

SPhT

RAPPORT D'ACTIVITÉ 1996

Illustration de couverture : *Surfaces et matrices*. Les triangles noirs représentent un pavage de triangles couvrant une surface, ce que l'on appelle une "triangulation". Il est commode d'associer à cette triangulation un diagramme "dual" fait de doubles lignes colorées traversant les côtés des triangles. A chaque double ligne de couleurs a et b , on associe l'élément M_{ab} d'une matrice hermitienne, et chaque point de rencontre des doubles lignes, appelé vertex, correspond à un produit de telles matrices. Les propriétés de la surface sont alors codées dans les propriétés des produits des matrices associées à toutes les doubles lignes et leur vertex. L'avantage de cette représentation est qu'elle ramène certains problèmes de géométrie à des calculs d'intégrales matricielles.

DÉDICACE

Nous dédions ce Rapport d'Activité à Claude Itzykson, notre collègue, notre ami, décédé le 22 mai 1995. Bon nombre des travaux présentés dans ce document font partie de son héritage.

En hommage à Claude Itzykson, un colloque intitulé "The mathematical beauty of physics" a été organisé dans le Service de Physique Théorique les 5, 6 et 7 juin 1996. L'ensemble des contributions à cette rencontre sera publié dans Advanced Series of Mathematical Physics, Vol. 24. Il est prévu que ces rencontres soient pérennisées sous forme d'un colloque international annuel que le SPhT organisera à Saclay sur des sujets de physique théorique.

Pour évoquer ici la mémoire de Claude Itzykson, laissons-le parler en reproduisant le texte des réflexions qu'il avait présentées à l'occasion des trente ans du SPhT sous le titre "Copie conforme".

Copie conforme

Il y a une dizaine d'années, lorsqu'au retour d'un séjour à Moscou, Dan Friedan nous fit le récit du programme de travail d'un groupe de physiciens de l'institut Landau, il fut accueilli par le scepticisme de mise dans notre Service. Scepticisme doublé d'incompréhension, pour le dire franchement. Comme nous le rappela durement l'un d'entre nous lors d'un colloque, s'il est bon, en théoricien consciencieux, de poursuivre ses recherches sans trop se soucier des effets de mode, il est aussi détestable d'ignorer systématiquement les sujets plus nouveaux, même si on n'en aperçoit pas d'emblée la portée. Dans le courant de l'année 83, Belavin, Polyakov et Zamolodchikov venaient de poser les fondements d'une méthode nouvelle d'analyse des phénomènes critiques bi-dimensionnels, autrement dit des théories quantiques locales de masse nulle, qui allait susciter une décennie de découvertes et des applications à la physique de la matière condensée (l'effet Kondo, l'effet Hall quantique, la turbulence, les polymères) à la théorie des cordes, aux systèmes intégrables et même ... aux mathématiques. A l'époque nous manquions des éléments pour apprécier cette nouveauté, et il fallut d'autres visiteurs (I. Affleck, J. Cardy, Ivan Todorov,...) et des séjours à l'étranger pour convaincre un premier petit groupe de s'atteler au déchiffrement de l'article fondateur.

Je ne vais pas ici détailler la liste des contributions Saclaysiennes en cette matière, ni vous infliger une description qui serait hors de propos. Pour faire bref, il suffit de dire que, comme cela s'est produit à plusieurs reprises, la découverte d'un groupe (infini) de symétries (assez bien caché) prélude à des applications insoupçonnées. Ainsi les invariances de jauge non commutatives sont elles à l'origine de la relation intime entre électromagnétisme et forces faibles qui conduisit à prédire l'existence des bosons Z^0 et W^\pm et fournissent aussi le cadre d'interprétation des interactions nucléaires et du confinement des quarks constituant les nucléons. De même en deux dimensions l'existence d'un "groupe" infini des transformations conformes, c'est-à-dire préservant les angles et partant de son algèbre de Lie — dite algèbre de Virasoro — associée au formalisme de la mécanique quantique, offre-t-elle la possibilité de caractériser les théories des champs locales à leurs points critiques. Les pionniers, suivis de Friedan, Qiu et Shenker, J. Cardy, I. Affleck, Dotsenko et Fateev firent rapidement progresser le sujet, découvrant de nouvelles relations entre modèles solubles, mécanique statistique, classes d'universalité, effets de taille finie...

Notre Service était bien connu pour ses contributions dans ces domaines — souvenez vous par exemple de la dédicace à Saclay du livre de D. Amit. En outre, nombre de travaux plus anciens se révélèrent avoir une résonance dans des développements ultérieurs. C'est le cas de ceux qui ont trait aux matrices aléatoires, aux problèmes solubles à N corps, à l'étude de la fonction d'onde de Bethe introduite dans l'étude quantique du magnétisme, ou encore au rôle de l'équation de Korteweg–de Vries dans le problème de la reconstruction du potentiel d'une équation de Schrödinger à partir des données spectrales. Enfin, on se souvient de l'importance prise par les nombreuses applications du groupe de renormalisation.

Une fois dégagés les principes fondamentaux, on vit très rapidement croître le nombre d'articles consacrés à l'invariance conforme tandis que le sujet des systèmes intégrables évoluait d'une manière

parallèle conduisant à l'étude des équations de Yang–Baxter, aux groupes quantiques, et autres variétés de Yangiens. Les Saclaysiens participèrent joyeusement à cette euphorie et sans fausse modestie y apportèrent quelques résultats des plus tangibles. En relisant une belle thèse de cette période, on découvre ainsi en filigrane l'esquisse de la fameuse formule de Verlinde, devenue l'un des chevaux de bataille des mathématiciens. Si l'on me pardonne d'évoquer un souvenir personnel, j'ai encore présent à l'esprit un coup de fil véritablement enthousiaste d'Andrea Cappelli m'annonçant qu'il venait d'achever une recherche de plus d'une année.

Certes, et cette critique ne manquera pas d'être vigoureusement faite par un éminent représentant de la physique mathématique, au surplus président de la commission qui procédait à l'examen de notre laboratoire, il est surtout question dans tout cela de recherches plus proches de la mathématique que de la physique concrète et on est en droit de s'interroger sur l'intrusion des physiciens dans des domaines qu'ils sont loin de maîtriser, voire dont ils ne possèdent pas réellement les bases. Je vous laisse juges de la portée de cette objection, au demeurant totalement fondée. Je relèverai simplement qu'il vaut parfois mieux se laisser porter par son sujet qui a sa logique interne que de s'attaquer sans idée novatrice aux grands problèmes fondamentaux, l'unification ultime des forces, la structure du vide ou de l'espace temps, la turbulence développée, la nature du vivant ou de l'intelligence. Sujets qui sont en principe à la source des problèmes de la physique théorique mais auxquels il est peu probable qu'un honnête chercheur apporte des lumières vraiment nouvelles.

Le travail quotidien, nous le savons tous, est fait de dizaines de pages qui finissent au panier, d'articles qui terminent leur carrière dans une cave obscure, de luttes mesquines de priorité. Aussi quand bien même elles demeurent modestes, de petites avancées dans des sujets tels que la gravitation quantique, encore à deux dimensions (il n'y a pas vraiment de force de gravitation à deux dimensions, tout au plus des effets entropiques dus à la multitude des géométries possibles) sont elles à saluer comme de véritables trouvailles. C'est à l'un des physiciens du Service, visiteur cette fois-ci d'une institution étrangère, qu'on doit la découverte d'une méthode, développée indépendamment par Kazakov et Migdal, qui permet de relier ce sujet à la théorie des matrices aléatoires de Wigner, déjà évoquée. Et nous savons tous comment V. Kazakov et E. Brézin, transfuge de ce Service, ont trouvé (simultanément avec des physiciens américains) des liens étonnants avec les systèmes intégrables qui ouvrent peut-être de nouvelles perspectives sur les aspects non perturbatifs de la gravitation quantique. Il serait malvenu d'insister sur les applications mathématiques de cette découverte.

Pour revenir à l'invariance conforme, il est peut-être bon de dire un mot des leçons qu'on peut en tirer. Je ne prétends pas être le mieux à même de le faire mais je vais quand même me risquer à cet exercice.

Tout d'abord, sur un plan théorique, elle nous a fait prendre conscience qu'au delà de la transition découverte il y a 50 ans par Onsager dans le modèle d'Ising et de ses avatars, il y avait à deux dimensions une richesse incroyable de transitions de phases. Les plus simples d'entre elles se présentent selon un schéma qui reproduit les solides platoniciens (!) preuve s'il en est de la permanence de ces formes les plus belles et les plus symétriques dans les constructions mathématiques. Malheureusement on ne peut pas en déduire qu'elles s'observent aisément dans la nature, ou du moins que les expérimentateurs trouvent ce sujet des plus passionnants.

Toujours sur le plan théorique, les théories conformes ont contribué à faire évoluer très nettement les espoirs outrageusement optimistes de voir les cordes quantiques fournir un modèle essentiellement unique des forces fondamentales.

Plus près du monde concret et sous des formes plus détournées, il n'est pas exclu que les analyses très élaborées (trop peut-être) qui ont été menées dans ce domaine contribuent à la description de systèmes complexes, comme certains fluides quantiques ou certains agrégats métalliques, voire à l'étude des supraconducteurs de haute température.

L'observation du milieu physicien sur plusieurs décennies suggère qu'il n'est pas rare de voir des pans entiers de savoir transférés d'un domaine à un autre. Ainsi l'équation d'onde de la mécanique quantique non relativiste doit-elle beaucoup aux travaux d'acousticien de Schrödinger, ainsi Brout et Englert, peut-être aussi Higgs, connaissaient-ils l'effet Meissner.

Il reste que notre monde est à trois, voire à quatre (ou même peut-être à dix) dimensions. Il est rageant d'être confiné à deux dimensions par une malédiction propre à certains théoriciens ou à l'insuffisance de notre imagination.

Je n'ai fait allusion ici qu'à une très faible fraction des travaux passés dans ce Service. Mais sans lire dans le marc du café, je suis persuadé que les physiciens à venir vont découvrir d'autres structures plus riches encore et contribueront activement à faire de Saclay un Service de Physique Théorique des plus vivants.

Claude ITZYKSON (1994)

SOMMAIRE

INTRODUCTION	9
LE CONSEIL SCIENTIFIQUE EXTÉRIEUR	15
PHYSIQUE MATHÉMATIQUE ET THÉORIE DES CHAMPS	17
Dynamique classique et quantique	19
Théorie des champs	21
Systèmes bidimensionnels	23
Autres sujets	29
PHYSIQUE NUCLÉAIRE, DES PARTICULES ET ASTROPHYSIQUE	33
Structure nucléaire	35
Physique hadronique	36
Théories de jauge	38
Plasmas quark-gluon	39
Interaction forte à haute énergie	40
Au delà du Modèle Standard	44
Astrophysique	46
PHYSIQUE STATISTIQUE	51
Systèmes et matériaux désordonnés	53
Membranes et polymères	55
Structures biologiques	58
Systèmes fortement corrélés, magnétisme et transition de phase	60
Hydrodynamique, turbulence, théorie cinétique	63
Mécanique statistique hors d'équilibre	66
LES PUBLICATIONS DU SPhT	69
ANNEXES	
Les thèses du SPhT	87
Prix, médailles et distinctions scientifiques	87
Encadrement de jeunes chercheurs	88
Activités pédagogiques	89
Edition scientifique	90

Livres	90
Actions de vulgarisation	91
Organisation de conférences ou d'écoles	91
Collaborations institutionnalisées	93
Administration de la recherche	94
Le groupe de documentation	96
Le secrétariat administratif	97
L'informatique au SPhT.....	97
Les physiciens au SPhT	99
(Physiciens du SPhT, jeunes chercheurs, visiteurs de longue durée)	

INTRODUCTION

Ce rapport d'activité, le septième du genre, est le quatrième qui s'adresse en particulier aux membres de notre Conseil Scientifique Extérieur. Nous espérons qu'il donnera une image fidèle de l'activité scientifique du SPhT pendant ces deux dernières années bien que la grande diversité des sujets abordés rende une présentation cohérente difficile. Les rédacteurs, R. Lacaze, J.-M. Normand, R. Schaeffer et le coordonnateur J.-P. Blaizot ont néanmoins essayé de regrouper les différents thèmes de recherche en trois sous-ensembles, conscients de l'arbitraire inhérent à une telle démarche. Par ailleurs, comme les fois précédentes, à l'occasion d'un colloque qui se tiendra à Colleville du 25 au 27 Septembre 1996, certains sujets seront également présentés de façon orale. A l'issue de ce colloque nous demanderons une évaluation critique à nos collègues du Conseil Scientifique Extérieur. Nous les remercions d'avance de leur aide et de leurs avis, dont nous essayerons de faire le meilleur usage, comme par le passé.

Le rapport d'activité est non seulement une compilation des articles, contributions à conférences, livres et rapports divers des membres du SPhT, mais il essaie aussi de donner un aperçu d'une activité scientifique multiforme, directions de thèse, cours toujours nombreux, travaux d'éditions, participation à des comités divers, j'en oublie sans doute, qui témoigne, je crois, d'un certain rayonnement du Service.

Comme introduction à ce rapport d'activité, je désire, comme il est de tradition, donner quelques indications sur la structure du SPhT, ses effectifs et sa politique scientifique. De façon à éviter la glose et les répétitions je ne reviendrai pas en détail sur tous les sujets que j'ai abordés dans l'introduction du précédent rapport. Sur certains sujets je me bornerai à mettre en évidence les points nouveaux apparus depuis.

- *Effectif permanent physicien* : L'année 1994 avait vu plusieurs membres du SPhT prendre leur retraite. Il a alors été décidé de ne pas les remplacer immédiatement de façon à assurer un recrutement régulier et homogène. Il en résulte un effectif physicien CEA temporairement en forte diminution. En accord avec notre hiérarchie, nous avons programmé un retour progressif à un niveau proche du niveau initial. Nous espérons vivement que, même dans une conjoncture difficile, cette politique que nous pensons sage et responsable, gardera le soutien des responsables de la DSM et du CEA.

L'année 1995 a été marquée par le décès d'un de nos collègues les plus éminents, Claude Itzykson. Il est à craindre que notre activité en physique mathématique en soit durablement affectée.

Par ailleurs un jeune physicien, B. Eynard, qui a fait sa thèse sur les modèles de matrices, un sujet d'intérêt commun à la gravitation quantique et la physique mésoscopique, a été recruté.

Comme je le soulignais dans notre précédent rapport l'obligation de départ à la retraite à soixante ans au CEA continue de poser de sérieux problèmes, certains physiciens encore très actifs souhaitant prolonger leur carrière scientifique. Ils s'estiment de plus victimes d'une discrimination par rapport à leurs collègues d'autres institutions. Par ailleurs leur départ correspondrait à une perte de compétence pour le Service. La poursuite de leur activité se heurte à de nombreuses difficultés pratiques.

L'idée sous-jacente à notre politique de recrutement est que nous essayons de compenser des départs, d'une fréquence naturellement quelque peu aléatoire, par un recrutement régulier (un à deux recrutements par an dans les prochaines années) de façon à ramener les effectifs du SPhT à leur niveau antérieur. Ceci concerne en premier lieu les effectifs CEA dont nous avons une meilleure maîtrise, mais une large majorité du SPhT désire qu'il en soit de même pour les effectifs CNRS. Un de nos jeunes chercheurs, E. Iancu, a été recruté au CNRS. Il est en stage dans notre laboratoire en attendant son affectation définitive.

- *Effectif non-physicien* : Je rappelle ici que le personnel non-physicien propre au SPhT se compose d'un secrétariat administratif de deux personnes et d'une assistante informatique au 4/5. Le groupe départemental d'informatique est commun au SPhT et au DRECAM (c'est à dire à environ 600 personnes) et deux de nos agents y sont affectés. Enfin le service de documentation, commun au SPhT et au Service voisin, le SPEC (en tout environ 200 physiciens), dirigé par M. Gingold, gère en particulier la bibliothèque (deux agents) et le secrétariat scientifique chargé de la saisie des articles. Un premier départ avait réduit le secrétariat scientifique à deux personnes. Il avait alors fallu supprimer l'essentiel de l'activité de soutien aux nombreux physiciens du SPhT qui sont éditeurs scientifiques, et membres de comités variés. Un second départ l'a ensuite réduit pendant plusieurs mois à une seule personne, Mme Dumets. Seul son dévouement et la prise en charge par M. Gingold de tâches qui ne relèvent pas de lui ont évité le désastre.

- *Etudiants de thèse* : Conformément aux recommandations pressantes du Conseil Scientifique Extérieur, nous avons augmenté de façon très importante le nombre d'étudiants préparant leur thèse dans notre laboratoire. Depuis nous avons reçu des signaux contradictoires de notre environnement. Nous sommes donc retournés à une politique plus prudente, sans revenir complètement à la situation antérieure. Début 1997 neuf étudiants prépareront leur thèse dans notre laboratoire. Le devenir des étudiants qui ne seront pas recrutés dans notre laboratoire orientera notre politique future en la matière.

- *Séjours post-doctoraux, visiteurs étrangers* : Notre programme de visiteurs reste un élément essentiel de notre politique scientifique. Il faut noter ici un fait nouveau : jusqu'à une époque récente les séjours post-doctoraux étaient administrativement réservés à des jeunes physiciens étrangers. Depuis peu il est devenu possible d'inviter également des jeunes chercheurs français ayant juste soutenu leur thèse. Nous avons donc accueilli pour deux ans C. Monthus dans notre laboratoire.

Je dois signaler ici, hélas, une fois de plus, le problème de l'accueil des visiteurs étrangers au CEA. La quantité de démarches à effectuer, de papiers à fournir et les délais prohibitifs constituent maintenant un frein majeur à notre programme d'invitations. Par ailleurs ils augmentent de façon insensée la charge administrative du laboratoire. Ils s'ajoutent encore à des obstacles naturels comme

un certain isolement géographique, l'absence de logements aisément disponibles pour des visiteurs de courte durée...

- *Problème de bureaux* : L'augmentation du nombre des étudiants, le désir de mettre à la disposition de nos retraités encore actifs un minimum d'espace de travail met notre laboratoire dans une situation extrêmement difficile, la densité dans les bureaux atteignant une valeur impossible à encore augmenter. Le sous-effectif présent et le nombre de nos chercheurs en mission de longue durée a rendu ce problème moins sévère en 1995-1996 mais l'année académique nouvelle se présente sous les plus mauvais auspices. La reconversion de salles de travail et de réunion en bureaux doit être dès maintenant envisagée, en l'absence d'autre solution.

- *Efforts de communication et animation scientifique* : Nous avons poursuivi notre effort de communication interne et externe. Je rappellerai que nous organisons deux fois par an une journée des thésards, dans le but de suivre leur travail et de le faire connaître à l'ensemble du laboratoire. Le journal du SPhT, qui paraît régulièrement participe aussi de cette volonté. Nous avons par ailleurs participé activement aux colloques organisés à l'occasion du Cinquantenaire du CEA. Enfin un colloque de trois jours s'est tenu dans notre laboratoire, destiné à honorer la mémoire de notre collègue Claude Itzykson.

Depuis l'hiver 95-96, renouant avec une ancienne tradition, plusieurs physiciens du SPhT ont donné localement des cours sur leurs domaines d'activité. Nous espérons que ceci marquera le début d'une nouvelle très longue série de cours du SPhT.

- *Implication du SPhT à l'intérieur de la DSM* : Le SPhT a continué à s'impliquer dans un certain nombre de conseils scientifiques internes de la DSM (DAPNIA, GANIL), et dans l'animation des segments (cinq) desquels il dépend thématiquement. Il organise les travaux du Comité Scientifique chargé d'attribuer au sein de la DSM le temps de calcul sur les ordinateurs centralisés du CEA (C90 et T3D) sur projet scientifique depuis sa création (création pour laquelle le SPhT avait milité pendant des années). Il joue un rôle important dans l'organisation des "Rencontres de la DSM".

- *Relations CEA-CNRS* : L'année 1996 a été marquée par la signature d'un accord entre le CEA et le CNRS qui définit en particulier les conditions de la mise à disposition de physiciens CNRS dans notre laboratoire. Cet accord devrait améliorer leur situation. Néanmoins seule la pratique révélera si cet accord résout la plupart des problèmes qui s'étaient posés dans le passé.

- *L'activité scientifique 1994-1996* : Nous avons essayé de regrouper une activité, par nature très diverse, en un petit nombre de thèmes pour mettre en évidence les domaines d'activité scientifique principaux du laboratoire. Cette démarche a quelque arbitraire dans la mesure où certains travaux sont communs à plusieurs thèmes, et qu'on aboutit à une classification différente suivant qu'on privilégie l'aspect technique ou le domaine d'application physique potentiel. Enfin, comme toujours en physique théorique, certains travaux plus ponctuels (même s'ils sont par ailleurs très intéressants) ne s'inscrivent dans aucun thème général de façon naturelle.

Dans un premier chapitre, *physique mathématique et théorie des champs*, nous avons regroupé la plupart des travaux ayant un caractère méthodologique à forte coloration mathématique. On y trouve par exemple l'étude de structures mathématiques générales apparaissant en physique : y apparaissent, flottant sur la vague du chaos, l'étude de systèmes dynamiques classiques ou quantiques,

ainsi qu'une analyse rigoureuse des propriétés des théories des champs dans un espace-temps courbe ou à température finie. La détermination de propriétés exactes de systèmes uni- ou bi-dimensionnels, la solution exacte de systèmes modèles est une des spécialités du SPhT. On y observe une activité phare, l'étude des théories des champs invariantes conformes dont la part se réduit, les modèles de matrices, un domaine très vivant mais qui plafonne faute de progrès technique spectaculaire nouveau, la recherche de solutions exactes de systèmes modèles, un domaine qui a une longue tradition au SPhT, et qui à n'en pas douter a encore de beaux jours devant lui. Il faut enfin souligner un thème nouveau prometteur, l'application de méthodes de théories conformes aux systèmes désordonnés.

Dans le deuxième chapitre, *physique nucléaire, physique des particules, astrophysique*, sont présentés des travaux, en général plus directement motivés par les grands programmes expérimentaux de physique lourde du CEA et donc parallèles aux activités du DAPNIA. En physique nucléaire les thèmes restent l'étude de la structure de noyaux dans des conditions extrêmes, noyaux loin de la vallée de stabilité ou très déformés, qui renseignent sur la force nucléaire dans des situations nouvelles.

La physique hadronique de basse énergie reste un domaine très actif, avec comme problèmes majeurs la symétrie chirale et le confinement des quarks. Les collisions d'ions ultra-relativistes conduisent à étudier la théorie des champs à haute température et à examiner les propriétés des plasmas quarks-gluons.

Enfin en parallèle avec la physique des grands accélérateurs, la discussion des extensions supersymétriques, souvent inspirées par la théorie des cordes, du modèle standard se poursuit. La description de la physique de la région cinématique dite de petits x a connu un développement original avec l'apparition de modèles bidimensionnels intégrables. Enfin les méthodes originales de calcul perturbatif en Chromodynamique Quantique, inspirées par la théorie des cordes, trouvent sans cesse des applications nouvelles.

En astrophysique le thème dominant reste l'étude des grandes structures et de la distribution de matière de l'univers, ainsi que leur évolution dans un passé récent. Notons aussi un travail inspiré par l'observation récente de machos par une équipe du DAPNIA.

L'intitulé *physique statistique* du dernier chapitre recouvre en réalité l'ensemble des activités en physique macroscopique. Le chapitre comprend quatre sections. L'étude des systèmes désordonnés continue à se développer. Cela va de la diffusion d'ondes électromagnétiques dans des milieux hétérogènes (un sujet porteur qui sera renforcé par un recrutement), aux verres de spin et aux milieux granulaires. On aurait pu aussi mettre dans cette section l'application de méthodes de théories conformes aux systèmes désordonnés, ainsi que des méthodes de matrices à la physique mésoscopique, qu'on trouve au premier chapitre.

La physique des objets géométriques fluctuants, chaînes polymères et membranes, est un des domaines où le SPhT a fait et continue à faire des contributions majeures. Elle relève des grands problèmes conceptuels de la physique et est particulièrement bien adaptée au savoir-faire technique et mathématique des physiciens du SPhT. La théorie des polymères est chez nous un sujet ancien qui reste pourtant remarquablement actif avec l'émergence de problèmes nouveaux comme les polymères chargés et les brosses de polymères. Pour ce qui concerne l'étude des objets bidimensionnels l'exploitation de la méthode de renormalisation des surfaces auto-évitantes s'est poursuivie et un nouveau thème très

original est apparu avec les problèmes de pliages et de méandres. L'étude des modèles de matrices, présentée en physique mathématique, aurait également eu sa place ici.

L'application des méthodes de la physique à des systèmes biologiques est maintenant une activité bien enracinée dans le service. Ici on trouve la poursuite d'une étude générale de la conformation des protéines ainsi qu'un sujet nouveau : la compréhension de l'anaphase. Plusieurs thèmes importants de la physique de la matière condensée sont représentés : les chaînes de spin quantiques, l'antiferromagnétisme dans les systèmes bidimensionnels, les électrons fortement corrélés, ainsi que l'étude de certaines transitions de phase.

Enfin dans la dernière section nous avons réuni un certain nombre de travaux qui vont des instabilités en hydrodynamique, à la turbulence, la théorie cinétique de Boltzmann discrétisée et à la dynamique hors d'équilibre et les problèmes de croissance. Je relèverai des nouveautés, comme l'application des méthodes de groupe de renormalisation à la turbulence et de jolis résultats exacts dans la dynamique des modèles d'exclusion asymétriques.

