondants est également fortement affectée par les produits de désintégration des bosons de Higgs.

Les bosons de Higgs supplémentaires  $H$  et  $A$  voient leurs couplages aux bosons vecteurs supprimés dans la limite découplée du MSSM. Leurs couplages sont proportionnels à  $\tan \beta$  avec les fermions d'isospin faible bas et inversement proportionnels à  $\tan \beta$  avec les fermions d'isospin faible haut par rapport au couplage de  $h$  avec ces mêmes fermions. Les couplages des bosons de Higgs



(a) Rapports de branchement à  $\tan \beta = 5$  pour  $h$ .(b) Rapports de branchement à  $\tan \beta = 30$  pour  $h$ .(c) Rapports de branchement à  $\tan \beta = 5$  pour  $H$ .(d) Rapports de branchement à  $\tan \beta = 30$  pour  $H$ .(e) Rapports de branchement à  $\tan \beta = 5$  pour  $A$ .(f) Rapports de branchement à  $\tan \beta = 30$  pour  $A$ .

**Figure X.22** – Rapports de branchement des bosons de Higgs du MSSM en fonction de  $m_A$  pour  $\tan \beta = 5$  et  $30$  [62, 63]. L'effet de  $\tan \beta$  sur les couplages de  $H$  et  $A$  aux fermions est bien visible avec l'augmentation des rapports de branchement au bottom (en rouge) et au tau (en bleu) et la diminution du rapport de branchement au top (en vert).

aux fermions sont de plus proportionnels aux masses de ces fermions. Ces rapports de branchement sont représentés sur la figure X.22, page 30, pour les trois bosons de Higgs neutres du MSSM et pour  $\tan \beta = 5$  et 30. Pour des masses de  $H$  et  $A$  suffisamment grandes pour leur permettre de se désintégrer en paire de quarks top, malgré la masse élevée de ce dernier, la suppression des couplages aux fermions d'isospin faible haut par  $\tan \beta$  laisse le quark  $b$  et le lepton  $\tau$  avec les rapports de branchement les plus élevés à haut  $\tan \beta$ . Les rapports de branchement du boson de Higgs  $h$  correspondant au boson de Higgs du modèle standard sont peu affectés par  $\tan \beta$ .

La valeur de  $\tan \beta$  est un paramètre libre du MSSM pouvant être grand. À haut  $\tan \beta$  le quark  $b$  et le lepton  $\tau$  proposent les rapports de branchement les plus grands à  $H$  et  $A$ . Pour des valeurs modérées voire basses de  $\tan \beta$ , le quark top peut éventuellement proposer un rapport de branchement plus grand, mais seulement pour  $m_A \gtrsim 350$  GeV. Les désintégrations en  $b\bar{b}$  et en  $\tau^+\tau^-$  sont donc les plus prometteuses pour la recherche de bosons de Higgs supplémentaires de haute masse.

Bien que le canal de désintégration  $h, H, A \rightarrow b\bar{b}$  possède un rapport de branchement 5 à 10 fois supérieur à celui du canal  $h, H, A \rightarrow \tau^+\tau^-$ , il est sujet à de nombreuses sources de bruit de fond au LHC où les collisions ont lieu entre protons. C'est pourquoi le sujet de cette thèse est la recherche de bosons de Higgs supplémentaires de haute masse se désintégrant en paire de taus, dont l'accessibilité expérimentale est meilleure. La présence de deux leptons tau de haute énergie dans l'état final est en effet une signature bien plus claire que la présence de quarks  $b$ . Le diagramme de Feynman correspondant à cette désintégration est présenté sur la figure X.23. Toutefois, les taus ne sont pas des particules stables et ils se désintègrent avant d'entrer dans les parties sensibles du détecteur. Seuls leurs produits de désintégration sont observés.

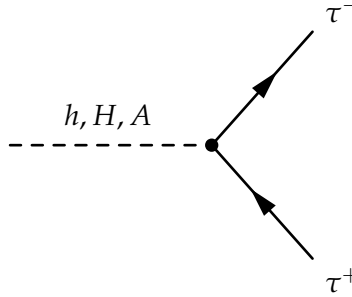


Figure X.23 – Diagramme de Feynman d'une désintégration  $h, H, A \rightarrow \tau^+\tau^-$ .

