



# Résumé de la thèse

Le mécanisme de génération de masses des neutrinos, la nature de la matière noire et l'origine de l'asymétrie baryonique de l'Univers sont les trois questions les plus pressantes dans la physique moderne des astroparticules, qui exigent l'introduction d'une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard. D'abord introduits pour tenir compte de l'observation que les neutrinos sont massifs et se mélangent, les fermions stériles ont montré un fort potentiel en fournissant une solution simultanée aux problèmes observationnels cités ci-dessus.

L'expression "fermions stériles" indique génériquement des champs fermioniques singlets de jauge, qui sont capables d'interagir avec les bosons de jauge seulement à travers des termes de mélange. Ils sont absents dans le Modèle Standard de la Physique des Particules. La définition générale des fermions stériles englobe des expressions plus particulières, comme neutrino droit ou neutrino stérile. Le terme *fermion stérile* est utilisé dans cette thèse dans son sens le plus général signalé ci-dessus ; *neutrino droit* est utilisé pour faire référence à un champ analogue aux neutrinos gauches standards, mais avec une chiralité opposée, résultant en un singlet du groupe de jauge du modèle standard. Enfin, les termes *neutrino stérile* et *lourd* sont utilisés pour référer à un état propre de masse fermionique, résultant de la diagonalisation d'une matrice de masse générale qui contient dans un sous-bloc la matrice de masse des neutrino actifs.

Malgré le fait qu'ils soient singlets de jauge, la simple hypothèse de l'existence des neutrinos droits -et, plus généralement, des fermions stériles- peut fournir une solution minimale et élégante aux trois problèmes observationnels du modèle standard, c'est à dire l'origine des masses et du mélange des neutrinos, la nature

de la matière noire et l'origine de l'asymétrie baryonique de l'Univers.

Les expériences d'oscillation des neutrinos ont établi une preuve claire de l'existence de deux fréquences d'oscillation ( $\Delta m_{ij}^2$ ) - ce qui signifie qu'au moins deux neutrinos (actifs) sont massifs - ainsi que la structure de base d'une matrice de mélange à 3-saveur leptoniques. En contraste avec les énormes progrès expérimentaux dans la détermination des paramètres d'oscillation des neutrinos, nombreuses sont les questions qui restent sans réponse concernant les propriétés des neutrinos, comme par exemple la nature des neutrino (de Majorana ou de Dirac), l'échelle absolue de masse et la hiérarchie du spectre de masse des neutrino. Enfin, et surtout, le mécanisme de génération de masse des neutrinos reste à être dévoilé, ainsi que la nouvelle physique et les échelles auxquelles elle se manifeste. Afin de tenir compte des masses et des mélanges des neutrinos, de nombreuses extensions du modèle standard supposent l'existence des fermions stériles. En tant que singlets de jauge, ces particules peuvent être stables sur des échelles de temps cosmologiques si leur mélange avec les neutrinos actifs est suffisamment petit, et si ils sont massifs ils peuvent contribuer à la composante de la matière noire de l'Univers. Ils peuvent en outre être couplés aux champs du modèle standard à travers des termes de couplage de Yukawa et peuvent jouer un rôle importante dans l'Univers primordial, notamment dans le mécanisme de baryogenèse via leptogenèse.

Une caractéristique importante des fermions stériles est le fait que, étant singlets de jauge, ils peuvent avoir un terme de masse de Majorana, terme qui est absent dans le Lagrangian du modèle standard. Un terme de masse de Majorana viole de deux unités toutes les charges internes d'un fermion, et est donc lié à des champs qui sont intrinsèquement neutres, ou à des champs qui sont chargés sous un groupe de jauge nouveau et inconnu, qui est brisé par un secteur de Higgs également nouveau et inconnu.

