

# GDR Terascale

## Recherche théorique et expérimentale de la nouvelle physique à l'échelle du TeV

Programme de recherche

Octobre 2008

Mettre en évidence et étudier le boson scalaire de Higgs, la supersymétrie, les dimensions supplémentaires ou d'autres extensions fortement motivées du Modèle Standard des particules élémentaires est la thématique qui guidera le GDR Terascale. Pour comprendre et tester la théorie fondamentale décrivant la matière et ses interactions, la combinaison de toutes les approches est envisagée: approches théoriques, phénoménologiques et expérimentales, ainsi que des études auprès des accélérateurs à haute énergie ou hors accélérateurs. Le GDR Terascale entend exploiter au mieux l'analyse des nouvelles données expérimentales attendues dans la période 2009-2012: les données du Tevatron et les premières données du LHC ainsi que les progrès importants attendus dans la sensibilité des recherches directes et indirectes de matière noire et les mesures de précision des paramètres cosmologiques. Le GDR Terascale aura pour ambition de fédérer les communautés françaises travaillant sur le sujet, mais il aura une ouverture informelle sur le reste du monde avec, en particulier, la participation d'experts Européens.

# 1 Introduction

Ce projet est une contribution aux efforts soutenus qui sont nécessaires pour étudier la phénoménologie des particules élémentaires auprès des collisionneurs à très haute énergie et dans les expériences d'astroparticules. Ces expériences peuvent mener à de grandes avancées dans la compréhension des interactions fondamentales de la nature actuellement décrites par le Modèle Standard, le cadre qui unifie les interactions électromagnétique, faible et forte. Ce modèle a passé avec succès tous les tests expérimentaux faits à ce jour, à l'exception d'un de ses piliers, le mécanisme de brisure spontanée de la symétrie électrofaible qui génère les masses des particules. Il reste donc à mettre en évidence la particule scalaire de Higgs, témoin et relique de cette brisure. C'est l'objectif premier du Large Hadron Collider (LHC) du CERN dont le démarrage effectif est imminent.

Toutefois, divers arguments théoriques font que le Modèle Standard est unanimement considéré comme étant simplement une manifestation effective – valable aux échelles d'énergie actuellement accessibles – d'une théorie plus fondamentale englobant éventuellement, après l'unification effective des couplages des trois interactions de jauge, la quatrième interaction fondamentale de la nature, la gravitation, et expliquant la matière noire ou masse manquante de l'univers qui requiert l'existence d'une nouvelle particule stable et assez massive. Parmi les candidats favorisés pour cette nouvelle physique au-delà du Modèle Standard, figurent en première place la supersymétrie et les dimensions supplémentaires qui pourraient se manifester à l'échelle du TeV, accessible au LHC. La plupart de ces théories prédisent l'existence d'une multitude de nouvelles particules élémentaires dont la découverte ferait date dans l'histoire des sciences et dont l'étude détaillée des propriétés fondamentales sera un enjeu majeur de la physique des particules et à laquelle il faut s'atteler dès maintenant.

Le présent projet permettra de rassembler et de renforcer la majeure partie des communautés en France cherchant à mettre en évidence et à étudier les manifestations de la nouvelle physique au-delà du Modèle Standard. Que ce soit par une approche théorique, phénoménologique, expérimentale sur accélérateurs ou hors accélérateurs, ou plus important encore, par la combinaison de toutes ces approches, notre projet entend exploiter au mieux l'analyse des nouvelles données attendues dans la période 2009–2012: données provenant du Tevatron, mais aussi et surtout, les premières données du LHC en 2009, ainsi que les progrès importants anticipés dans la sensibilité des recherches directes et indirectes de matière noire. Nous participerons également à l'évaluation du potentiel de nouvelles expériences telles que le futur collisionneur international électron-positron ILC.

L'objectif principal de notre groupement de recherche est tout d'abord d'affiner les prédictions des divers modèles théoriques existants au-delà du Modèle Standard dans un contexte où les scénarios peuvent être très différents, les modèles effectifs avoir un grand nombre de paramètres libres et les aspects à prendre en compte multiples et variés. Il faudra ensuite étudier de manière détaillée la phénoménologie de ces modèles: détermination des masses et des couplages des nouvelles particules prédites, calcul des sections efficaces de production et des taux de désintégration de ces particules, détermination de la densité cosmologique et des taux de détection des candidats à la matière noire, etc... Un volet important de notre travail consistera à élaborer, ou à améliorer quand ils existent déjà, et à tester avec des simulations rapides dans certains scénarios, les logiciels et codes de simulation qui serviront d'outils d'analyse aux expérimentateurs. La réalisation de ces objectifs requiert

une étroite collaboration entre les théoriciens et les expérimentateurs impliqués dans nos équipes.

## 2 Contexte scientifique

Au cours de ces quatre dernières décennies s'est édifiée et confirmée la théorie des particules élémentaires connue sous le nom de Modèle Standard (MS). Les constituants de la matière sont les quarks et les leptons, particules de spin  $\frac{1}{2}$  groupées en trois familles. Si l'on met à part la gravitation, leurs interactions, véhiculées par les bosons de jauge de spin-1, résultent de l'invariance par rapport aux transformations du groupe de symétrie de jauge  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ . La symétrie de couleur  $SU(3)_C$  est conservée et le gluon, médiateur de l'interaction forte associée, est de masse nulle. La symétrie électrofaible  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  est par contre spontanément brisée (laissant l'électromagnétisme comme seule symétrie résiduelle) et les bosons de jauge associés sont le photon de masse nulle, et les trois bosons vecteurs de l'interaction faible,  $W^\pm$  et  $Z$ , qui sont massifs.