### 5.3 Désintégration des leptons tau

La durée de vie du lepton  $\tau$  est de 290 fs. Ils se propage ainsi sur des distances inférieures à 87  $\mu\text{m}$ . Le  $\tau$  n'est donc pas directement observé dans le détecteur, ses produits de désintégration le sont.

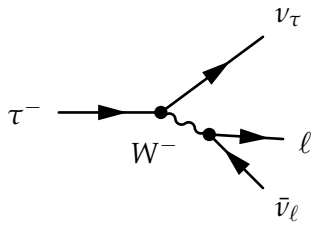
Les leptons  $\tau$  se désintègrent par interaction faible selon  $\tau^- \rightarrow W^- \nu_\tau$ . Le boson  $W$ , virtuel, se désintègre ensuite :

- leptoniquement selon  $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  dans 17,82 % des cas ;
- leptoniquement selon  $W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$  dans 17,39 % des cas ;
- hadroniquement selon  $W^- \rightarrow q\bar{q}'$  dans 64,79 % des cas.

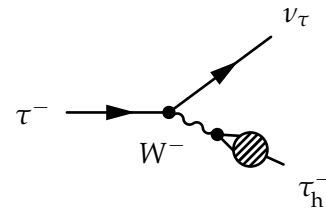
Dans le cas de la désintégration hadronique, l'hadronisation présentée dans le chapitre 4 a lieu et les deux quarks donnent un ensemble constitué de quelques hadrons, en général trois ou moins, et éventuellement des particules neutres comme des  $\pi^0$ , ces derniers se désintégrant majoritairement en deux photons. L'ensemble des particules issues de la désintégration du  $W$  forme ainsi un petit jet. Il s'agit d'un « tau hadronique », noté  $\tau_h$  dans la suite.

Les diagrammes de Feynman correspondant aux désintégrations leptonique et hadronique du  $\tau$  sont représentés figures X.24a et X.24b. Le tableau X.7a résume plus en détails les rapports de branchement des différents modes de désintégration du  $\tau$ .

La désintégration d'un  $\tau$  peut donc se faire selon trois modes différents,  $\tau \rightarrow \tau_h \nu_\tau$ ,  $\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$  et  $\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau$ . Dans tous les cas, les neutrinos sont invisibles pour le détecteur. Les deux leptons  $\tau$  issus de la désintégration du boson de Higgs se désintègrent indépendamment l'un de l'autre. Il existe donc six canaux différents pour les événements où un boson de Higgs se désintègre en paire de  $\tau$ ,



(a) Désintégration leptonique d'un  $\tau^-$ . Le lepton  $\ell$  peut être un électron ou un muon.



(b) Désintégration hadronique d'un  $\tau^-$ .

**Figure X.24** – Diagrammes de Feynman de désintégration d'un  $\tau^-$ .

Mode de désintégration	$\mathcal{BR}$ (%)
$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\tau$	17,82
$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_\tau$	17,39
$\tau^- \rightarrow h^- \bar{\nu}_\tau$	11,51
$\tau^- \rightarrow h^- \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	25,93
$\tau^- \rightarrow h^- \pi^0 \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	9,48
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ \bar{\nu}_\tau$	9,80
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	4,76
Autres modes hadroniques	3,31
$\tau^- \rightarrow \tau_h^- \bar{\nu}_\tau$	64,79

(a) Rapports de branchement des différents modes de désintégration du  $\tau$  [9].

Canal	$\mathcal{BR}$ (%)
$\tau_h \tau_h$	41,98
$\mu \tau_h$	22,53
$e \tau_h$	23,09
$\mu \mu$	3,02
$ee$	3,18
$e \mu$	6,20

(b) Rapports de branchement des six canaux des événements  $h \rightarrow \tau \tau$ .

**Tableau X.7** – Rapports de branchement des différents modes de désintégration du  $\tau$  [9] et des différents canaux des événements  $h \rightarrow \tau \tau$ .

listés avec leurs rapports de branchement dans le tableau X.7b.

