

# Prospectives LPC 2018 - Pôle Théorie

<b>1</b>	<b>Vue d'ensemble</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aspects formels : régularisation et front de lumière</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>QCD sur réseau</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Phénoménologie du <math>b</math></b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Recherches de Nouvelle Physique</b>	<b>3</b>
5.1	Recherches indirectes : saveurs lourdes . . . . .	3
5.2	Recherches indirectes : saveurs leptoniques . . . . .	4
5.3	Recherches directes . . . . .	5

## 1 Vue d'ensemble

Les activités du Pôle Théorie au LPC portent à présent sur trois axes : aspects formels en théorie des champs, Chromodynamique Quantique sur Réseau (LQCD) et les recherches directes et indirectes de Nouvelle Physique (NP) au-delà du Modèle Standard (MS). Dans les années à venir (une fenêtre temporelle autour de 3-5 ans), l'équipe souhaite pérenniser ces axes, et en particulier se concentrer sur les points suivants (lesquels seront présentés plus en détails par la suite) :

- (i) Études formelles de régularisation de Taylor-Lagrange appliquées à des aspects du MS normalement traités par régularisation dimensionnelle ; théorie des champs sur le front de lumière.
- (ii) Activités en LQCD portant sur l'étude des mesons lourds ; constantes de renormalisation d'opérateurs non-locaux.
- (iii) Phénoménologie du quark  $b$  (désintégration de mésons et hadrons contenant des  $b$ ) ; étude des anomalies suggérant la violation de l'universalité des saveurs leptoniques.
- (iv) Recherches indirectes de NP : violation de la saveur leptonique, nombre leptonique, et violation de la saveur hadronique ; impact pour les expériences de haute-intensité.
- (v) Recherches de NP auprès des collisionneurs (accent sur des modèles supersymétriques et fermions stériles lourds) : LHC et futurs collisionneurs FCC et/ou LC.

Plusieurs des points ci-dessus offrent des liens naturels entre eux, et peuvent aussi permettre des échanges avec certaines équipes expérimentales du LPC (comme par exemple LHCb, Solid, et dans l'avenir COMET). L'évolution du programme scientifique ici proposé se fera bien évidemment en suivant de près les progrès expérimentaux sur les différents fronts. Toute nouvelle découverte, ou la disparition de tensions existantes auparavant sera suivie de près, et nos lignes de recherche seront ainsi adaptées.

Au-delà de collaborations avec des chercheurs individuels, les activités proposées s'inscrivent dans le cadre de plusieurs groupes de recherche, à l'échelle nationale et internationale. Les groupements de recherche français, notamment IRN « Terascale » ainsi que les GdR « Neutrino », « High-Intensity » et « Hadron » offrent un cadre naturel pour plusieurs thématiques de recherche. A à l'échelle européenne, on suivra de près les activités de la « CERN Neutrino Platform ». D'autres études se poursuivront dans le cadre des collaborations ETMC et CKMfitter, ainsi que de l'expérience COMET.

## 2 Aspects formels : regularisation et front de lumière

L'expérience acquise dans le cadre de deux collaborations récentes sur d'une part la méthode de régularisation de Taylor-Lagrange et d'autre part sur des calculs non-perturbatifs en théorie des champs sur le front de lumière nous ont amené à nous intéresser à plusieurs aspects du MS dans sa formulation habituelle utilisant la régularisation dimensionnelle. Ces études sont amenées à se prolonger dans les cinq années à venir, en quatre étapes principales :

