

Contribution sur la physique du quark top pour les prospectives IN2P3

Jeremy Andrea¹, Samuel Calvet², Sabine Crépé-Renaudin³, Frédéric
Déliot ^{*}⁴, Benjamin Fuks⁵, et Romain Madar²

¹IPHC, Strasbourg

²LPC, Clermont-Ferrand

³LPSC, Grenoble

⁴CEA, Saclay

⁵LPTHE, Paris

pour le groupe top LHC-France

29 novembre 2019

Résumé

Ce document présente la contribution du groupe top LHC-France aux prospectives IN2P3 2020. Un résumé des études prospectives pour le LHC à haute luminosité est présenté en mettant l'accent sur les aspects de la physique du quark top les plus pertinents. Le document discute d'abord les mesures et recherches impliquant le quark top dans le cadre du modèle standard. Les recherches indirectes dans le cadre de la théorie effective des champs étendant le modèle standard par des opérateurs de dimension supérieure ainsi que les recherches directes de nouvelle physique avec des quarks top sont ensuite abordées. À travers cet exercice, il apparaît que le LHC à haute luminosité permettra un programme de physique autour du quark top riche, auquel les laboratoires français prendront pleinement part.

^{*}contact: frederic.deliot@cern.ch, tel: 01.69.08.66.28

1 Introduction

Le groupe top LHC-France regroupe la communauté française expérimentale et théorique qui travaille sur la physique du quark top au LHC. Il s'agit de sept groupes de l'IN2P3 (CPPM-Marseille, IPHC-Strasbourg, IP2I-Lyon, LLR-Palaiseau, LPC-Clermont, LPSC-Grenoble, LPNHE-Paris), d'un groupe du CEA-Saclay (Irfu/DPhP) et d'un laboratoire de l'INP (LPTHE-Paris). Les activités de cette communauté recouvrent à la fois les mesures de précision des propriétés du quark top et la recherche de nouvelle physique impliquant des quarks top. Dans le cadre des prospectives IN2P3 à 10 ans, ce document se concentre sur les possibilités qu'offre le LHC à haute luminosité (HL-LHC) car, durant cette période, le LHC et le HL-LHC seront les seuls accélérateurs en fonctionnement permettant de produire des quarks top. Les points qui sont présentés dans ce document sont classés en fonction des thématiques suivantes : mesures de précision et recherche de processus rares dans le cadre du modèle standard (MS), interprétation dans le cadre de théories des champs effectives et recherche directe de nouvelle physique.

2 Mesures de précision

Les mesures de précision des propriétés du quark top représentent un test essentiel du MS. Au cours des 10 prochaines années et en particulier au HL-LHC, ces propriétés pourront être explorées dans un espace de phase étendu, par exemple pour des masses invariantes $t\bar{t}$ allant jusqu'à 7 TeV ou avec des quarks top produits jusqu'à des rapidités autour de 4 [1]. Cet échantillon de données permettra de tester la présence de nouvelle physique (par l'intermédiaire d'opérateurs EFT en particulier, voir Section 4) avec une sensibilité accrue d'au moins un ordre de grandeur par rapport aux mesures actuelles (cf. par exemple [2]). Ces recherches nécessitent cependant que la modélisation par Monte Carlo des processus de production de paires de quarks top ou de quark célibataire soit suffisamment précise. Pour cela, il sera important d'effectuer la mesure des sections efficaces différentielles $t\bar{t}$ ou top célibataire. Les données disponibles permettront des mesures multidimensionnelles et avec une granularité plus fine ou sur une plage étendue par rapport aux mesures actuelles [3]. Ces mesures différentielles pourront également être utilisées pour étudier les corrélations de spin, la polarisation ou les asymétries dans le processus $t\bar{t}$. La mesure de ces propriétés à grande masse invariante $t\bar{t}$ bénéficiera de l'énorme statistique disponible au HL-LHC. Afin de maîtriser les erreurs systématiques provenant de la modélisation de ces processus (reconnection de couleur, hadronisation et événements sous-jacents), des observables spécifiques pourront être étudiées et corrigées des effets de reconstruction et de détection, afin d'ajuster les modèles Monte Carlo.

Des mesures différentielles plus spécifiques seront également nécessaires pour les processus comme $t\bar{t}b\bar{b}$ ou $t\bar{t}W$ car ces processus représentent une source de bruit de fond cruciale pour l'étude d'événements plus rares ($t\bar{t}H$, $t\bar{t}t\bar{t}$, ...). Les simulations semblent actuellement insuffisantes pour reproduire correctement la cinématique de ces processus, en particulier dans l'espace des phases pertinent pour la recherche de ces événements rares.