La brisure spontanée de la symétrie électrofaible par laquelle la masse des bosons  $W^\pm$  et  $Z$ , ainsi que celle des fermions, est générée, est un pilier essentiel du modèle et, plus généralement, des théories modernes des interactions électrofaibles. Dans le MS, un seul doublet de champs scalaire est nécessaire pour briser la symétrie, donnant naissance à l'unique boson de Higgs de la théorie, témoin et relique de cette brisure. La découverte du boson de Higgs et la détermination de ses propriétés fondamentales via des mesures de précision seront le test le plus crucial du MS et sont le but majeur de toutes les expériences auprès des collisionneurs à haute énergie, présents et à venir. C'est, en particulier, l'objectif premier du Tevatron, du LHC dont le démarrage effectif est imminent et du futur collisionneur electron-positron ILC en projet.

Toutefois, demeure dans cette description de l'interaction électrofaible un problème fondamental, celui de hiérarchie ou de naturalité : au niveau quantique, il n'y a pas de mécanisme permettant à la masse du boson de Higgs de ne pas être du même ordre de grandeur que l'échelle de grande unification. Les théories supersymétriques, qui postulent l'existence d'un partenaire à toute particule connue, nous donnent une solution naturelle à ce problème : les corrections quantiques dominantes dues aux particules standards et supersymétriques s'annulent entre elles automatiquement. C'est l'une des raisons majeures – avec l'unification des couplages de jauge et la possibilité d'expliquer naturellement le problème de la matière noire – pour laquelle la supersymétrie à l'échelle électrofaible a été introduite en physique des particules. Dans la version minimale, deux doublets de champs scalaires sont nécessaires, donnant naissance à un spectre de Higgs plus élargi que dans le cas standard.

La mise en évidence de la supersymétrie est l'autre principale motivation des collisionneurs à haute énergie. Celle ci consisterait, en premier lieu, à produire directement une multitude de nouvelles particules : les scalaires du secteur de Higgs et les partenaires supersymétriques scalaires et fermioniques des particules standard. Cependant, il sera aussi nécessaire de mesurer certains paramètres fondamentaux et de vérifier les relations entre couplages et masses imposées par la supersymétrie. Ceci permettra de reconstruire le Lagrangien à basse énergie, ce qui lèverait le voile sur la structure de la physique sous-jacente à l'échelle de grande unification et la détermination du mécanisme de brisure de la super-

symétrie. En effet, plusieurs mécanismes de brisure ont été proposés, ayant chacun des caractéristiques de spectre spécifiques découlant du mode de médiation de la brisure aux partenaires supersymétriques: via la gravitation, une interaction de jauge ou une anomalie. La capacité de les discriminer expérimentalement sera une question primordiale.

Cet aspect requiert les analyses les plus modèles-indépendantes possibles (qui, en pratique, se font dans le cadre de modèles effectifs tels que le Modèle Standard Supersymétrique Minimal, MSSM, et ses diverses extensions qui ont un grand nombre de paramètres libres) et la prise en compte d'aspects nombreux et variés (dans les modèles supersymétriques contraints, par exemple, l'évolution des paramètres entre l'échelle électrofaible et celle de grande unification, la brisure radiative de la symétrie électrofaible, les effets des corrections quantiques, etc.). De surcroît, il est nécessaire d'étudier le plus grand nombre possible de processus de production et de désintégration des particules supersymétriques et des bosons de Higgs, en particulier les processus d'ordre supérieur, et la prise en compte des corrections quantiques qui peuvent dépendre fortement du modèle et dont les effets ne sont pas toujours entièrement maîtrisés.

Les modèles supersymétriques ont un candidat idéal pour la matière noire ou masse manquante de l'univers: le neutralino le plus léger, qui est une combinaison des partenaires supersymétriques des bosons de jauge et de Higgs neutres (même si d'autres candidats, comme le gravitino, sont possibles). Dans les modèles minimaux, c'est généralement la particule supersymétrique la plus légère: elle est non-baryonique, électriquement neutre, massive et, en vertu d'une symétrie discrète appelée R-parité, absolument stable. Un effort théorique important est à consacrer à l'estimation de la densité relique cosmologique de ces particules, densité inversement proportionnelle à la section efficace d'annihilation des neutralinos, ainsi qu'à l'étude des modes permettant leur détection directe (via leur interaction avec des noyaux) et indirecte (par exemple, sous forme de rayons gamma très énergétiques ou des neutrinos dus à leur annihilation dans le halo de notre galaxie et de galaxies proches) dans les expériences d'astroparticules. Les expériences astrophysiques de détection directe ou indirecte (au sol ou embarquées) de la matière noire seront complémentaires avec les recherches auprès des accélérateurs à haute énergie.

Au cours de ces dernières années est apparue une approche radicalement nouvelle du problème de hiérarchie, dans laquelle la masse de Planck elle-même est ramenée au voisinage de l'échelle électrofaible. Dans cette approche, la gravitation se propage dans des dimensions compactes supplémentaires, de sorte qu'ainsi diluée, elle apparaît faible dans nos trois dimensions d'espace habituelles. Les effets expérimentaux de ces dimensions supplémentaires seraient l'émission de gravitons de Kaluza-Klein, se manifestant dans nos trois dimensions sous la forme d'énergie manquante, ou l'échange de tels gravitons virtuels modifiant les sections efficaces des processus standards. Dans d'autres variétés de modèles à dimensions supplémentaires, les niveaux de Kaluza-Klein sont séparés de telle sorte que le graviton se manifeste sous forme de résonance étroite aux environs du TeV. Il est enfin possible, par exemple, de permettre aux bosons de jauge de se propager dans la ou les dimensions supplémentaires, ce qui modifierait à nouveau le comportement des sections efficaces des processus standards et conduirait à des récurrences de Kaluza-Klein de ces bosons de jauge.