## 6 Conclusion

Les constituants fondamentaux de la matière usuelle sont les fermions de la première génération, c'est-à-dire les quarks  $u$  et  $d$  pouvant former les protons ( $uud$ ) et les neutrons ( $udd$ ), l'électron et le neutrino électronique, dont la présence se manifeste lors des désintégrations radioactives  $\beta$ . Cependant, la liste des particules fondamentales est bien plus longue. Il existe ainsi trois générations de fermions, portant leur nombre à douze. Avec l'antimatière, il existe également douze antifermions.

Aux fermions s'ajoutent les bosons. Les bosons de jauge sont les vecteurs des forces fondamentales, il s'agit du photon, des bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$  et des gluons. Le boson de Higgs, scalaire, est issu de la brisure spontanée de symétrie.

Le modèle standard, reposant sur la théorie quantique des champs, permet ainsi de décrire fidèlement le comportement de ces particules. L'invariance de jauge locale sous les transformations du groupe  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  fait émerger naturellement les forces électrofaible et forte. Le mécanisme de brisure spontanée de symétrie introduit le champ de Higgs et donne une masse aux particules.

Ce modèle a permis de prédire l'existence de particules comme les bosons  $W$  et  $Z$ , le quark top ou encore le boson de Higgs de nombreuses années avant leurs observations. Malgré ces prouesses et les décennies de prédictions correctement vérifiées, la communauté scientifique sait pertinemment que le modèle standard n'est qu'une étape vers une théorie plus complète. En effet, le modèle standard ne permet pas d'expliquer certains faits expérimentaux comme la présence de la matière noire. D'autres phénomènes comme l'ajustement fin laissent à croire qu'il s'agit d'une théorie effective à basse énergie.

De nombreuses extensions au modèle standard sont alors proposées, comme la supersymétrie.

Les modèles supersymétriques introduisent les « sparticules », partenaires supersymétriques des particules. Dans sa version la plus simple, l'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM, il n'y a pas un mais cinq bosons de Higgs, ainsi que leurs partenaires. La recherche d'un signal associé à ces bosons de Higgs supplémentaires est un test expérimental du MSSM.

Dans le cas où ces bosons de Higgs supplémentaires sont de hautes masses, le canal de désintégration en paire de leptons tau est le plus prometteur. Les leptons tau se désintègrent eux-mêmes en électron, muon ou tau hadronique. Il existe donc six états finaux différents. Le chapitre 5 présente une analyse expérimentale menée pour la recherche de bosons de Higgs supplémentaires de haute masse se désintégrant en paire de taus.

Grâce à la collaboration CMS (*Compact Muon Solenoid*) et au détecteur du même nom installé au LHC (*Large Hadron Collider*) de l'organisation européenne pour la recherche nucléaire ou CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), les conditions expérimentales sont réunies pour procéder à la recherche de bosons de Higgs supplémentaires de haute masse se désintégrant en paire de taus. Le chapitre 3 présente ce dispositif expérimental ainsi que l'obtention du contenu en particules des événements produits lors des collisions.