- (i) Suite à l'étude de la méthode de régularisation de Taylor-Lagrange, qui prend en compte de façon cohérente la nature des champs quantiques comme distributions, il a été possible d'identifier la nature différente des deux échelles arbitraires qui apparaissent dans tout calcul d'observable physique : l'échelle de régularisation et le point de renormalisation. Il est donc possible d'en déduire pour chacune une équation du groupe de renormalisation.
- (ii) Ces études sur la nature des échelles de régularisation et de renormalisation vont avoir des conséquences sur l'interprétation même de certaines limitations attribuées au MS. Notons en particulier les questions de fine-tuning ou de hiérarchie de la masse du Higgs, l'interprétation du pôle de Landau en théorie des perturbations, ou la nature triviale de la théorie  $\lambda\phi^4$ .
- (iii) L'utilisation de la régularisation de Taylor-Lagrange permettra aussi d'aborder deux questions importantes en théorie des champs et dans le calcul d'observables physiques du MS. En théorie des champs d'abord, cette méthode de régularisation permet d'envisager le calcul d'observables physiques pour une théorie à masse nulle, à partir d'amplitudes élémentaires finies dans la limite infra-rouge. Dans le cadre du Modèle Standard ensuite, cette régularisation permet aussi d'obtenir des amplitudes élémentaires finies dans le domaine ultra-violet. Elle permettra donc naturellement le calcul d'observables dont la contribution à l'ordre dominant correspond déjà à une boucle (Higgs en deux  $\gamma$  par exemple, ou diagrammes Pingouins) que l'on pourra comparer aux calculs habituels en régularisation dimensionnelle.
- (iv) Le MS repose entièrement sur le mécanisme de Higgs de brisure spontanée de symétrie. Il y a deux façons cependant de le concevoir. La première, qui est celle actuellement étudiée, consiste à imposer, dès la définition du Lagrangien du MS, cette brisure de symétrie, par le choix d'un potentiel en "chapeau Mexicain". Elle est dite statique. La deuxième, dynamique, consiste à générer cette brisure de symétrie de façon non-perturbative par self-interactions du champ scalaire, pour des valeurs de la constante de couplage supérieures à une valeur critique. Une telle possibilité est connue à 1+1 dimensions. La formulation de la théorie des champs sur le front de lumière devrait permettre de l'envisager de manière plus réaliste à 3+1 dimensions. Une détermination expérimentale précise de la constante de couplage trilineaire du Higgs devrait permettre d'avoir une indication sur le mécanisme effectivement en jeu dans la nature.

## 3 QCD sur réseau

Dans le secteur non perturbatif, l'interaction forte est souvent traitée non pas en utilisant QCD mais plutôt des approximations effectives comme par exemple les règles de somme. Cependant, la seule approche connue à ce jour qui permet de traiter la QCD directement à partir des principes de base est la QCD sur réseau. Prenant en compte le lagrangien complet, cette méthode est bien plus sûre que les autres méthodes plus phénoménologiques et elle permet également de réduire les incertitudes théoriques pour les ramener au même niveau que les incertitudes d'origine expérimentales.

Cette approche est tellement importante, aussi bien du point de vue de la Physique de l'interaction forte que du point de vue des moyens informatiques nécessaires à son utilisation, que de nombreuses collaborations se sont formées. Le LPC travaille entre autre au sein de la collaboration ETMC (European Twisted Mass Collaboration) ce qui lui permet d'avoir accès aux configurations et autres propagateurs indispensables au calcul des observables hadroniques étudiées.

De façon plus détaillée, les activités prévues de l'équipe théorie dans ce domaine portent dans un premier temps sur l'étude des mésons lourds du type  $Q\bar{q}$  ( $B$ ,  $D$  et ses premières excitations orbitales, leur spectroscopie et les facteurs de forme intervenant dans leurs désintégrations) mais aussi des quarkonias  $Q\bar{Q}$  (du point de vue phénoménologie, ces mésons permettent par exemple de contraindre certains scénarios de Physique au-delà du Modèle Standard dont les secteur de Higgs est enrichi par des états légers  $CP$ -odd). Enfin, dans un deuxième temps, un travail sur les constantes de renormalisation d'opérateurs non-locaux bilinéaires en champ de quark est en cours, en utilisant  $2 + 1 + 1$  saveurs de quarks dynamiques.

## 4 Phénoménologie du $b$

Les désintégrations des hadrons contenant un quark  $b$  (leptoniques, semi-leptoniques ou non leptoniques) revêtent une importance cruciale dans bon nombre de tests expérimentaux du Modèle Standard (MS) ainsi que dans les modélisations théoriques associées (le quark  $b$  étant suffisamment massif pour introduire des simplifications dans les théories utilisées). Qui plus est, récemment, ces désintégrations ont révélé des tensions dans les prédictions du MS (par exemple les anomalies  $R_{D^{(*)}}$ ) ainsi qu'une possibilité de violation de l'universalité de la saveur leptonique.

Un travail sur le calcul des facteurs de forme qui apparaissent dans les désintégrations des baryons  $\Lambda_b$  vers  $\Lambda_c$  (prenant en compte les états fondamentaux mais également les excitations radiales ainsi que la première excitation orbitale  $L = 1$  pour les  $\Lambda_c^*$ ) a été démarrée dans le cadre de la formulation covariante des amplitudes de transition utilisant la construction dite de Bakamjian - Thomas et les symétries de quark lourd. Il s'agit d'une extension d'un travail déjà réalisé avec des mésons du type  $Q\bar{q}$ , mais en considérant des baryons  $Qqq$ . Des expressions générales initiales ont été obtenue pour les facteurs de forme et le travail en cours (et à venir) consiste en la vérification de certaines règles de somme vérifiées par ces facteurs de forme, comme la règle de somme de Bjorken, puis la prédiction numérique des amplitudes de transition et des sections efficaces à partir de l'évaluation numérique des fonctions d'onde baryoniques. Cette dernière étape repose sur l'utilisation d'un modèle relativiste de quarks, celui de Capstick et Isgur, qui prend en compte un grand nombre d'interactions entre les trois quarks de valence du baryon  $\Lambda_Q$ . En plus de vérifier la cohérence du modèle, l'une des finalités de ce travail est d'étudier une possible violation de la saveur leptonique dans les désintégrations du type  $\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c \ell \nu$ .