Finalement, des extensions du MS autres que la supersymétrie ou les dimensions supplémentaires, comme les modèles à plusieurs doublets de Higgs, les théories de grande unifica-

tion, les modèles inspirés des interactions fortes (modèles little Higgs ou sans Higgs), etc., prédisent une multitude de nouvelles particules (bosons scalaires, fermions avec des nombres quantiques exotiques tels que les leptoquarks, nouveaux bosons de jauge neutres ou chargés, etc.) qui pourraient se manifester à l'échelle du TeV.

L'objectif principal du GDR Terascale est de faire le lien entre les divers modèles théoriques existants au-delà du MS et les différentes analyses expérimentales prévues auprès des collisionneurs et des expériences d'astroparticules. Il s'agit tout d'abord d'affiner les prédictions de ces modèles dans un contexte où les scénarios théoriques sont très variés comme discuté plus haut et les modèles effectifs – tels que le MSSM avec ou sans violation de CP ou avec un champ singlet supplémentaire – ont beaucoup de paramètres libres. Il faudra ensuite étudier de manière détaillée la phénoménologie de ces modèles: détermination du spectre et des propriétés de production et de désintégration des nouvelles particules prédites par les divers modèles, calcul de la densité cosmologique des candidats à la matière noire, etc... Tout ce programme doit se faire en étroite collaboration entre les expérimentateurs et les théoriciens du GDR Terascale. Une finalité supplémentaire est de développer des outils de calcul et d'analyse très performants pour les expériences auprès des collisionneurs et pour les expériences d'astroparticules de la nouvelle génération.

### 3 Thèmes et groupes de travail

Les activités seront organisées dans quatre groupes de travail, chacun de ces groupes traitant aussi bien des aspects expérimentaux que théoriques. Par conséquent il y aura au moins deux co-ordinateurs par groupe, un expérimentateur et un théoricien. Les groupes sont *Higgs et Supersymétrie*, *Alternatives à la supersymétrie* et *Matière noire*; le groupe additionnel *Méthodes et outils communs* (on utilisera aussi l'abréviation "Outils" par la suite), jouera un rôle spécial en tant que groupe transversal.

#### 3.1 Higgs et Supersymétrie

F. Maltoni (*UCL, Louvain*), J.-L. Kneur (*LPTA Montpellier*),  
R. Lafaye (*LAPP Annecy*), P. Verdier (*IPN Lyon*)

Ce groupe de travail se consacrera plus spécifiquement à faire le lien entre les différents modèles théoriques (existants, voire à venir) de la supersymétrie, et les différentes analyses expérimentales prévues auprès des collisionneurs. Comme mentionné dans les motivations générales, la grande diversité de modèles supersymétriques provient de l'ignorance relative, encore à ce jour, du mécanisme fondamental de brisure de la supersymétrie, ce qui conduit à la prolifération des paramètres arbitraires du MSSM. En effet dans le Lagrangien le plus général du MSSM, on doit admettre tous les termes de brisure dite "douce", i.e. n'invalidant pas la stabilité des masses des particules vis-à-vis des corrections radiatives, une propriété essentielle de la supersymétrie. D'autres extensions du MSSM, telles que le NMSSM où un scalaire singlet supplémentaire est ajouté au spectre, ou le MSSM avec violation de la R-parité (impliquant la non-stabilité de la LSP) seront aussi à considérer.

Bien que le MSSM constitue alors le modèle phénoménologique de base pour l'étude de la supersymétrie, aussi bien auprès des accélérateurs de particules que dans des considérations

astrophysiques ou cosmologiques (cf. sections suivantes), l’approche supersymétrique acquiert tout son intérêt lors qu’on considère des scénarios faisant jouer un rôle important soit à l’interaction gravitationnelle (modèle mSUGRA, modèles dérivés de théories sous-jacente de supercordes), soit à un secteur de jauge (modèle GMSB) donnant une origine dynamique à la brisure de la supersymétrie tout en réduisant le nombre de paramètres libres du modèle. Il existe aussi d’autres modèles de brisure de supersymétrie, comme les modèles de brisure “transmise par l’anomalie” (AMSB), où la brisure douce est engendrée à haute énergie par l’effet indirect d’anomalies “superconformes” de la supergravité ou des supercordes.

Face à ces scénarios théoriques très variés, il s’agit d’obtenir des prédictions suffisamment précises pour permettre la comparaison avec les mesures expérimentales présentes et à venir, avec la nécessité de préparer au mieux les outils d’analyse (voir ci-dessous le programme du groupe “Outils”, avec lequel les liens seront nombreux) pour les expériences actuelles au Tevatron et au LHC et au futur collisionneur linéaire ILC. En effet, la mise en évidence d’une éventuelle supersymétrie aux énergies considérées constitue une motivation importante des actuels et futurs collisionneurs de particules. Celle-ci consisterait d’abord à vérifier la production directe d’une multitude de nouvelles particules: les scalaires du secteur de Higgs, ainsi que les partenaires supersymétriques scalaires et fermioniques des particules actuellement connues. Mais il sera aussi nécessaire de mesurer avec le plus de précision possible les différents paramètres fondamentaux et de vérifier un certain nombre de relations entre couplages et masses imposées par la supersymétrie. Ceci permettrait de reconstruire le Lagrangien à basse et à haute énergie, avec la possibilité de déterminer la véritable structure de la physique sous-jacente à l’échelle de grande unification, et donc du mécanisme précis de brisure de la supersymétrie parmi les diverses possibilités théoriques évoquées plus haut. Tout cela requiert l’étude du plus grand nombre possible de processus de production et de désintégration des particules supersymétriques et des bosons de Higgs, en particulier les processus d’ordre supérieur (production associée de plusieurs particules et désintégration à plusieurs corps ou via des boucles). Cela nécessite également une expertise sur les effets de corrections radiatives affectant ces différents processus de production/désintégration.