Pour ce qui concerne les tendances futures, je crois que je ne peux être plus précis que ce que j'écrivais il y a deux ans.

- *Tendances scientifiques : pronostic.* Faire des prédictions sur les tendances scientifiques des prochaines années pour une discipline où la mobilité thématique est aussi forte qu'en physique théorique conduit le plus souvent à naviguer entre la trivialité et l'erreur. Je choisirai avec modestie la trivialité sans être néanmoins sûr d'échapper complètement à l'erreur.

- Notre activité qui est parallèle aux programmes expérimentaux de la DSM sera maintenue et si possible développée. Ceci vaut pour la physique hadronique et l'astrophysique aussi bien que la physique plus légère.

- En physique légère les aspects systèmes désordonnés et la physique à connotation biologique paraissent faire partie des tendances de fond de notre discipline, mais de façon générale la physique légère continuera au gré des découvertes expérimentales et des progrès conceptuels à fournir une mine de problèmes au théoricien du SPhT.

- Je pense enfin que notre activité de physique mathématique et autres problèmes conceptuels qui a souvent été une activité d'excellence, va se maintenir à un haut niveau car elle correspond de façon idéale à la formation scolaire de nos meilleurs étudiants. La physique sous-jacente va sans doute évoluer sans qu'il soit très clair actuellement dans quelle direction. On peut cependant estimer que l'aspect général bidimensionnel : membranes, surfaces fluctuantes plongées dans des espaces de dimension arbitraire... va continuer à se développer.

Je n'ai qu'une chose à ajouter, les départs nombreux et surtout le décès de C. Itzykson ont affaibli notre activité de physique mathématique plus qu'on ne pouvait le prévoir voilà deux ans. Il sera nécessaire de prêter une grande attention à ce problème.

Jean ZINN-JUSTIN

CONSEIL SCIENTIFIQUE EXTERIEUR

A l'initiative de notre service, un Conseil Scientifique extérieur a été mis en place en 1990. Son rôle est de procéder à une évaluation critique de notre activité. Ce conseil, renouvelé par partie tous les deux ans, a la composition suivante:

- M. LE BELLAC, Université de Nice
- O. BOHIGAS, IPN-Orsay
- J. CARDY, Université d'Oxford, Département de Physique
- J. ELLIS, CERN, Division Théorique
- J. FRÖHLICH, ETH-Zurich, Physique Théorique
- M. LÜSCHER, DESY, Hambourg
- P. MITTER, Université de Montpellier
- N. SOURLAS, ENS Paris
- M. SPIRO, DAPNIA/SPP-Saclay
- J. VILLAIN, DRFMC-Grenoble

PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

et

THÉORIE DES CHAMPS

Ce chapitre regroupe un ensemble de travaux dont le dénominateur commun est la mise en œuvre de méthodes mathématiques souvent très avancées. Les travaux présentés montrent une continuité dans les thèmes de recherche abordés au SPhT. Cependant, tout en continuant à approfondir et à enrichir la panoplie des techniques d'analyse, ces méthodes ont été appliquées à de nouveaux systèmes physiques. Mentionnons par exemple l'emploi de méthodes de théorie conforme en mécanique statistique des systèmes désordonnés.

Associés à des recherches conceptuelles reposant sur des principes physiques généraux (invariances, causalité, ...), de nombreux travaux sont consacrés à l'étude de "modèles". Il ne s'agit pas ici d'une modélisation de systèmes réels compliqués, mais de "systèmes modèles" qui offrent prise à un traitement mathématique, souvent déjà subtil, tout en incorporant certains des aspects, considérés comme essentiels, du phénomène réel intéressant. La résolution de ces modèles a conduit au développement de techniques sophistiquées, fréquemment en relation avec des grands domaines actuels de recherche en mathématiques. Ces méthodes ont permis d'obtenir un nombre croissant de "résultats exacts". On entend par là l'obtention pour une grandeur physique d'une expression mathématique commode, ou tout au moins la réduction de son évaluation à un problème d'analyse classique. Ces résultats sont loin d'être des curiosités dont l'intérêt se limiterait à une prouesse technique. Ils permettent souvent d'illustrer des principes et théorèmes généraux, de contrôler des méthodes d'approximation ou perturbatives applicables à des modèles plus complexes, enfin, et peut-être surtout, ils orientent la recherche pour accéder à la description d'une physique plus réaliste. Ainsi, mélange de descriptions très qualitatives de la physique et de techniques mathématiques très abstraites, les "modèles" de ce genre jouent un rôle heuristique fondamental dans la compréhension des problèmes physiques.

Une spécificité de la physique mathématique pourrait donc consister en l'alliance entre ce type d'approche par systèmes modèles et l'accent mis sur les grands principes physiques généraux. Une telle démarche conceptuelle repose sur le dialogue qui a été établi entre physiciens et mathématiciens, et nourrit les avancées dans chacune des disciplines. Inversant la perspective, on parle même de "mathématique physique" pour décrire ces nouvelles voies d'explorations communes.

DYNAMIQUE CLASSIQUE ET QUANTIQUE

Cette section rassemble des études sur les systèmes dynamiques, la théorie cinétique de Boltzmann, la turbulence, la gravitation et le chaos quantique.

Systèmes dynamiques holomorphes, fonction de Brjuno et propriétés d'universalité

La stabilité des orbites quasipériodiques est un problème classique de la mécanique hamiltonienne : la théorie dite “KAM” (Kolmogorov, Arnold, Moser) permet d’aborder les problèmes de “petits diviseurs” liés aux résonances qui s’y présentent. Les applications sont multiples et variées : mouvements des planètes, configurations magnétiques toriques, quasicristaux et transitions structurales. Il existe une situation analogue, mais plus simple, où la question de la stabilité est complètement résolue : l’itération des fonctions analytiques ayant un point fixe indifférent (donc localement équivalentes à une rotation). Il y a stabilité si on a un voisinage du point fixe où la fonction se comporte, lorsqu’on l’itère, comme sa partie linéaire. Yoccoz a montré que le logarithme de la taille du domaine de stabilité est bien représenté par la “fonction de Brjuno”, fonction explicite issue de la théorie des nombres, et dotée d’un comportement singulier au voisinage de tous les rationnels. Cependant, en utilisant des méthodes de groupe de renormalisation, on a mis en évidence des propriétés d’universalité de ce comportement singulier : dans les systèmes dynamiques holomorphes, la condition donnant la persistance des courbes invariantes est essentiellement décrite par cette fonction, et ne dépend pas du cas particulier considéré [95/016, 95/028]. Par ailleurs, on a construit une extension complexe de la fonction de Brjuno et étudié ses transformations sous

le groupe d’invariance modulaire [P. Moussa *et al.*, en préparation]. Un résultat récent de Davie montre que la même fonction de Brjuno décrit la condition nécessaire et suffisante pour la persistance des courbes invariantes dans le modèle standard d’Arnold, Chirikov et Taylor. Ce modèle décrit directement, et de façon basique, le couplage non linéaire de deux oscillateurs, situation très courante en physique. Les propriétés d’universalité obtenues pourraient donc bien être plus proches des applications qu’on ne le supposait au départ.

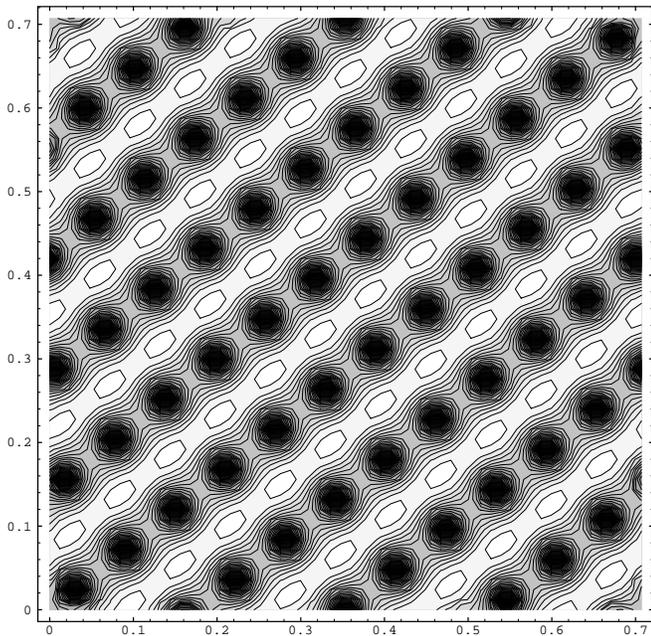
Régimes semi-classiques en mécanique quantique

L’influence du chaos classique sur la quantification (“chaos quantique”) et les calculs analytiques des états liés (spectres d’énergie et états propres) à partir des trajectoires classiques demeurent des sujets de recherches en cours.

Représentation stellaire des états quantiques en présence de chaos classique

La “représentation stellaire”, ou “paramétrisation nodale”, des fonctions d’onde de la mécanique quantique sert notamment dans les situations où le mouvement classique est chaotique. A partir d’une fonction d’onde $\phi(q)$ définie dans l’espace physique, on construit une fonction auxiliaire $\psi(z)$ du paramètre complexe $z = q - ip$ défini sur l’espace de phase. Cette fonction analytique étant presque déterminée par la position de ses zéros, on caractérise la fonction d’onde $\phi(q)$ par l’ensemble où cette fonction auxiliaire $\psi(z)$ s’annule (dans le cas le plus simple de dimension 1, cet ensemble représentatif est un nuage de points, en nombre fixé, dit “constellation des zéros”). Cette représentation encore peu usuelle est hautement non-linéaire, privilégiant le logarithme de la fonction d’onde par rapport à la fonction d’onde elle-même. Elle est

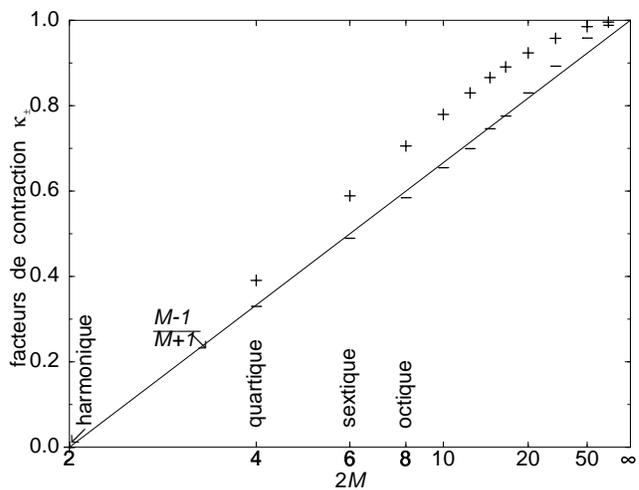
en revanche révélatrice du comportement semi-classique de la fonction d'onde sous-jacente ϕ : si les orbites du mouvement classique remplissent uniformément tout l'espace de phase disponible (propriété d'ergodicité, une caractéristique du chaos), alors les zéros des fonctions quantiques ψ pour les états liés tendent à faire de même. Bien que le comportement semi-classique de ces états liés demeure globalement un mystère, des progrès ont été enregistrés (en particulier pour le hamiltonien $H = p.q$) dans l'analyse fine de la dynamique des zéros, qui régit l'évolution des fonctions d'onde et leur régime semi-classique. Certaines fonctions propres d'un système modèle (le "chat d'Arnold") ont pu être explicitement calculées en termes des fonctions automorphes usuelles (fonction Θ de Jacobi) [S. Nonnenmacher, A. Voros, en préparation].



Représentation stellaire d'une fonction propre du "chat d'Arnold". Dans ce plan complexe, les zéros sont localisés au centre des zones noires.

Etude de la condition de quantification exacte pour les oscillateurs anharmoniques homogènes à une dimension

Destinée au calcul des énergies de liaison, cette condition de quantification remplace la résolution de l'équation différentielle de Schrödinger par celle d'une équation discrète beaucoup plus élémentaire, à savoir une condition "de point fixe" explicite à partir de laquelle les énergies liées elles-mêmes se calculent par simple itération. Ces travaux ont été continués [95/106]. Nous avons vérifié numériquement la convergence du schéma jusqu'au degré 400 du potentiel et accru sa description théorique. Des preuves plus rigoureuses et l'extension aux potentiels polynômiaux plus généraux sont en cours d'étude.



Quelques facteurs de contraction des équations de point fixe déterminant les spectres d'énergie des potentiels homogènes en fonction de leur degré $2M$. Les "+" (resp. "-") correspondent aux ensembles des valeurs propres paires (resp. impaires), et la ligne diagonale à une prédiction linéaire approchée. Les facteurs de contraction mesurent par leur petitesse la qualité de la convergence; on voit ici que la valeur limite supérieure 1 n'est jamais atteinte, elle n'est qu'approchée et seulement pour des anharmonicités au-delà de tout intérêt physique.

THÉORIE DES CHAMPS

Cette section regroupe divers aspects de la théorie des champs qui ont été abordés avec une forte coloration mathématique.

Structure analytique des fonctions de corrélation

Le sujet d'intérêt est ici la théorie quantique des champs dans deux de ses nouveaux domaines d'applicabilité : la théorie des champs "thermique" (ou à "température finie") et la théorie des champs sur un espace-temps courbe analytique. Dans les deux cas, l'investigation concerne les structures mathématiques nouvelles, intégrant des principes physiques propres à ces deux domaines, auxquelles la théorie quantique des champs doit s'adapter pour rester cohérente et fournir des représentations "complètes" (c'est-à-dire non-perturbatives) de fonctions fondamentales telles que les "propagateurs" des champs. Ce double programme, poursuivi avec succès, est actuellement en plein développement. A ces recherches, s'ajoute une étude des amplitudes de diffusion dans le cadre d'une théorie de champs chargés non-locaux dans l'espace-temps minkowskien.

Théorie des champs thermiques

Le cadre général des théories de champs relativistes dans un état d'équilibre thermique (donc brisant l'invariance relativiste) a été défini de façon rigoureuse. Des propriétés de structure des fonctions à n points intégrant les "formalismes à temps réel et à temps imaginaire" (faisant l'objet d'un fameux débat dans l'approche traditionnelle perturbative) ont été établies. Une représentation intégrale complète des propagateurs permet d'aborder des problèmes de fond de la théorie tels que "le concept de quasiparticule" et la "version thermique du théorème de Goldstone" [95/148, 96/053, 96/054, 96/055].

L'intérêt de ces recherches concerne notamment l'étude des milieux de type "plasma quark-gluon" (voir le chapitre suivant).

Théorie des champs sur un espace-temps courbe analytique

Les modèles d'espace-temps einsteinien à structure analytique, tels que ceux de de Sitter et de Schwarzschild, outre leur intérêt physique (le premier pour la phase d'expansion de l'univers primitif, le second comme modèle simple incluant un "trou noir") présentent le grand avantage théorique de se prêter à une formulation cohérente de la théorie quantique des champs dans le même esprit que pour l'espace-temps "plat" de Minkowski.

Ceci a été réalisé avec succès pour l'espace-temps de de Sitter grâce à des méthodes mathématiques appropriées. L'introduction d'"ondes planes de sitteriennes" globales et la prise en compte de la structure analytique complexe de cet espace ont permis d'obtenir une compréhension nouvelle des champs de Klein-Gordon de sitteriens et de leur interprétation thermique (au sens de Gibbons et Hawking). Ces méthodes fournissent de plus une représentation intégrale des propagateurs de champs en interaction et un "espace de Fourier global" de variables de type énergie-impulsion laissant espérer des développements parallèles à ceux de la théorie des champs minkowskienne, tout en donnant des réponses explicites (spécifiques à cet exemple d'univers) à des problèmes posés par la théorie des champs sur espace-temps courbe [94/160, 95/092]. L'application à la cosmologie de ces résultats est en cours. Il s'agit de l'étude des fluctuations quantiques dans un modèle d'univers ouvert, une question qui a récemment attiré l'attention de nombreux chercheurs en relation avec les données récentes provenant de

l'astrophysique (satellite COBE). L'application des nouvelles méthodes introduites dans le cadre de la théorie quantique des champs sur l'espace-temps de de Sitter semble permettre un traitement de ces questions à la fois plus simple et plus puissant [U. Moschella, R. Schaeffer *et al.*, en préparation]. Ces méthodes paraissent aussi devoir s'appliquer à la théorie des champs sur l'espace-temps de Schwarzschild.

Des résultats de mathématiques pures ont constamment accompagné les recherches précédentes, lesquelles en sont indissociables : ils concernent la mise en oeuvre (dans ses divers aspects analytiques) d'une transformation de type Fourier-Laplace sur l'hyperboloïde à une nappe [94/152, 95/061, 95/062, 95/063].

Amplitudes de diffusion dans une théorie de champs chargés non-locaux

Dans l'approche générale de la théorie quantique relativiste des "observables locales" de R. Haag, il a été montré par Buchholz et Fredenhagen que les états de particules chargées peuvent toujours être construits par l'action sur l'état du vide d'opérateurs localisés, non pas dans des régions bornées de l'espace-temps, mais dans des cônes du genre espace. Nous avons étudié comment les fonctions à quatre points des champs non-locaux associés à ces opérateurs permettent de démontrer des propriétés d'analyticité du type "relations de dispersion" pour les amplitudes de diffusion de ces particules chargées [95/140].

Exploration générale de la théorie des champs dans la limite d'un grand nombre de composantes

De la même façon que les modèles de matrices dans leur limite de double échelle fournissent des représentations de surfaces aléatoires triangulées dynamiquement, sommées

sur différentes topologies, le modèle vectoriel $O(n)$ représente des polymères branchés discrétisés dans la limite où n tend vers l'infini et la constante de couplage vers sa valeur critique d'une façon corrélée. Les surfaces dans le cas d'un modèle de matrices et les polymères branchés aléatoirement dans le cas des modèles de vecteurs sont classés par les différentes topologies de leurs graphes de Feynman et donc par puissances en $1/n$. Bien que les théories de matrices soient les plus intéressantes, une compréhension détaillée de ces théories existe seulement en dimension $d \leq 1$. Par contre, dans de nombreux cas, le modèle vectoriel $O(n)$ peut être étudié en dimension $d > 1$, et ainsi peut guider l'intuition pour décrire une théorie quantique des champs en terme d'objets étendus en dimension 4, problème qui demeure en théorie des particules élémentaires. Dans cet esprit, on a étudié le voisinage des points (multi)critiques du modèle $O(n)$ vectoriel, dans la limite de double échelle, où n tend vers l'infini et la constante de couplage vers sa valeur critique de façon corrélée. Pour chaque potentiel multicritique, il existe une dimension critique où le champ collectif devient libre. Au-dessous de cette dimension, les termes sous dominants du développement en $1/n$ sont amplifiés par des singularités infrarouges et, par conséquent, la limite de double échelle est non triviale [95/132].

A l'interface entre théorie des champs et mécanique statistique, des résultats rigoureux en théorie des polymères ont été obtenus, et un nouveau formalisme de théorie des champs, développé pour les modèles de membranes polymérisées, a été mis en oeuvre dans différentes études. Ces travaux sont mentionnés en physique statistique dans la rubrique "Polymères et membranes".

SYSTÈMES BIDIMENSIONNELS

L'étude des systèmes bidimensionnels joue un rôle important, tant sur le plan des méthodes de physique mathématique que sur celui des applications aux interactions fondamentales (théorie des cordes, gravitation quantique) et à la mécanique statistique des systèmes sans, et plus récemment, avec désordre. Des méthodes mathématiques avancées, utilisant en particulier l'invariance conforme, des techniques des systèmes intégrables et des propriétés des matrices aléatoires, permettent d'obtenir un nombre croissant de résultats exacts.

Théories conformes

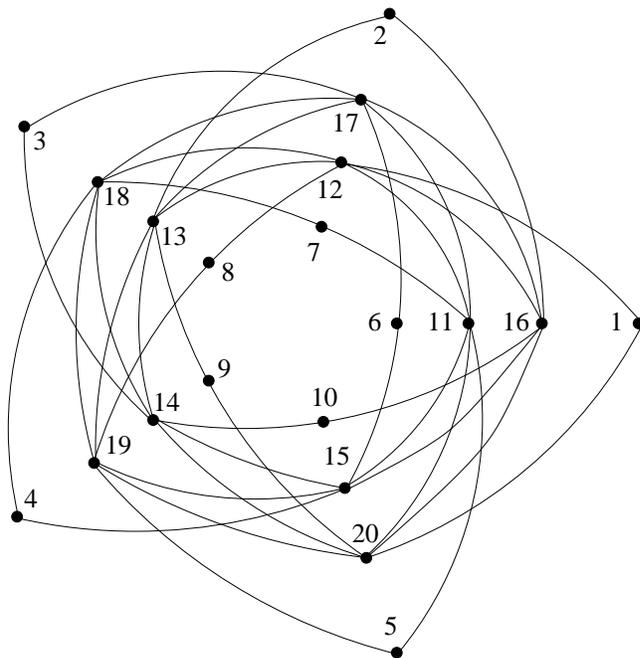
Classification et structures algébriques des théories conformes

L'étude de la classification et des structures algébriques des théories conformes (modèles de Wess-Zumino-Witten) et des modèles intégrables sur réseau qui leur sont associés est un sujet poursuivi depuis plusieurs années au SPhT. Aussi bien le concept d'invariance modulaire des fonctions de partition que l'étude des modèles de "hauteurs" sur réseau avaient mené à la conclusion que des graphes sont sous-jacents à toutes ces constructions : diagrammes de Dynkin dans le cas le plus simple, graphes plus compliqués construits empiriquement en général.

Des progrès récents ont été obtenus selon deux voies.

1) On a montré que dans la structure de l'algèbre d'opérateurs des théories conformes sont cachées des données relatives au graphe [94/113]. Réciproquement, ces données peuvent dans de nombreux cas être inversées pour reconstruire le graphe [95/118] (voir figure). Ceci fournit donc une construction systématique et ra-

tionnelle des graphes.



Ce graphe correspond à une théorie obtenue par le plongement conforme $\widehat{sl}(5)_3 \subset \widehat{sl}(10)_1$.

On obtient ainsi une vision globale et cohérente de ces théories ainsi que la confirmation du fait que leur classification équivaut à celle de graphes particuliers [95/082]. Parmi les quelques points qui demeurent à éclaircir, figurent la construction explicite du modèle intégrable sur réseau attaché à un graphe et la détermination de ses poids de Boltzmann. Une étude récente d'identités remarquables satisfaites par ces poids [96/056] laisse espérer un progrès final et la conclusion de ce programme entrepris il y a près de dix ans.

2) On apprend beaucoup de l'étude parallèle des théories superconformes à $N = 2$ générateurs ou des théories topologiques associées. D'une part, ces théories sont classées selon un schéma voisin des théories conformes usuelles. D'autre part, étant très structurées, elles nous donnent des informations d'un type nouveau sur ce schéma. Les graphes

précédemment introduits décrivent ainsi les flots de solitons entre les états fondamentaux des théories superconformes (selon Cecotti et Vafa). L'observation nouvelle est que ce graphe code la géométrie d'un système de vecteurs ("racines"), et que le groupe engendré par les réflexions dans les hyperplans orthogonaux à ces racines n'est autre que le groupe de monodromie qui apparaît naturellement dans l'étude des théories $N = 2$ superconformes mais dont la construction explicite faisait jusque là défaut [94/156, 95/089].

Invariance modulaire

Les théories conformes s'intéressent à des corrections non extensives à la limite thermodynamique. Celles-ci sont universelles, mais sensibles aux conditions aux limites. En particulier, changer celles-ci interdit la propagation de certaines excitations élémentaires et en autorise d'autres. C'est un problème difficile de décider quels opérateurs de la théorie se propagent pour une géométrie fixée. Sur un cylindre avec conditions aux limites périodiques, des techniques existent pour répondre à cette question. Elles font intervenir des problèmes de théorie des nombres qui ont des liens inattendus avec des thèmes de mathématique divers. Le lien avec la classification des algèbres de Lie simplement lacées pour $\widehat{su}(2)$ est connu depuis longtemps. Nous explorons des liens avec les jacobiennes des courbes de Fermat dans le cas des modèles associés à $\widehat{su}(3)$ [96/031, 96/032].

Systèmes intégrables, groupes quantiques

Théorie des champs sur réseau bidimensionnel

Nous avons complété et systématisé la structure de l'opérateur de plaquette qui engendre le formalisme matriciel permettant l'étude des théories des champs sur réseau bidimensionnel. En particulier, nous avons montré comment une théorie des champs scalaires, définie à partir

d'un lagrangien avec termes cinétique et potentiel, pouvait être décrite à partir d'un opérateur de plaquette [94/096]. Le but recherché est de trouver une règle qui permettrait de construire la fonction de partition d'un modèle à partir de son opérateur de plaquette. Le seul moyen que nous ayons à notre disposition aujourd'hui pour découvrir une telle règle est d'utiliser les valeurs propres de la matrice de transfert.

Ayant appliqué ce formalisme au modèle à 6 vertex, et après avoir retrouvé les valeurs propres de la matrice de transfert correspondante, nous avons développé ces valeurs propres sur les polynômes de Schur, homogènes et symétriques dans les variables qui décrivent l'ansatz de Bethe. Nous espérons maintenant obtenir un tel développement en polynômes de Schur pour les puissances des valeurs propres, puis sommer sur toutes les valeurs propres afin de reconstruire la fonction de partition. Un tel programme a déjà été réalisé dans le cadre de l'approximation des fermions libres.

Groupes quantiques et yangiens

La structure de groupe quantique a été introduite dans le cadre des modèles intégrables. Elle joue un rôle essentielle dans les théories de champs conformes et/ou intégrables.