Les fermions stériles sont activement recherchés dans des expériences de laboratoire mais, jusqu'à présent, seulement des limites supérieures sur le mélange

avec les neutrinos actifs ont été établies. En particulier ils existent seulement des limites inférieures sur leur échelle de masse, qui peut varier entre quelques eV jusqu'à l'échelle de Planck. Par exemple, dans la plus simple des réalisations du mécanisme du Seesaw (Type I), afin de tenir compte des valeurs de masses des neutrino actifs et en considérant des couplages de Yukawa naturels, l'échelle typique des particules supplémentaires est en général très élevée, potentiellement près de l'échelle de l'unification des couplages de jauge (GUT), ce qui implique que les tests expérimentaux directs de l'hypothèse du Seesaw sont impossibles. En revanche, les mécanismes de Seesaw à basse échelle de nouvelle physique, dans lesquels des fermions stériles de masse autour de l'échelle du TeV -ou même en dessous- sont ajoutés au modèle standard, sont très attractifs du point de vue phénoménologique, parce que les nouveaux états peuvent être produits dans les collisionneurs et/ou dans des expériences à basse énergie (haute intensité), et leur contribution aux processus physiques pourrait se révéler importante.

Dans ce travail, nous étudions les implications de l'existence des fermions stériles en physique des particules et en cosmologie. Tous les mécanismes de génération de masses des neutrinos doivent tenir compte de la petitesse de cette échelle de masse par rapport à l'échelle électrofaible. Dans cette thèse, nous nous sommes concentrés sur l'analyse des mécanismes caractérisés par une symétrie  $B - L$  approximative, en raison de leur potentiel de rendre compte des masses des neutrinos observées avec une nouvelle échelle de physique relativement basse,  $\mathcal{O}(\text{TeV})$  ou moins, ce qui les rend testables dans les installations expérimentales présentes et futures. Nous montrons comment l'ajout de fermions stériles au contenu du modèle standard peut fournir une solution pour chacun des problèmes observationnels du modèle standard (origine des masses des neutrinos, matière noire et l'asymétrie baryonique de l'Univers). Nous abordons également l'impact de ces nouveaux états dans les observables de laboratoire, comme les désintégrations de bosons vectoriels qui violent la saveur leptonique, et leur impact sur des fits globaux des données de

précision électrofaibles.

Dans [1], nous avons proposé une approche méthodologique pour identifier les réalisations du mécanisme dit de l’Inverse Seesaw (ISS) les plus minimaux, répondant à toutes les contraintes phénoménologiques. En ajoutant des fermions stériles au modèle standard (neutrinos droits,  $\nu_R$  et singlets de jauge,  $s$ ) dont le nombre de générations n’est pas fixé ( $\#\nu_R$  pas nécessairement égale à  $\#s$ ), nous avons montré qu’il est possible de construire plusieurs réalisations distinctes de l’ISS qui peuvent reproduire correctement le spectre de masse des neutrinos ainsi que le mélange observé. Notre analyse générale a montré que le spectre de masse d’une réalisation de l’ISS est caractérisé par 2 ou 3 différentes échelles de masse, celle correspondant aux neutrinos actifs légers, celle correspondant aux états lourds, et une échelle intermédiaire associée à  $\#s - \#\nu_R$  états stériles (qui apparaît uniquement lorsque que  $\#s > \#\nu_R$ ). L’approche que nous avons suivie était basée sur la théorie des perturbations indépendantes du temps pour les opérateurs linéaires, ce qui nous a permis de diagonaliser analytiquement la matrice de masse des neutrinos. On peut ainsi obtenir des expressions analytiques pour les états propres des neutrinos et leurs masses associées comme un développement en série des petits paramètres qui violent le nombre leptonique total. En conséquence, nous avons pu identifier deux classes de réalisations de l’ISS vraiment minimales qui peuvent expliquer correctement les données de neutrinos. La première, appelée ici modèle ISS(2,2), correspond au modèle standard étendu avec deux neutrinos droits et deux états stériles. Il conduit à un système de mélange à 3-saveur, et ne nécessite que deux échelles (l’une correspondant à la masse des neutrinos légers, et l’autre correspondant à la masse des neutrinos droits). Bien que considérablement finement ajustée, cette configuration de l’ISS se conforme à toutes les contraintes phénoménologiques, et conduit systématiquement à une hiérarchie normale pour les neutrinos légers. Le modèle pourrait marginalement donner lieu à une masse effective pour double désintégration sans émission des neutrinos ( $0\nu 2\beta$ ) qui est