Plus généralement, il est apparu progressivement ces quelques dernières années la nécessité d’une synergie encore plus importante entre expérimentateurs et théoriciens concernant notamment les perspectives de reconstruction de paramètres. En effet les deux communautés ont réalisé, tant pour des raisons théoriques qu’expérimentales, qu’on ne pouvait pas se contenter de tester la reconstruction en se plaçant par exemple seulement dans le cadre d’un modèle supersymétrique bien défini et de quelques points représentatifs de l’espace des paramètres. La question “découvrir la supersymétrie, puis mesurer ses paramètres” s’est déplacée dans un premier temps plutôt vers la question:

- comment mettre en évidence un scénario réellement supersymétrique (i.e des partenaires interagissant faiblement à l’échelle du TeV) en contraste avec un scénario non-supersymétrique (une théorie effective d’interaction forte par exemple)?

Cette problématique est en premier lieu essentiellement expérimentale, nécessitant des techniques efficaces pour distinguer le bruit de fond des données intéressantes, en ajustant les simulations Monte-Carlo aux données expérimentales (sans signal de nouvelle physique) pour mettre en évidence la présence de déviations du MS. Cela implique aussi un lien très fort avec les analyses expérimentales et le groupe “Outils”, particulièrement concernant les bruits de fond standard, QCD et multi-jet.

Ensuite, supposant qu'on ait bien identifié des partenaires interagissant faiblement, la question suivante serait:

- comment se convaincre que c'est bien la supersymétrie (et non par exemple un signal de l'existence de dimensions supplémentaires, ou encore un modèle "little Higgs", etc)?

Cette question donne lieu à beaucoup d'activités mais tout n'a pas encore été exploré. De nouvelles techniques plus élaborées, par exemple en statistique (chaînes de Markov etc) ou des innovations théoriques au niveau des générateurs (éléments de matrice, ...) devraient être utilisés. De plus, ces outils devraient dans l'idéal pouvoir simuler tout type de nouvelle physique, un domaine dans lequel il y a encore beaucoup à développer (là encore en étroite collaboration avec le groupe "Outils"). Probablement, dans un premier temps, la supersymétrie pourrait être utilisée comme "calibrage" de référence même si on considérera des scénarios différents. Dans ce cas, on aurait besoin d'un modèle suffisamment général pour garantir que les contraintes typiques et les prédictions ne biaisent pas les mesures.

Ensuite se poseront probablement des questions plus modèles-dépendantes, telles que:

- quelle sorte de supersymétrie (minimale ou non), quel type de Higgs, etc?

Par exemple, détecter un Higgs chargé serait un signal clair de l'existence de deux doublets de Higgs, plus que si l'on découvre seulement des scalaires neutres. Ou encore, la mise en évidence de symétries de jauge supplémentaires serait plutôt associée aux modèles incluant des états vecteurs lourds tels que des bosons  $Z'$ . D'autre part, comme évoqué plus haut, les scénarios supersymétriques non-minimaux, tels que le NMSSM, les modèles à violation de R-parité, les modèles à violation de saveur (ou encore des modèles plus exotiques où les partenaires des bosons de jauge "inos" sont des particules de Dirac) sont de plus en plus étudiés. Là aussi, la collaboration avec le groupe "Outils" mais aussi avec le groupe "Alternatives à la supersymétrie" sera nécessaire.

Enfin si la supersymétrie est identifiée clairement, au moins sous une certaine forme de ces modèles, viendra la question évoquée plus haut:

- comment mesurer avec précision les paramètres fondamentaux du modèle pour déterminer le mécanisme de brisure de la supersymétrie de manière détaillée?

Pour cela nous avons besoin d'analyses plus sophistiquées, sur le plan expérimental autant que sur celui théorique. Cela implique des calculs pour les différents signaux aux ordres perturbatifs supérieurs, de même pour les évolutions des paramètres aux grandes échelles, et d'autre part, de développer des techniques statistiques de simulation et de contraintes plus sophistiquées (ajustements de paramètres globaux etc). Actuellement il y a aussi dans la communauté un débat animé sur quel types d'approches seraient les plus efficaces pour résoudre l'éventuel "problème inverse" au LHC, i.e. le risque potentiel d'ambiguïtés discrètes dans la reconstruction des paramètres fondamentaux même pour un modèle supersymétrique "familier" à la MSSM, étant donné le nombre relativement petit d'observables disponibles. Sont considérées, typiquement, les approches traditionnelles top-down, ou bien des approches inverses "bottom up", ou encore les analyses dites "en aveugle", ou basées sur un nombre restreint d'observables. Bien sur, toutes ces approches sont complémentaires et devraient être suivies en parallèle.

Des données expérimentales auprès des collisionneurs de la période 2009-2012 viendront du Tevatron, dont la prise de données est approuvée jusqu'en 2010, et du LHC avec une

énergie au centre de masse de 10 TeV prévue en 2009 qui va augmenter à 14 TeV ensuite. Le Tevatron vient de publier cette année la première amélioration des limites sur le boson de Higgs depuis la fin de LEP, excluant que celui ci ait une masse de 170 GeV. La recherche du boson de Higgs au LHC prendra plus de temps s'il a une masse faible (de l'ordre de 115–120 GeV) comme le suggèrent les contraintes indirectes venant des mesures de précision électrofaibles. D'un autre côté, le LHC est sensible, avec une luminosité intégrée de seulement  $10 \text{ pb}^{-1}$ , on s'attend à une luminosité nominale de  $10 \text{ fb}^{-1}$  par an, à des masses de particules supersymétriques comme les squarks et les gluinos à la limite de la sensibilité du Tevatron. Avec une luminosité intégrée de  $1 \text{ fb}^{-1}$ , des masses jusqu'à 1 TeV pourraient être sondées.