Les symétries quantiques ont trouvé beaucoup d'applications ces dernières années, dans les chaînes de spins entre autres. On peut utiliser les représentations de ces symétries pour classer les états de tels systèmes. Concrètement, on indexe les états par les valeurs propres d'un ensemble maximal d'observables construites à partir des symétries et qui commutent, ce qui donne une description naturelle et fine. L'étude du centre des groupes quantiques a permis de construire de tels ensembles d'observables. La différence avec les symétries classiques est que ces ensem-

bles sont nécessairement redondants [96/019].

Un autre cas de symétrie quantique qui apparaît dans de nombreux systèmes intégrables dotés d'un groupe de symétrie globale est la structure de yangien. L'étude des propriétés de ces algèbres a été poursuivie [94/119, 94/155].

Quantification des solitons

Ces travaux s'inscrivent dans le programme d'étude des fonctions de corrélation des modèles intégrables bidimensionnels, par exemple celui de sine-Gordon, paradigme des systèmes intégrables. On cherche à calculer tous les éléments de matrices des opérateurs locaux de la théorie. Des formules explicites, mais assez complexes, avaient été obtenues en suivant le programme de "bootstrap" et à partir de l'expression exacte de la matrice de diffusion. L'interprétation de ces formules était loin d'être limpide. On a montré comment ces formules résultaient de la quantification directe de la théorie dans de bonnes variables adaptées aux solitons. Afin de mener à bien cette quantification, on a dû introduire un ensemble d'objets et d'opérateurs, nouveaux dans la théorie des systèmes intégrables [96/018, D. Bernard, en préparation].

Chaînes de spins intégrables et systèmes coulombiens

Ces thèmes de recherches relèvent de la mécanique statistique, mais leur analyse fait largement appel aux techniques des théories conformes, des systèmes intégrables et des modèles de matrices.

Mécanique statistique du système coulombien bidimensionnel

Dans l'étude de l'effet Hall quantique fractionnaire, Laughlin a proposé une fonction d'onde d'essai, dont la normalisation est difficile à calculer. Ce problème peut s'interpréter

comme celui d'un gaz coulombien soumis à un champ neutralisant. Dans le prolongement d'un travail déjà publié, on a poursuivi l'étude du système en présence d'un champ électrique, à l'aide des polynômes orthogonaux sur un domaine complexe. On a également traité le problème de la séparation de l'énergie libre résiduelle, c'est-à-dire comment isoler explicitement la partie extensive de la contribution du fond neutralisant [M. Gaudin, travail en cours].

Modèles à interaction à longue portée, modèle de Calogero-Sutherland

Le modèle de Calogero-Sutherland décrit des particules en mouvement sur un cercle qui interagissent avec un potentiel proportionnel à l'inverse du carré de la distance qui les sépare et à un paramètre β . Ce modèle est intégrable et le spectre est connu exactement. De plus, c'est un exemple non-trivial de modèle à statistique fractionnaire, interpolant entre la limite d'un gaz de Bose ($\beta = 0$) et d'un gaz de Fermi ($\beta = 1$). L'intérêt pour les modèles de ce type ne cesse de grandir en raison de leurs liens avec des sujets de recherches actuelles, comme la théorie des matrices aléatoires, les modèles intégrables et les théories conformes.

En utilisant la méthode des polynômes de Jack, développée précédemment, on a calculé, pour toute valeur rationnelle de β , la fonction de Green avancée du modèle de Calogero-Sutherland [95/147]. D'autre part, on a montré que l'intégrabilité de ce modèle et certaines de ses propriétés intéressantes sont préservées si on introduit des réflexions. En particulier, on peut définir et résoudre des modèles de chaînes de spins avec interaction à longue portée et avec différentes conditions aux bords [95/003]. La propriété de dualité, qui relie deux modèles avec deux valeurs différentes des con-

stantes de couplage, peut elle aussi être retrouvée pour le modèle avec réflexions [D. Serban, en préparation].

Modèles intégrables et QCD en quatre dimensions

L'étude de l'amplitude de diffusion $A(s, t)$ dans le régime de haute énergie, s grand, t fixé, est un problème difficile à traiter à partir de la chromodynamique quantique (QCD). Des travaux récents de Lipatov, Faddeev et Korchemsky ont montré comment des classes de diagrammes de Feynman importants dans ce régime peuvent être traitées par des techniques issues des systèmes intégrables à $1 + 1$ dimensions. La contribution due à l'échange de n "reggéons" est contrôlée par un hamiltonien d'une chaîne XXX à n spins, qu'il s'agit de diagonaliser. Ce problème a été analysé pour $n = 2, 3$, en étudiant l'équation dite de Baxter et ses différentes solutions, polynômiales ou non, et les équations de récurrence qui permettent de les déterminer. De nouvelles expressions pour les vecteurs propres ont été obtenues [95/081].

L'étude des chaînes de spins zéro a donné de nouvelles façons d'étudier les équations de l'ansatz de Bethe. On a commencé à généraliser ces nouvelles approches à des chaînes de spin XXX et XXZ arbitraires [Z. Maassarani, en préparation].

Résultats mathématiques

Dans la théorie perturbative de certains modèles chiraux (modèle de Potts, chaînes quantiques Z_n, \dots) interviennent des sommes trigonométriques qui impliquent des fonctions symétriques des racines n èmes de l'unité. Ce qui est remarquable, c'est qu'une fois sommées, ces expressions s'écrivent simplement comme des polynômes en n dont le degré dépend de la complexité de la somme initiale.

Une systématique a été établie à partir des méthodes très classiques liées aux fractions rationnelles (décomposition en éléments simples, relations coefficients-racines) et aux matrices. Elles permettent de calculer directement les premières sommes, puis celles d'ordre plus élevé par récurrence [95/017, 95/127].

Théories conformes et systèmes bidimensionnels désordonnés

Alors qu'il existe de nombreuses applications des méthodes de théories conformes à l'analyse des systèmes bidimensionnels ordonnés, il n'en est pas de même pour les systèmes désordonnés. Un exemple expérimental d'applications potentielles est fourni par l'étude de la transition localisation-délocalisation intervenant lors de la transition entre deux plateaux de l'effet Hall quantique, phénomène pour lequel une description théorique satisfaisante est toujours attendue. Un cours d'école d'été a eu pour objet de mettre en évidence l'apport des techniques des champs conformes aux problèmes des systèmes désordonnés, en dégagant quelques thèmes dont l'approfondissement permettrait une application plus systématique de ces méthodes [95/113].

Trois classes de modèles désordonnés simples ont été explorées.

- 1) Des versions désordonnées des modèles de Wess-Zumino-Witten, dont certains cas particuliers s'appliquent à la transition Hall ou à la description de fermions près du niveau de Fermi en présence d'impuretés [95/006].
- 2) Les méthodes conformes de bosonisation amènent à des généralisations à grand nombre de composantes du modèle de sine-Gordon en phase aléatoire. Des développements à courte distance permettent alors des calculs analytiques. On peut ainsi comparer les méthodes de groupe

de renormalisation et les méthodes variationnelles dans des régimes où ces dernières sont supposées exactes. Cela a permis de suggérer une explication aux contradictions apparentes entre des calculs de groupe de renormalisation dans la méthode des répliques et des calculs variationnels [95/073].

3) Un des modèles considérés dans le cadre des études de la transition entre les plateaux de l'effet Hall quantique est le modèle de fermions de Dirac en deux dimensions avec masse et/ou potentiel aléatoires (modèle proche de celui d'Ising avec couplage aléatoire). Ce modèle a été étudié par une méthode algébrique, dite "supersymétrique". Cela conduit à des théories conformes non-unitaires, moins étudiées jusqu'à présent que les théories unitaires. La caractéristique la plus surprenante de ces théories est la présence de logarithmes dans les fonctions de corrélation, propriété confirmée par le calcul des fonctions de corrélation à quatre points [96/040].

Matrices et surfaces aléatoires, cordes

Modèles intégrables sur surfaces aléatoires et théories des cordes sur un espace discret

On sait depuis 't Hooft que le calcul des fonctions de partition de systèmes de matrices aléatoires de taille $N \times N$, pour N grand, s'organise en un développement topologique où la contribution d'ordre $1/N^{2g}$ provient de surfaces de genre g . Depuis 1989, les nouvelles techniques appliquées à l'étude des matrices aléatoires de grande taille ont permis d'approfondir la compréhension des modèles de gravité bidimensionnelle et des théories de cordes de charge centrale $c \leq 1$. Les modèles de matrices liés aux diagrammes de Dynkin ont permis de construire, d'une façon non-perturbative, une théorie de champs de cordes dont les excitations élémentaires sont les boucles plongées

dans l'espace-cible. Les espaces de plongement qui permettent un comportement critique non-trivial sont classés par les algèbres classiques de Lie des séries A_n , D_n , E_6 , E_7 et E_8 (ADE). Géométriquement, ces modèles représentent des systèmes statistiques liés aux diagrammes de Dynkin, définis sur un réseau aléatoire.

Modèles intégrables de cordes

Le modèle de cordes ouvertes et fermées en 1+1 dimensions est formulé comme un système coulombien qui permet une interprétation fermionique. Le modèle admet une solution exacte dans la limite N grand et un développement systématique en $1/N$ [94/097]. La forme coulombienne de la fonction de partition s'écrit comme une "supersymétrisation" du système coulombien qui décrit la corde fermée. La symétrie dynamique du modèle est donnée par un produit semi-direct de l'algèbre de Virasoro et l'algèbre de courants $U(1)$ [95/001].

Technique diagrammatique pour les théories de champs de cordes

La théorie collective du modèle de matrices peut être interprétée comme une théorie de champs de cordes. Au cours de son évolution, la corde peut absorber ou émettre des cordes virtuelles. Des règles de Feynman précises permettent de calculer les amplitudes de boucle sur une surface de topologie quelconque [95/056]. Le propagateur est la somme des surfaces cylindriques et les vertex décrivent les processus d'interactions de plusieurs cordes qui changent la topologie de la feuille d'univers.

Modèle $O(n)$

Bien que le modèle $O(n)$, ou le modèle de boucles sur réseau aléatoire, soit sans doute parmi les plus intéressants problèmes de géométrie aléatoire étudiés au cours des dernières années, les expressions exactes pour les ampli-

tudes de boucle n'étaient pas connues. Le modèle $O(n)$ défini sur un réseau fluctuant est équivalent à un problème de matrices aléatoires dont la solution est connue pour $-2 \leq n \leq 2$ dans la limite d'échelle. On a obtenu la solution exacte du modèle hors du point critique et pour un potentiel arbitraire. Grâce à une généralisation de la "méthode des moments", appliquée auparavant pour le cas $n = 0$, on a obtenu des expressions explicites pour les amplitudes d'une et deux boucles et pour l'énergie libre de genre zéro. L'amplitude d'une boucle et l'énergie libre ont également pu être calculées à l'ordre thorique. La "méthode des moments" permet d'obtenir de façon systématique les amplitudes de genre quelconque. Les résultats obtenus, non seulement reproduisent pour $-2 \leq n \leq 2$ les régimes (multi)critiques déjà connus, mais permettent aussi d'étudier les intervalles $n < -2$ et $n > 2$. Comme on s'y attendait, le comportement critique pour $n > 2$ est celui des polymères branchés. Les résultats obtenus ouvrent la possibilité d'une étude systématique des topologies plus élevées, ce qui généraliserait les contraintes de Virasoro dans le modèle d'une matrice [95/068, 95/133].

Structures intégrables dans les modèles des surfaces aléatoires

Les modèles de matrices associées aux modèles statistiques $O(n)$, ADE et $\hat{A}\hat{D}\hat{E}$ définis sur une surface aléatoire peuvent être construits comme des perturbations du modèle d'une matrice hermitique qui génère l'ensemble des graphes planaires. La perturbation est réalisée par un opérateur différentiel qui agit dans l'espace des constantes de couplage. Cet opérateur préserve les propriétés d'intégrabilité du modèle d'une matrice, et les équations bilinéaires de Hirota se transforment

en équations fonctionnelles bilinéaires [96/011, 96/029].

Les modèles ADE et $\hat{A}\hat{D}\hat{E}$ peuvent être reformulés comme des systèmes coulombiens où les charges correspondent aux racines simples de ces algèbres de Lie. Les structures intégrables associées avec ces systèmes coulombiens permettent de représenter les fonctions de partition correspondantes en terme des "fonctions τ " au sens de Sato pour certaines hiérarchies d'équations intégrables [95/114].

Calcul perturbatif en théorie des cordes

En théorie des cordes, le calcul perturbatif n'est possible qu'en dimension d d'espace-temps grande négative (la dimension D de l'espace-temps cible restant finie). On désigne par "tachyons" les excitations de plus basse énergie dans cette théorie. On a calculé, pour chaque ordre de la théorie de perturbation, les fonctions de corrélation de vertex de ces tachyons [95/084].

Résultats mathématiques en théorie des matrices aléatoires

Dans le cadre de l'étude des matrices aléatoires, on a obtenu une nouvelle démonstration des relations connues entre les fonctions d'espacement des trois ensembles de matrices, orthogonales, unitaires et symplectiques. Ces relations sont utilisées pour calculer les séries en puissances ou séries asymptotiques des fonctions d'espacement à partir de deux déterminants de Fredholm [96/064].

Théorie topologique des champs

Une théorie des champs topologique est une théorie physique, pour laquelle les corrélations d'observables ne dépendent pas des points où ces observables sont définies, mais seulement de la topologie de l'espace tout entier. De telles théories se révèlent utiles par exemple pour essayer de quantifier les équations

d'Einstein de la relativité générale, c'est-à-dire d'incorporer les fluctuations quantiques d'espace (résumées dans l'aspect topologique de la théorie) et de matière (modélisées par les champs eux-mêmes). Ces théories topologiques ont en général une structure très riche : les corrélations d'observables sont régies par des systèmes d'équations différentielles intégrables. L'étude de telles théories de la gravitation quantique produit des à-côtés mathématiques surprenants, en particulier des résultats profonds et nouveaux de géométrie énumérative [94/111, 94/161, 95/080]. Typiquement, on cherche à énumérer les courbes tracées sur une variété V , sujettes à certaines conditions (incidence de points, de droites, ...). L'idée, due à Manin et Kontsevich, est d'introduire une théorie topologique des champs à valeurs dans la variété V . Les nombres de courbes cherchés sont alors simplement des corrélations d'observables spécifiant le degré et les diverses conditions imposées aux courbes.

AUTRES SUJETS

Gravitation classique, métrique axisymétrique stationnaire en présence de matière

Dans le cadre de la gravitation d'Einstein, un long essai a été consacré à "La métrique axisymétrique stationnaire en présence de matière" [95/053]. En dehors des masses en rotation (disques, anneaux, galaxies, ...) tout est suspendu à la résolution de la fameuse équation non-linéaire de Ernst. Il se trouve qu'une variante de la méthode inverse de la diffusion, mise au point par Zakharov en 78, permet en gros de remplacer l'équation de Ernst par une équation linéaire. On voit certaines classes de solutions généralisant la métrique de Kerr. L'équation de Ernst serait réduite à une équation intégrale linéaire de noyau connu dans sa forme. Pour achever de le

déterminer reste l'importante question des conditions de raccordement de la matière.

Algèbres des courants et groupes des difféomorphismes de l'espace physique

L'idée de base de cette recherche est qu'il est possible de décrire des phénomènes très variés en mécanique quantique au moyen des représentations d'un seul groupe, introduit par exponentiation d'une algèbre de courants : le groupe des difféomorphismes de l'espace physique. La construction de ces représentations est un problème difficile, relié à la construction de mesures quasi-invariantes sous l'action des difféomorphismes de l'espace physique sur lequel est défini le système quantique.

On ne connaissait des solutions à ce problème que dans quelques cas particulier : le cas d'un nombre fini de particules (qui a donné lieu à la première prédiction de l'existence des "anyons") et le seul cas en dimension infinie des mesures de Poisson qui décrit un gaz de Bose libre à température nulle. L'introduction de processus stochastiques auto-similaires a permis de construire de nouvelles classes de mesures sur \mathbb{R}^∞ qui sont quasi-invariantes, et à partir de là, les représentations unitaires des groupes $\text{Diff}(\mathbb{R})$ qui s'en déduisent. Ces nouvelles représentations peuvent être interprétées comme décrivant une transition de phase quantique dans un modèle de gaz de particules. D'autres classes de mesures sur \mathbb{R}^∞ quasi-invariantes par l'action de $\text{Diff}(\mathbb{R})$ et pour lesquelles l'espace des configurations est composé par des ensembles fractals (ensembles de Cantor aléatoires) ont aussi été obtenues [94/140, 95/041].

Problème à trois corps quantique, théorie de l'effet Efimov

Ce cas particulier de problème à trois corps correspond à la situation où deux des trois parti-

cules ont un état lié à énergie nulle. Il en résulte paradoxalement que le système à trois corps présente une infinité d'états liés. Ce problème a été traité par combinaison des méthodes de Born-Oppenheimer et de la coordonnée génératrice. On obtient ainsi une démonstration rigoureuse de l'effet, à l'aide de méthodes élémentaires [94/106].

“Super-Instantons” dans les modèles sigma non-linéaires à deux dimensions

Patrascioiu et Seiler ont trouvé que la théorie des perturbations, pour les théories de jauge ou les modèles sigma, diffère au deuxième ordre de la théorie standard, si on utilise des conditions aux limites assez particulières (baptisées “super-instantons”) qui brisent la symétrie du modèle en volume fini, mais pas en volume infini. Nous avons montré que ce phénomène est précurseur de divergences infra-rouge qui apparaissent au troisième ordre, conséquences des corrélations à longue distance induites par les super-instantons [95/048]. Ce phénomène n'invalide donc pas a priori la théorie des perturbations.

Description des hétérojonctions

On a clarifié, par des approches microscopique et semi-empirique, la manière dont se raccordent, dans une hétérojonction entre deux matériaux différents (métaux ou semiconducteurs), les fonctions d'onde électroniques lissées, de part et d'autre de la jonction. Ces fonctions d'onde présentent des discontinuités aux hétérojonctions, caractérisées par un hamiltonien effectif ou une matrice de transfert dont les propriétés sont précisées [94/158, 95/010].

Construction de puits quantiques par la méthode inverse de la diffusion

On ne sait pas construire des lasers infrarouges pour la vision de nuit qui satis-

fassent aux trois critères suivants : 1) grande longueur d'onde afin d'éviter d'endommager la rétine, 2) fonctionnement à température ordinaire, 3) portabilité. Actuellement, seuls deux critères, choisis de façon quelconque parmi les trois précédents, peuvent être simultanément mis en œuvre. L'idée est de construire une succession de puits quantiques, à l'échelle du nanomètre, qui permettent le pompage optique en utilisant l'inversion du temps de vie des résonances, la résonance la plus haute en énergie ayant un temps de vie plus long que la plus basse. Seuls des puits quantiques ayant un profil complexe devraient autoriser cette inversion. En combinant trois ingrédients : 1) une méthode d'approximation de Padé qui permet de reconstruire la phase du coefficient de transmission ne connaissant que son module, 2) une méthode classique d'inversion, 3) une nouvelle transformation unitaire qui applique un hamiltonien effectif avec masse variable sur le cas standard de la masse constante en utilisant la description donnée ci-dessus pour des hétérojonctions, on a pu trouver une structure à base de gallium, d'aluminium et d'arsenic qui laisse espérer une solution proche du problème [96/052].

Filtres analytiques pour la mesure des sections efficaces

Dans la diffusion électron-cible, à énergie fixée, la section efficace différentielle a en général des propriétés d'analyticité par rapport à l'angle de diffusion. Rien de tel pour les fluctuations statistiques et le bruit lié à la mesure expérimentale. Partant de cette remarque, on cherche à construire des protocoles expérimentaux qui permettent le traitement le plus adéquat du signal expérimental (filtres analytiques). Des simulations effectuées sur ordinateur montrent qu'une amélioration de plus de

10db, soit un ordre de grandeur dans la réduction du bruit est possible. Une première application de ces idées à été testée en physique atomique en utilisant les protocoles expérimentaux existants non optimisés. Malgré cela, d'excellents résultats ont été obtenus [96/051].

Chaîne de spins frustrés et codes correcteurs d'erreurs

Le principe des codes correcteurs d'erreurs, utilisés en télécommunications, est d'introduire de la redondance dans les messages à transmettre, afin de les rendre robustes au bruit engendré par les imperfections de la transmission. Ont été considérés les codes dits de convolution : le message est discrétisé en une suite de signaux binaires, que l'on peut interpréter comme une chaîne de spins d'Ising, et le codage consiste à former des produits locaux de ces spins, d'où le terme de convolution. Rujan et Sourlas ont montré que l'étape de décodage après transmission revient à trouver les états fondamentaux d'une chaîne de spins frustrés. Le cas le plus simple, qui correspond à des interactions

aléatoires à deux et à trois spins, a été étudié en détail [94/089].

Fonctionnelles browniennes

Les fonctionnelles exponentielles du mouvement brownien interviennent dans divers modèles physiques unidimensionnels avec désordre gelé (diffusion en milieu aléatoire, physique statistique d'une particule soumise à un potentiel de Wiener), mais aussi dans d'autres domaines comme la biologie ou l'économie pour modéliser des processus stochastiques multiplicatifs. L'étude de diverses propriétés statistiques des fonctionnelles exponentielles du mouvement brownien a été faite en utilisant les méthodes de la physique des systèmes désordonnés (intégrale fonctionnelle, équation de Fokker-Planck), et la théorie probabiliste fine du mouvement brownien (notamment l'identité en loi de Bougerol concernant le sinus hyperbolique du mouvement brownien). La comparaison des résultats obtenus par la résolution d'une équation de Fokker-Planck et par des méthodes directes browniennes conduit à des identités surprenantes [96/004].

PHYSIQUE NUCLÉAIRE PHYSIQUE DES PARTICULES ASTROPHYSIQUE

Les physiciens de ces trois domaines ont en commun de s'intéresser principalement à la phénoménologie. Ils accordent le plus grand poids à la description des mécanismes régissant les phénomènes physiques auxquels ils s'intéressent, l'outil pour y parvenir n'étant pour eux qu'un moyen. L'intuition physique joue un rôle majeur: il ne leur est pas demandé que leur théorie soit exacte, mais tout simplement que ce qu'ils disent soit pertinent. Il est bien évident, de ce fait, que les propriétés prédites par la modélisation théorique sont à vérifier *a posteriori* par l'expérience ou l'observation. Inversement, savoir quelles contraintes ces dernières imposent à la description des systèmes étudiés est du ressort du théoricien. Les relations avec les grands programmes expérimentaux sont ainsi naturellement privilégiées. Les démarches scientifiques dans ces trois domaines, et même dans les sous-domaines mentionnés ci-dessous, sont toutefois nettement différentes. Selon les sujets abordés, les convergences de vues avec les physiciens de la théorie des champs, ou ceux de physique statistique peuvent devenir bien plus fortes, en particulier lorsqu'il semble possible de trouver aux approches empiriques des fondements plus rigoureux. Ces différences n'empêchent pas les discussions, quasi quotidiennes, les collaborations, qui restent occasionnelles, et de rares mais réguliers passages plus ou moins définitifs d'un domaine à l'autre. Cette diversité d'intérêts, et la connexion avec des programmes nationaux ou internationaux, a pour corollaire la recherche de collaborations extérieures au laboratoire par toutes les équipes, sans exception.

STRUCTURE NUCLÉAIRE

La physique de la structure nucléaire est devenue celle des noyaux extrêmes : noyaux très riches en neutrons, ou au contraire extrêmement déficients, loin de la vallée de stabilité; noyaux en rotation si rapide que leur cohésion en devient problématique. L'existence possible de très grandes déformations dans ces noyaux, quadrupolaires, octupolaires ou plus complexes encore, nous fournit un outil d'une richesse sans cesse renouvelée pour tester les possibilités de la prédiction théorique et étendre les limites des noyaux connus. La description de ces noyaux se fait à l'aide d'une interaction effective, phénoménologique, entre les nucléons, le problème à N-corps étant résolu dans l'approximation du champ moyen.

Déformations

L'étude du couplage entre les modes quadrupolaires et octupolaires du ^{194}Pb [95/008] complète des travaux plus anciens effectués dans la région des zirconiums et montre le faible couplage des modes octupolaires aux modes quadrupolaires, aussi bien à déformation normale que pour les états superdéformés du ^{194}Pb . La méthode de la coordonnée génératrice (GCM) a été utilisée pour étudier les fonctions d'onde collectives dans les deux modes quadrupolaires et octupolaires simultanément. Enfin le même couplage a été analysé pour les isotopes légers des noyaux de xénon et de baryum [94/121]. Pour ces deux noyaux, on n'observe pas de déformation octupolaire permanente dans l'état fondamental. Toutefois, un calcul dynamique montre que la collectivité des modes octupolaires est renforcée.

Interaction effective

L'ensemble des études microscopiques menées à bien dans le cadre des méthodes

développées dans la collaboration Saclay-Orsay-Bruxelles a montré qu'il devenait nécessaire, sinon urgent, de revoir la paramétrisation des forces effectives nucléon-nucléon au sein des noyaux pour pouvoir étudier valablement les propriétés des noyaux le plus loin possible de la vallée de stabilité. Cette motivation se fonde sur la moisson de résultats expérimentaux que l'on est en droit d'attendre de SPIRAL et d'autres projets similaires, et aussi sur la confirmation de la valeur mesurée du paramètre de compressibilité de la matière nucléaire [95/021]. Le cadre de ce travail a été élargi en imposant à ces futures forces de reproduire aussi les propriétés de la matière nucléaire infinie de neutrons pour pouvoir décrire avec la même interaction non seulement les noyaux mais aussi la structure des étoiles à neutrons. Cette étude a fait l'objet du travail de thèse d'un étudiant de l'IPN de Lyon sous la direction conjointe du Professeur J. Meyer et de deux physiciens du service. Dans ce travail une nouvelle interaction a été obtenue et les premiers calculs entrepris sont très encourageants. Une première publication sommaire des résultats a déjà été présentée [94/116, 94/126 et 94/127] et un article de synthèse est en cours.