## Références

- [1] S. L. GLASHOW. « The renormalizability of vector meson interactions ». *Nuclear Physics* **10** (1959), p. 107-117. DOI : [10.1016/0029-5582\(59\)90196-8](https://doi.org/10.1016/0029-5582(59)90196-8). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029558259901968>.
- [2] A. SALAM & J. WARD. « Weak and electromagnetic interactions ». *Nuovo Cim* **11** (fév. 1959), p. 568-577. DOI : [10.1007/BF02726525](https://doi.org/10.1007/BF02726525).
- [3] S. WEINBERG. « A model of leptons ». *Physical Review Letters* **19** (21 nov. 1967), p. 1264-1266. DOI : [10.1103/PhysRevLett.19.1264](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.1264).
- [4] C. S. WU & coll. « Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay ». *Physical Review* **105** (4 fév. 1957), p. 1413-1415. DOI : [10.1103/PhysRev.105.1413](https://doi.org/10.1103/PhysRev.105.1413).
- [5] J. H. CHRISTENSON & coll. « Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K_2^0$  Meson ». *Physical Review Letters* **13** (4 juil. 1964), p. 138-140. DOI : [10.1103/PhysRevLett.13.138](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.138).
- [6] M. KOBAYASHI & T. MASKAWA. « CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction ». *Progress of Theoretical Physics* **49.2** (fév. 1973), p. 652-657. DOI : [10.1143/PTP.49.652](https://doi.org/10.1143/PTP.49.652). eprint : <https://academic.oup.com/ptp/article-pdf/49/2/652/5257692/49-2-652.pdf>.
- [7] N. CABIBBO. « Unitary Symmetry and Leptonic Decays ». *Physical Review Letters* **10** (12 juin 1963), p. 531-533. DOI : [10.1103/PhysRevLett.10.531](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.10.531).
- [8] N. CABIBBO. « Unitary Symmetry and Nonleptonic Decays ». *Physical Review Letters* **12** (2 jan. 1964), p. 62-63. DOI : [10.1103/PhysRevLett.12.62](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.12.62).
- [9] Particle Data Group. « Review of Particle Physics ». *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **8** (août 2020). DOI : [10.1093/ptep/ptaa104](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104).
- [10] F. ENGLERT & R. BROUT. « Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons ». *Physical Review Letters* **13.9** (9 août 1964), p. 321-323. DOI : [10.1103/PhysRevLett.13.321](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.321).
- [11] P. W. HIGGS. « Broken symmetries, massless particles and gauge fields ». *Physics Letters* **12.2** (sept. 1964). DOI : [10.1016/0031-9163\(64\)91136-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91136-9). URL : <https://cds.cern.ch/record/641590>.
- [12] P. W. HIGGS. « Broken symmetries and the masses of gauge bosons ». *Physics Letters* **13.16** (oct. 1964). DOI : [10.1103/physrevlett.13.508](https://doi.org/10.1103/physrevlett.13.508).
- [13] G. S. GURALNIK, C. R. HAGEN & T. W. B. KIBBLE. « Global Conservation Laws and Massless Particles ». *Physical Review Letters* **13.20** (20 nov. 1964), p. 585-587. DOI : [10.1103/PhysRevLett.13.585](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.585).
- [14] T. W. B. KIBBLE. « Symmetry Breaking in Non-Abelian Gauge Theories ». *Physical Review* **155** (5 mar. 1967), p. 1554-1561. DOI : [10.1103/PhysRev.155.1554](https://doi.org/10.1103/PhysRev.155.1554). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.155.1554>.