La connaissance précise de la masse du quark top est de première importance pour tester la cohérence du modèle standard. La combinaison des mesures directes de masse par les expériences ATLAS et CMS ont actuellement une erreur de l'ordre de 500 MeV.

Cependant des aspects théoriques dans l'interprétation de cette masse en tant que masse au pôle conduisent à des ambiguïtés de l'ordre de quelques centaines de MeV. Ceci renforce l'intérêt des mesures de masse par des méthodes alternatives (mesure en utilisant le J/ψ [4] ou en utilisant les sections efficaces par exemple). Dans les années à venir au HL-LHC, ces mesures alternatives, pour le moment moins précises que les mesures directes, deviendront compétitives (incertitudes attendues autour de 500 MeV par mesure) et seront donc amenées à limiter l'incertitude théorique liée à l'interprétation des mesures en tant que masse au pôle.

3 Recherches et mesures de processus rares

Dans cette section, nous appellerons processus rares tous processus ayant des sections efficaces significativement plus faibles que celle de la production $t\bar{t}$, et pour lesquels les sensibilités des mesures et recherches actuelles sont dominées par l'erreur statistique. Nous considérerons donc les processus de production associées de bosons et de quarks top, à la fois dans les modes de production de quarks top célibataire ou par paires, et les processus produisant quatre tops ($t\bar{t}Z$ et $t\bar{t}W$ [5, 6, 7, 8], $t\bar{t}\gamma$ [9, 10], $t\gamma q$ [10], $t\bar{t}t\bar{t}$ [11, 12, 13], $t\bar{t}H$ [14, 15, 16]).

La recherche et l'étude des processus rares impliquant des quarks top sont intéressantes à de multiples égards. Tout d'abord, elles permettent de sonder le MS à l'aide de signatures existantes parfois inobservées, ainsi que d'explorer les couplages entre le quark top et les bosons d'interaction d'une part, et entre le quark top et le boson de Higgs d'autre part. Ces mesures de couplages sont sensibles à la présence de nouvelle physique, soit directement, soit indirectement comme présenté dans la section 4. Une mesure directe de ces couplages est cruciale pour valider le MS et vérifier que les relations existantes entre les différents couplages sont bien vérifiées. L'étude de processus rares permet également de mieux tester les prédictions théoriques et les générateurs Monte Carlo.

Différents travaux de prospectives, principalement portant sur le programme du HL-LHC, ont été préparés par les collaborations ATLAS et CMS. Ils estiment en particulier le gain en sensibilité attendu avec à une luminosité intégrée de 3 ab^{-1} . À titre d'exemple, la section efficace du processus 4 top, actuellement inobservé, pourrait être mesurée avec une précision allant de 10% à 30%, en fonction des différents scénarios d'erreurs systématiques supposés [17, 18]. L'erreur statistique attendue est quant à elle d'une dizaine de pourcents. Une très nette amélioration de la sensibilité aux processus $t\bar{t}H$ est également attendue, avec des incertitudes sur la section efficace de 5-10% [19, 20], selon les différents scénarios étudiés, ce qui correspond à une amélioration d'un facteur 4 à 6 de la mesure du couplage de Yukawa du quark top κ_t . De plus, bien que restant difficile à observer avec la luminosité du LHC, les limites attendues sur la production du processus tHq seraient réduites d'un facteur 8, permettant ainsi d'exclure totalement les valeurs négatives de κ_t , ou dans le cas contraire d'observer des signes de nouvelle physique. Ces études prospectives illustrent de manière forte les améliorations qui peuvent être attendues grâce à la large statistique d'événements au HL-LHC. Il est à noter que cette statistique pourrait permettre l'observation de processus encore plus rares, comme la production associée de quarks top et de paire de bosons (tWZ , $t\bar{t}WZ$) ou impliquant plus de 4 tops.

4 Interprétation dans le cadre de théories des champs effectives

La théorie effective des champs étendant le MS par des opérateurs de dimension supérieure (*SMEFT*) vise à paramétriser les effets de nouveaux champs, évoluant à très haute énergie, à travers l'introduction de couplages effectifs qui modélisent les diagrammes impliquant des nouvelles particules très massives. Cela se traduit par des recherches de déviations, par rapport aux prédictions du MS, de nombre d'observables physiques mesurables aux énergies expérimentalement accessibles. L'intérêt de cette paramétrisation est d'être, dans une grande mesure, valide quelque soit le détail de la dynamique à haute énergie, et donc indépendante de la théorie fondamentale réalisée dans la nature pourvu que la nouvelle physique se trouve à suffisamment grande masse. De plus, cela ouvre la porte, dans un second temps, à une possible réinterprétation dans le cadre de très nombreux modèles complets à plus grande énergie après matching vers le SMEFT (et running jusqu'à l'échelle du TeV). Le point fort de cette approche est donc clairement la prise en compte cohérente de l'effet des nouveaux couplages sur l'ensemble des observables mesurées et ce, sur tous les secteurs du modèle standard. Afin de pleinement exploiter cet avantage, il est donc nécessaire de combiner le plus de mesures possibles.