Bandes de rotation

L'étude des bandes de rotation a été activement poursuivie dans plusieurs directions. Tout d'abord, on a montré que dans la région des terres rares, la disparition des bandes à bas moments angulaires pouvait être simplement corrélée à la profondeur du minimum secondaire en fonction du spin des états [95/115]. Ce travail a permis de prédire l'existence de bandes de rotation superdéformées dans d'autres noyaux. Ces prédictions ont été confirmées depuis par l'expérience pour le noyau ^{154}Er par une équipe de Livermore.

Signalons que les calculs prévoyaient la désexcitation des bandes superdéformées vers des états du premier puits —de déformation voisine de celle du fondamental— par des transitions γ directes de plus de 2 MeV. De telles transitions viennent d’être observées dans deux noyaux, le ^{194}Hg dans la collaboration Gammasphère et le ^{194}Pb à Eurogam. Ces deux noyaux étaient les candidats les plus favorables pour ce genre d’observation d’après des prédictions faites il y a quelques années [Bonche *et al.*, 1990].

En complément des calculs des bandes superdéformées des noyaux pair-pair, une étude des bandes de rotation du ^{193}Hg a été menée à bien [95/009]. On a ainsi montré que les bandes des noyaux impairs correspondaient bien à celles des noyaux pairs voisins par excitation d’une simple quasi-particule judicieusement choisie.

Enfin, une analyse détaillée de l’influence de l’appariement des nucléons sur les moments d’inertie dynamique des bandes superformées a été faite pour les noyaux de la région mercure–plomb [95/079]. On a ainsi pu mettre au point une nouvelle paramétrisation de l’interaction responsable de l’appariement des nucléons. Au lieu de la force dite à G constant que l’on doit réajuster dans la pratique pour chaque région de la table de masse, on a étudié une paramétrisation fondée sur une force δ dépendante de la densité. Les résultats obtenus pour les moments d’inertie dynamique s’en trouvent considérablement améliorés. Avec cette même interaction, on a aussi calculé les mêmes moments d’inertie dynamique dans la région des terres rares. L’accord avec les résultats expérimentaux est, là encore, amélioré, sans qu’aucun réajustement des paramètres ne soit nécessaire.

Limites de stabilité des noyaux riches en neutrons

Toujours dans le même cadre microscopique, l’adéquation de la théorie Hartree-Fock Bogoliubov à la description des noyaux près de la limite de stabilité par émission de neutrons (*drip line*) a été démontrée. Le problème en soi n’était pas trivial car pour les noyaux très riches en neutrons, le niveau de Fermi approche zéro et un certain nombre d’orbitales ayant des occupations non nulles peuvent devenir non liées. Un programme d’étude de la *drip line* de neutrons vient d’être lancé jusqu’à des noyaux de charge 40. Ceci correspond au maximum que l’on pense pouvoir atteindre à SPIRAL, le projet de faisceau radioactif du GANIL.

Théorie des collisions par la méthode du champ moyen indépendant du temps

Cette méthode repose sur un calcul approché de la matrice de collision par une méthode de champ moyen, approche qui a donné de grands succès pour la théorie des états liés. Il apparaît une hiérarchie naturelle de corrections dues à des mécanismes de corrélation particules-trous. Comme nous l’avons fait précédemment pour l’invariance par parité, nous avons trouvé, et analysé en détail, un modèle soluble qui comporte des violations, par le champ moyen, de l’invariance par renversement du temps. Ces violations ont une interprétation physique [94/159].

PHYSIQUE HADRONIQUE

L’interaction forte devrait naturellement se décrire non pas comme interaction entre nucléons, qui sont des particules composites, mais en termes de leurs constituants, quarks et gluons confinés dans les hadrons. C’est le rôle de la chromodynamique quantique, dont, au régime considéré, nous ne savons cependant pas

résoudre les équations. Une modélisation possible de l'interaction forte à basse énergie profite d'une symétrie approximative, la symétrie chirale. Sa brisure, dans l'approximation du champ moyen, génère un état non perturbatif, à partir duquel il est ensuite possible de faire des développements. L'exemple classique d'un tel mécanisme est donné par le modèle de Nambu Jona-Lasinio, largement utilisé dans cette approche phénoménologique.

Théorie effective des champs pour les noyaux et la matière nucléaire

Il est proposé que des propriétés nucléaires soient décrites de façon quantitative par la QCD nonperturbative, à savoir, la théorie perturbative chirale. Le processus classique en physique nucléaire, $n + p \rightarrow d + \gamma$ à très basse énergie, peut être calculé de façon extrêmement précise (à 0.1% près) [94/169, 95/065]. Le modèle [95/101] de champ moyen de Walecka pour la matière nucléaire, qui a eu un succès phénoménologique impressionnant en physique nucléaire, peut s'obtenir à partir des lagrangiens effectifs chiraux à l'aide de la loi d'échelle dite "BR scaling" [95/105]. De plus, cette théorie, dont les prédictions sont en bon accord avec les données expérimentales, est équivalente à la théorie de liquide de Fermi de Landau appliquée à la matière nucléaire [96/016, 96/026]. C'est la première formulation d'une théorie effective des champs pour les noyaux et la matière nucléaire à partir d'une théorie effective de la QCD [94/150]. Cette notion de loi d'échelle conduit à une description simplifiée de la transition de phase chirale en termes des degrés de liberté des champs effectifs [95/039, 95/037, 96/030]. Ce résultat fournit un outil simple et puissant pour analyser ce qui se passe dans la collision d'ions lourds à haute densité et/ou température.

L'étrangeté dans la matière hadronique dense

La théorie perturbative chirale est utilisée pour calculer la densité critique de la condensation de kaons dans la matière dense des étoiles à neutrons [95/065, 94/138, 94/151]. La densité critique ainsi obtenue est de $\rho_c \sim 3\rho_0$ (où ρ_0 est la densité de la matière nucléaire normale). Cette prédiction implique que les étoiles à neutrons observées jusqu'ici pourraient contenir en leur centre des condensats de kaons avec des conséquences importantes pour les observations. Un argument basé sur le groupe de renormalisation dû à Shankar et Polchinski montre que le phénomène de condensation de kaons est générique dans le cadre du lagrangien effectif chirale de la QCD [94/170]. Par ailleurs, le $\Lambda(1405)$, un "état lié virtuel" dans le canal de K^- -proton, peut s'introduire comme un champ d'interpolation baryonique local dans le calcul de l'interaction kaon-nucléaire et en particulier, dans la structure des condensats de kaons [95/064].

Confinement des quarks dans les hadrons

La phase confinée du vide de la chromodynamique quantique (QCD) est décrite par un modèle d'un système dia-électrique ($\epsilon = 0$) parfait du champ de couleur, de type Landau-Ginzburg, obtenu en ajoutant au lagrangien de la QCD, un champ auxiliaire antisymétrique et un champ scalaire. Ces champs couplés agissent comme des paramètres d'ordre. Dans le vide à symétrie brisée, la fonction diélectrique ϵ du champ de gluons s'annule. En présence d'un champ chromo-électrique fort, la constante diélectrique prend sa valeur du vide perturbatif ($\epsilon = 1$). On obtient ainsi deux phases qu'on associe respectivement à la phase confinée et déconfinée du vide physique [94/147].

La régularisation utilisée le plus souvent pour le modèle de Nambu Jona-Lasinio est la méthode du temps propre. Nous avons montré que cette régularisation mène à une action qui est une fonctionnelle singulière et discontinue des champs scalaires et vectoriels. Il en résulte que, pour un soliton, l'action régularisée ne se prête pas au calcul de l'intégrale fonctionnelle par la méthode du col en présence de champs vecteurs. Nous avons montré dans un article de revue [96/046] que les solutions proposées pour résoudre ce problème conduisent toutes à des difficultés. Les singularités des propagateurs de mésons obtenus par cette méthode ont été identifiées. Des pôles non physiques apparaissent dans le plan complexe du carré de l'impulsion. Ces pôles, dont l'existence n'avait pas été signalée auparavant, interdisent les déformations de contour habituelles utilisées dans le calcul des observables et invalident les relations de dispersion des propagateurs [96/045].

Un calcul numérique des effets à une boucle de mésons dans le modèle de Nambu Jona-Lasinio a été effectué, dans le cadre d'une approximation qui conserve les symétries, de manière à ce que le pion reste un boson de Goldstone et que les relations du type Gell-Mann Oakes Renner restent valables. Les contributions de la boucle de mésons sont d'ordre 30%, en accord avec le développement en $1/N_c$. Les termes non analytiques, liés à la masse finie du pion, prédits par la théorie de perturbations chirales, sont tous reproduits correctement [96/044].

THÉORIES DE JAUGE

Propriétés non perturbatives des théories de jauge

Nous avons examiné un formalisme dual de l'électrodynamique quantique couplée à un champ scalaire neutre. L'intérêt de la formu-

lation duale est d'admettre un développement perturbatif en puissances de l'inverse de la charge électrique. De plus, une interaction à quatre fermions apparaît de manière naturelle dans l'expression du lagrangien effectif dual. Des différences d'interprétation avec la formulation conventionnelle intéressantes apparaissent au niveau de la régularisation des singularités ultraviolettes. L'existence dans l'espace des constantes de couplage de la théorie d'une ligne critique de transition de phase chirale du second ordre est également confirmée dans la description duale [95/072].

Formulation géométrique des théories de jauge

La question du calcul du spectre des théories de jauge, c'est-à-dire des masses des excitations élémentaires et des états liés, reste ouverte. En particulier, en $3 + 1$ dimensions, il y a consensus sur le fait que même la description quantique des théories de jauge (même celles qui ne contiennent aucune constante dimensionnée classiquement) ne fait intervenir que des états massifs. Pour certains systèmes ne contenant que des bosons de jauge (mais pas de fermions), nous avons reformulé la théorie en termes d'excitations invariantes de jauge : le potentiel vecteur est remplacé par une métrique. Nous avons écrit l'équation de Schrödinger associée. Des singularités à courte distance rendent difficiles les calculs numériques qui permettraient de tester la pertinence de ce formalisme. En $2+1$ dimensions, la situation est un peu plus favorable et nous espérons trouver une discrétisation en terme de surfaces aléatoires. La constante de couplage est dimensionnée et le problème de génération spontanée de masse n'est plus présent [94/168, 95/030, 95/057].

Problèmes infrarouges

Les plasmas ultrarelativistes sont le siège

de phénomènes collectifs qui se manifestent typiquement à l'échelle $1/gT$ (T étant la température et $g \ll 1$ la constante de couplage de QCD à haute température), qui est grande par rapport à la distance moyenne entre deux particules, de l'ordre de $1/T$. En particulier, des effets d'écran, comme l'écrantage de Debye, réduisent la portée des interactions de jauge, et permettent d'éliminer certaines divergences "infrarouges" de la théorie des perturbations. Cependant, des problèmes infrarouges persistent, par exemple, dans le calcul de la durée de vie des quasiparticules (en QCD, mais aussi en QED), ou celui de la masse de Debye non-abélienne (la masse d'écran des forces coulombiennes de couleur). Les divergences résiduelles sont engendrées par les interactions magnétiques qui ne sont pas écrantées dans la limite statique.

Dans le cas d'un plasma abélien, nous avons vérifié que les forces magnétiques statiques restent non-écrantées à *tous* les ordres de la théorie des perturbations [95/034]. Nous avons aussi calculé la correction à la masse d'écran de Debye dans l'électrodynamique spinorielle (QED) et scalaire (SQED) à haute température, jusqu'aux ordres e^5 et e^4 , respectivement. En SQED, le calcul perturbatif de la masse d'écran du champ scalaire chargé est affecté par des divergences infrarouges à partir du deuxième ordre. Ces divergences, décrites par une théorie effective en trois dimensions, sont proches de celles rencontrée dans le calcul de la masse de Debye en QCD. Cependant, la structure abélienne de SQED conduit à des simplifications qui nous ont permis de les éliminer par un traitement non-perturbatif basée sur l'équation de Dyson-Schwinger [95/055]. Toujours par un traitement non-perturbatif, qui généralise le modèle de Bloch-Nordsieck à température finie, nous avons obtenu le comportement en temps du propaga-

teur fermionique en QED à haute température [95/146]. Notre solution est libre de problèmes infrarouges, et met fin aux difficultés faisant obstacle depuis plusieurs années au calcul perturbatif de la durée de vie des quasiparticules. De façon remarquable, le propagateur présente une atténuation en $\exp(-\alpha T t \ln g T t)$ (où $\alpha = e^2/4\pi$ est la constante de structure fine), au lieu du facteur exponentiel $\exp(-\alpha T t)$ en théorie des perturbations.

PLASMAS QUARK-GLUON

Les plasmas ultrarelativistes apparaissent naturellement dans l'étude des transitions de phase dans le modèle standard, et notamment de la phase deconfinée de QCD —le plasma de quarks et de gluons— qu'on espère produire dans les collisions d'ions lourds ultrarelativistes. Ces plasmas, sensés représenter l'état de la matière à très grande densité et très haute température, sont l'objet d'études détaillées depuis plusieurs années. Ils sont le siège de phénomènes collectifs qui dominent la physique à grande échelle d'espace-temps.

Production de la particule J/Ψ dans les collisions plomb-plomb

On réalise au SPS du CERN, depuis novembre 1994, des expériences de collision plomb-plomb à 160 GeV par nucléon. La collaboration NA50, qui observe les mésons J/Ψ produits dans ces collisions, a mis en évidence une diminution du nombre de J/Ψ produits par rapport à la valeur attendue, de l'ordre de 30% en moyenne, et 50% pour les collisions les plus centrales. Nous avons proposé un scénario simple permettant de rendre compte de ce phénomène, en partant de l'observation qu'on produit dans une collision plomb-plomb une densité d'énergie plus grande que dans n'importe quel système étudié auparavant, puisqu'elle at-

teint une valeur d'environ 35% plus élevée que dans les collisions soufre-uranium réalisées au CERN jusqu'en 1992. En supposant que tous les J/Ψ produits dans ces régions très denses disparaissent, nous arrivons à un accord quantitatif avec les données préliminaires de NA50. S'ils sont confirmés, ces résultats sont très importants car la suppression du J/Ψ avait été prédite en 1986 comme une conséquence possible de la formation d'un plasma de quarks et de gluons. L'effet vu par NA50 indiquerait alors qu'on a formé et observé le plasma de quarks et de gluons [96/039].

Effets collectifs dans les collisions noyau-noyau

La physique des collisions d'ions lourds connaît actuellement, sur le plan expérimental, un essor considérable : on dispose pour la première fois de faisceaux d'ions lourds (or et plomb) ultrarelativistes, à l'AGS de Brookhaven depuis fin 1992 et au SPS du CERN depuis fin 1994. Aux énergies dites intermédiaires, des détecteurs "4 π ", qui couvrent tout l'angle solide et permettent des analyses plus complètes, viennent d'être mis en service au GANIL de Caen et au SIS de Darmstadt (Allemagne).

On espère, par ces expériences, obtenir des informations sur la matière nucléaire chaude et dense. Un accès privilégié à ces propriétés est fourni par le phénomène de "flot": les particules émises n'ont pas une distribution isotrope autour de l'axe de la collision, mais suivent des orientations préférées par rapport au plan de la réaction (qui est le plan contenant les trajectoires des deux noyaux incidents). L'observation d'un tel phénomène n'est pas facile car on ne connaît pas le plan de la réaction événement par événement, et les anisotropies purement statistiques, dues au faible nombre de particules détectées, sont toujours du même ordre de grandeur que les

anisotropies dues au flot.

Depuis 1992, nous avons mis au point des méthodes pour observer le flot, en soustrayant systématiquement les fluctuations statistiques des observables recherchées. Ces méthodes sont basées sur une analyse des coefficients de Fourier de la distribution en azimut [95/035]. Ces nombres, qui reflètent l'anisotropie recherchée, ont des fluctuations gaussiennes, qui sont donc caractérisées par un unique paramètre, la largeur de la gaussienne, qu'on peut extraire de l'expérience. On a ainsi un contrôle quantitatif des effets statistiques. Ces méthodes ont permis d'observer pour la première fois l'effet de flot dans les collisions ultrarelativistes, où on craignait qu'il ne soit trop faible pour être vu : tout d'abord à l'AGS en novembre 94 (collaboration E877), puis au CERN en février 96 (collaboration NA49).

Lorsque le flot est suffisamment fort, les mêmes méthodes permettent de reconstruire exactement les distributions azimutales à partir de celles mesurées dans l'expérience, qui sont entachées des erreurs statistiques sur la détermination du plan de réaction. On peut ainsi obtenir une image fidèle, en trois dimensions, d'une collision noyau-noyau [95/022, 95/134].

INTERACTION FORTE À HAUTE ÉNERGIE

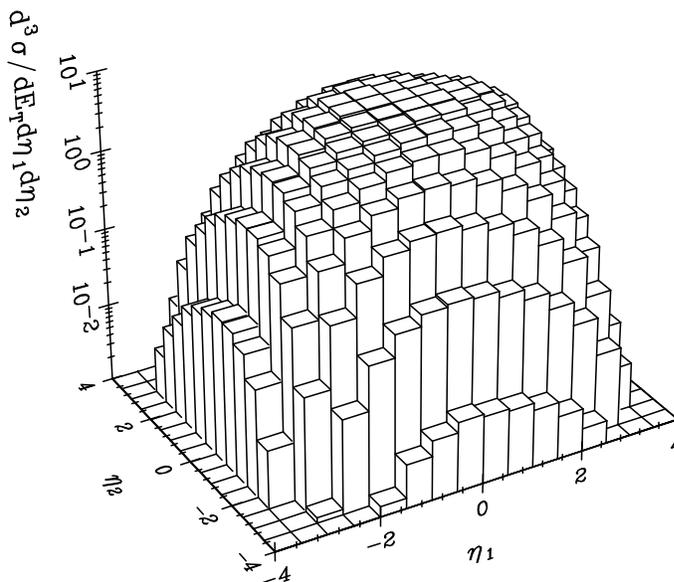
À énergie suffisamment élevée, les équations de la chromodynamique quantique peuvent être résolues en développant par rapport à la constante de couplage α_S de l'interaction forte. Cependant, aux énergies accessibles, les corrections au-delà de l'ordre dominant sont nécessaires. Elles conduisent à une mesure plus précise de α_S au LEP, à une vérification du nombre de fermions colorés, les prédictions théoriques étant dans ce cas moins sensibles aux paramètres de la renormalisation. Elles

sont indispensables pour comprendre le comportement des constantes de structure, dans des régions cinématiques encore inexplorees accessibles à HERA.

Développements perturbatifs au-delà de l'ordre dominant

En collaboration avec des physiciens de l'UCLA et du SLAC, nous avons perfectionné une technique basée sur l'unitarité pour calculer les corrections à l'ordre d'une boucle aux amplitudes de QCD. La plupart des termes dans une amplitude à une boucle peuvent être reconstruits à partir des coupures (parties absorptives) en quatre dimensions. Pour calculer ces termes avec cette technique, il faut "coudre" des amplitudes à l'ordre des arbres [94/095]. La technique est efficace parce que le calcul profite de toutes les annulations à l'ordre des arbres. Il est ainsi possible de calculer les amplitudes de violation d'hélicité maximale avec un nombre indéfini de gluons, dans une théorie de jauge avec supersymétrie $N = 1$. Ce résultat étend un travail précédent pour la théorie avec supersymétrie $N = 4$. Nous avons utilisé ces techniques dans le calcul des corrections à l'ordre d'une boucle aux amplitudes de deux quarks et trois gluons [94/108]. Ce sous-processus est l'un des trois dont les corrections à une boucle sont nécessaires pour l'élaboration d'un programme numérique afin de prédire des quantités à trois jets aux collisionneurs hadroniques. Nous avons calculé antérieurement les corrections à une boucle au sous-processus le plus difficile, celui à cinq gluons, en utilisant des techniques basées sur la

théorie des cordes.



Lors des collisions très énergétiques de hadrons, les nombreuses particules produites ne se distribuent pas de façon uniforme, mais en "jets" extrêmement fins. Le processus le plus simple correspond à la formation de deux "jets" dans des directions mesurées par les variables η_1 et η_2 . La figure montre la section efficace différentielle prédite par la théorie, pour des énergies comprises entre 45 Gev et 55 Gev. La distribution de η_1 et η_2 permet, par exemple, d'obtenir des informations sur la distribution des gluons dans le proton. Il est nécessaire de faire les calculs au-delà de l'ordre dominant de la théorie des perturbations pour obtenir la décroissance correcte de la section efficace à grand η , et tirer une information quantitative fiable de l'expérience correspondante.

Le calcul des corrections à une boucle au processus $Z \rightarrow$ quatre jets au LEP est en voie d'achèvement. Ces sous-processus ont des coefficients $SU(3)$ -couleur différents. C'est le plus simple processus qui permette une mesure indépendante des charges de couleur des quarks et des gluons. Il peut aussi être utilisé pour mettre des limites sur des fermions ou scalaires légers qui possèdent des charges de couleur. Ces

calculs constituent également une partie importante dans le calcul des corrections après l'ordre dominant (NNLO) au processus $Z \rightarrow$ trois jets. Ce dernier est utilisé pour extraire la constante de couplage des interactions fortes α_s , mais les erreurs dans cette extraction sont principalement des incertitudes théoriques. Le calcul des corrections NNLO élimine cette source d'incertitude.

Un article de revue [96/010] explique les techniques développées pendant les dernières années pour les calculs à l'ordre d'une boucle dans les théories de jauge.

Phénoménologie des jets aux collisionneurs hadroniques

En collaboration avec le Fermilab et l'Université de Durham nous avons utilisé le programme numérique mis au point précédemment pour étudier la distribution la plus générale des événements à deux jets, triplement différentielle en énergie transverse E_T et les pseudo-rapidités $\eta_{1,2}$ des jets [94/157]. Cette distribution peut être utilisée pour mettre des contraintes sur la fonction de distribution des gluons dans le proton. Nous avons étudié antérieurement [94/094] une sous-distribution qui compare des événements à même pseudo-rapidité, $\eta_1 \simeq \eta_2$, aux événements à pseudo-rapidités opposées, $\eta_1 \simeq -\eta_2$. Cette distribution, appelée "same-side to opposite-side", réduit les effets de certaines erreurs systématiques expérimentales. Des résultats expérimentaux pour cette distribution ont été publiés par la collaboration CDF.

Les mesures et les calculs dans la physique des jets dépendent d'un "algorithme de jet" qui spécifie comment les hadrons vus dans le détecteur sont rassemblés en jets. Une partie de l'algorithme spécifie comment les impulsions des partons sont combinées en un seul quadrivecteur. Nous avons étudié les détails des méthodes de

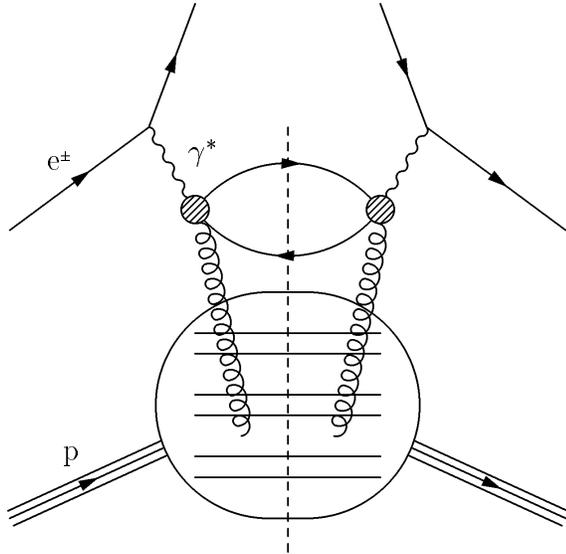
recombinaison utilisées par les collaborations à Fermilab, et avons remarqué [95/122] que la méthode de recombinaison utilisée par la collaboration DØ possède très vraisemblablement des corrections perturbatives importantes aux ordres supérieurs. Pour cette raison, cette méthode ne doit pas être utilisée pour faire des comparaisons avec la théorie des perturbations arrêtée à un ordre fixé.

L'interaction forte à HERA

Le développement des expériences auprès de l'accélérateur électron-proton ($e - p$) HERA donne la possibilité de sonder le cœur de la matière à des échelles encore inconnues : on peut atteindre une finesse de résolution de 1/100 de fermi et des fractions de l'énergie portée par les quarks aussi faibles que 10^{-5} . A ces limites, notre connaissance de la théorie quantique de l'interaction forte est encore très fragmentaire, ce qui stimule de nombreuses recherches.

Dans ce cadre de recherches menées souvent en coopération internationale, l'étude a porté sur la distribution des quarks [94/090, 95/078] et des gluons [95/032, 95/075] en développant en particulier une approche nouvelle, celle des *dipôles* de QCD, c'est-à-dire d'états quark-antiquark-gluons apparaissant dans la théorie perturbative des champs avec quantification sur le cône de lumière. En développant cette approche, il a été possible de proposer une formulation de la diffusion profondément inélastique $e - p$ impliquant des violations d'invariance d'échelle qui peuvent être testées à HERA. Une paramétrisation simple des fonctions de structure a été obtenue et confrontée avec succès aux données les plus récentes [96/043]. Des prédictions spécifiques du modèle des dipôles ont été faites pour le rapport des contributions des polarisations longitudinales et

transverses du photon échangé, ce qui motiverait des investigations expérimentales futures.