- [15] P. W. HIGGS. « Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons ». *Physical Review* **145** (4 mai 1966), p. 1156-1163. DOI : [10.1103/PhysRev.145.1156](https://doi.org/10.1103/PhysRev.145.1156). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.145.1156>.
- [16] S. L. GLASHOW. « Partial symmetries of weak interactions ». *Nuclear Physics* **22.4** (1961), p. 579-588. DOI : [10.1016/0029-5582\(61\)90469-2](https://doi.org/10.1016/0029-5582(61)90469-2).
- [17] G. ARNISON & coll. « Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at  $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$  ». *Physics Letters* **B122.1** (1983), p. 103-116. DOI : [10.1016/0370-2693\(83\)91177-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)91177-2). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269383911772>.
- [18] M. BANNER & coll. « Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN  $pp$  collider ». *Physics Letters* **B122.5** (1983), p. 476-485. DOI : [10.1016/0370-2693\(83\)91605-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)91605-2). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269383916052>.
- [19] G. ARNISON & coll. « Further evidence for charged intermediate vector bosons at the SPS collider ». *Physics Letters* **B129.3** (1983), p. 273-282. DOI : [10.1016/0370-2693\(83\)90860-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90860-2). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269383908602>.
- [20] G. ARNISON & coll. « Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around  $95 \text{ GeV} \cdot c^{-2}$  at the CERN SPS collider ». *Physics Letters* **B126.5** (1983), p. 398-410. DOI : [10.1016/0370-2693\(83\)90188-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90188-0). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269383901880>.
- [21] P. BAGNAIA & coll. « Evidence for  $Z^0 \rightarrow e^+e^-$  at the CERN  $pp$  collider ». *Physics Letters* **B129.1** (1983), p. 130-140. DOI : [10.1016/0370-2693\(83\)90744-X](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90744-X). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037026938390744X>.
- [22] The ATLAS Collaboration. « Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC ». *Physics Letters* **B716.1** (2012), p. 1-29. DOI : [10.1016/j.physletb.2012.08.020](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037026931200857X>.
- [23] The CMS Collaboration. « Observation of a new boson at a mass of  $125 \text{ GeV}$  with the CMS experiment at the LHC ». *Physics Letters* **B716.1** (2012), p. 30-61. DOI : [10.1016/j.physletb.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312008581>.
- [24] The CMS Collaboration. « Observation of a new boson with mass near  $125 \text{ GeV}$  in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and  $8 \text{ TeV}$  ». *Journal of High Energy Physics* **06** (juin 2013). DOI : [10.1007/jhep06\(2013\)081](https://doi.org/10.1007/jhep06(2013)081).
- [25] G. AAD & coll. « Combined measurement of the Higgs boson mass in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and  $8 \text{ TeV}$  with the ATLAS and CMS Experiments ». *Physical Review Letters* **114.19** (mai 2015). DOI : [10.1103/physrevlett.114.191803](https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.191803).
- [26] G. AAD & coll. « Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC  $pp$  collision data at  $\sqrt{s} = 7$  and  $8 \text{ TeV}$  ». *Journal of High Energy Physics* **08** (août 2016). DOI : [10.1007/jhep08\(2016\)045](https://doi.org/10.1007/jhep08(2016)045).
- [27] T. M. HAHN & coll. « Neutrons and Gamma-Rays from the Proton Bombardment of Beryllium ». *Physical Review* **85.5** (mar. 1952), p. 934. DOI : [10.1103/PhysRev.85.934](https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.934).
- [28] H. L. ANDERSON & coll. « Total Cross Sections of Negative Pions in Hydrogen ». *Physical Review* **85.5** (mar. 1952), p. 934-935. DOI : [10.1103/PhysRev.85.934.2](https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.934.2).
- [29] H. L. ANDERSON & coll. « Total Cross Sections of Positive Pions in Hydrogen ». *Physical Review* **85.5** (mar. 1952), p. 936. DOI : [10.1103/PhysRev.85.936](https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.936).
- [30] V. E. BARNES & coll. « Observation of a Hyperon with Strangeness Minus Three ». *Physical Review Letters* **12.8** (fév. 1964), p. 204-206. DOI : [10.1103/PhysRevLett.12.204](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.12.204).