Un autre aspect très important sera aussi la complémentarité avec les expériences de détection directe et indirecte de matière noire, pour lesquelles une interaction avec le groupe "Matière noire" sera indispensable. Enfin, dans le cadre de la mise en évidence d'un signal de nouvelle physique au-delà du MS, il sera également crucial d'envisager la complémentarité des collisionneurs présents et futurs, incluant le futur collisionneur international linéaire ILC, dont le projet est en cours.

### 3.2 Alternatives à la supersymétrie

F. Ledroit (*LPSC Grenoble*), G. Moreau (*LPT Orsay*), G. Servant (*CERN Genève*).

L'objectif majeur du LHC est de comprendre la dynamique responsable de la brisure de la symétrie électrofaible. Les grandes questions auxquelles le LHC va tenter de répondre concernent la nature et les propriétés du boson de Higgs : est-il fondamental ou composite? un boson de Goldstone associé à une symétrie élargie? une manifestation de dimensions supplémentaires (la cinquième composante d'un boson de jauge, un effet de bord dû à une projection de type orbifold)? une combinaison de tout ceci ou autre chose à laquelle les théoriciens n'ont pas encore pensé?

Ces deux dernières décennies, le problème de hiérarchie a été la force motrice pour l'étude d'extensions du MS à l'échelle du TeV. Longtemps, la supersymétrie a été considérée comme l'extension la plus réaliste du MS. Cependant, après les résultats de LEP2, l'absence de découverte du boson de Higgs, repoussant sa masse au-delà de 114 GeV, ni d'aucune particule supersymétrique a contraint le MSSM dans une région d'ajustement fin ou "fine-tuning", et en cela, a un peu altéré sa motivation d'origine. Ces dernières années, les modèles de brisure dynamique de la symétrie électrofaible ont reçu un regain d'intérêt. Ceci est en particulier dû au fait qu'il a été réalisé que les modèles avec dimensions supplémentaires pouvaient fournir une description duale des modèles d'interaction forte de type technicouleur. La connexion entre théories de jauge fortement couplées et gravité dans des géométries anti de Sitter a ouvert la voie à la construction de nouveaux modèles de brisure électrofaible (holographic Higgs, Higgsless, little Higgs, ...).

Pour optimiser le potentiel de découverte de nouveaux phénomènes au LHC, il est indispensable de se pencher plus précisément sur les prédictions associées à ces différents scénarios. Les bruits de fond devant être détectés au LHC seront considérables et la recherche de manifestations de nouvelle physique va nécessiter un très grand nombre d'analyses spécifiques focalisées sur des états finals bien particuliers. Les derniers développements théoriques ont montré que la gamme de possibilités pour la nouvelle physique au TeV est très étendue. Il



est nécessaire d'en étudier le plus grand nombre afin de s'assurer que les analyses de physique couvrent tout le spectre des possibilités.

Le sous-groupe "Alternatives à la supersymétrie" s'attellera à cette tâche. Cela comporte :

- de se pencher sur les manifestations de bosons de Higgs non-standard: les couplages du Higgs sont très sensibles à toute nouvelle physique et une mesure précise de ses taux de production et de tous ses modes de désintégration sera une des activités principales au LHC et nous devons être prêts à interpréter toute déviation dans le cadre d'extensions du MS bien motivées; il sera aussi important d'examiner la physique non-standard du quark top: on peut citer en particulier les corrections au vertex  $Wtb$ , les interactions changeant la saveur ou encore les corrections à la section efficace de production;
- de poursuivre l'effort entrepris dans l'étude des modèles avec dimensions supplémentaires: émission de gravitons de Kaluza-Klein, se manifestant sous la forme d'énergie manquante, ou l'échange de tels gravitons virtuels modifiant les sections efficaces standard (approche des grandes dimensions supplémentaires); dans d'autres modèles, les niveaux de Kaluza-Klein sont séparés de telle sorte que les gravitons de Kaluza-Klein se manifestent sous forme de résonances étroites (approche avec des dimensions supplémentaires courbes); enfin, si les bosons de jauge se propagent dans la ou les dimensions supplémentaires, cela conduirait à des récurrences de Kaluza-Klein de ces bosons de jauge,  $Z_{KK}$  et  $W_{KK}$ , qui modifieraient à nouveau le comportement des sections efficaces standard;
- de poursuivre la recherche de nouveaux bosons de jauge  $Z'$  et  $W'$ : outre les états de Kaluza-Klein cités plus haut, de nouveaux bosons de jauge sont prédits dans de très nombreux modèles, les plus anciens étant les théories de grande unification ou celles restaurant la parité droite-gauche, mais ces nouveaux bosons sont également prédits dans les modèles "little Higgs" par exemple;
- d'approfondir la recherche de nouveaux scalaires: de nombreuses théories en dehors de la supersymétrie prédisent des particules scalaires supplémentaires, les leptoquarks, prédits par les modèles de grande unification ou les modèles composites en sont un type particulièrement recherché; dans une approche plus phénoménologique, de nombreux modèles comportant des singlets scalaires ont été introduits récemment, avec des conséquences importantes pour la transition de phase électrofaible (baryogénèse électrofaible) ainsi que pour la matière noire;
- de persévérer dans la recherche de nouveaux quarks et de nouveaux leptons: ces particules sont en effet prédites dans le cadre d'une quatrième génération, dans les modèles de Higgs composite où des nouveaux quarks partenaires du top jouent un rôle déterminant dans la brisure électrofaible, mais également sous forme d'états de Kaluza-Klein dans les modèles avec dimensions supplémentaires;
- de développer l'étude des signatures de particules de matière noire non supersymétriques et les propositions de candidats ont afflué ces dernières années : singlets scalaires, neutrinos de Dirac, boson de jauge (de Kaluza-Klein ou  $B'$  dans les modèles little Higgs), branons ...; à chacune de ces propositions est associée une phénoménologie différente.