Diffusion $e^\pm - p$ vers l'avant. Dans le régime où la masse du photon virtuel émis par l'électron est dans le domaine perturbatif ($Q^2 \gg \Lambda_{QCD}^2$) et l'énergie dans le centre de masse du système photon-proton est grande (x_b petit), cette diffusion peut être décrite de la façon suivante : le photon virtuel se couple par l'intermédiaire d'une paire quark-antiquark à un gluon échangé par le proton. Ce gluon est en fait émis par un des dipôles de couleur contenus dans le proton, qui sont les excitations dominantes dans ce régime. Comme on somme sur les états finals, la section efficace totale est calculée à l'aide du théorème optique, d'où les pointillés et la symétrie de la figure.

Un autre phénomène, la *diffraction dure*, a été aussi étudiée [95/150, 96/036], en utilisant le modèle des dipôles de QCD. Dans ce cas, cette méthode a l'avantage de fournir des prédictions quantitatives en accord avec la théorie pour un processus dont l'explication fondamentale manque encore. Les calculs en cours devraient donc permettre de relier le phénomène observé à HERA à des processus mettant en jeu les fondements de l'interaction forte elle-même.

Méthodes de resommation de QCD

Des progrès importants ont été réalisés récemment sur le problème de resommation de la théorie de perturbations de QCD et en particulier sur la restauration de la relation d'unitarité de la matrice S correspondante. En particulier, une resommation de diagrammes d'interaction multiple de gluons à la limite d'un grand groupe de couleur est équivalente à la résolution d'un modèle intégrable au sens de la mécanique statistique quantique. Une application systématique des méthodes de résolution de ce genre de problèmes, fondée sur des variations du célèbre Ansatz de Bethe, a été entreprise [95/081] et a donné des résultats nouveaux dans ce problème considéré comme difficile. Une caractérisation mathématique des classes de solution a été obtenue ainsi que de nouvelles pistes pour la solution explicite du modèle, qui reste encore une question ouverte.

Intermittence et multifragmentation

L'étude des fluctuations de multiplicité dans les réactions de production multiple a suscité de nombreux travaux. La méthode se propose d'extraire l'information dynamique à partir des structures aléatoires observées événement par événement dans les réactions aussi bien dans les expériences de physique des particules que dans celles de multifragmentation nucléaire à plus basse énergie.

Les travaux récents, en physique des particules [96/002, 96/027] ou pour la multifragmentation [94/091, 94/148, 96/063] permettent de mieux cerner l'origine du phénomène d'*intermittence* observé dans les deux domaines, c'est-à-dire de la structure invariante d'échelle des fluctuations observées. En physique des particules ces propriétés ont été obtenues par le calcul des fluctuations dans un jet de quarks et de

gluons en QCD. Elles sont reliées à la structure profonde de l'interaction fondamentale. En multifragmentation nucléaire, elles sont plutôt liées à l'existence d'une transition de phase cachée de la matière nucléaire sous l'effet d'une collision entre ions lourds, transition apparentée à une percolation des liens entre nucléons.

AU-DELÀ DU MODÈLE STANDARD

Les extensions du Modèle Standard des interactions électrofaibles, dans l'idée de décrire la physique aux échelles plus petites, se font pratiquement toutes maintenant dans le cadre de la supersymétrie. Il reste cependant un arbitraire assez grand pour les diverses théories, en l'absence de détection expérimentale de l'une de ces particules supersymétriques. Le problème des trois familles de saveur faisant apparemment triple emploi reste toujours aussi entier, et aussi fascinant. Il se pourrait que l'existence de ces familles ait un lien avec la brisure de l'invariance par renversement du temps, et de l'existence d'une asymétrie entre baryons et antibaryons.

Hierarchie des masses et saveurs

On appelle *saveurs* les variétés de fermions élémentaires. Une *famille*, constituée de deux saveurs de quarks, d'un lepton et de son neutrino, est l'unité de base qui peut être couplée au Modèle Standard. Seule la famille la plus légère est effectivement présente dans l'univers actuel. Pourquoi alors trouvons-nous *trois* répliques de cette famille dans le "laboratoire" ? C'est la version actualisée du fameux "who ordered the muon ?" de Rabi. Comme l'électron et le muon, les familles ne se distinguent que par les masses très différentes de leurs états. Le problème des saveurs est donc aussi celui des *masses* des quarks et des leptons, des *mélanges* de saveurs —le fait que les interactions puissent changer un quark dans son équivalent d'une autre famille.

Un phénomène, que nous croyons très lié à cette physique des saveurs est la violation microscopique de l'invariance par *renversement du temps*. En effet, le nombre minimal de familles pour incorporer dans le lagrangien cette violation est trois ! Il va de soi qu'il faut introduire des différences entre les trois familles, par exemple, de nouvelles symétries de jauge. En effet, une amorce d'explication du spectre des masses et des mélanges des quarks, dont certains sont très légers, d'autres très lourds, comme le quark top, découvert l'année dernière, s'obtient par l'introduction d'une *symétrie abélienne* ad hoc. Une analyse systématique [95/27, 95/107] a permis de classer ces modèles en tenant compte aussi des contraintes théoriques, telles l'absence d'anomalies.

La théorie des saveurs ne peut donc se concevoir que dans le cadre d'une physique plus fondamentale faisant intervenir de grandes échelles d'énergie. D'où la nécessité de la supersymétrie pour protéger le secteur léger observable, bien décrit par le Modèle Standard. Une série d'études [95/094, 96/003] a permis de mieux comprendre les conséquences du plongement de ces théories dans la *supergravité* et dans la théorie des supercordes, où les nouvelles symétries s'appliquent aussi bien aux partenaires supersymétriques des quarks et leptons, les *squarks et sleptons*. Il en résulte une prédiction du spectre des particules supersymétriques et un certain nombre de contraintes qui viennent des analyses phénoménologiques du mélange de saveurs tel qu'il est mesuré dans un certain nombre d'expériences.

L'intérêt renouvelé des physiciens pour la questions des *effets FCNC* (changement de saveur dans les interactions à courants neutres) et de violation de CP, dans les théories supersymétriques, est dû bien évidemment aux

expériences actuelles avec les mésons B, aux usines à K, et à d'autres améliorations des moyens expérimentaux. Mais aussi, aux études récentes du problème des familles de quarks et leptons dans le cadre de la théorie de supercordes. Ces développements ont rendu nécessaire la généralisation de l'évolution des paramètres des modèles supersymétriques selon les équations du groupe de renormalisation, ce qui permet de comparer les limites expérimentales avec les prédictions théoriques, formulées dans le cadre des théories unifiées, donc à des échelles d'énergie beaucoup plus grande [94/153].

Un autre mécanisme pour engendrer des hiérarchies de masses dans des théories de cordes a été inspiré par un travail récent de Y. Nambu. La minimisation de l'énergie par rapport aux couplages de Yukawa fournit une détermination dynamique des couplages. Ce mécanisme est satisfaisant si les couplages sont associés à des champs scalaires sans potentiel et si la minimisation est contrainte. Une contrainte naturelle est reliée à la structure géométrique des théories de supergravité dans le secteur des champs sans potentiel de type moduli [94/136, 94/145]. Le formalisme s'élargit facilement pour incorporer la structure entière des matrices des masses [95/042, 96/102] et fournit des structures analogues avec celles obtenues par une approche de symétrie horizontale.

Modèles supersymétriques

La forte activité expérimentale au LEP du CERN, au Tevatron du FNAL, et celle qui se prépare au LHC, autour de la recherche du boson de Higgs et des nouvelles particules prédites par la supersymétrie, a encouragé des analyses phénoménologiques des versions supersymétriques du Modèle Standard. La plupart des travaux se font dans le cadre de

l'extension dite *minimale* du Modèle Standard, ou MSSM, et il est important d'élargir cette recherche. Une série d'études d'un modèle supersymétrique alternatif dit *du singlet glissant*, ou (M+1)SSM, a été poursuivie [95/004] en tenant compte aussi des résultats expérimentaux les plus récents. Or, les limites actuelles, dues surtout aux expériences au LEP, ont un impact énorme sur la phénoménologie du (M+1)SSM. En les combinant aux contraintes théoriques, par exemple celles dues à la brisure spontanée des symétries, on obtient des prédictions pour les masses des particules qui seront recherchées aux grands accélérateurs, en particulier au LEP2. Ce travail a servi comme base de la partie sur les extensions du MSSM du rapport du groupe "Higgs" dans l'atelier qui a eu lieu pendant toute l'année 1995 au CERN sur la physique à LEP2. Par ailleurs, le (M+1)SSM peut être envisagé [94/141] comme une théorie effective dérivée à partir de certaines théories de cordes compactifiées.

La théorie des supercordes semble englober une grande quantité de questions physiques et constitue donc une source d'inspiration pour une approche plus phénoménologique. Ainsi, la supersymétrie est apparue pour la première fois dans ce cadre. Il est donc naturel d'y puiser aussi pour comprendre un problème resté très obscur jusqu'ici, celui de la brisure spontanée de la supersymétrie. Suivant une suggestion de plusieurs auteurs, qui semblait au départ très pertinente dans l'hypothèse d'une théorie de cordes compactifiées, une étude de la condensation des *fermions de jauge* (liés aux bosons de jauge par la supersymétrie) comme responsable de la brisure de supersymétrie a été réalisée par une adaptation de la méthode classique de Nambu Jona-Lasinio. Elle a montré qu'une application cohérente de cette méthode deman-

derait des valeurs du couplage de jauge incompatibles avec sa valeur expérimentale [95/002, 95/029].

Une des prédictions caractéristiques des modèles d'orbifolds des supercordes compactifiées à 4 dimensions d'espace-temps concerne l'existence, dans les termes de brisure molle de la supersymétrie, d'une non-universalité par rapport aux générations des quarks et leptons. L'approche utilisée dans ce travail exploite de façon essentielle les contraintes imposées sur l'action effective de basse énergie par les symétries de dualité héritées des supercordes. L'extraction de bornes physiques requiert la résolution des équations du groupe de renormalisation pour les différentes constantes de couplage, étape nécessaire pour relier la physique à l'échelle de la masse de Planck de l'unification des cordes, à celle de la masse de Fermi des interactions électrofaibles [94/128].

Nous nous sommes aussi intéressés au calcul des corrections de renormalisation à une boucle (dites corrections de seuil) de la théorie des cordes aux constantes de couplages des interactions de jauge. La composante des corrections de seuil indépendante des modules de compactification a été calculée pour un large choix de modèles, en vue d'en déduire les caractéristiques générales. On a ainsi examiné la possibilité de ramener l'échelle d'unification d'une valeur de l'ordre de 10^{17} GeV, telle qu'elle est prédite dans le contexte de la théorie des cordes, à une échelle effective d'une valeur de l'ordre de 10^{16} GeV, telle qu'elle est déterminée par l'extrapolation aux hautes énergies des valeurs empiriques des constantes de couplage [95/046].

Résultats exacts

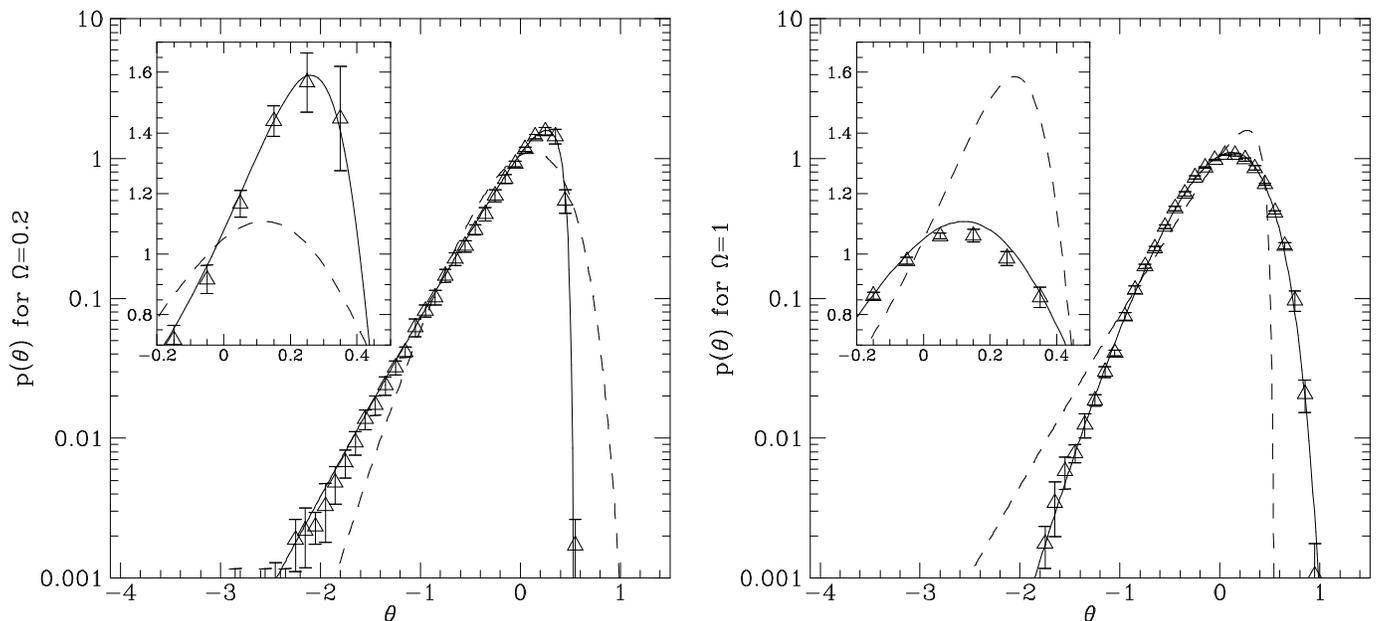
Nous nous sommes intéressés aux théories de jauge supersymétriques, comme l'ho-

lomorphie et la dualité électromagnétique. Nous avons généralisé des considérations basées sur l'holomorphie et les symétries dans des théories où le couplage de jauge est défini par la partie réelle d'un champ complexe dynamique. Sa dépendance dans les autres paramètres de la théorie peut alors être exactement déterminée et satisfait à des tests de consistance hautement non-triviaux [95/123].

ASTROPHYSIQUE

La résolution de problèmes de physique ayant un impact en astrophysique est, depuis de nombreuses années, une des activités présentes au SPhT. Plusieurs thèmes ont été abordés ces deux dernières années. Il restait à obtenir (voir section "Structure Nucléaire") une interaction effective valable à la fois pour les noyaux riches en neutrons obtenus auprès des grands accélérateurs et pour les supernovae et les étoiles à neutrons. La compréhension des interactions dans la matière hadronique dense a de toute évidence une répercussion sur la description de l'intérieur des étoiles à neutrons (voir section "Physique Hadronique"). Aussi, les progrès dans la compréhension des effets quantiques dans les espaces courbes (voir chapitre "Physique Mathématique et Théorie des Champs") permettent de calculer de manière fiable les fluctuations primordiales de densité dans un espace-temps non plat.

Les activités commandées non pas par des progrès récents de la physique, mais visant la compréhension de phénomènes astrophysiques continuent cependant à se développer. Elles sont centrées autour de la description de l'univers aux échelles extragalactiques, de l'origine de ses structures, de son passé récent (les dix derniers milliards d'années) et de son contenu sous forme de matière noire.



Comparaison des Fonctions de Probabilité de Distribution (FPD) de la divergence locale du champ de vitesse cosmologique mesurées dans des simulations numériques avec les prédictions théoriques. Les courbes continues donnent la forme attendue de la FPD à partir de la Théorie des Perturbations appliquée au champ de vitesse cosmologique. Cette forme dépend de manière connue de la densité de l'Univers, Ω . La figure de gauche montre le cas d'un univers ouvert, $\Omega = 0.2$, et celle de droite le cas d'un univers critique, $\Omega = 1$. Les courbes théoriques reproduisent bien les distributions mesurées. Les courbes en pointillés, obtenues en faisant les hypothèses inverses sur Ω , sont clairement rejetées par les mesures. On dispose ainsi d'un outil statistique robuste susceptible d'apporter des contraintes sur Ω à partir de mesures de vitesses de galaxies.

L'univers aux très grandes échelles

L'étude de la théorie des perturbations appliquée à la formation des grandes structures fait l'objet d'études approfondies d'un point de vue tant théorique, numérique qu'observationnel. Rappelons que ces techniques s'intéressent aux propriétés statistiques de l'univers à grande échelle, grandes structures, flots cosmologiques, dans un régime dit quasi-linéaire où les fluctuations par rapport à un univers parfaitement homogène restent faibles. Le choix de ce régime permet de faire des calculs perturbatifs par rapport aux fluctuations de densité initiales. Par des techniques de resommations partielles il est alors possible d'accéder à des propriétés statis-

tiques des champs cosmologiques qui tiennent compte des couplages non-linéaires induits par la dynamique.

Les propriétés du champ local de densité et de vitesse obtenues précédemment ont été étendues aux propriétés des distributions conjointes de densité [95/136]. Cela permet d'affiner notre compréhension de l'émergence des structures non-linéaires et en particulier de mieux évaluer les propriétés de corrélation des objets observables, galaxies, amas de galaxies, par rapport aux propriétés du fluide de matière sous-jacent.

La majeure partie des efforts a cependant porté sur la vérification de ces prédictions dans

des simulations numériques et leur applicabilité aux données observationnelles. Les effets de projection dans les catalogues de galaxies angulaires ont ainsi été abordés dans [95/076] et font l'objet d'une collaboration internationale.

Par ailleurs les propriétés du champ de vitesse qui permettent en principe d'accéder à la densité globale de l'univers [94/063] font l'objet d'un travail de fond pour mettre au point des méthodes de mesure adaptées [95/076], tant pour les simulations numériques que pour des données réelles. Ces études ont déjà démontré que, de même que pour le champ de densité les prédictions théoriques étaient en parfait accord avec les propriétés intrinsèques du champ de vitesse observées dans les simulations numériques. En étendant ces techniques aux données, on disposera d'une méthode permettant non seulement de mesurer la densité de l'univers mais aussi de tester la validité même du scénario standard de formation des grandes structures par instabilité gravitationnelle.

De plus, un nouveau champ d'activité est en train de s'ouvrir pour ce type d'approches. C'est l'étude des effets de lentilles gravitationnelles par les structures à grande échelle, qui induisent un cisaillement observé dans les champs profonds des galaxies. Ce domaine constitue un terrain privilégié, et jusqu'à maintenant peu exploré, pour l'application des techniques de la théorie des perturbations. Il fait l'objet d'une collaboration avec le groupe de l'observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse.

Distribution de matière et de lumière aux échelles extragalactiques

Une étude poursuivie depuis de nombreuses années au SPhT a permis de comprendre les relations entre le champ de densité de l'univers à grande échelle et la distri-

bution des galaxies (c'est-à-dire de la lumière), en profitant des lois d'échelle induites par la forte non-linéarité. La théorie proposée est du type "hiérarchique" avec de petites structures très denses rassemblées dans des structures plus grandes, elles-mêmes regroupées dans de grands amas. La formation des étoiles a évidemment lieu dans les petites structures denses. Cela implique que les galaxies soient plus corrélées que les points de matière, l'intensité de la corrélation augmentant avec leur luminosité. Cet effet vient d'être observé de façon statistiquement significative dans le nouveau SSRS (Southern Sky Redshift Survey) et conforte l'approche théorique [96/060].

Le passé récent de l'univers

Un travail a été entrepris pour décrire les abondances respectives de certains objets astrophysiques comme les galaxies, les amas de galaxies dans l'univers actuel, et de reconstituer leur évolution dans un passé récent. Pour cela, on caractérise en premier lieu le champ de densité de matière sous-jacent par certaines propriétés de ses fonctions de corrélation à tous les ordres, ce qui permet d'obtenir la probabilité de trouver une certaine masse dans une sphère placée au hasard. Il est possible d'en déduire la fonction de multiplicité d'objets définis par leur contraste de densité, puis de l'appliquer au cas des galaxies. Pour cela, il faut de plus introduire un critère de formation des galaxies lumineuses, qui en fixant les relations masse-rayon-dispersion de vitesse-luminosité de leur halo définit de manière précise ce qu'est une galaxie, et permet ainsi d'obtenir leur fonction de masse. On dispose ainsi d'une alternative à la méthode habituelle de Press-Schechter, et qui se compare favorablement aux observations. En outre, cette même méthode prédit également les comptages des

amas de galaxies qui sont des objets cent fois plus massifs et donc d'une tout autre échelle. On vérifie alors qu'il est possible de satisfaire simultanément aux contraintes venant de ces deux classes d'objets, ce qui n'est pas le cas pour la méthode habituelle de Press-Schechter, à moins d'utiliser des paramètres assez peu naturels. Cela représente donc un succès pour la technique utilisée. L'évolution dans le temps des comptages de ces objets s'obtient alors directement, en appliquant le même procédé à des époques différentes de la nôtre [Valageas et Schaeffer, en cours].

Modèles galactiques et microlentilles gravitationnelles

A la suite des observations de EROS et de MACHO visant à déterminer par leur effet de microlentille le nombre et la masse des objets de masses substellaires, peu visibles par détection directe, nous avons entrepris en collaboration avec une équipe de l'ENS Lyon de faire le lien entre ces observations, celles de la distribution

d'étoiles de faible luminosité et nos connaissances sur la distribution des objets dans la Galaxie. Le résultat est qu'il y a beaucoup plus de petites étoiles et d'objets substellaires où la fusion de l'hydrogène ne peut se faire (naines brunes), voire de naines blanches, que ce qui était admis auparavant, mais de loin pas assez pour expliquer la matière sombre de notre galaxie [95/137].

Disques protoplanétaires

Depuis peu, les annonces de découverte de systèmes planétaires, ou protoplanétaires (c'est-à-dire de disques de matière donnant lieu, à terme, à des condensations planétaires) se multiplient. A des stades divers de leur évolution, ces systèmes nous apprendront comment s'est formé notre système solaire, dont toute la masse est au centre et tout le moment angulaire à la périphérie. La modélisation d'une telle évolution [95/135] permet de mieux cerner les points de passage cruciaux, transport, turbulence, rayonnement, qui conditionnent l'évolution du système.

PHYSIQUE STATISTIQUE

Ce chapitre regroupe des travaux extrêmement variés de physique statistique. Ces études sont motivées par des questions de physique de la matière condensée au sens large, ce qui conduit, comme par le passé, à un vaste spectre de problèmes. Les objectifs vont d’approches phénoménologiques, comprenant des comparaisons directes avec l’expérience, jusqu’à des points de vue plutôt formels, englobant aussi bien des études de systèmes modèles que des analyses préliminaires à des applications réalistes. Certains travaux relevant de cette deuxième catégorie auraient fort bien pu être présentés avec ceux de Physique Mathématique, mais se retrouvent traditionnellement dans ce chapitre en raison de la physique sous-jacente. Ce rapprochement a en outre l’avantage de souligner le large éventail de préoccupations du service sur un sujet physique donné et de témoigner des échanges fructueux qui s’y réalisent.

A côté de grands thèmes qui, au fil des années, mettent en évidence une contribution importante du laboratoire (par exemple la renormalisation des polymères et membranes), d’autres travaux peuvent paraître moins cohérents : ils correspondent cependant à une méthodologie systématique (par exemple l’application des méthodes du groupe de renormalisation à des situations variées).

Le regroupement de ces travaux en quelques sous-thèmes n’est pas exempt d’ambiguïté et comporte une bonne partie d’arbitraire. Ainsi les études “Dynamique des verres de spin” auraient pu figurer sous le titre “Systèmes désordonnés”, mais il est apparu plus judicieux de les considérer comme “Problèmes hors d’équilibre”, compte-tenu de leur approche.

Afin de mieux mettre en évidence les évolutions thématiques, un choix conservateur des thèmes a été fait, en reprenant pour l’essentiel la présentation adoptée il y a deux ans.

SYSTÈMES ET MATÉRIAUX DÉSORDONNÉS

Sont regroupés ici des travaux caractérisés par le fait qu'une fraction des degrés de liberté considérés est associée à un désordre gelé au niveau microscopique. L'influence de ce désordre concerne des propriétés électromagnétiques, thermodynamiques ou géométriques.

Ondes dans des milieux hétérogènes

A la continuation du travail sur la propagation de la lumière viennent s'ajouter des travaux concernant des situations physiques plus spécifiques.

Propriétés électromagnétiques des milieux désordonnés

L'étude de la propagation de la lumière dans un milieu désordonné, dans le régime de diffusion multiple, a été poursuivie, en particulier en ce qui concerne les effets combinés des réflexions aux interfaces, de la polarisation et de l'anisotropie des collisions entre le rayonnement et les diffuseurs. Une étude analytique complète a été faite dans la limite où la section efficace est très piquée vers l'avant [95/044].

L'étude des propriétés électromagnétiques de certains milieux composites peut se faire en utilisant soit la supersymétrie soit le principe variationnel gaussien avec répliques, méthodes couramment employées dans les problèmes de champs aléatoires ou de polymères dirigés. Pour ce qui est de l'effet Hall dans les composites, on a ainsi pu montrer l'existence d'un régime de magnétorésistivité anormalement forte, dans la région où l'un des deux matériaux percole. Ce régime correspond à des champs magnétiques intenses, à la limite des champs accessibles actuellement [95/015].