à portée expérimentale, mais toutes ces régions se révèlent être exclues par les contraintes actuelles de laboratoire et de MEG dont la recherche porte sur la désintégration rare  $\mu \rightarrow e\gamma$ . La seconde, nommée réalisation ISS(2,3), correspond à une extension du modèle standard avec deux neutrinos droits et trois états stériles. Cette classe permet de générer les deux hiérarchies pour le spectre de masse des neutrinos légers (bien que la hiérarchie inverse est à peine permise), dans un schéma de mélange à  $3 + 1$ -saveurs. Concernant la désintégration  $0\nu 2\beta$ , l'ISS(2,3) conduit à des masses effectives à proximité de l'actuel limite expérimentale et dans la sensibilité future des expériences. La masse du neutrino stérile léger peut varier dans un grand intervalle : en fonction de son régime, l'ISS(2,3) peut offrir une explication de l'anomalie de réacteurs (dans ce cas, l'état essentiellement stérile le plus léger a une masse  $m_4 \sim \text{eV}$ ), ou peut constituer un candidat viable pour la matière noire "chaude" (pour une masse de l'état stérile léger autour du keV). Nous avons mis l'accent sur la détermination des réalisations du mécanisme ISS vraiment minimales. Notre approche peut être facilement généralisée pour sonder la viabilité phénoménologique et l'impact de toute les extensions ISS du modèle standard (pour un nombre arbitraire de champs droits  $\nu_R$  et de fermions stériles  $s$ ).

La viabilité de l'hypothèse de matière noire dans l'ISS(2,3) a ensuite été analysée dans [2], où nous avons considéré la possibilité de traiter simultanément le problème de la matière noire et le mécanisme de génération de masse des neutrinos. Nous avons effectué une analyse complète, en tenant compte de toutes les contraintes phénoménologiques et cosmologiques et des différentes possibilités de spectres de masse des neutrinos lourds. Nous avons constaté que dans la plupart de l'espace des paramètres, la matière noire ne peut être produite que par des transitions actives-stériles selon le mécanisme de production Dodelson-Widrow (DW), ce qui représente, dans le cas le plus favorable, au plus  $\sim 43\%$  de l'abondance totale de matière noire, sans conflit avec les contraintes d'observation astrophysiques et

de laboratoire. Cette situation peut être améliorée pour deux choix spécifiques du spectre des neutrinos de pseudo-Dirac lourds. Tout d’abord, on peut considérer le cas de neutrinos de pseudo-Dirac modérément légers, soit  $\sim 1 - 10$  GeV. Ces états peuvent dominer la densité d’énergie de l’Univers et produire l’entropie nécessaire au moment de leur désintégration, en modifiant l’impact de la matière noire sur la formation des structures cosmologiques. Cependant, les contraintes de détection indirecte de matière noire sont encore trop sévères et la fraction de matière noire permise est seulement augmentée jusqu’à  $\sim 50\%$ . La deuxième possibilité est basée sur des paires de pseudo-Dirac relativement lourdes,  $\sim 130$  GeV – 1 TeV, qui peuvent produire la quantité correcte de matière noire par leur désintégration. Dans ce type de configuration, il est également possible pour l’ISS(2,3) d’expliquer la ligne à 3.5 keV rapportée dans des spectres d’amas de galaxies. Dans la dernière partie de l’analyse, nous avons proposé une extension minimale du modèle ISS(2,3) avec l’ajout d’un singlet scalaire (à l’origine de la violation du nombre leptonique par les masses des champs stériles) qui permet d’obtenir la densité relique correcte de matière noire pour des valeurs génériques des masses des neutrinos de pseudo-Dirac. Ces derniers peuvent toujours participer, à divers niveaux, au mécanisme de production de la matière noire.

Afin de répondre à la dernière question, qui est la baryogenèse, nous avons proposé dans [3] une extension minimale du modèle standard correspondant à l’ajout de deux fermions stériles avec des nombres leptoniques opposés, qui forment une configuration avec une conservation approximative du nombre leptonique. Les nouveaux champs formant une paire de pseudo-Dirac sont couplés aux leptons actifs à travers des termes de mélange. La petite différence de masse au sein de cette paire, ainsi que la petitesse des masses des neutrinos actifs, sont toutes les deux causées par des termes qui violent le nombre leptonique de deux unités,  $\Delta L = 2$ , correspondant à un mécanisme d’ISS étendu par un terme de masse du mécanisme du Linear Seesaw (LSS). L’objectif principal était d’étudier la faisabilité d’avoir si-