Pour ces recherches, encore beaucoup d'outils, notamment en terme de générateurs d'événements pour les simulations de signal dans les collisionneurs, nécessaires à leur recherche expérimentale, doivent être développés et/ou intégrés à ceux déjà existants et ceci, à

travers un effort commun entre expérimentateurs et théoriciens et une étroite collaboration avec le groupe “Outils”.

### 3.3 Matière noire

G. Bertone (*IAP, Paris*), E. Moulin (*IRFU, Saclay*)

Le problème astrophysique de l’origine et de la nature de la matière noire dans l’univers est devenu, au fil du temps, intimement lié à celui de la physique au-delà du Modèle Standard des particules élémentaires et de leurs interactions. En particulier, la perspective que les modèles supersymétriques ou à dimensions supplémentaires offrent des candidats naturels pour la matière noire, sous forme de particules élémentaires dont les possibles manifestations observationnelles dans l’univers seraient calculables, apparaît très prometteuse. Ces mêmes modèles, qui sous-tendent par ailleurs l’une des principales motivations du LHC et des futurs collisionneurs de particules, permettent ainsi d’espérer que deux grands problèmes actuels et toujours ouverts de la physique des hautes énergies et de l’astrophysique, soient résolus dans un seul et même contexte théorique. Ce fait a motivé en bonne partie le rapprochement de communautés scientifiques assez différentes, comprenant expérimentateurs et théoriciens, et qui s’est opéré depuis un certain nombre d’années aussi bien au niveau international que national.

Le démarrage du LHC marquera le début de l’exploration de la région du TeV et, en particulier, des modèles supersymétriques et à dimensions supplémentaires. Les particules pouvant constituer la matière noire pourraient y être produites et leurs interactions étudiées. D’un autre côté, le grand nombre d’expériences astrophysiques de détection directe (CDMS, Edelweiss, DAMA, ZEPLIN, etc.) ou indirecte au sol ou embarquées (HESS, MAGIC, ANTARES, ICECUBE, INTEGRAL, PAMELA, GLAST, AMS02, etc.), de la matière noire, sont très complémentaires entre elles ainsi qu’avec les recherches auprès des collisionneurs. En particulier, PAMELA et Fermi/GLAST (lancés en Novembre 2006 et Juillet 2008 respectivement) ont déjà produit des résultats extrêmement intéressants, et le futur de ces expériences semble très prometteur. Par ailleurs, les deuxièmes phases des expériences HESS et MAGIC permettront dès 2009 de sonder des masses en dessous de 100 GeV encore inaccessibles aux télescopes Cherenkov. De nouvelles phases ou projets aussi bien en détection directe qu’indirecte se dessinent à l’horizon 2011–2012 et, parmi elles, se trouvent EURECA, SuperCDMS et CTA. Tous ces efforts expérimentaux permettront potentiellement d’apporter des informations différentes et complémentaires sur la masse, les interactions et la distribution de la matière noire. Il paraîtrait donc très souhaitable qu’au niveau national un rapprochement entre les diverses communautés soit maintenu, voire renforcé, afin d’accompagner un mouvement qui ne manquera pas de s’accélérer dans un très proche avenir, avec l’arrivée de nouvelles données expérimentales.

Le groupe de travail “Matière noire” serait le lieu naturel où les réunions régulières pourront susciter de tels contacts et discussions entre théoriciens et expérimentateurs, et éventuellement collaborations inter-communautaires. Des exposés et discussions sur les derniers résultats expérimentaux ainsi que les limites et contraintes trouveront pleinement leur place au sein de ce groupe au même titre que les présentations sur les derniers développements théoriques et les incertitudes astrophysiques.

Le neutralino matière noire dans le cadre du modèle de supergravité minimale constitue un scénario de référence largement étudié dans la littérature. Dans ce contexte nous envisageons, dans un premier temps, d'affiner les prédictions à la lumière des diverses incertitudes théoriques inhérentes au modèle et du degré d'ajustement requis. On discutera également l'approche expérimentale pour la reconstruction des paramètres supersymétriques et de la matière noire auprès du LHC en étroite collaboration avec le groupe "Higgs et Supersymétrie".

Nous souhaiterions étudier les aspects de complémentarité entre la détection directe, la détection indirecte et la recherche auprès des collisionneurs dans le but de définir comment ces différents moyens peuvent être utilisés pour identifier de manière concluante la ou les particules de matière noire. Le potentiel expérimental de complémentarité pour l'exclusion ou la détection pourrait débiter également dans ce cadre de référence. Par la suite, ces travaux de complémentarité pourraient s'étendre dans le cadre de modèles supersymétriques plus larges et moins contraints.

Par ailleurs, il est important d'étudier d'autres scénarios, non moins motivés théoriquement, présentant un candidat de matière noire. La matière noire peut rester le neutralino le plus léger mais dans un cadre différent de brisure de supersymétrie (effets d'anomalies, modèles de supercordes, etc.), elle correspondrait à d'autres candidats supersymétriques, tels que le singlino présent dans la version minimalement étendue du MSSM, ou le gravitino léger qui serait théoriquement favorisé dans certains scénarios de brisure de supersymétrie (GMSB) ou encore d'autres candidats tels que l'axino, etc. Par ailleurs, des scénarios très différents de ceux mentionnés ci-dessus pourraient émerger si l'échelle de masse de la théorie fondamentale des supercordes se trouvait être aussi basse que le TeV. Parmi les manifestations des dimensions supplémentaires compactes d'espace qui en résulteraient, un état de Kaluza-Klein électriquement neutre et stable pourrait alors fournir un candidat à la matière noire avec des signatures de détection assez distinctives. Parmi eux se trouvent la première excitation du boson de jauge (hypercharge) de Kaluza-Klein ou encore des neutrinos droits. Les divers aspects de ces autres types de matière noire pourront être affinés grâce aux échanges et interactions avec les autres groupes de travail du GDR, comme le groupe "Alternatives à la supersymétrie" et le groupe "Méthodes et outils communs" qui auront naturellement lieu et qui solliciteront en particulier la communauté travaillant sur le LHC.