## 5 Recherches de Nouvelle Physique

Plusieurs observations suggèrent que malgré son succès, le MS n'offre pas une description complète de la Nature. Les masses des neutrinos et leurs mélanges, ainsi que l'asymétrie baryonique de l'Univers, et finalement le problème de la matière noire font appel à de nouveaux degrés de liberté et mécanismes présents dans de nouvelles théories dont le MS peut être vu comme une réalisation effective à basse énergie. Les recherches de nouvelle physique seront menées auprès de deux « frontières » expérimentales : haute intensité et haute énergie. La première englobe les recherches auprès des collisionneurs (recherche de nouvelles résonances), et la deuxième les

recherches indirectes, soit par des testes de précision du MS, soit par la recherche de phénomènes très rares (ou même interdits) dans le MS.

## 5.1 Recherches indirectes : saveurs lourdes

En l’absence de signaux directs à la frontière de l’énergie explorée par le LHC, nous voulons aborder la question de la complétude du modèle standard en nous focalisant sur les signaux indirects qui peuvent émerger dans les transitions de saveur de quarks et de leptons.

Dans le secteur des quarks, ce sont les désintégrations semi-leptoniques exclusives de hadrons contenant un quark  $b$  qui nous semblent les plus intéressantes. La phénoménologie est compliquée par les facteurs de forme des hadrons initiaux et finaux qui demandent encore des efforts théoriques pour atteindre le niveau de précision des résultats expérimentaux de LHCb et attendus à Belle-II. Mais on peut déjà extraire des déviations significatives ( $> 3\sigma$ ) en comparant différents types ou cinématiques de leptons finaux. Après les écarts dans l’analyse angulaire de la désintégration  $B \rightarrow K^{(*)}\mu\bar{\mu}$  par LHCb (et Belle puis CMS et ATLAS) sont apparues des déviations dans les rapports  $R_{K^{(*)}} = \text{BR}(B \rightarrow K^{(*)}\bar{\mu}\mu)/\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)}\bar{e}e)$ . Il est remarquable que ces différentes déviations peuvent s’absorber en ajoutant la contribution à une boucle du modèle standard et celle d’un seul couplage effectif  $C_9^{(\mu)}$  qui multiplie le produit d’un courant gauche  $\bar{b}_L\gamma_\alpha s_L$  violant la saveur des quarks et d’un courant uniquement muonique  $\bar{\mu}_L\gamma_\alpha\mu_L$ , violant donc l’universalité des leptons. Dans les années à venir, l’étude de toutes les transitions  $b \rightarrow s\ell\ell^{(\prime)}$  permettant de conforter ou d’invalider la nécessité de ce couplage particulier, ou d’autres couplage similaires, sera donc une priorité :  $B \rightarrow K^{(*)}\bar{\tau}\tau$ ,  $B_s \rightarrow \phi^{(*)}\bar{\ell}\ell$ ,  $\Lambda_b \rightarrow \Lambda\bar{\ell}\ell, \dots$

En attendant l’éventuelle confirmation de ce type couplages effectifs, il est intéressant d’étudier les modèles renormalisables qui peuvent leur donner naissance, et leurs implications tant théoriques que phénoménologiques. L’ampleur du couplage  $C_9^{(\mu)}$  nécessaire, comparable à la contribution du modèle standard, fait qu’une contribution à une boucle se heurte aux limites inférieures sur la masse et supérieure sur les couplages de nouvelles particules. A l’ordre de l’arbre, les possibilités se limitent à l’échange d’un  $Z'$  en voie sou un leptoquark en voie  $t$ . Du point de vue théorique, la question de la complétude UV de ces extensions exotiques est intéressante. Du point de vue phénoménologique, il faut étudier les implications sur des observables en tension  $(g-2)_\mu$  ou à venir (transition de saveur entre leptons chargés). Ces modèles peuvent également jeter un éclairage nouveau sur le problème de la matière noire, de la baryogénèse et de la masse des neutrinos.