multanément un mécanisme de Seesaw à très basse échelle - généralement à  $1 - 10$  GeV - qui génère les masses et les mélanges observés des neutrinos ainsi qu'un mécanisme efficace de leptogenèse grâce à des oscillations de neutrinos à l'échelle électrofaible, dans un cadre "naturel" et minimal. Ici l'état de pseudo-Dirac assure naturellement une leptogenèse très efficace en raison de sa petite division de masse. Nous avons également examiné le mécanisme (pur) ISS dans lequel plusieurs états de pseudo-Dirac apparaissent naturellement. Nous avons effectué une analyse analytique et numérique complète en considérant les deux hiérarchies de neutrinos de masse, normale (NH) et inversée (IH), pour le spectre de masse des neutrinos, et en explorant les différents régimes de suppression (washout) de l'asymétrie baryonique de l'Univers. À cette fin, nous avons mis en œuvre et résolu un système d'équations d'évolution de Boltzmann ; nous avons en outre dérivé une expression analytique pour l'asymétrie baryonique, fournissant une meilleure compréhension des solutions. Nos études révèlent que notre scénario (modèle standard étendu avec deux neutrinos droits, avec deux sources de violation du nombre leptonique de 2 unités) est efficace pour atteindre une leptogenèse correcte à travers des oscillations entre les deux états essentiellement stériles, tout en respectant toutes les données et contraintes disponibles. Notre expression analytique est valable dans le régime de faible washout et est en accord avec les résultats obtenus par la résolution numérique du système d'équations de Boltzmann. Dans le régime de fort washout, qui est numériquement très exigeant, nous avons néanmoins prouvé que notre scénario peut fournir une leptogenèse efficace, avec des valeurs d'angles de mélange actif-stérile qui peuvent être sondées par les installations futures telles que SHiP. Nous avons mené la même étude pour le pur ISS, dans ce cas, nous avons constaté que la différence de masse entre les états dans les paires de pseudo-Dirac est beaucoup trop grande pour permettre une leptogenèse efficace dans le régime de faible washout tout en tenant compte des données de neutrinos. Cette analyse n'est cependant pas concluante pour rejeter le scénario ISS puisqu'il repose sur la

condition (forte) que tous les couplages de Yukawa sont en dessous de la valeur d'équilibre thermique. Une analyse complète de l'ensemble de l'espace des paramètres dans ce cas est numériquement très exigeante, et fera l'objet d'une étude ultérieure.

Dans [4] nous avons discuté de l'augmentation des rapport de branchement pour les désintégrations des bosons vectoriels qui violent le saveur leptonique,  $B(V \rightarrow \ell_\alpha \ell_\beta)$ , avec  $V \in \{\phi, \psi^{(n)}, \Upsilon^{(n)}, Z\}$ , induites par un mélange entre les neutrinos actifs et stériles. Cette augmentation croît avec la masse des neutrinos stériles lourds, comme on peut le voir à partir de la dépendance de masse des coefficients de Wilson que nous avons explicitement calculés. Nous constatons que les diagrammes les plus importants qui donnent lieu à la désintégrations de bosons vectoriels qui violent le saveur leptonique sont ceux qui contiennent le vertex  $Z\nu\nu$ , ce qui suggère une croissance régulière avec l'augmentation de la masse du neutrino stérile. Cependant, dans l'amplitude physique la région de très grande masse du neutrino stérile est supprimée quand le découplage a lieu, c'est à dire quand le mélange entre les neutrinos stériles et actifs diminue rapidement. Nous avons illustré l'augmentation de  $B(V \rightarrow \ell_\alpha \ell_\beta)$  pour deux scénarios : un modèle avec un neutrino stérile qui imite l'effet d'une extension générique du modèle standard, y compris avec fermions stériles lourds, et dans une réalisation minimale de l'ISS compatible avec les observations actuelles (qui est l'ISS (2,3)). Nos résultats pour les limites supérieures sur  $B(V \rightarrow \ell_\alpha \ell_\beta)$  [ $V \in \{\phi, J/\psi, \psi(2S), \Upsilon(1S), \Upsilon(2S), \Upsilon(3S), Z\}$ ] sont toujours considérablement plus petites que les limites expérimentales actuelles (quand elles sont disponibles), mais cette situation pourrait changer dans l'avenir, quand la recherche expérimentale sera menée à Belle II, BESIII, LHC, et on l'espère, à FCC-ee (TLEP). Si l'une des désintégrations étudiées est observée et se révèle avoir une rapport de branchement plus grand que les limites supérieures signalées, alors des sources de violation du saveur leptonique autre que ceux qui viennent du mélange avec les neutrinos stériles lourds doivent être considérées.