L'utilisation de la méthode des répliques pour le cas de la propagation a permis, dans un

cas simple de désordre gaussien pour les constantes diélectriques, de montrer que la constante diélectrique effective subit de la dispersion, c'est-à-dire dépend du vecteur d'onde et de la fréquence [95/014].

Verres de spin et transitions de phases

Les fluctuations des systèmes vitreux (verres de spin) font intervenir des matrices compliquées (dites ultramétriques). On montre comment diagonaliser ces matrices en blocs, ce qui est essentiel pour étudier les comportements à grande distance [94/120].

On a longtemps cru que les systèmes à champ magnétique aléatoire en dimension D avaient le comportement des systèmes non-aléatoires en dimension $D-2$ (avec une transition vers le ferromagnétisme). On a montré qu'avant de parvenir à cette transition, le système subit une transition vitreuse [94/134].

Le modèle de sine-Gordon désordonné est généralement traité par un principe variationnel gaussien avec répliques qui nécessite une brisure complète de symétrie des répliques. Ce modèle est étudié à l'aide d'un principe variationnel gaussien sans répliques, dépendant explicitement du désordre. Pour certaines configurations du désordre, on retrouve le résultat des répliques brisées, alors que pour d'autres, on obtient des résultats différents des répliques. Ce principe variationnel gaussien a ensuite été employé dans d'autres problèmes [94/139].

L'étude d'un ferromagnétique XY en champ aléatoire et d'un polymère dirigé en milieu aléatoire a été réalisée à l'aide de la méthode variationnelle dépendant du désordre ci-dessus. Cette méthode permet d'obtenir des informations fines sur la taille des domaines d'Imry-Ma, sur la distribution des fonctions de corrélation. Elle permet aussi de mieux compren-

dre la validité des méthodes variationnelles avec répliques, où on moyenne a priori le désordre. Dans le cas d'un polymère dirigé à $1 + 1$ dimensions, on trouve ainsi une solution variationnelle que les répliques ne peuvent pas obtenir. Cette méthode permet également de faire le lien entre les modèles de type champ moyen, et les modèles de basse dimension : elle souligne le fait que les méthodes variationnelles peuvent être fiables, à condition qu'il y ait peu de solutions variationnelles [95/124, 96/022].

L'étude des polymères branchés en milieu aléatoire permet de comprendre les interfaces de systèmes désordonnés. Ce travail confirme que les transitions du 1er ordre deviennent continues à deux dimensions sous l'effet du désordre et indique que pour un désordre assez fort elles deviennent du type Ising, quelle que soit la symétrie du problème [94/154].

La technique de la double transformée de Legendre permet une approche nouvelle du modèle d'Ising en champ aléatoire. Elle permet de montrer qu'une transition verre de spin pouvait avoir lieu avant la transition ferromagnétique ordinaire, et ce en dimensions inférieures à 6. Cela expliquerait pourquoi la réduction dimensionnelle, prédite dans ces systèmes, ne peut être observée dans les dimensions habituelles [94/134].

Milieus granulaires

Dynamique des tas de sable

Une description phénoménologique de la dynamique des tas de sable a été proposée, qui consiste en un système de deux équations stochastiques couplées, décrivant la hauteur de la couche de grains fixe et l'épaisseur de la couche de grains mobile. Des simulations numériques du comportement critique de plusieurs variantes de ce modèle ont révélé des exposants de rugosité

spatiale et temporelle différents des exposants usuels, comme ceux des modèles d'Edwards-Wilkinson ou de Kardar-Parisi-Zhang [95/024, 95/102].

Remplissage du plan et de l'espace

Les ensembles granulaires (empilements sous pesanteur, suspensions, ...) présentent un grand désordre positionnel où interviennent à la fois la forme des grains, leur distribution de taille, le procédé de fabrication. L'étude des caractéristiques de ce désordre essentiellement géométrique se poursuit depuis plusieurs années sur des ensembles modèles, d'abord à 2, puis à 3 dimensions. Une partie de l'analyse a été faite à partir d'assemblées numériques; à 2 dimensions des tests expérimentaux ont été réalisés sur une table à coussin d'air qui permet plus de réarrangements locaux que des modèles numériques et contraint donc mieux le système. Par exemple, pour des assemblées binaires (2 tailles) de disques, une certaine ségrégation apparaît, les petits disques s'arrangeant en amas filiformes le long des gros, suivant un processus qui peut s'interpréter dans le contexte de la percolation [95/025]. A 3 dimensions, pour des assemblées monotailles de sphères, on a développé l'étude de l'encombrement des grains à partir de leur cellule de Voronoï, substituant ainsi aux grains la "mousse" réalisée à partir de cette partition. Les lois empiriques connues à 2d (Aboav, Lewis, ...) se généralisent [96/007].

La recherche de la structure liée à la capacité maximum, précédemment étudiée pour les disques a été reformulée pour des pentagones réguliers [94/163] puis pour les autres polygones réguliers [95/060]. L'intérêt physique est double a) voir le rôle que jouent les contacts côté-côté (stables) par rapport aux contacts côté-sommet (instables) et b) vérifier si l'arrangement

le plus dense est –ou non– périodique. En fait, on retrouve de 3 manières différentes (expérimentalement sur la table, théoriquement par un comptage topologique et numériquement) les arrangements dits “en double réseau” qui maximisent le nombre de contacts stables. Ce résultat vient à l’appui de la conjecture formulée en ce sens par les mathématiciens, qui a été démontrée dans le cas pair.

MEMBRANES ET POLYMÈRES

L’étude d’objets uni et bi-dimensionnels va depuis des problèmes mathématiques de dénombrement en géométrie jusqu’à des questions de biologie en passant par la renormalisation des membranes; la physique des polymères est moins présente ces deux dernières années que dans le passé.

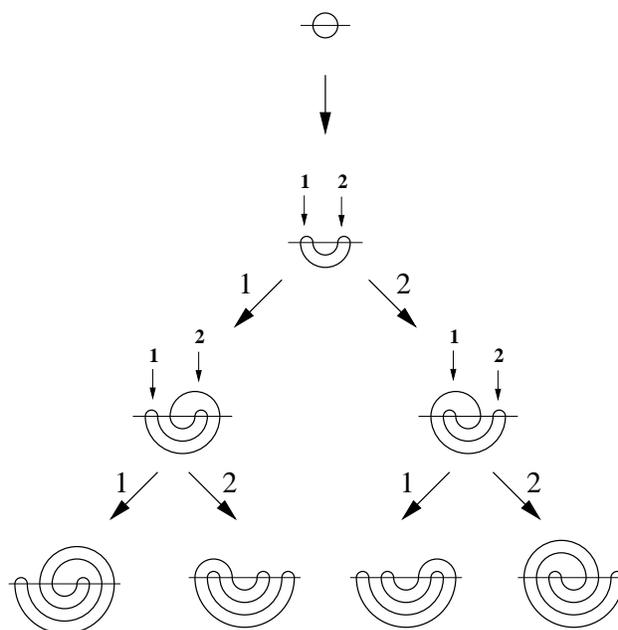
Pliages et méandres

La physique des objets géométriques fluctuants, tels les polymères (à 1 dimension), ou les membranes (à 2 dimensions) continue à poser de nombreuses questions théoriques. Un effort particulier a été porté sur la compréhension de la statistique du *pliage* de ces objets. Cette façon minimale d’engendrer des changements de conformation a l’avantage de mettre l’accent sur l’aspect géométrique du problème.

Le premier problème abordé a été celui du repliement d’une membrane polymérisée, directement modélisable en termes des pliages du réseau triangulaire plan. Une étude complète de ce problème, d’abord effectuée pour les pliages plans, a été étendue aux pliages tridimensionnels [95/019]. Bien qu’à l’origine locales, les contraintes géométriques imposent aux plis de se propager à travers la membrane, donnant naissance à des interactions à longue portée qui déterminent de manière cruciale le diagramme de

phase.

Dans un deuxième temps, le problème du pliage *auto-évitant* d’une chaîne polymérisée a été considéré. Une image facile à retenir est celle d’une bande de timbres-poste, repliée sur elle-même. Ici encore, le pliage fournit une version minimale du problème où la contrainte d’auto-évitement, qui constitue la difficulté principale, est ramenée à son aspect purement topologique.



Un méandre d’ordre n est la juxtaposition d’un système de n arches emboîtées (partie inférieure du méandre en arc-en-ciel) et de tout système de n arches (partie supérieure) tel que la courbe résultante soit connexe, c’est à dire en un seul morceau. La courbe peut être vue comme le tracé d’un circuit particulier traversant une rivière (ligne horizontale) en $2n$ ponts. La figure montre comment engendrer les méandres de manière récursive. A chaque étape, une des arches supérieures est amenée dans la partie inférieure en englobant le reste du méandre.

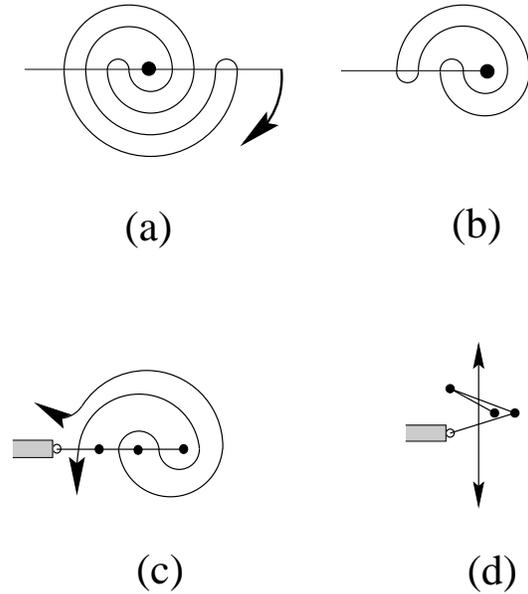
Dans le cas du pliage *compact* d’un polymère (c’est-à-dire la bande de timbres est repliée sur un seul timbre), une configuration de

pliage du polymère peut être interprétée comme un *méandre*, c'est-à-dire comme la configuration d'une rivière ne se croisant jamais elle-même, et traversant une autoroute [95/059, 95/128, 96/062].

Le problème de l'énumération des méandres, qui remonte apparemment à Poincaré dans le cadre de la géométrie différentielle, a connu peu de développements. Son expression dans le langage de la physique des polymères a permis de le replacer dans le cadre des phénomènes critiques et en particulier d'introduire des variables d'échelle (comme l'enroulement du polymère) bien adaptées à la description de ses propriétés. Une étude numérique poussée du problème a été faite, permettant à la fois de confirmer la validité de l'hypothèse des lois d'échelle et de déterminer numériquement les exposants critiques correspondants. D'autre part, dans l'espoir de trouver des éléments d'une solution exacte du problème, on a développé une version prometteuse du problème, fondée sur l'algèbre de Temperley-Lieb [96/008], reliée à la théorie des nœuds et au cœur des modèles intégrables sur réseaux. Dans ce cadre, quelques résultats exacts ont été obtenus, comme des règles de somme, et surtout le calcul du déterminant d'une matrice codant le nombre de composantes connexes du méandre (le nombre de rivières), un concept crucial dans le langage des phénomènes critiques.

Outre la formulation mentionnée ci-dessus, il existe une version "gravitationnelle" du problème, simulée par un modèle de matrices aléatoires. Malheureusement, aucune solution exacte n'est connue à ce jour, malgré le foison-

nement des techniques disponibles.



Tout méandre d'ordre n correspond à une configuration de pliage d'une chaîne (polymère) de $n - 1$ maillons (monomères). L'équivalence est obtenue en refermant sur elle même la partie inférieure du méandre en repliant en deux la rivière en son milieu (a)→(b), en ouvrant le circuit au niveau du pont le plus à gauche (c) et en tirant sur ses extrémités de manière à plier la chaîne formée par les $n - 1$ segments de rivière situés de part et d'autre de chacun des ponts restants (d).

Membranes auto-évitantes

Renormalisation des membranes auto-évitantes

La théorie des membranes polymérisées est une extension de la théorie des polymères au cas d'objets à D dimensions plongés dans un espace à d dimensions. Le paramètre dimensionnel D interpole entre des polymères ($D = 1$) et des membranes ($D = 2$). Dans le cas où ces objets (ou "surfaces") ne se recoupent pas dans l'espace à d dimensions, cas des surfaces auto-évitantes, il s'agit d'une généralisation du modèle d'Edwards

des polymères. La théorie des membranes auto-évitantées a conduit à un nouveau formalisme de théorie des champs non-locaux. Bien que non-équivalente à une théorie des champs locale, la théorie est renormalisable en théorie des perturbations. Un article présentant les détails de la preuve de la renormalisation du modèle des membranes polymérisées auto-évitantées et des applications est en préparation [F. David, B. Duplantier et E. Guitter].

La renormalisation d'une infinité d'opérateurs marginaux dans une membrane sans tension interagissant avec une impureté a été résolue dans [96/034].

Le nouveau formalisme de théorie des champs non-locaux a été utilisé pour aller au delà des calculs simples de groupe de renormalisation au premier ordre. Ceci s'avère un programme techniquement difficile. En effet, les amplitudes à calculer ne peuvent pas être évaluées analytiquement, sauf dans des cas très particuliers. Il faut par exemple développer des méthodes d'intégration numérique adaptées à des distributions dépendant d'un grand nombre de variables, possédant des singularités sur les bords du domaine d'intégration, et de plus variant très rapidement.

Membranes au point Θ

Une application porte sur l'étude du comportement des membranes auto-évitantées au point Θ , c'est-à-dire à la transition entre comportement en bon solvant et comportement en phase effondrée (par analogie avec les polymères) [95/036]. Les calculs de renormalisation à une boucle ont été effectués, et ont, par exemple, permis de déterminer que l'interaction dominante pour les membranes au point Θ doit être une interaction à deux corps (à la différence des polymères, où c'est une interaction à trois corps

qui domine).

Calculs à deux boucles

Le calcul complet de la renormalisation à deux boucles pour une membrane auto-évitante, c'est-à-dire pour l'interaction à deux corps, a été terminé [96/017, article détaillé en préparation]. Pour exploiter les résultats, il faut approfondir et systématiser des méthodes d'extrapolation en ϵ introduite par Hwa en 90. Pour l'exposant fractal ν , les résultats montrent que lorsque la dimension d de l'espace est grande, les résultats du groupe de renormalisation coïncident avec ceux d'une approximation variationnelle gaussienne. Ils s'en écartent pour des dimensions d plus petites, et dans le cas physique $d = 3$ sont assez proches des prédictions des méthodes de Flory.

Physique des polymères

Le modèle d'Edwards des chemins auto-évitantés en théorie des polymères en dimension 4 (dimension "marginale") a été étudié par des méthodes rigoureuses du type groupe de renormalisation, ainsi que des modèles reliés [94/066, 95/138, et en préparation].

Le comportement de polyélectrolytes (polymères chargés) dans des solutions contenant du sel, placés entre deux plaques, a été étudié pour des modèles où la charge électrique est soit étalée uniformément le long du polymère, soit à l'équilibre thermodynamique dans la solution avec le sel, soit gelée [95/051, 95/091]. On a montré que l'adsorption des polyélectrolytes sur les plaques pouvait être fortement augmentée par les effets électrostatiques. Certains cas où la théorie de Debye-Hückel est en défaut ont été particulièrement étudiés.

Le problème des brosses de polymères est l'archétype de la limite de forte élongation (strong stretching limit). Son étude a été faite en vue de s'initier à cette difficile limite, pour l'étude

ultérieure des phase exotiques de fondus de copolymères. On a écrit une équation intégrale pour la densité de monomères, et montré que l'on obtenait ainsi exactement le profil de densité, en particulier le "pied" de la brosse (qui classiquement a un profil parabolique, donc abrupt) [95/077].

Un modèle phénoménologique des monocouches adsorbées sur substrat, dérivé des modèles de smectiques frustrés en volume, montre comment les structures lamellaires de monocouches sont le résultat du compromis entre couplage avec le substrat et interactions intermoléculaires. Ce modèle permet de comprendre les observations faites sur l'alkylcyanobiphényl adsorbés sur MoS₂ avec des structures de lamelles crantées qui apparaissent lorsque la frustration imposée par le substrat dépasse une valeur critique, de telle sorte que la monocouche relaxe par des crans et forme une structure incommensurable [96/059].

STRUCTURES BIOLOGIQUES

Polymères et protéines

L'étude de modèles de polymères sur réseau a été poursuivie pour essayer, une fois de plus, de comprendre comment une protéine devient compacte tout en gardant un ordre local en hélice (i.e. unidimensionnel), ou en feuillet (i.e. quasi-bidimensionnel). Une étude analytique d'un modèle de polymères semi-flexibles (pour modéliser l'effet des liaisons hydrogènes) en mauvais solvant (pour modéliser l'effet de l'eau) a été faite en utilisant des chemins hamiltoniens pondérés. Elle a montré que, pour une faible rigidité des chaînes, le système subissait d'abord une transition d'effondrement ordinaire similaire au point Θ à haute température, avant de subir une transition (du premier ordre) de cristallisation à plus basse température,

qui s'apparente à la transition de repliement des protéines. Quand la rigidité augmente, les deux températures de transition se rapprochent, et finalement se croisent. A partir de telles rigidités, l'effondrement et la cristallisation se produisent ensemble, à une température unique. Des simulations Monte-Carlo, à l'aide de la méthode de croissance, suggèrent que ce scénario reste valable si l'énergie de compaction est assez grande, mais que l'on peut avoir une transition unique de la forme dépliée vers la forme "native" repliée, si l'ordre local est assez fort [95/119].

En ce qui concerne le problème d'adsorption de protéines sur des monocouches de lipides, aux interfaces eau-air, le diagramme de phase des protéines a été étudié en détail, et fait apparaître (en fonction de la température, de la concentration des protéines, ...) des phases variées, en particulier une phase semi-localisée, observée expérimentalement par microscopie sous fluorescence [95/125].

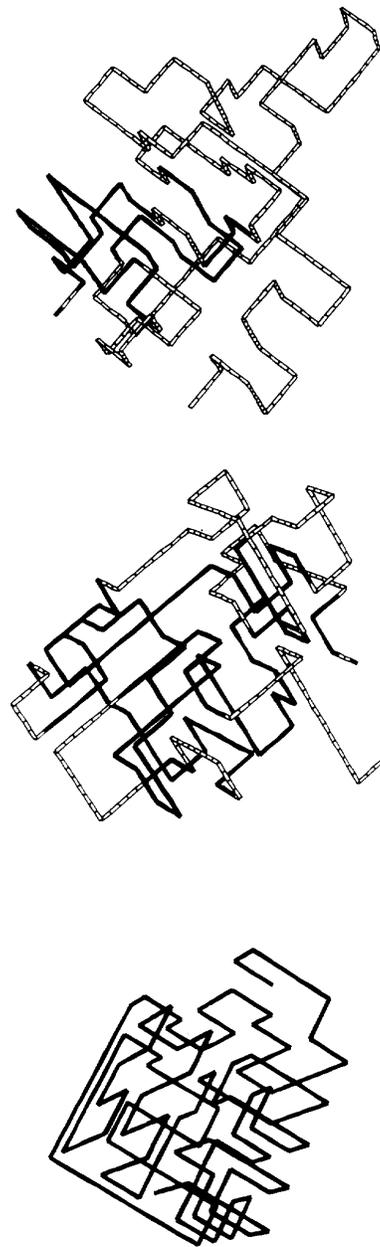
Un mécanisme d'action des protéines chaperonnes est proposé et la cinétique associée étudiée. Les chaperonnes se lient aux protéines mal repliées, et leur confèrent une énergie d'activation telle que celles-ci peuvent tenter un nouveau repliement. Par contre, les chaperonnes ne se lient pas à la forme native. Les divers états mal repliés sont donc représentés par un modèle d'énergies aléatoires, alors que l'état natif est représenté par un puits. En étudiant la cinétique de ce modèle, on s'aperçoit que, alors qu'en absence de puits la dynamique est représentée par une exponentielle étirée, l'introduction d'un puits transforme la dynamique en exponentielle normale, et accélère considérablement le repliement [96/023].

Anaphase

L'anaphase est le moment de la division cellulaire (mitose) où les chromosomes répliqués

se séparent pour se localiser dans deux cellules filles. Chaque chromosome est constitué d'une longue molécule d'ADN faite d'une double hélice sous forme compacte (en double brin). Au moment de l'anaphase, l'ADN chromosomique est soumis à la traction du fuseau mitotique. Mais les deux chromatides sœurs à séparer sont en fait topologiquement liées par un grand nombre d'enchevêtrements apparus lors de la réplication de l'ADN. Seule l'intervention d'enzymes, les topoisomérases de type II (topo II), permet la séparation topologique : elles effectuent la coupure d'un brin d'ADN, la traversée par le brin complémentaire appartenant à la chromatide sœur, suivie de la fermeture du brin initialement coupé.

Un modèle probabiliste s'appuyant sur la géométrie des chromatides, et la diffusion aléatoire brownienne des enzymes topo II vers les enchevêtrements, a été proposé. Il permet de calculer les probabilités de séparation en fonction du temps des chromatides à l'anaphase. Le couplage entre l'action des topoisomérases II et la traction du fuseau mitotique soulève encore d'autres questions qui ont été étudiées : comparaison de la force de traction exercée avec la force de rupture de l'ADN et question de la "sûreté biologique" à l'anaphase ; lorsque l'action des enzymes est inhibée, utilisation de modèles d'extrusion de chaînes polymériques pour décrire la séparation des petits ADN, ou d'un modèle de rupture de chaînes pour les grandes chaînes d'ADN ; rôle enfin du théorème de fluctuation-dissipation pour décrire une "friction de protéine" lors du croisement de brins d'ADN assisté par la topoisomérase II [94/071, 95/040, 95/151].



Etude numérique de la fusion d'un homopolymère semi-flexible en mauvais solvant. A haute température (en haut), le polymère a peu de régions compactes (en noir). Quand on baisse la température (au milieu, puis en bas), le polymère se compactifie. A très basse température, le globule compact cristallise (non représenté).

SYSTÈMES FORTEMENT CORRÉLÉS, MAGNÉTISME ET TRANSITION DE PHASE

En ce qui concerne les milieux ordonnés, les problèmes abordés portent surtout sur des systèmes en interaction forte et sur des questions de transition de phase.

Chaînes de spins

Chaînes de spins entiers et la conjecture de Haldane

Les chaînes de spins quantiques entiers possèdent un fondamental désordonné par les fluctuations quantiques, avec une longueur de corrélation de spin qui est finie et un gap dans le spectre d'excitation, contrairement au cas des spins demi-entiers où il y a quasi-ordre algébrique à longue distance et pas de gap. L'étude, pour la première fois, du cas de la chaîne de spin $S = 2$ a montré qu'elle obéit à la conjecture de Haldane avec un gap $\Delta = 0.08J$ où J est la constante d'échange. Le diagramme de phase en présence d'anisotropie à un ion et d'anisotropie d'échange est substantiellement différent des prédictions de la bosonisation abélienne, et on a pu conjecturer, à partir de ces résultats, comment la limite classique est atteinte. Le cas du spin $S = 1$ apparaît comme très particulier, tandis que $S = 2$ est générique. La construction d'un paramètre d'ordre non-local a permis de mettre en évidence que la physique est dominée par un état cristallin de liens de valence (valence-bond-solid). Toutefois, cet ordre non-local ne distingue pas la phase de Haldane de la phase triviale à grande anisotropie à un ion [95/007, 95/126].

La signification physique du hamiltonien cristallin de liens de valence

Il existe une description simple de la phase de Haldane de la chaîne de spin $S = 1$ au moyen d'un hamiltonien cristallin de liens

de valence (valence-bond-solid), somme de projecteurs qui commutent et dont le fondamental est connu exactement. Bien que très étudié, il restait à comprendre sa signification physique. Ce hamiltonien fait partie d'une famille à un paramètre avec interaction biquadratique qui inclut le hamiltonien d'Heisenberg. Quand on s'écarte de ce hamiltonien particulier, on voit apparaître des corrélations magnétiques incommensurables à partir d'un point de Lifshitz (le facteur de structure n'est plus maximum à l'origine). Les corrélations de spins dans l'espace réel deviennent *incommensurables* précisément en ce point dans la famille à un paramètre. Il s'agit donc d'un *point de désordre* au sens de la mécanique statistique classique (longueur de corrélation minimale, réduction dimensionnelle des fonctions de corrélation, ...) [95/054].

Le modèle de Heisenberg bidimensionnel

Le modèle d'Heisenberg antiferromagnétique à deux dimensions possède un fondamental ordonné pour toute valeur du spin S . Pour $S = 1/2$, les corrélations magnétiques observées expérimentalement sont en accord avec les prédictions du comportement d'échelle asymptotique, alors que d'importantes déviations sont observées pour $S > 1/2$. Le calcul des corrélations à l'aide de séries de haute température est par contre en accord avec les mesures sur La_2CuO_4 , $\text{Sr}_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ ($S = 1/2$), K_2NiF_4 , La_2NiO_4 ($S = 1$) et Rb_2MnF_4 ($S = 5/2$). Cet effet s'explique par le passage d'un comportement d'échelle quantique à un comportement classique, caractérisé par la compétition de deux échelles de longueur qui caractérisent des coupures à grands moments : dans le régime quantique c'est la longueur d'onde thermique λ_{th} des ondes de spin (la distribution de Bose supprime fortement les excitations de

longueur d'onde inférieure à λ_{th}) et dans la limite classique la coupure est donnée par l'inverse de la constante du réseau $1/a$ [95/011].