Enfin, d'autres aspects de nature astrophysique seront également importants à considérer. Par exemple, la complexité de la modélisation des halos de matière noire résulte en des incertitudes sur les profils de densité de matière noire dans les halos des galaxies qui affectent les expériences de détection indirecte. De même, l'environnement complexe au centre de notre galaxie peut rendre difficile l'interprétation des observations en termes de produits d'annihilation de la matière noire. Des considérations ayant trait à l'univers primordial peuvent aussi compléter les contraintes sur certains modèles ou en modifier les prédictions (nucléosynthèse primordiale, contribution non-thermique à la densité relic, etc.).

### 3.4 Méthodes et outils communs

S. Kraml (*LPSC Grenoble*), S. Muanza (*CPPM Marseille*).

Le principal but du groupe "Méthodes et outils communs" du GDR Terascale est de fournir à tous les membres de ce GDR, et particulièrement aux expérimentateurs, un choix de logiciels de simulation et de codes de calcul pour les recherches directes et indirectes de nouvelle physique: bosons de Higgs standards et non-standards, supersymétrie, dimensions d'espace supplémentaires,....

Ces dernières années de plus en plus de programmes ont vu le jour, chacun avec des approches et/ou des approximations différentes dans les calculs phénoménologiques de nouvelle physique. Un grand nombre de ces programmes ne tient pas encore compte des derniers développements théoriques. De plus, la plupart se spécialise dans un type particulier de recherche ou de simulation. Il y a encore d'importantes séparations entre des codes dédiés exclusivement à la recherche hors accélérateurs (matière noire) et la recherche directe de nouvelle physique auprès des collisionneurs. De plus, même dans cette dernière catégorie, certains codes sont spécifiques à la recherche de bosons de Higgs supersymétriques par exemple alors que d'autres ne traitent que des spectres de nouvelles particules. Il demeure en outre une subdivision entre les programmes dédiés aux collisionneurs hadroniques et ceux dédiés aux collisionneurs électron-positron.

Au vu de ce foisonnement d'outils, les efforts d'harmonisation et de déverminage, notamment grâce à des comparaisons systématiques, restent indispensables. Ceci est d'autant plus vrai que nous sommes à la veille du démarrage effectif du LHC et entrain d'accumuler des mesures de plus en plus précises au Run II du Tevatron. Ces mesures contraignent à la fois les masses ou les couplages des nouvelles particules prédites par la nouvelle physique ainsi que les détails de la modélisation des bruits de fond standards, essentiellement dans leurs aspects reliés à la QCD. Nous continuerons à insister sur l'amélioration qualitative de la modélisation des bruits de fond du MS parce que la tâche première du LHC sera de déterminer et de quantifier les écarts éventuels entre les données et les prédictions du MS, ces dernières devant être au moins aussi précises que les mesures expérimentales. Notons aussi qu'en retour, les prédictions sur la nouvelle physique peuvent être améliorées. Citons par exemple la possibilité récente de générer des événements nouvelle physique multi-jet avec un appariement entre les contributions des éléments de matrice et celles de la gerbe partonique.

Les méthodologies d'étude de nouvelle physique peuvent être testées de manière concrète grâce à la mise en oeuvre des outils mentionnés ci-dessus. C'est par exemple le cas avec le projet "blind SUSY analysis". Il s'agit d'une recherche en aveugle des propriétés d'un échantillon de pseudo-données contenant un mélange de processus de bruit de fond du MS ainsi que des productions inclusives de bosons de Higgs et de super-particules d'un modèle supersymétrique à déterminer.

Notons que malgré le nombre croissant de Workshops sur la nouvelle physique organisés chaque année, les outils en sont souvent le "parent pauvre", en dépit des demandes répétées des expérimentateurs. Le développement des outils est un travail très important qui requiert une très bonne connaissance des modèles ainsi qu'une bonne maîtrise de l'informatique et des techniques d'analyse numérique. Ceci explique qu'en général les outils existants sont le fruit

de collaborations. Nous comptons continuer à faire du groupe “Outils” un véritable incubateur pour le développement, l’amélioration, voire la création de nouveaux outils concernant la nouvelle physique ainsi que ses bruits de fond du MS, les interactions entre théoriciens et le retour d’expériences d’utilisation ou les demandes des expérimentateurs étant le moteur de ces avancées.

Nous mettrons l’accent sur un développement renforcé d’outils pour la nouvelle physique supersymétrique au-delà du MSSM et surtout pour la nouvelle physique non-supersymétrique. En effet, pour cette dernière, nombre d’outils sont en cours de conception ou de développement. Il s’agit souvent de codes très spécialisés, difficiles à interfacer et ils sont en général insuffisamment testés et demeurent souvent privés. La situation est bien plus satisfaisante pour les outils du MSSM. Toutefois, nous ne négligerons pas l’amélioration de leur précision, notamment grâce à des corrections d’ordres supérieurs, des normalisations mais aussi, le cas échéant, des formes des sections efficaces différentielles. Nous continuerons à insister sur l’augmentation de la modularité des programmes (qui tire avantage du passage croissant à la programmation en C++) et sur la création ou le développement subséquent d’interfaces standardisées sur le modèle des “Accords des Houches”.