Enfin, dans [5], nous avons analysé en détail l'importance des corrections à une boucle lors de la dérivation des contraintes sur le mélange entre les états propres de saveur du modèle standard et les nouveaux neutrinos lourds introduits par les mécanismes Seesaw. Bien naïvement l'attente est que les corrections radiatives concernant ces nouveaux états ne seraient pas importantes compte tenu de leurs interactions plus faible, en raison de leur nature en tant que singlets et, a priori, en raison de leur mélanges supprimés avec le neutrinos du modèle standard, les modèles Seesaw peuvent permettre des couplages de Yukawa significatifs, même de l'ordre de un. Ainsi, des corrections de boucle concernant les neutrinos lourds et le boson de Higgs ou les Goldstones des bosons W et Z, impliquent la dépendance par les couplages de Yukawa et peuvent en effet être importantes, comme le montre la Réf. [6]. Dans ce travail, on a démontré que pour les mécanismes de Seesaw caractérisés par de grandes valeurs de couplage de Yukawa et une basse échelle de nouvelle physique (électrofaible), la contribution des nouveaux degrés de liberté aux paramètres obliques pourrait en effet devenir aussi importante que les effets au niveau en arbre dans certaines régions de l'espace des paramètres. En outre, il a été constaté que plusieurs observables partageaient une dépendance commune entre le paramètre  $T$  et la contribution au niveau en arbre, découlant de la modification par ces effets de la désintégration du muon à travers laquelle la constante  $G_F$  est mesurée et ensuite utilisée comme entrée pour d'autres observables. Ainsi, une annulation partielle entre les contributions du niveau arbre et boucle peut relaxer considérablement les limites dérivées de ces observables. En effet, dans Réf. [6] un bon fit avec un mélange important a été obtenu, dans lequel les limites les plus strictes ont été relaxées grâce à cette annulation partielle, alors que les tensions permanentes entre le modèle standard et quelques observables, comme la largeur invisible du  $Z$ , ont été allégées. Nous avons étendu l'analyse effectuée dans Réf. [6] afin d'inclure également des corrections de vertex et non seulement les paramètres obliques, puisque les contributions importantes des couplages de

Yukawa à grande valeur ne disparaissent pas dans le limite des valeurs des masses des neutrinos légers et des lepton chargés à zéro. Nous avons constaté que, dans l'ensemble, les paramètres obliques ont tendance à dominer les autres corrections de boucle et leur contribution pourrait être importante dans une partie de l'espace des paramètres. Cependant, notre analyse Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC) ne montre pas de préférence pour des larges corrections à une boucle et l'annulation partielle trouvée dans [6] ne se reproduit pas. Nous avons donc étudié en détail les valeurs du paramètre  $T$  préférées par les données et par le résultats de notre MCMC et constaté qu'elles étaient non seulement négligeables, mais toujours positives dans nos résultats, tandis que, parce que l'annulation entre les contributions au niveau arbre et le paramètre  $T$  se produit, ce dernier doit avoir des valeurs négatives. Nous avons étudié ainsi les conditions nécessaires pour des valeurs négatives importantes du paramètre  $T$  et réalisé que, non seulement des échelles basses du Seesaw et des couplages de Yukawa larges sont nécessaires, mais aussi de grandes violations du nombre  $B - L$ . Nous avons ensuite identifié les seuls paramètres dans la matrice de masse avec trois neutrinos lourds supplémentaires qui pourrait fournir la violation nécessaire de  $B - L$  requise pour que le paramètre  $T$  soit négatif et compétitif avec les contributions au niveau arbre, tout en gardant la masse des neutrinos dans leurs limites actuelles, malgré les grandes valeurs des couplages de Yukawa, la basse échelle du mécanisme de Seesaw et la perte de la protection par la symétrie  $B - L$ . Finalement, nous avons étudié la façon dont ces paramètres contribueraient à la masse des neutrinos au niveau boucle et nous avons constaté que, pour la taille de  $T$  nécessaire pour que la cancellation ait lieu, les masses des neutrino légers seraient de l'ordre de 10 keV à 100 MeV, excluant effectivement cette possibilité. Nous concluons que les corrections au niveau de boucle ne sont importantes que dans une petite fraction de l'espace des paramètres du Seesaw, caractérisée par de grandes valeurs des couplages de Yukawa et à basse échelle de la nouvelle physique, et que ces corrections ont tendance à renforcer