À titre d'exemple, la mesure de section différentielle du processus $pp \rightarrow t\bar{t}$ permet de contraindre les opérateurs de type \mathcal{O}_{tG} et $\mathcal{O}_{tu,td}$ [21], en particulier à haute impulsion transverse pour ce dernier - précisément là où l'apport du HL-LHC sera le plus significatif. Cela renforce d'ailleurs l'importance d'avoir une prédiction précise dans cette région de l'espace des phases (cf. section 2). Les opérateurs électro-faibles $\mathcal{O}_{tW,tB}$ [21] modifient la désintégration du quark top $t \rightarrow Wb$ (accessible *via* les fractions d'hélicité du W), sa production célibataire ainsi que les productions $t\bar{t}W$ et $t\bar{t}Z$. Une étude [22] montre un gain typique d'un facteur deux sur la précision attendue sur les opérateurs de type \mathcal{O}_{tW} au HL-LHC, en exploitant les sections efficaces de production de quark top célibataire et la mesure des fractions d'hélicité du boson W dans la production de paire $t\bar{t}$. Par ailleurs, la production rare de $pp \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$ permet entre autre de contraindre les opérateurs du type \mathcal{O}_{tt} et verra leurs sensibilités augmenter avec les données du HL-LHC (cf. section 3).

Il existe un certain nombre d'études menées hors des collaborations expérimentales produisant des contraintes combinées sur le quark top grâce aux mesures effectuées au LHC [23, 24, 25]. Cependant, aucune combinaison globale n'a été encore effectuée par les collaborations elles-mêmes. Ce point implique une meilleure prise en compte des corrélations entre mesures, mais aussi une possible optimisation du choix des observables en vue d'une meilleure contrainte sur certains opérateurs. L'impact des corrections d'ordre supérieur reste également un point à explorer pour le futur, sachant que l'indépendance des opérateurs ne se conserve pas au NLO [26, 27, 28]. Enfin, les meilleures contraintes sur l'ensemble des opérateurs s'obtiendront en combinant les différentes mesures sur l'ensemble des secteurs du modèle standard.

5 Recherches directes de nouvelle physique avec le quark top

Le quark top est une des sondes privilégiées dans la recherche de nouvelle physique auprès des collisionneurs de particules. La possibilité d'observer des signes de nouvelles particules dans les collisions du LHC puis du HL-LHC est en effet principalement motivée par le problème de la naturalité de la masse du boson de Higgs associé au problème de la hiérarchie des interactions. Or le quark top est la particule qui contribue le plus aux corrections radiatives à la masse du Higgs. Les partenaires du quark top peuvent être des fermions (de type vectoriel) pour les théories avec des dynamiques fondamentales fortes à haute énergie ou des scalaires comme les partenaires supersymétriques du top, les squarks stops. Un deuxième argument qui justifie la recherche de nouvelle physique est la compréhension de la saveur des fermions. La génération de la structure en saveur du MS n'est pas comprise ni la hiérarchie de masse des fermions. Le quark top est le fermion le plus massif, il est ainsi amené à jouer un rôle particulier et est une signature privilégiée dans tous les modèles qui favorisent un couplage à la troisième génération de particules. Le troisième argument fort qui sous-tend l'existence de nouvelles particules et l'observation de matière noire dans l'univers via ses effets gravitationnels. La particule d'interaction associée, si elle est produite au LHC, peut aussi se désintégrer en particules du MS. Les quarks top peuvent faire partie de ses désintégrations et sont privilégiés dans les cas où cette particule est scalaire. De plus, dans certains modèles dit top-philiques, la connection entre le secteur sombre (ou caché) et le MS se fait au travers du quark top, comme cela est notamment le cas dans des scénarios motivés par une dynamique d'interaction forte à haute énergie [29]. Les signatures en question sont diverses : monotop, paire de quarks top ou signature plus complexe comme dans les cas des modèles avec deux doublets de Higgs auxquels sont associés une particule scalaire interagissant avec la matière noire.