Le groupe “Méthodes et outils communs” bénéficiera de réunions systématiquement plénières lors des réunions du GDR Terascale. Ce caractère de groupe complètement transversal au GDR devrait rééquilibrer un peu la prédominance de la supersymétrie par rapport aux alternatives de nouvelle physique et inciter à une participation accrue des membres du GDR aux activités du groupe.

## 4 Organisation et moyens

L’organisation du GDR repose sur plusieurs structures qui seront détaillées dans cette section. Nous attachons une grande importance aux contacts Européens et internationaux, bien qu’étant un GDR Français. En effet, certaines collaborations avec des partenaires Européens existent déjà et il serait naturel de bénéficier de l’expertise supplémentaire qu’elles apportent (nous avons eu des échos très favorables à une forme organisationnelle du GDR dans ce sens). Sur la période 2009–2012, nous prévoyons quatre réunions plénières en France et deux réunions dans un autre pays Européen.

### 4.1 Conseil de groupement

Un conseil de groupement, réunissant outre les deux co-ordinateurs du GDR et les co-ordinateurs des groupes de travail, des personnalités travaillant dans le domaine de la physique au-delà du Modèle Standard, aura un rôle de supervision du GDR. La composition du conseil tentera d’assurer un équilibre expérimentateurs/théoriciens, collisionneurs/non-collisionneurs et laboratoires/régions. Quatre membres extérieurs ne travaillant pas dans un laboratoire Français ont accepté d’en faire pour illustrer l’ouverture informelle sur l’Europe. Le conseil se réunira une à deux fois par an, l’une d’elles pendant la réunion générale du GDR.

Les membres du conseil de groupement sont, pour l'instant :

G. Bélanger	( <i>LAPTH Annecy</i> ),
M. Besançon	( <i>DAPNIA Saclay</i> ),
P. Binétruy	( <i>APC Paris</i> ),
A. Djouadi	( <i>LPT Orsay</i> ),
E. Dudas	( <i>CPT Palaiseau</i> ),
P. Fayet	( <i>LPTENS Paris</i> ),
S. Gascon-Shotkin	( <i>IPNL Lyon</i> ),
P. Gay	( <i>LPC Clermont-Ferrand</i> ),
U. Goerlach	( <i>IPHC Strasbourg</i> ),
J.-F. Grivaz	( <i>LAL Orsay</i> ),
M. Klasen	( <i>LPSC Grenoble</i> ),
J. Orloff	( <i>LPC Clermont-Ferrand</i> ),
S. Rosier-Lees	( <i>LAPP Annecy</i> ),
C. Tao	( <i>CPPM Marseille</i> ),
D. Zerwas	( <i>LAL Orsay</i> );
S. Abel	( <i>IPPP Durham</i> ),
G. Isidori	( <i>INFN Frascati</i> ),
T. Plehn	( <i>University of Edinburgh</i> ),
M. Tytgat	( <i>UL Bruxelles</i> ).
ex-officio:	les co-ordinateurs des groupes de travail.

## 4.2 Réunion générale

Nous prévoyons une réunion générale annuelle avec pour but la rencontre entre tous les groupes de travail; sur les 4 ans, au moins la moitié des réunions aura lieu en dehors de la région Parisienne. La première réunion en France est prévue pour le printemps 2009. Un groupe Allemand a proposé d'organiser la première réunion Européenne à l'automne 2009. Nous baserons le budget prévisionnel sur 60 participants à cette réunion, dont 7 étrangers.

## 4.3 Réunions des groupes de travail

Les quatre groupes de travail regrouperont en moyenne une vingtaine de chercheurs. Les co-ordinateurs ont le libre choix d'organiser des réunions supplémentaires de leurs groupes. Ceci permettra de créer une dynamique et de favoriser la mise en place de collaborations. Typiquement, ces réunions dureront une journée (aller-retour dans la journée si possible). On peut estimer à deux par groupe et par an le nombre de ces réunions. Nous compterons deux européens dans chaque groupe (dont parfois le co-ordinateur) pour l'estimation du budget.

## 4.4 Groupes de travail supplémentaires et ateliers

Le conseil du groupement pourra envisager la création de groupes de travail supplémentaires, par exemple des groupes transversaux focalisés sur un point précis et pour une durée limitée.

De plus, nous prévoyons la possibilité d'organiser des ateliers d'une semaine autour d'une thématique donnée sur proposition des co-ordinateurs de groupes ou du conseil.

#### **4.5 Workshop “Tools for new physics and its background”**

Le Workshop Européen “Tools for new physics and its background” est né dans l'ancien GDR SUSY comme “Tools for SUSY”. En 2008, il a été organisée à Munich, ce qui montre le fort intérêt que la communauté apporte aux questions qu'il traite. Nous proposons de continuer à soutenir cette activité qui est fortement reliée à celle du groupe “Outils”, ce qui permettrait d'augmenter la visibilité des travaux réalisés. Nous prévoyons de participer à ses frais d'organisations ainsi qu'au financement des missions des membres du GDR.

#### **4.6 Administration**

Nous souhaitons que le GDR soit formellement sous la tutelle de l'IN2P3/ commission 03 du CNRS, mais qu'il puisse y avoir un rattachement supplémentaire au MPPU/commission 02 du CNRS. Cette demande tient compte d'un consensus des membres du GDR que les activités reposent à égalité sur les parties théorique et expérimentale. Le LAL d'Orsay a proposé d'assurer le secrétariat du GDR.

#### **4.7 Budget**

La demande de budget annuel est de 97 kEuro. Compte tenu de la répartition de la centaine de chercheurs entre le MPPU, l'IN2P3 et le CEA, un équilibre serait atteint par une répartition de cette somme autour de 28 kEuro pour le MPPU, 59 kEuro pour l'IN2P3 et 10 kEuro pour le CEA.