- [31] S. DÜRR & coll. « Ab Initio Determination of Light Hadron Masses ». *Science* **322**.5905 (nov. 2008), p. 1224-1227. DOI : [10.1126/science.1163233](https://doi.org/10.1126/science.1163233).
- [32] G. P. SALAM. *Elements of QCD for hadron colliders*. 2010. arXiv : [1011.5131](https://arxiv.org/abs/1011.5131) [hep-ph]. URL : <https://arxiv.org/pdf/1011.5131.pdf>.
- [33] D. J. GROSS & F. WILCZEK. « Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories ». *Physical Review Letters* **30** (26 juin 1973), p. 1343-1346. DOI : [10.1103/PhysRevLett.30.1343](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.1343).
- [34] H. D. POLITZER. « Reliable Perturbative Results for Strong Interactions? » *Physical Review Letters* **30** (26 juin 1973), p. 1346-1349. DOI : [10.1103/PhysRevLett.30.1346](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.1346).
- [35] The CDF Collaboration. « Observation of top quark production in  $p\bar{p}$  collisions with the collider detector at Fermilab ». *Physical Review Letters* **74**.14 (avr. 1995), p. 2626-2631. DOI : [10.1103/physrevlett.74.2626](https://doi.org/10.1103/physrevlett.74.2626).
- [36] The DØ Collaboration. « Observation of the top quark ». *Physical Review Letters* **74**.14 (avr. 1995), p. 2632-2637. DOI : [10.1103/physrevlett.74.2632](https://doi.org/10.1103/physrevlett.74.2632).
- [37] S. MELE. « The Measurement of the Number of Light Neutrino Species at LEP ». *Advanced Series on Directions in High Energy Physics* **23** (2015), p. 89-106. DOI : [10.1142/9789814644150\\_0004](https://doi.org/10.1142/9789814644150_0004). URL : <http://cds.cern.ch/record/2103251>.
- [38] The Super-Kamiokande Collaboration. « Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos ». *Physical Review Letters* **81** (8 août 1998), p. 1562-1567. DOI : [10.1103/PhysRevLett.81.1562](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1562).
- [39] The SNO Collaboration. « Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory ». *Physical Review Letters* **89** (1 juin 2002). DOI : [10.1103/PhysRevLett.89.011301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.011301).
- [40] J. SCHECHTER & J. W. F. VALLE. « Neutrino masses in  $SU(2) \times U(1)$  theories ». *Physical Review D* **22** (9 nov. 1980), p. 2227-2235. DOI : [10.1103/PhysRevD.22.2227](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.22.2227).
- [41] A. DAVIDSON & K. C. WALI. « Family mass hierarchy from universal seesaw mechanism ». *Physical Review Letters* **60** (18 mai 1988), p. 1813-1816. DOI : [10.1103/PhysRevLett.60.1813](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.1813).
- [42] R. N. MOHAPATRA & G. SENJANOVIĆ. « Neutrino masses and mixings in gauge models with spontaneous parity violation ». *Physical Review D* **23** (1 jan. 1981), p. 165-180. DOI : [10.1103/PhysRevD.23.165](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.23.165).
- [43] R. N. MOHAPATRA & G. SENJANOVIĆ. « Neutrino Mass and Spontaneous Parity Nonconservation ». *Physical Review Letters* **44** (14 avr. 1980), p. 912-915. DOI : [10.1103/PhysRevLett.44.912](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.44.912).
- [44] M. GELL-MANN, P. RAMOND & R. SLANSKY. « Complex Spinors and Unified Theories » (1979). arXiv : [1306.4669](https://arxiv.org/abs/1306.4669) [hep-th]. URL : <http://cds.cern.ch/record/133618>.
- [45] Z. MAKI, M. NAKAGAWA & S. SAKATA. « Remarks on the Unified Model of Elementary Particles ». *Progress of Theoretical Physics* **28.5** (nov. 1962), p. 870-880. DOI : [10.1143/PTP.28.870](https://doi.org/10.1143/PTP.28.870). eprint : <https://academic.oup.com/ptp/article-pdf/28/5/870/5258750/28-5-870.pdf>.
- [46] Y. NAGASHIMA. *Beyond the Standard Model of Elementary Particle Physics*. Weinheim : Wiley-VCH, juin 2014. URL : <http://cds.cern.ch/record/1620277>.
- [47] D. CLOWE & coll. « A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter ». *Astrophysical Journal* **648.2** (août 2006). DOI : [10.1086/508162](https://doi.org/10.1086/508162).
- [48] P. A. R. ADE & coll. « Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results ». *Astronomy & Astrophysics* **571** (oct. 2014). DOI : [10.1051/0004-6361/201321529](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321529).
- [49] Y. A. GOL'FAND & E. P. LIKHTMAN. « Extension of the algebra of Poincare group generators and violation of  $P$  invariance ». *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* **13.8** (1971), p. 323-325. URL : <http://cds.cern.ch/record/433516>.
- [50] J. WESS & B. ZUMINO. « Supergauge transformations in four dimensions ». *Nuclear Physics* **B70.1** (1974), p. 39-50. DOI : [10.1016/0550-3213\(74\)90355-1](https://doi.org/10.1016/0550-3213(74)90355-1). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321374903551>.