Les signatures les plus simples et les modèles associés les plus favorisés ou les plus généraux ont été largement explorés pendant les deux premières phases de prise de données du LHC. Ces recherches ont été infructueuses. Ces modèles devront continuer à être explorés pendant les prochaines phases de fonctionnement du LHC et du HL-LHC notamment car dans de nombreux scénarios où la matière noire est faiblement interagissante (WIMPs), la cosmologie autorise de la nouvelle physique dans le régime multi-TeV présentement non-accessible [29]. L'augmentation de la luminosité permettra de sonder des couplages plus faibles même si les conditions de prise de données seront plus compliquées (large taux de collisions d'empilement). Mais l'amélioration des détecteurs et des techniques d'analyse permettront d'obtenir des performances similaires ou meilleures que celles obtenues jusqu'à aujourd'hui. Ainsi à la fin du HL-LHC, les prévisions actuelles permettent de sonder des masses de stop jusqu'à 1,7 TeV quelle que soit la masse des neutralinos si ceux-ci ont une masse inférieure à environ 400 GeV [30] et des masses de resonances top-antitop jusqu'à 7 TeV [31]. Par ailleurs le fait qu'aucun signe de nouvelle physique n'ait encore été mis en évidence peut signifier que des signatures plus complexes doivent être exploitées. Les signatures de top célibataire ou en paire associés à des jets, des Higgs ou de l'énergie manquante ont commencé à être explorées. La production de quatre quarks top devient aussi accessible.

Ainsi les pistes pour la recherche directe de nouvelle physique avec le quark top sont nombreuses et fortement motivées. Les données du Run 2 du LHC doivent encore être

exploitées complètement. L'accumulation de la statistique permise par les prochaines phases d'exploitation du LHC et du HL-LHC permettra d'étendre la sensibilité de ces recherches aux couplages plus faibles. Elle permettra aussi d'étendre encore la gamme des masses accessibles même sans augmentation sensible de l'énergie des collisions, soit des gains allant jusqu'à 50% par rapport aux mesures actuelles [32]. Enfin la diversité des modèles et des signatures possibles présentent encore de nombreuses opportunités de découvertes qu'il faut saisir.

6 Conclusion

Une discussion sur les opportunités offertes par le HL-LHC pour la physique du quark top a été présentée dans ce document. Le HL-LHC permettra clairement de repousser les limites de la connaissance du modèle standard grâce au quark top, voire la découverte de nouvelle physique dans ce secteur. Comme dans le passé, les passerelles naturelles entre les différentes facettes de la physique du quark top devraient en favoriser les progrès. Les groupes français expérimentaux et théoriciens sont impliqués sur la plupart des thématiques discutées dans ce document et, fort de leur expérience, sont amenés à participer pleinement à ces analyses, s'ils en ont les moyens. Au delà du HL-LHC, les potentiels futurs collisionneurs électron-positron, pourvu que leur énergie soit suffisante, offrent des opportunités très complémentaires aux analyses en collision hadronique dans le secteur du quark top en particulier pour les mesures de très grande précision des propriétés du quark top (et l'interprétation EFT associée), la production $t\bar{t}$ électrofaible, la mesure précise de la masse du quark top, ...

Références

- [1] P. Azzi et al. Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC. 2019.
- [2] Juan A. Aguilar-Saavedra, Benjamin Fuks, and Michelangelo L. Mangano. Pinning down top dipole moments with ultra-boosted tops. *Phys. Rev.*, D91 :094021, 2015.
- [3] CMS Collaboration. Projection of measurements of differential $t\bar{t}$ production cross sections in the e/u +jets channels in pp collisions at the HL-LHC. 2018.
- [4] ATLAS Collaboration. Prospects for measurement of the top quark mass using $t\bar{t}$ events with $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ decays with the upgraded ATLAS detector at the High Luminosity LHC. 2018.
- [5] CMS Collaboration. Measurement of top quark pair production in association with a Z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. 2019.
- [6] ATLAS Collaboration. Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. *Phys. Rev.*, D99(7) :072009, 2019.
- [7] CMS Collaboration. Measurement of the associated production of a single top quark and a Z boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Phys. Lett.*, B779 :358–384, 2018.
- [8] ATLAS Collaboration. Measurement of the production cross-section of a single top quark in association with a Z boson in proton–proton collisions at 13 TeV with the ATLAS detector. *Phys. Lett.*, B780 :557–577, 2018.
- [9] CMS Collaboration. Measurement of the semileptonic $t\bar{t} + \gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *JHEP*, 10 :006, 2017.
- [10] ATLAS Collaboration. Measurements of inclusive and differential fiducial cross-sections of $t\bar{t}\gamma$ production in leptonic final states at $\sqrt{s} = 13$ TeV in ATLAS. *Eur. Phys. J.*, C79(5) :382, 2019.
- [11] ATLAS Collaboration. Search for four-top-quark production in the single-lepton and opposite-sign dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. *Phys. Rev.*, D99(5) :052009, 2019.
- [12] CMS Collaboration. Search for the Production of Four Top Quarks in the Single-Lepton and Opposite-Sign Dilepton Final States in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. 2019.
- [13] CMS Collaboration. Search for production of four top quarks in final states with same-sign or multiple leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. 2019.
- [14] CMS Collaboration. Observation of $t\bar{t}H$ production. *Phys. Rev. Lett.*, 120(23) :231801, 2018.
- [15] ATLAS Collaboration. Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector. *Phys. Lett.*, B784 :173–191, 2018.
- [16] CMS Collaboration. Search for associated production of a Higgs boson and a single top quark in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Phys. Rev.*, D99(9) :092005, 2019.