D’autres anomalies violant l’universalité de saveur leptonique sont également apparues dans les transitions  $b \rightarrow c\ell\nu$ , comme le rapport  $R_{D^{(*)}} = \text{BR}(B \rightarrow D^{(*)}\tau\bar{\nu})/\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)}\ell\bar{\nu})$ . Si cet effet pourrait à première vue être lié au précédent par  $SU(2)$ , il demande en réalité un paramètre indépendant et une complication du modèle, comme l’ajout d’un deuxième leptoquark avec de nouveaux couplages. Par ailleurs, cette déviation se greffe sur les incohérences entre déterminations inclusive et exclusive de  $V_{cb}$  (et aussi de  $V_{ub}$ ), pour lesquelles un tel deuxième leptoquark ne semble pas aider. La nécessité théorique de tels ajouts est donc plus confuse, et du point de vue expérimental, les derniers résultats de Belle n’aident pas. De nouvelles mesures et des observables indépendantes sont dès lors indispensables pour clarifier la situation. Les désintégrations en  $D^{**}$  pourraient se révéler décisives, à condition de résoudre le “puzzle  $\tau_{3/2} - \tau_{1/2}$ ”, un profond écart ( $\sim 10\sigma$ ) entre les mesures et les prédictions de la limite de quarks lourds  $\Lambda_{\text{QCD}}/m_{b,c} \rightarrow 0$  pour les désintégrations vers de états  $D^{**}$  avec moment cinétique du quark léger  $j = 3/2$  et  $j = 1/2$ . La possibilité de trancher cette question en QCD réseau a fait l’objet de la thèse de M. Atoui (LPC, 2013). L’affirmation récente que cet écart pourrait disparaître avec la prise en compte des corrections  $O(\Lambda_{\text{QCD}}/m_c)$  est importante et demande vérification.

## 5.2 Recherches indirectes : saveurs leptoniques

Un certain nombre de tensions entre le MS et les données expérimentales est associé au secteur des leptons : c'est le cas du moment magnétique du muon  $(g - 2)_\mu$ , et aussi des anomalies liées à la violation de l'universalité de la saveur leptonique, déjà abordés dans la section précédente. Les oscillations de neutrinos elles-mêmes signalent la violation de la saveur leptonique dans le secteur des leptons neutres. Plusieurs modèles de NP dédiés à expliquer les échecs observationnels du MS ouvrent la possibilité de violation de la saveur leptonique dans les leptons chargés (cLFV). D'autres signaux – tels que la violation du nombre leptonique (LNV), ou bien des observables violant CP dans les leptons (par exemple les EDM) peuvent aussi être induits par cette NP.

Les extensions du MS par des neutrinos stériles sont fortement motivées – théoriquement et phénoménologiquement. Ces fermions (lourds) sont une partie intégrante de plusieurs mécanismes de génération de masse pour les neutrinos actifs, et peuvent même offrir des pistes pour l'asymétrie baryonique de l'Univers, ou la matière noire.

Nous sommes intéressés par l'exploration de modèles de NP – notamment ceux faisant appel à des fermions stériles – en ce qui concerne leurs signatures en terme de cLFV, LNV, EDMs et  $(g - 2)_\mu$ . Notre but est le développement de stratégies, basées sur la synergie de plusieurs observables, qui permettent de dévoiler (ou infirmer) le modèle de NP. En parallèle, nous aimerions aussi poursuivre le développement de nouvelles observables, cLFV et/ou CPV ; une exploration préliminaire d'observables liées aux désintégrations radiatives des muons ( $\mu \rightarrow e\gamma$ ), ainsi que des désintégrations cLFV du Muonium a déjà été démarrée. En vue de la participation du LPC dans l'expérience COMET, toute étude d'observables susceptibles d'être étudiées auprès de COMET devient particulièrement intéressante.

## 5.3 Recherches directes

Si l'énergie dans centre de masse d'une collision est suffisamment élevée, les nouvelles particules présentes dans des modèles de NP peuvent aussi être produites dans des collisionneurs. La fin du Run II du LHC, ainsi que les Run III et IV offrent donc des possibilités de recherche directe de ces nouveaux états. Nous sommes intéressés par la recherche de fermions lourds au LHC, à travers des signatures violant le nombre leptonique (et n'ayant pas d'énergie transverse manquante). Nous aimerions aussi démarrer des études dédiées pour des futures machines comme le FCC-ee ou le LC.

Malgré les résultats (jusqu'à présent) négatifs, la supersymétrie (SUSY) est un des modèles de nouvelle physique le mieux motivé. Dans le passé, des membres de l'équipe ont travaillé sur des modèles SUSY non-minimaux, en particulier dans le cadre du NMSSM. C'est une ligne de recherche que nous comptons garder, notamment en ce qui concerne l'étude de canaux (signaux et bruit de fond) dédiés aux signatures spécifiques du NMSSM (comme par exemple, un singlino LSP, des états « long-lived », parmi d'autres), pour le FCC et le LC.