Ce résultat est étendu aux ferromagnétiques quantiques et permet de déduire un diagramme de phase complet des scénarios possibles de changements de comportement. Un nouveau comportement critique quantique pourrait être trouvé pour les ferromagnétiques par analogie avec le comportement connu des antiferromagnétiques. Un candidat possible serait un modèle bi-plan avec couplage ferromagnétique dans le plan et échange antiferromagnétique entre les plans. Au point critique ferromagnétique, on prédit le comportement de la divergence de la longueur de corrélation : $\xi \propto (T \log T)^{-1/2}$ [95/067].

Ce n'est qu'à très basse température que la théorie des champs est utile. A température finie une théorie d'ondes de spin à 3 modes identiques (isotropes) permet d'obtenir une expression simple pour la susceptibilité magnétique. Cette expression décrit avec précision la dépendance en vecteur d'onde du facteur de structure à temps égal et de la susceptibilité statique. Cette description comporte comme seul paramètre l'énergie interne qui peut être déterminée facilement [96/015].

Les simulations numériques sont faites sur des réseaux finis et la comparaison avec les résultats de théorie des champs nécessitent une extrapolation à volume infini. Mais pour le modèle σ non-linéaire invariant $O(N)$ à deux dimensions, la raideur de spin a un comportement universel dans la région où la longueur de corrélation du volume infini est beaucoup plus grande que la taille du réseau. C'est pourquoi une simulation numérique du modèle a été faite dans la région de très basses températures, avec des longueurs de corrélation entre 10^{11} et 10^{51}

et pour des réseaux de taille au plus égale à 256×256 . Les résultats sur le comportement de la raideur de spin en fonction de la température et de la taille du réseau sont en excellent accord avec les prédictions de l'analyse par le groupe de renormalisation du modèle σ non linéaire continu. Les longueurs de corrélation correspondantes sont obtenues avec beaucoup de précision [95/116].

Electrons fortement corrélés

Les systèmes d'électrons en forte interaction font l'objet de nombreux travaux, motivés notamment par l'intense activité expérimentale sur les supraconducteurs à haute température critique. En particulier, l'expérience met en évidence le rôle essentiel de paires fortement corrélées dans des plans, et la sensibilité des valeurs de la température de transition au degré de remplissage en électrons de ces plans.

Le modèle de Hubbard attractif

Le modèle de Hubbard attractif en 2 dimensions constitue la réalisation la plus simple d'un système planaire susceptible de créer un appariement d'électrons ajustable par l'intensité de l'interaction, et fonction d'un remplissage contrôlé par un potentiel chimique. En deux dimensions, les symétries du hamiltonien font que la seule transition possible vers une phase supraconductrice est une transition de type Kosterlitz-Thouless, à une température T_c s'annulant à demi remplissage (un électron par site). Une simulation numérique du modèle a été entreprise. Un résultat préliminaire est la mise en évidence d'un appariement qui passe par un maximum lorsqu'on s'éloigne du demi remplissage à couplage et température fixés, effet attendu si T_c a un comportement similaire. Le comportement concomitant de la susceptibilité est étudié simultanément à l'aide de séries de type "haute

température”, existantes mais essentiellement inexploitées à ce jour. Une des étapes suivantes consistera à aborder, à l’aide des mêmes données de simulations, des propriétés dynamiques du modèle [R. Lacaze et A. Morel avec B. Peterson et J. Schroper, travail en cours].

Modèle bosonique d’un liquide de Fermi

En liaison avec l’étude de l’effet hall quantique, on a considéré un problème de particules bosoniques interagissant répulsivement dans un domaine fini bidimensionnel. Pour une valeur particulière du champ magnétique (facteur de remplissage $\nu = 1$), on s’attend à ce que le système ait un comportement de liquide de Fermi avec un moment de Fermi bien déterminé. Cette hypothèse a été testée numériquement. Un modèle de fermions neutres sans spin est proposé pour expliquer ce comportement. Les conséquences expérimentales prédites par ce modèle sont en cours d’analyse [V. Pasquier, en préparation].

Transitions de phase

Transition du 1er ordre

L’activité menée sur la transition du 1er ordre du modèle de Potts à q états ($q > 4$) en 2 dimensions s’est achevée avec les résultats détaillés portant sur le développement de l’énergie libre à l’ordre 10 en $q^{-1/2}$ (par comptage explicite des amas de la représentation de Fortuin-Kasteleyn), et la resommation des séries correspondantes pour les cumulants de l’énergie (par des techniques de Padé mettant à profit la domination de la singularité connue en température à $q = 4$). Les résultats de simulations récentes effectuées par d’autres groupes, en se rapprochant des prédictions analytiques obtenues, illustrent l’utilité du développement réalisé et l’efficacité des resommations effectuées [96/001].

Les hélimagnétiques

La transition (cristal) liquide-solide est un sujet de grand intérêt. On a étudié le comportement critique des constantes élastiques à la transition dans le cadre d’un modèle magnétique simplifié. Ce modèle décrit un hélimagnétique XY isotrope, à l’aide d’une méthode variationnelle (gaussienne). Les résultats (saut non-universel des constantes élastiques, avec pente infinie) semblent en bon accord avec les expériences sur la transition nématique-smectique A [95/013].

Une étude de la transition de phase des hélimagnétiques par un modèle sigma approprié avait permis de conjecturer un comportement critique $O(4)$ pour de tels systèmes à trois dimensions, en désaccord avec des études numériques poussées. En conjuguant diverses méthodes (généralisation à N composantes, développement en $D = 2 + \epsilon$, champ moyen non-abélien), une structure très riche, avec une phase nématique où les spins sont partiellement ordonnés, et des lignes de transitions du second et du premier ordre, a été mise en évidence. En fait il apparaît que ce modèle sigma a vraisemblablement une transition de phase du premier ordre à trois dimensions, le point fixe visible près de quatre dimensions existant encore probablement à $D = 3$ d’après un calcul auto-cohérent [95/005, 95/149].

L’exposant critique de percolation

La mise au point des derniers programmes et une exploitation qui s’est achevée en décembre 95 ont permis d’atteindre les objectifs fixés au lancement du projet de calculateur PERCOLA fin 84. Une première série de calculs avait eu pour objet la détermination en dimensions 2 et 3 de l’exposant de percolation s qui caractérise le comportement critique de la conductivité électrique d’un mélange supraconducteur-conducteur normal au voisinage du seuil de per-

colation. La dernière série de calculs avait pour objet la détermination de l'exposant t pour un mélange conducteur-isolant en dimension 3 (par symétrie de dualité $t = s$ en dimension 2). La précision obtenue pour t , résultat d'une vingtaine de mois de calcul, est moins bonne que celle obtenue pour s pour des raisons attendues (conditions aux limites), ou non prévues (mauvais comportement des corrections aux lois d'échelle) [95/143]. La valeur trouvée est en bon accord avec les résultats récents de deux travaux utilisant d'autres algorithmes. L'exploitation du calculateur PERCOLA s'est achevée en décembre 95 après avoir atteint les objectifs fixés au lancement du projet fin 84. Soulignons qu'aucune défaillance technique du calculateur n'est apparue au cours de cette 8ème année d'exploitation. La machine reste un modèle pédagogique opérationnel d'architecture à très long mot d'instruction (VLIW), disposant d'une documentation complète.

Le comportement critique de solutions ioniques

Le comportement critique des solutions ioniques est actuellement l'objet d'études tant théoriques qu'expérimentales car, alors que l'on s'attendrait à observer des exposants de type Ising, les premières analyses concluent en faveur de valeurs de type classique. La présence de l'interaction à longue portée coulombienne (bien qu'écrantée) pourrait expliquer le comportement classique apparent suivi d'un changement vers le comportement d'Ising difficilement observable expérimentalement. Tout n'est pas aussi simple puisque des compétitions entre interactions peuvent intervenir dans ces systèmes complexes que sont les solutions ioniques. La solution considérée (nitrate d'étylammonium- n -octanol avec mesures par diffusion lumineuse) en est un exemple : présence d'une interaction de type liaison

hydrogène à courte portée en plus de l'interaction coulombienne. Le comportement critique observé est de type Ising mais les corrections à cette approche, bien que faibles, sont particulières [95/140, 96/014].

Les propriétés magnétiques des super-réseaux Eu/Te

Les super-réseaux Eu/Te se présentent comme un empilement successif de couches de EuTe et de couches de PbTe, l'épaisseur de chaque couche étant de quelques couches atomiques (1 à 7 suivant les échantillons), le rapport entre l'épaisseur des couches PbTe et EuTe étant fixé. Les moments magnétiques sont portés par les atomes Eu^{2+} qui ont un spin $7/2$. Les couches de PbTe ne sont pas magnétiques et ont pour seule fonction de séparer les couches de EuTe. Une source d'anisotropie pouvant stabiliser l'ordre antiferromagnétique à température finie dans ce système est l'interaction dipolaire, qui joue également un rôle important dans le magnétisme des couches minces métalliques. L'effet de cette interaction sur l'hamiltonien d'échange est étudié par la méthode Monte-Carlo. Qualitativement, il apparaît que l'interaction dipolaire suffit à engendrer un comportement très anisotrope de la susceptibilité en dessous de T_c [L. Bergomi, en préparation].

HYDRODYNAMIQUE, TURBULENCE, THÉORIE CINÉTIQUE

Des questions de dynamique hors d'équilibre sont abordées tant du point de vue macroscopique que par des méthodes de mécanique statistique.

Instabilités hydrodynamiques

Instabilités d'écoulements d'origine thermique

Des structures stationnaires ou propaga-

tives apparaissent dans des expériences mettant en jeu à la fois des effets de convection en volume (thermogravité) et thermocapillaires. A travers la modélisation de ces systèmes, on cherche à comprendre les mécanismes hydrodynamiques à l'origine de ces structures, caractérisées expérimentalement par l'équipe "Instabilités et turbulence" du SPEC, dans des couches de fluides avec surface libre soumises à des gradients horizontaux de température.

Dans la configuration étudiée, le fluide se trouve dans une cellule rectangulaire soumise à un gradient thermique horizontal appliqué entre les deux grands côtés du rectangle. Les échanges thermiques à la surface libre sont pris en compte de manière réaliste en introduisant un nombre de Biot, dont la valeur à une incidence sur la distribution verticale de température qui conditionne la nature de l'instabilité. Pour un nombre de Biot supérieur à l'unité, des instabilités d'origine thermique peuvent se développer. Dans la partie inférieure du fluide, un mécanisme de type Rayleigh-Bénard est attendu, tandis que près de l'interface, un mécanisme de type Bénard-Marangoni semble devoir l'emporter. Notre analyse fournit des prédictions sur le seuil d'apparition des modes instables lorsqu'on augmente le gradient, leurs caractéristiques spatiales et temporelles, en fonction du nombre de Biot et de la hauteur de fluide. Pour de grandes hauteurs et un grand nombre de Biot, l'instabilité apparaît sous forme de rouleaux stationnaires alignés dans la direction de l'écoulement. Pour de faibles hauteurs et un petit nombre de Biot, l'instabilité apparaît sous forme d'ondes propagatives. L'accord entre résultats théoriques et expérimentaux se révèle particulièrement bon pour les modes propagatifs mais des différences existent dans le cas des modes stationnaires en ce qui concerne leur longueur d'onde [95/20, 95/103].

Instabilités d'écoulements pulsés

La stabilité des écoulements dépendant du temps de manière périodique soulève des problèmes nouveaux par rapport au cas des écoulements permanents, le plus évident étant le choix d'un critère de stabilité adapté à ce type de problème. Nous avons d'abord étudié l'apparition d'instabilités centrifuges dans un dispositif de type Taylor-Couette, l'écoulement étant engendré par l'oscillation des deux cylindres à la même fréquence. Trois écoulements ont été considérés qui diffèrent par le sens de rotation des cylindres. Après la configuration où les deux cylindres oscillent en phase ([94/023]) et celle où les deux cylindres oscillent en opposition de phase ([95/031]), l'analyse du cas où seul le cylindre intérieur oscille a permis de dégager les comportements communs aux trois systèmes, en particulier dans le domaine des hautes fréquences où l'accord entre résultats théoriques et expérimentaux est excellent [95/097, 95/117]. Il n'en va pas de même dans le régime des basses fréquences où l'analyse de stabilité prédit un comportement inattendu pour le seuil d'instabilité qui est toujours supérieur au seuil observé expérimentalement. Cette différence a finalement été élucidée et attribuée à l'usage de critères de stabilité qui ne sont pas équivalents. L'analyse théorique s'appuie sur un critère de stabilité "global" où tous les instants d'un cycle sont pris en compte tandis que la détection d'instabilités par l'expérimentateur est régie par un critère "instantané" qui privilégie l'apparition de l'instabilité à un instant particulier. L'action déstabilisatrice de la force de Coriolis sur un écoulement parallèle plan pulsé a été analysée par la même méthode [94/084].

Turbulence

Groupe de renormalisation et turbulence

La turbulence à deux dimensions est assez différente de la turbulence tri-dimensionnelle, avec notamment des solutions de l'équation de Navier-Stokes qui restent régulières pour des conditions initiales régulières. Il existe cependant un régime dissipatif intéressant lorsque la longueur de viscosité est de l'ordre de la longueur sur laquelle on moyenne les quantités physiques. Ce régime s'obtient soit en soumettant le système à des forces extérieures aléatoires, soit en prenant des conditions initiales aléatoires pour le champ de vitesse. En interprétant la mesure de probabilité des conditions initiales comme un poids de Boltzmann, l'équation de Navier-Stokes décrit l'évolution temporelle de ce poids de Boltzmann. Il est alors montré que cette évolution est en fait une trajectoire du groupe de renormalisation, et des familles de points fixes invariants conformes (du type gaz de Coulomb) sont identifiées. Ce gaz de Coulomb donne une description effective de la turbulence [95/058].

En trois dimensions, on a étudié l'équation de Navier-Stokes en présence d'une force aléatoire gaussienne agissant sur les grandes longueurs d'onde et analysé l'évolution temporelle de la loi de probabilité du potentiel de vitesse. Supposant que la loi de probabilité est une théorie des champs statistique, l'évolution temporelle correspond à des trajectoires du groupe de renormalisation. Au point fixe la dimension d'échelle du potentiel de vitesse est $-4/3$ et le spectre d'énergie coïncide avec le spectre de Kolmogorov [96/033].

Modèles de turbulence

Le problème de la compréhension théorique de la turbulence développée est posé depuis longtemps aux physiciens. Alors que les

études phénoménologiques et numériques foisonnent, peu d'avancées importantes ont été effectuées depuis la prédiction d'un écoulement inertiel par Kolmogorov en 1941, avec les propriétés d'échelle qui le caractérisent. Récemment le problème concernant la description des comportements statistiques de scalaires passifs (par exemple la température), entraînés par un champ de vitesse aléatoire, a suscité de nombreux travaux. Ce problème se caractérise par des déviations par rapport aux comportements d'échelle du type Kolmogorov. Le calcul des fonctions de corrélation des scalaires montre comment ces comportements sont reliés à des dimensions anormales analogues à celles présentes dans le groupe de renormalisation en théorie des champs. Bien que ce problème soit encore loin des conditions de la turbulence développée, il semble fournir un prototype de système turbulent [96/020, D. Bernard, en préparation].

Théorie cinétique de Boltzmann discrétisée

Dans les modèles discrétisés de la théorie cinétique de Boltzmann, les vitesses des particules sont restreintes aux vecteurs qui joignent le centre d'un ou plusieurs polygones réguliers aux différents sommets et, éventuellement, la vitesse nulle (particule au repos). On a étudié des propriétés d'ondes progressives, d'ondes de choc et d'ondes stationnaires.

1) Modèles avec un nombre fini d'hexagones (cinq au plus) [94/109] : on s'intéresse aux différences de propriétés entre les cas avec ou sans particule au repos. Pour les solutions anisotropes, à l'aval les solutions sont différentes dans les domaines où la vitesse de propagation est inférieure à une quantité fixée. On trouve aussi des différences lorsque la densité des particules au repos est grande.

2) Modèles avec un nombre arbitraire de carrés ou d'hexagones [95/069, 95/142] : le but est d'étudier des modèles intermédiaires entre ceux de la théorie continue et ceux de la théorie discrète avec un nombre fini de vitesses. On définit des échelles pour les quantités macroscopiques et microscopiques et on impose que certaines contraintes macroscopiques de la théorie continue, venant des solutions d'équilibre de Maxwell, soient satisfaites. Le résultat le plus important est d'avoir montré, avec ces échelles, que les quantités macroscopiques restent invariants lorsque le nombre de carrés ou d'hexagones est supérieur à un nombre critique. On montre aussi dans un cadre général que la température (énergie interne pour les modèles discrets) est monotone pour les ondes de choc avec des états isotropes à l'aval.

3) Critères pour des inversions de température dans les phénomènes d'évaporation et condensation [95/130]. Pour les ondes de choc, connaissant les états amont et aval, on est capable de prédire des comportements monotones de la température entre ces deux états. On peut adapter ces critères à un autre phénomène étrange : la température du gaz près de la plaque froide peut être supérieure à celle du gaz près de la plaque chaude. On obtient ce phénomène paradoxal pour toute une classe de modèles et des solutions stationnaires. En particulier, on obtient des solutions exactes pour des systèmes de Riccati d'ordre six satisfaisant trois équations linéaires de conservation.

MÉCANIQUE STATISTIQUE HORS D'ÉQUILIBRE

Dynamique des verres de spin

Les études de dynamique de milieux désordonnés faites précédemment dans le laboratoire concernaient plutôt des aspects de loca-

lisation. Ce sont essentiellement les aspects de vieillissement qui sont maintenant étudiés.

Champ moyen et dynamique vitreuse

Franz et Ritort ont introduit un modèle simple de dynamique vitreuse en champ moyen, qui ne possède pas de barrières énergétiques. En dépit de sa simplicité, ce modèle possède de nombreuses caractéristiques communes avec les verres et les verres de spins, avec en particulier un régime de dynamique non-stationnaire et du vieillissement. Une étude de la dynamique à température nulle a permis de déterminer le comportement aux temps longs de la loi de relaxation de l'énergie vers celle de l'état fondamental, et de la loi du vieillissement de la corrélation de l'énergie à deux temps inégaux [95/145].

Modèle de pièges

Les verres présentent expérimentalement des propriétés dynamiques spécifiques, qui mettent en jeu des temps caractéristiques de relaxation présentant à basse température des divergences de type Vogel-Fulcher en $\exp(\frac{C}{T-T_0})$ ou de type $\exp(\frac{\delta}{T})^2$. Les verres sont aussi le siège de phénomènes de "vieillessement", qui sont le signe d'une dynamique essentiellement hors d'équilibre non-invariante par translation dans le temps. On montre comment des modèles dynamiques simples de pièges reproduisent ces caractéristiques de dynamique lente et de vieillissement. Il existe dans certains cas une transition vitreuse à température finie $T_0 > 0$, en dessous de laquelle la distribution d'équilibre cesse d'être normalisable, et en dessus de laquelle le temps caractéristique de relaxation diverge selon une loi de Vogel-Fulcher. Dans la phase de basse température, une fonction d'échelle qui permet de décrire la dynamique non-stationnaire est déterminée. Lorsque la transition vitreuse a lieu à une température nulle $T_0 = 0$, on

met explicitement en évidence un phénomène de “vieillesse interrompu”, dans lequel la dynamique semble non-stationnaire sur une échelle de temps très grande qui diverge en $\exp(\frac{\delta}{T})^2$ à basse température [95/144].

Problèmes de croissance

Un modèle de croissance en branches aléatoires avait été proposé par des collègues de Chicago comme description mathématique simplifiée du phénomène de DLA (Diffusion Limited Aggregation). Le calcul de la moyenne sur le désordre y pose d'intéressants problèmes comme dans la plupart des modèles de désordre gelé. Un formalisme perturbatif a été développé qui ressemble à celui de la théorie des champs. Comme dans celle-ci, la resommation des puissances de logarithmes dominants, et sous-dominants, a conduit à des lois d'échelles, cette fois multifractales, et dont les dimensions ont été calculées. Le modèle pourrait être susceptible d'une résolution exacte à tous les ordres [95/155].

Quand on refroidit un système de type Ising au dessous de sa température d'ordre, il est bien connu que la taille des domaines se met à croître avec un exposant universel 1/2 (quand le paramètre d'ordre n'est pas conservé). Le comportement des corrélations temporelles est beaucoup moins simple. Plusieurs résultats exacts ont été obtenus pour l'équation de Landau-Ginzburg en dimension 1 ; en particulier les exposants décrivant les corrélations temporelles peuvent prendre des valeurs transcendentes du type 0,3993835... .

Des simulations Monte-Carlo ont montré que ce phénomène se répète pour la dynamique de Glauber à température nulle du modèle d'Ising ou du modèle de Potts : certaines corrélations

temporelles (comme la fraction des spins qui ne se sont jamais retournés) sont caractérisées par des exposants non triviaux. En utilisant des techniques numériques basées sur les effets de taille finie et une analogie avec un problème de réaction-diffusion, ces exposants ont pu être prédits avec beaucoup de précision. Récemment ces exposants ont pu être calculés exactement (le plus souvent ce sont des nombres irrationnels). Ce travail est un des rares exemples de système hors d'équilibre en dimension finie pour lesquels les exposants ont pu être déterminés exactement [94/135, 94/165, 95/052, 96/013].

Solutions exactes de problèmes hors d'équilibre

En 1992, un modèle unidimensionnel lié à la croissance avait été résolu exactement. La solution exacte de ce modèle d'exclusion asymétrique a permis de justifier certaines valeurs d'exposants qui avaient été mesurées dans des simulations antérieures. Ce premier travail a été suivi par toute une série de travaux conduisant à des résultats exacts, le plus récent étant le calcul de la constante de diffusion pour un système à conditions de bords libres [94/080, 94/114].

Il a été suggéré que les modèles d'exclusion sur la chaîne ouverte avec deux espèces de particules chargées peuvent présenter une phase de symétrie brisée, dans laquelle les courants portés par les particules positives et négatives sont macroscopiquement différents. L'étude de ce phénomène dans un cas limite a mis en évidence un paramètre d'ordre qui est l'équivalent d'une énergie d'activation pour ces systèmes hors d'équilibre [95/071].

LES THÈSES SOUTENUES AU SPhT

Jehanne BASCLE

“Modélisation de protéines”, Thèse de Doctorat de l’Université Paris VI, soutenue le 6 janvier 1995.

Aletta Maria DOGTEROM

“Aspects physiques de l’assemblage des microtubules et du fuseau mitotique”, thèse de l’Université Paris XI, Orsay, soutenue le 3 novembre 1994.

Fawzia MEKIDECHE “Théorie du champ moyen indépendant du temps pour le calcul d’amplitudes de collision et de temps de vie”, thèse de Doctorat de l’Université de Paris XI, Orsay, soutenue le 14 juin 1995.

Bertrand EYNARD

“Matrices aléatoires et gravitation quantique en dimension 2”, thèse de Doctorat de l’Université Paris VI, soutenue le 17 février 1995.

Frédéric LESAGE

“Solutions exactes de problèmes en interaction à longue portée”, thèse de l’Université Paris XI, Orsay, soutenue le 19 mai 1995.

Ulrich SCHOLLWOECK

“Le groupe de renormalisation numérique dans l’espace réel : application aux chaînes de spins quantiques”, thèse de l’Université Paris XI, soutenue le 16 juin 1995.

PRIX, MÉDAILLES, DISTINCTIONS

R. BALIAN, Élu à l’Académie des Sciences (1995). Officier des Palmes Académiques (1996).

C. De DOMINICIS [avec M. MEZARD], Prix Ampère de l’Académie des Sciences (1996).

C. ITZYKSON, Prix Ampère de l’Académie des Sciences (1995).

J.-M. LUCK, Prix Anita Winter-Klein de l’Académie des Sciences (1996).

M. RHO, Prix A. von Humboldt (1995).

G. RIPKA, Chevalier de l’Ordre National du Mérite (1994). Palmes Académiques (1996).

J. ZINN-JUSTIN, Prix Gentner-Kastler (1996).

J.B. ZUBER, Prix de la communication du DSM/SPhT (1995).

• Thèses en cours au SPhT

Liste des étudiants préparant une thèse au SPhT en juin 1996. Entre parenthèses figurent le nom du directeur de thèse et l'année prévue pour la soutenance.

- E. AMIC (J.-M. Luck, 1997)
- C. GROJEAN (C. Savoy, 1998)
- K. MALLICK (B. Derrida, 1996)
- J.-F. MERCIER (Ch. Normand, 1997)
- S. NONNENMACHER (A. Voros, 1997)
- E. PITARD (H.Orland, 1997)
- G. SCHREIBER (C. de Dominicis, H. Orland, 1997)
- D. SERBAN (D. Bernard, V. Pasquier, 1996)
- P. VALAGEAS (R. Schaeffer, 1997)
- S. WALLON (R. Peschanski, 1996)
- S. WIENZIERYL (D. Kosower, 1998)
- K. WIESE (F. David, 1996)

• Thèses extérieures

Les physiciens du SPhT encadrent, complètement ou partiellement, des étudiants appartenant à d'autres organismes français ou étrangers. Leurs nombres figurent entre parenthèses.

Rennes (1), Marseille (1), SPTN-Bruyères-le-Châtel (1), IPN-Lyon (1), ENS-Lyon (1), IAP (1), Meudon (1), Pise (1), Séoul (1), Paris 7 (1), Münster (1), Laboratoire de Mécanique Théorique de Jussieu (1), CRN Strasbourg (1), Calcutta (1).