- [51] S. P. MARTIN. « A Supersymmetry primer ». *Advanced Series on Directions in High Energy Physics* (juil. 1998), p. 1-98. DOI : [10.1142/9789812839657\\_0001](https://doi.org/10.1142/9789812839657_0001).
- [52] J. F. GUNION & coll. *The Higgs hunter's guide*. T. 80. Upton, NY : Brookhaven Nat. Lab., 1989. URL : <https://cds.cern.ch/record/425736>.
- [53] J. F. GUNION & coll. *Errata for "The Higgs Hunter's Guide"*. Rapp. tech. hep-ph/9302272. Fév. 1993. URL : <https://cds.cern.ch/record/559892>.
- [54] P. FAYET. « Supergauge invariant extension of the Higgs mechanism and a model for the electron and its neutrino ». *Nuclear Physics* **B90** (1975), p. 104-124. DOI : [10.1016/0550-3213\(75\)90636-7](https://doi.org/10.1016/0550-3213(75)90636-7). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321375906367>.
- [55] P. FAYET. « Spontaneously broken supersymmetric theories of weak, electromagnetic and strong interactions ». *Physics Letters* **B69.4** (1977), p. 489-494. DOI : [10.1016/0370-2693\(77\)90852-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(77)90852-8). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269377908528>.
- [56] M. CARENA & coll. « MSSM Higgs boson searches at the LHC : benchmark scenarios after the discovery of a Higgs-like particle ». *European Physical Journal* **C73.9** (sept. 2013). DOI : [10.1140/epjc/s10052-013-2552-1](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2552-1).
- [57] E. BAGNASCHI & coll. « MSSM Higgs boson searches at the LHC : benchmark scenarios for Run 2 and beyond ». *The European Physical Journal* **C79.7** (juil. 2019). DOI : [10.1140/epjc/s10052-019-7114-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7114-8).
- [58] The CMS Collaboration. « Search for neutral MSSM Higgs bosons decaying to a pair of tau leptons in  $pp$  collisions ». *Journal of High Energy Physics* **10** (oct. 2014). DOI : [10.1007/jhep10\(2014\)160](https://doi.org/10.1007/jhep10(2014)160).
- [59] The CMS Collaboration. « Search for additional neutral MSSM Higgs bosons in the di-tau final state in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV ». *Journal of High Energy Physics* **09.007** (sept. 2018). DOI : [10.1007/JHEP09\(2018\)007](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2018)007).
- [60] G. RIDOLFI, G. ROSS & F. ZWIRNER. « Supersymmetry ». *Large Hadron Collider Workshop Proceedings. II*. CERN. Geneva : CERN, oct. 1990, p. 606-683.
- [61] LHC Higgs Cross Section Working Group. « Inclusive Observables ». *Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 1*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2011. DOI : [10.5170/CERN-2011-002](https://doi.org/10.5170/CERN-2011-002). URL : <https://cds.cern.ch/record/1318996>.
- [62] LHC Higgs Cross Section Working Group. « Differential Distributions ». *Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 2*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2012. DOI : [10.5170/CERN-2012-002](https://doi.org/10.5170/CERN-2012-002). URL : <https://cds.cern.ch/record/1416519>.
- [63] LHC Higgs Cross Section Working Group. « Higgs Properties ». *Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 3*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2013. DOI : [10.5170/CERN-2013-004](https://doi.org/10.5170/CERN-2013-004). URL : <https://cds.cern.ch/record/1559921>.
- [64] LHC Higgs Cross Section Working Group. « Deciphering the Nature of the Higgs Sector ». *Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 4*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, oct. 2016. DOI : [10.23731/CYRM-2017-002](https://doi.org/10.23731/CYRM-2017-002). URL : <http://cds.cern.ch/record/2227475>.
- [65] P. BOLZONI & coll. « Vector boson fusion at next-to-next-to-leading order in QCD : Standard model Higgs boson and beyond ». *Physical Review* **D85** (3 fév. 2012). DOI : [10.1103/PhysRevD.85.035002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.035002).
- [66] S. DAWSON, A. DJOUADI & M. SPIRA. « QCD Corrections to Supersymmetric Higgs Boson Production : The Role of Squark Loops ». *Physical Review Letters* **77.1** (juil. 1996), p. 16-19. DOI : [10.1103/physrevlett.77.16](https://doi.org/10.1103/physrevlett.77.16).