les contributions du niveau arbre à moins que des grandes violations de  $B - L$  soient présentes. Si le nombre  $B - L$  est approximativement conservé, les données préfèrent ainsi les régions de l'espace des paramètres où ces boucles ne sont pas pertinentes. D'autre part, si  $B - L$  est fortement violé, l'annulation discutée dans Réf. [6] peut en effet fournir un bon fit des données expérimentales avec un rôle très important des contributions de boucle. Cependant, ces grandes violations de  $B - L$  conduisent aussi à de trop grandes contributions aux masses des neutrinos légers au niveau de boucle, donc cette possibilité est exclue. Nous concluons donc que les corrections de boucle peuvent en toute sécurité être négligées dans les analyses des mélanges de neutrinos lourds dans les mécanismes Seesaw. Enfin, nous avons également obtenu des contraintes pertinentes sur ces mélanges lorsque  $B - L$  est une symétrie approximative, de manière à récupérer les masses et les mélanges de neutrinos observés dans les expériences d'oscillation. Nous trouvons une légère ( $\sim 90\%$  CL) préférence pour un angle de mélange différent de zéro avec la saveur  $e$  ( $\theta_e$ ), donnant le meilleur fit à  $\theta_e = 0.034_{-0.014}^{+0.009}$  où  $\theta_e = 0.035_{-0.014}^{+0.009}$  pour la hiérarchie de masse normale et inversée, respectivement. Dans le cas de la hiérarchie normale, cette préférence induit également un angle de mélange non nul avec la saveur  $\tau$ ,  $\theta_\tau = 0.018_{-0.013}^{+0.019}$  de manière à récupérer les données correctes sur la masse des neutrinos et leur mélange. D'autre part, un petit mélange avec la saveur  $\mu$  est préférable de façon à maintenir  $\mu \rightarrow e\gamma$  à des niveaux acceptables en présence de  $\theta_e$  différent de zéro. Au niveau de  $2\sigma$  nous trouvons les limites supérieures suivantes :  $\theta_e < 0.051$ ,  $\theta_\mu < 0.037$  et  $\theta_\tau < 0.049$ .

# Bibliographie

- [1] A. Abada and M. Lucente, “Looking for the minimal inverse seesaw realisation,” *Nucl. Phys.* **B885** (2014) 651–678, [arXiv:1401.1507 \[hep-ph\]](#).
- [2] A. Abada, G. Arcadi, and M. Lucente, “Dark Matter in the minimal Inverse Seesaw mechanism,” *JCAP* **1410** (2014) 001, [arXiv:1406.6556 \[hep-ph\]](#).
- [3] A. Abada, G. Arcadi, V. Domcke, and M. Lucente, “Lepton number violation as a key to low-scale leptogenesis,” [arXiv:1507.06215 \[hep-ph\]](#).
- [4] A. Abada, D. Bečirević, M. Lucente, and O. Sumensari, “Lepton flavor violating decays of vector quarkonia and of the  $Z$  boson,” *Phys. Rev.* **D91** no. 11, (2015) 113013, [arXiv:1503.04159 \[hep-ph\]](#).
- [5] E. Fernandez-Martinez, J. Hernandez-Garcia, J. Lopez-Pavon, and M. Lucente, “Loop level constraints on Seesaw neutrino mixing,” [arXiv:1508.03051 \[hep-ph\]](#).
- [6] E. Akhmedov, A. Kartavtsev, M. Lindner, L. Michaels, and J. Smirnov, “Improving Electro-Weak Fits with TeV-scale Sterile Neutrinos,” *JHEP* **1305** (2013) 081, [arXiv:1302.1872 \[hep-ph\]](#).