- [17] ATLAS Collaboration. HL-LHC prospects for the measurement of the Standard Model four-top-quark production cross-section. Technical Report ATL-PHYS-PUB-2018-047, CERN, Geneva, Dec 2018.
- [18] CMS Collaboration. Projections of sensitivities for tttt production at HL-LHC and HE-LHC. Technical Report CMS-PAS-FTR-18-031, CERN, Geneva, 1900.
- [19] ATLAS Collaboration. Projections for measurements of Higgs boson cross sections, branching ratios, coupling parameters and mass with the ATLAS detector at the HL-LHC. Technical Report ATL-PHYS-PUB-2018-054, CERN, Geneva, Dec 2018.
- [20] CMS Collaboration. Sensitivity projections for Higgs boson properties measurements at the HL-LHC. Technical Report CMS-PAS-FTR-18-011, CERN, Geneva, 2018.
- [21] D. Barducci et al. Interpreting top-quark LHC measurements in the standard-model effective field theory. 2018.
- [22] Frédéric Déliot, Miguel C. N. Fiolhais, and António Onofre. Top quark anomalous couplings at the high-luminosity phase of the lhc. *Modern Physics Letters A*, 34(18) :1950142, Jun 2019.
- [23] I. Brivio, S. Bruggisser, F. Maltoni, R. Moutafis, T. Plehn, E. Vryonidou, S. Westhoff, and C. Zhang. O new physics, where art thou? a global search in the top sector, 2019.
- [24] Andy Buckley, Christoph Englert, James Ferrando, David J. Miller, Liam Moore, Michael Russell, and Chris D. White. Constraining top quark effective theory in the lhc run ii era. *Journal of High Energy Physics*, 2016(4) :1–32, Apr 2016.
- [25] Andy Buckley, Christoph Englert, James Ferrando, David J. Miller, Liam Moore, Michael Russell, and Chris D. White. Global fit of top quark effective theory to data. *Physical Review D*, 92(9), Nov 2015.
- [26] Elizabeth E. Jenkins, Aneesh V. Manohar, and Michael Trott. Renormalization Group Evolution of the Standard Model Dimension Six Operators I : Formalism and lambda Dependence. *JHEP*, 10 :087, 2013.
- [27] Elizabeth E. Jenkins, Aneesh V. Manohar, and Michael Trott. Renormalization Group Evolution of the Standard Model Dimension Six Operators II : Yukawa Dependence. *JHEP*, 01 :035, 2014.
- [28] Rodrigo Alonso, Elizabeth E. Jenkins, Aneesh V. Manohar, and Michael Trott. Renormalization Group Evolution of the Standard Model Dimension Six Operators III : Gauge Coupling Dependence and Phenomenology. *JHEP*, 04 :159, 2014.
- [29] Stefano Colucci, Benjamin Fuks, Federica Giacchino, Laura Lopez Honorez, Michel H. G. Tytgat, and Jérôme Vandecasteele. Top-philic Vector-Like Portal to Scalar Dark Matter. *Phys. Rev.*, D98 :035002, 2018.
- [30] ATLAS Collaboration. ATLAS sensitivity to top squark pair production at the HL-LHC. 2018.
- [31] CMS Collaboration. Search for ttbar resonances at the HL-LHC and HE-LHC with the Phase-2 CMS detector. 2018.
- [32] Xabier Cid Vidal et al. Beyond the Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC. 2018.