• Stages DEA

- . DEA de Physique Théorique, Paris 6, 7 et 11 (3)
- . DEA Champs, Particules, Matière, Paris 6, 7 et 11 (3)
- . DEA de Mathématiques Applicables (1)
- . DEA de l'ENS Lyon (3)
- . DEA de Physique Statistique, Cergy et Paris XI (1)

• Stages X

Stages d'option de l'Ecole Polytechnique (6)

• Divers

- Magistère des matériaux de Rennes (1)
- Stagiaire militaire (1)

ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

Sont indiqués ici uniquement les cours donnés dans des Universités ou des Grandes Ecoles, et ceux ayant donné lieu à une publication.

• Premier et deuxième cycle d'Université

- Université de Cergy-Pontoise (H. Orland, jusqu'en 95).
- DEUG, Université Paris-Sud (S. Nonnenmacher, S. Wallon).
- Magistère de Physique de l'ENS (B. Derrida, J.-B. Zuber).
- Paris VII (P. Valageas)

• Grandes Ecoles

- Ecole Polytechnique (R. Balian, J.-P. Blaizot, B. Duplantier, Th. Jolicœur; par ailleurs, T. Garel est examinateur, et J.Y. Ollitrault correcteur du concours d'entrée).
- ENS (J.-M. Drouffe est correcteur)
- Ecole Centrale (Z. Maassarani).
- Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées (G. Ripka).
- Ecole des Mines de Paris (B. Giraud)

• DEA

- Physique Théorique, Paris 6, 7, 11 (B. Derrida, E. Dudas, C. Monthus, P. Bonche).
- Champs, Particules, Matière, Paris 6, 7, 11 (J.-M. Luck, T. Jolicœur, P. Bonche).
- Physique Quantique (J.Y. Ollitrault).
- Dynamique des Fluides et des Transferts (Ch. Normand).
- Physique Statistique Cergy-Pontoise (H. Orland).
- DEA de Mathématiques de l'université Paris 7 (J.-B. Zuber).
- Ecole Doctorale Rhodanienne (J.-B. Zuber).
- Ecole Doctorale de l'ENS (D. Bernard)
- Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI), Marseille (J.-M. Luck).
- DESS de biologie et de pharmacologie du vieillissement, Université de Marne-la-Vallée (M. Gingold).

• Cours ayant donné lieu à publication

- R. Balian, "De la mécanique statistique aux équations de transport" [95/112]
- F. David "Introduction to conformal invariance in statistical mechanics and to random surface models" [94/129], "Self-avoiding random manifolds" [95/129]
- B. Giraud, "Modèle soluble pour les méthodes de Hartree-Fock et de la coordonnée génératrice" [96/057]
- A. Morel, "Topics on first order transitions" [94/092]
- R. Schaeffer, "Mais où est donc la matière noire de notre galaxie ?" [96/025]

- J. Zinn-Justin, “Théorie quantique des champs et phénomènes critiques : sujets choisis” [96/049]

- J.-B. Zuber, “Sur les symétries exactes d’espace-temps” [94/167], “An introduction to conformal field theory” [95/141]

ÉDITION SCIENTIFIQUE

Des physiciens du SPhT contribuent en tant que rédacteurs en chef, éditeurs, ou membres des bureaux éditoriaux, à diverses revues scientifiques.

- **Europhysics Letters** (R. Balian 1989-1995, B. Duplantier 1992-1997)
- **Comptes Rendus de l’Académie des Sciences** (R. Balian)
- **Nuclear Physics A** (J.-P. Blaizot)
- **Nuclear Physics B** (J. Zinn-Justin)
- **Nuclear Physics B[FS]** (B. Duplantier)
- **Journal of Physics A** (B. Derrida remplacé par J.-M. Luck, J. Zinn-Justin (éditeur en chef))
- **International Journal of Modern Physics E** (M. Rho)
- **Journal de Physique** (F. David, H. Orland)
- **Fortschritte der Physik** (J. Zinn-Justin)
- **Physica A** (B. Derrida)
- **Annales de l’Institut Henri Poincaré** (J. Bros, B. Derrida)
- **Serie “Texts and Monographs in Physics” (Springer)** (R. Balian)

Par ailleurs, R. Balian et J. Zinn-Justin sont membres du Conseil d’administration des Editions de Physique ; J. Zinn-Justin édite les Comptes-Rendus des Sessions de l’Ecole d’Eté de Physique Théorique des Houches, il est remplacé par F. David en 1996.

Les secrétariats scientifique et administratif assurent, dans la mesure du possible, le soutien à toutes ces activités.

LIVRES

M. RHO “*Chiral Nuclear Dynamics*” (M.A. Nowak, M. Rho et I. Zahed), World Scientific, Singapour, 1996.

J. ZINN-JUSTIN, “*Quantum Field Theory and Critical Phenomena*”, Troisième édition (Oxford Science Publication, 1993).

P. DI FRANCESCO “*Conformal Field Theory*” (P. Di Francesco, P. Mathieu, D. Senechal), Springer-Verlag (Graduate Texts in Physics, 1996).

ACTIONS DE VULGARISATION

- Participation à la conférence de presse de novembre 1995. Exposé sur les tendances actuelles de la physique théorique [95/153] (R. Balian).
- Articles dans *Pour la Science* “Cristaux de pentagones” [T96/158], pour *Phases Magazine* [T96/157] (A. Gervois)
- Participation au Comité de Rédaction de la revue *Images de la Physique* (J.-Y. Ollitrault)
- Participation au Comité de Rédaction de *Phases Magazine* (J.-P. Blaizot, M. Gingold)
- Fiche CEA sur l'énergie à l'usage de l'enseignement secondaire [T94/154] (R. Balian)
- “Les flèches du temps” [94/130], “Le physicien français et ses langages de communication” [96/058] (R. Balian)
- C. De Dominicis (SFP)
- Document sur PERCOLA pour un livre sonore présenté à l'exposition “Cinquantième du CEA” à la Cité des Sciences et de l'Industrie (J.-M. Normand, 1995)
- “Passion de famille” (R. Peschanski, film, 1995)
- “HERA et la quête du gluon” (article pour *Scintillations*, R. Peschanski, 1996)
- “Les supernovae” , article pour la revue *L'astronomie* [94/166], “La physique” [95/088] (R. Schaeffer)
- “Quantum Field Theory: Renormalisation and Renormalisation Group”, article pour le bulletin de la Société Allemande de Physique (J. Zinn-Justin, 1996).
- “ Renormalisation group analysis”, Encyclopedia of Mathematics, Kluwer, 1996 (D. Iagolnitzer et J. Magnen).

ORGANISATION DE CONFÉRENCES OU D'ÉCOLES

- Programme “Cellular Automata, Aggregation and Growth”, Isaac Newton Institute, Cambridge, UK, janvier-juin 1994 (B. Derrida, comité d'organisation).
- XIème Congrès International de Physique Mathématique, Paris, 18-23 juillet 1994 (D. Iagolnitzer président, F. Lefèvre secrétaire, F. David membre du comité local d'organisation).
- “Théorie Générale des Champs et Particules” (conférence satellite du XIème Congrès International de Physique Mathématique), La Sorbonne, Paris, 25-28 juillet 1994 (J. Bros).
- Session d'août 94 de l'Ecole des Houches, “Fluctuating Geometries in Statistical Mechanics and Field Theory” (F. David).
- Conference “Mathematical Physics of Disordered Systems”, Paris, juillet 1994 (B. Derrida, comité d'organisation).

- “Problèmes de Remplissage de l’Espace”, Les Houches, janvier 1995 (J.M. Luck)
- Conférence “Technologie, architecture et logiciel de base : situation et évolution des calculateurs numériques”, Saclay, 13 avril 1995 (J.-M. Normand [95/050]).
- Conférence “Systèmes désordonnés”, Saclay, juillet 1995 (C. De Dominicis, H. Orland)
- Conference “Complex Fluids and Monte Carlo Methods”, Hong Kong, juillet 1995 (B.Derrida, comité d’organisation).
- Ecole Prédoctorale de Physique des Particules, Les Houches, septembre 1994; Journées Jeunes Chercheurs, décembre 1995 (E. Dudas).
- Atelier “QCD and Ultrarelativistic Heavy Ion collisions” ECT*, Trento, juin 95 (J.-Y. Ollitrault).
- Atelier “Deep Inelastic Scattering at HERA”, Cambridge 1995 (R. Peschanski, S. Wallon).
- “DIS 95” Paris, “SUSY 95” Palaiseau, Colloque SFP Marseille 95, “Deep Inelastic Scattering at HERA” (R. Peschanski).
- Organisation du programme “Chiral Symmetry in Hadronic Physics” à l’I.N.T. de Seattle, février-juin 95 (M. Rho).
- Ecole “La Limite de la Séquence Principale et au-delà”, Aussois, septembre 95 (R. Schaeffer).
- Session d’un semestre au Centre E. Borel de l’Institut Henri Poincaré , “Chaos et physique quantique”, septembre 1995-février 1996 (A. Voros).
- Atelier et école de printemps “Artificial Neural Networks and Learning Algorithms”, Université de Montréal, 15-30 avril 1996 (B. Giraud).
- Conférence “The mathematical beauty of physics”, en hommage à C. Itzykson, Saclay, 5-7 juin 1996 (J.-M. Drouffe et J.-B. Zuber).
- Atelier “Nuclear Fission : New Dynamical Aspects, Physics of Fission Fragments” , ECT*, Trento, mai 1996 (P. Bonche).
- Atelier “Structure of Nuclei far from Stability” Trento, mai 1996 (P. Bonche).
- Ecole Joliot Curie 1996 “Production d’Energie Nucleaire et Traitement des Déchets” (P. Bonche).
- “Deep Inelastic Scattering at HERA”, Durham 1996 (R. Peschanski).
- Conférence “DIS 96” Rome (responsable de la session “Hadronic Final States”, S. Wallon).
- Journées de Physique Statistique, Paris (B.Derrida, comité d’organisation).
- Rencontres de Moriond, session “Transport and Correlated fermions in Mesoscopic Systems”, janvier 1996 (T. Jolicœur, comité d’organisation).
- Rencontres de Moriond, session “Interaction électrofaible” 1994, 1995, 1996 (C. Savoy).
- Colloque CEA sur “Invariances et Symétries”, avril 1996 (R. Balian)
- “Workshop on K Physics”, Orsay, 1996 (C.Savoy).
- Atelier “Protéines, membranes and their interactions” (H.Orland, co-organisateur).
- Conférence triennale STATPHYS20 1998 Paris (D. Iagolnitzer, A. Gervois, secrétariat général)
- Conseil Scientifique de l’Ecole de Cargèse (J. Zinn-Justin).

A l'intérieur du CEA

De par sa vocation pluridisciplinaire, le SPhT participe à 5 “segments” CEA :

- Unification des Interactions Fondamentales (seg. 31)
- Structure du Nucléon et des Noyaux (seg. 32).
- Evolution des Etoiles et des Galaxies (seg. 33)
- Ordre et Chaos (seg. 36)
- Matériaux et Microstructures (seg. 37)

GDR

- “Physique des milieux hétérogènes complexes” (A. Gervois)
- “Fermions fortement corrélés” (T. Jolicœur, H. Orland)
- “Modélisation des assemblages moléculaires” complexes” (H. Orland, T. Garel, J.M. Drouffe)
- “Cosmologie et grandes structures” (F. Bernardeau, R. Schaeffer)
- “Structure des étoiles” (R. Schaeffer)
- “Ordre et chaos dans la matière” (Ch. Normand)
- “Systèmes colloïdaux mixtes” (B. Duplantier)
- “Gedeon” (P. Bonche)

Programmes Européens

• PROCOPE (Allemagne)

- “Structure de Phase et Analyse en Particules en Théorie Quantique des Champs” (J. Bros, D. Jagolnitzer)

- “ Chiral models of baryons and mesons ” (G. Ripka)

• PICASSO (Espagne)

- “Brisure de symétrie et de supersymétrie” (C. Savoy, E. Dudas)

• Réseaux CE

- “Foams” (A. Gervois)
- “Conformal Theory” (P. Di Francesco, D. Bernard, J.-B. Zuber)
- “Investigations in random geometries: from interfaces to quantum gravity” (P. Di Francesco,

I. Kostov, F. David, J.-B. Zuber)

- “Stability and Universality in Classical Mechanics” (P. Moussa)
- “Flavordynamics” (C. Savoy)

Autres Programmes Internationaux

- Allocation de Recherche de l'OTAN pour collaboration avec le laboratoire SLAC (USA) (D. Kosower).
- Allocation de Recherche de l'OTAN pour collaboration avec l'Arménie (I. Kostov, J.B. Zuber)
- Programme BALATON (Hongrie), "Théorie des systèmes désordonnés : verres de spin" (C. De Dominicis, T. Garel)
- Programme Paris-Oxford (G. Ripka)
- Bourse von Humboldt (Ripka : Bochum, Heidelberg, Munich; Rho : GSI, Munich)
- PICS, puis Convention d'Echanges franco-polonais (R. Schaeffer : Institut Copernic de Varsovie)
- Programme Concerté de Collaboration Scientifique franco-polonais (E. Dudas, C. Savoy)
- Programme "Fermion masses and mixing" franco-américain (E. Dudas : University of Florida)

ADMINISTRATION DE LA RECHERCHE

• CEA

- Conseil Scientifique du CEA (R. Balian)
- Conseil de Direction de la DSM (R. Lacaze)
- Conseils de laboratoire
 - DAPNIA (A. Morel)
 - CSTS du SPN (J.-P. Blaizot)
 - CSTS du SPP (J. Zinn-Justin)
 - CSTS du SAP (R. Schaeffer, J. Zinn-Justin)
 - Comité d'évaluation du CESTA, Bordeaux (R. Balian)
- Conseils Scientifiques de segments
 - Segment 33 (R. Schaeffer)
 - Segment 32 (P. Bonche)
- Comité scientifique de programme "Réacteurs et Combustibles" (P. Bonche)
- Comité scientifique de programme "Cycle du combustible" (G. Ripka)
- Programme ISAAC et INCA (P. Bonche)

• CALCUL SCIENTIFIQUE AU CEA

- Comité des utilisateurs de l'informatique du CEA (A. Billoire)
- Comité Simulation et Téraflopp (A. Billoire)
- Conseil Scientifique pour le Calcul Centralisé de la DSM (A. Billoire, J.Zinn-Justin)
- Comité d'exploitation du C90 (O. Golinelli)

Par ailleurs, J. M. Normand participe régulièrement aux réflexions de la Direction Informatique sur l'évolution des calculateurs centralisés.

- **CNRS**

- Comité des Sciences Physiques (R. Balian, président)
- Conseil du Département SPM (J.-P. Blaizot, J.-B. Zuber)
- Comité National (section 02) (F. David, J.-M. Drouffe jusqu'en 1995; J.-B. Zuber depuis 1995)

- **MESR**

- Conseil des Très Grands Equipements Scientifiques (R. Balian)
- Chargé de mission à la DSPT2 (informatique) (A. Billoire)
- Comité d'attribution des bourses de thèses MESR (A. Morel)
- Commission d'habilitation des DEA (J. Zinn-Justin)
- Commission de spécialistes (section 29), université de Nantes (J.-P. Blaizot)
- Conseil scientifique du programme MENESR pour les thésards polonais (R. Schaeffer)

- **CONSEILS SCIENTIFIQUES DE LABORATOIRE**

- Conseil Scientifique de l'ENSLAPP (F. David)
- Conseil Scientifique du CPT-Marseille (J.-B. Zuber)
- Conseil Scientifique du GANIL (P. Bonche)
- Conseil Scientifique du LN SATURNE (M. Rho)
- Conseil Scientifique du Hochleistungszentrum (HLRZ, KFA, Julich) (J.Zinn-Justin)
- Conseil Scientifique Extérieur du Laboratoire de Physique Théorique du JINR, Dubna (J.Zinn-Justin)
- Conseil Scientifique du DARC-Meudon (R. Schaeffer)
- Conseil Scientifique du laboratoire de physique théorique de l'ENS (J.-B. Zuber)
- Conseil Scientifique de l'IHES (J.-B. Zuber)
- Comité du SPSL du CERN (J.-P. Blaizot)

- **DIVERS**

- R. Balian est vice-président de la Société Française de Physique
- J.-P. Blaizot est président du Comité de direction de l'ECT* (European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, Trento, Italie)
- F. David est directeur de l'Ecole d'Eté de Physique Théorique des Houches, remplaçant J. Zinn-Justin
- B. Duplantier est directeur adjoint de l'Institut Henri Poincaré
- J.-B. Zuber est président de la section 02 du Comité National du CNRS

- Comité de programmes de l'IDRIS
 - "Systèmes Modèles" (R. Lacaze)
 - "Systèmes Moléculaires Organisés et Biologie" (H. Orland)
- Conseil Scientifique de l'IDRIS (R. Lacaze)
- Comité Scientifique du GDR "Fermions fortement corrélés" (T. Jolicœur)
- Comité Scientifique du GDR "Gedeon" (P. Bonche)

- Comité Scientifique du GDR “Structure interne des étoiles” (R. Schaeffer)
- Comité Scientifique du GDR “Cosmologie et grandes structures” (R. Schaeffer, jusqu’en 1994)
- (Co)Responsable de GDR “Assemblages Moléculaires Complexes” (H. Orland)
- Comité d’expériences de Modane (R. Schaeffer, jusqu’en 1994)
- Comité d’attribution des bourses CERN (R. Peschanski)
- Conseil d’administration de l’Ecole des Houches (R. Balian)
- Conseil d’administration de l’IHES (J. Zinn-Justin, représentant du Haut-Commissaire)
- “Assessment Board” de l’académie des sciences de la République Tchèque (G. Ripka)
- Comités de sélection de professeurs à l’Institut Niels Bohr et à NORDITA (J.-B. Zuber, J.-P. Blaizot)
- Responsable du CESEN, Cercle d’études sur l’énergie nucléaire (P. Bonche)
- Rapporteur pour le programme de la D.F.G. “Fermions, dynamique sur réseaux” (J. Zinn-Justin)
- Conseil scientifique du PICS Franco-Polonais, puis de la Convention d’échange CNRS-Académie polonaise (à partir de 1995) (R. Schaeffer)

LE GROUPE DE DOCUMENTATION SP_HT-SPEC

La bibliothèque, un des pôles essentiels pour la physique théorique, comporte actuellement plus de 8000 ouvrages et souscrit à plus de 150 abonnements à des revues scientifiques.

Son informatisation a été consolidée. Les procédures ont été davantage formalisées et contrôlées, tant pour le catalogage que pour la gestion des livres (achats, prêts). Animé par Andrée Bonnerot, le comité de sélection, qui rassemble des physiciens du service, continue d’assurer la qualité scientifique du fonds.

Monique Féron part à la retraite cette année 1996. Rejointe ensuite par Jeanine Delouvrier, elle a participé à la création de la bibliothèque, rendue si attrayante, tant par la tenue matérielle des locaux et des ouvrages, que par la qualité et la diversité des services fournis aux chercheurs. Arrivé au début de cette année, Bruno Savelli, qui lui succédera, a eu le temps d’être formé à ses nouvelles tâches.

Le secrétariat scientifique souffre encore très fortement du départ quasi-simultané de Valérie Lambert et de Sylvie Zaffanella; même si l’unique secrétaire actuelle, Liliane Dumets, aidée au début par Sylvie (restée heureusement dans le service) et Claudine Verneyre, a su rapidement et efficacement : a) utiliser un nouveau logiciel de traitement de texte scientifique, b) respecter les procédures du service pour la gestion des publications, c) assurer un secrétariat d’édition d’une revue scientifique.

Un serveur “Web” pour le groupe de documentation et le service de physique théorique a été mis en place. Il comporte en particulier des pages pour la consultation des liste des ouvrages et des publications ainsi que pour les annonces des séminaires. Les résumés et les rapports internes des publications du service depuis 1993 sont disponibles, de même que certains textes intégraux (en format PostScript). Des écrans-formulaires permettent aux chercheurs d’obtenir par eux-mêmes, sous plusieurs formats et

selon divers critères de recherches des listes de publications personnalisées. Actuellement, ce serveur n'est malheureusement accessible que de l'intérieur du CEA.

Andrée BONNEROT (Ingénieur, SPEC)

Jeanine DELOUVRIER (Bibliothèque)

Liliane DUMETS (Secrétariat scientifique)

Monique FERON (Bibliothèque), remplacée par B. Savelli en 1996

Marc GINGOLD (Ingénieur)

Valérie LAMBERT (Secrétariat scientifique) jusqu'en 1995

Bruno SAVELLI (Bibliothèque)

Claudine VERNEYRE (Informatique)

Sylvie ZAFFANELLA (Secrétariat scientifique), remplacée par L. Dumets

LE SECRÉTARIAT ADMINISTRATIF

Les tâches administratives incombant au secrétariat administratif se sont considérablement alourdies ces dernières années: traitement direct des achats, démultiplication des formalités administratives pour nos visiteurs, etc...

Anne-Marie ARNOLD

Syvie ZAFFANELLA (qui a remplacé Francine LEFEVRE en août 95)

L'INFORMATIQUE AU SPhT

Le SPhT partage un système informatique avec le DRECAM. La gestion en est assurée par une équipe interdépartementale de 4 membres, une 5ème personne assurant un support spécifique SPhT.

L'architecture retenue, à base de serveurs Sun et de terminaux X, permet à l'équipe système d'assurer l'administration de plusieurs dizaines de serveurs et stations et de plusieurs centaines de terminaux X répartis sur l'ensemble du site de Saclay.

Le système est en constante évolution pour s'adapter aux besoins des utilisateurs et suivre les progrès technologiques.

Les serveurs

Le support des postes de travail et les services interactifs sont assurés par des serveurs Sun SparcStation 20. Les calculs moyens sont effectués en batch sur des serveurs Sun UltraSparc, un modèle biprocesseur étant entièrement réservé à cet usage.

Le SPhT dispose en propre de 2 Sun SparcStation 10 destinées en priorité au calcul formel avec les logiciels MacSyma et Mathematica et aux applications graphiques.

Les postes de travail

Le choix du terminal X comme poste de travail standard a été confirmé. Après une première phase d'équipement en 19" noir et blanc, les nouveaux postes sont des 17" et 20" couleur.

Un certain nombre de PC et de MacIntosh permettent de répondre à des besoins spécifiques. L'utilisation d'un logiciel serveur X-Window, permet d'accéder au système dans les mêmes conditions que les terminaux X.

Le calcul centralisé

Les physiciens disposent pour leurs gros calculs des moyens de calcul centralisé du CEA : un Cray C94 quadri-processeur et un Cray T3D à 128 processeurs qui doit être prochainement remplacé par un T3E à 256 processeurs.

Les projets importants font l'objet d'un examen par un Comité qui juge de la validité du projet et de l'adéquation avec les machines (possibilités de vectorisation et de parallélisation) et alloue un contingent d'heures par semestre.

Les utilisateurs peuvent se connecter en interactif sur le C94 ou soumettre les travaux en batch à partir du système local.

Citons parmi les projets importants du SPhT

* des simulations en mécanique statistique et en théorie de jauge sur réseaux

* des calculs de conformation de protéines

* des calculs de structure nucléaire

Communication et information

Les physiciens sont maintenant totalement habitués à l'utilisation de toute la panoplie des outils d'accès au réseau : messagerie, connexion, transfert de fichiers, News, et surtout Web.

Un serveur WWW interne permet aux utilisateurs d'accéder aux bases de la documentation SPEC-SPhT (recherche d'ouvrages, listes de prétrajés, rapports, ...).

Un projet de serveur WWW externe doit faire l'objet d'un agrément de la Direction de la Sécurité.

Catherine BOURGOIS

Jean-Claude CARRE

François MARABELLE

Laurent de SEZE

Claudine VERNEYRE

PHYSICIENS DU SERVICE DE PHYSIQUE THÉORIQUE

Roger BALIAN (CEA)
Michel BAUER (CEA) (mission longue durée au CERN, jusqu'en mars 1995)
Michel BERGERE (CNRS)
Lorenzo BERGOMI (CEA) (postdoc au MIT jusqu'en juin 96)
Denis BERNARD (CNRS)
Francis BERNARDEAU (CEA)
Claude BERVILLIER (CNRS)
Daniel BESSIS (CEA) (conseiller scientifique depuis 1993)
Alain BILLOIRE (CEA)
Jean-Paul BLAIZOT (CNRS)
Paul BONCHE (CEA)
Philippe BRAX (CEA) (postdoc a Cambridge jusqu'en septembre 96)
Jacques BROS (CEA) (conseiller scientifique depuis octobre 1994)
Marc CHEMTOB (CNRS)
Henri CORNILLE (CNRS)
François DAVID (CNRS)
Cirano DE DOMINICIS (CEA) (retraite depuis 1992)
Bernard DERRIDA (professeur à l'ENS et conseiller scientifique CEA depuis 1993)
Philippe DI FRANCESCO (CEA)
Jean-Michel DROUFFE (CEA)
Bertrand DUPLANTIER (CEA)
Bertrand EYNARD (CEA) (service national en Syrie)
Thomas GAREL (CNRS)
Michel GAUDIN (CEA) (conseiller scientifique depuis janvier 1992)
Annie GERVOIS (CNRS)
Bertrand GIRAUD (CEA)
Olivier GOLINELLI (CEA)
Emmanuel GUITTER (CEA)
Daniel IAGOLNITZER (CEA)
Edmond IANCU (en stage du CNRS)
Claude ITZYKSON (CEA) (décédé le 22 mai 1995)
Thierry JOLICOEUR (CNRS)
Hannah KLUBERG-STERN (CNRS)
David KOSOWER (CEA)

Ivan KOSTOV (CNRS)
Robert LACAZE (CNRS)
Stanislas LEIBLER (CEA) (détaché à l'Univ. de Princeton depuis le 1.3.1992)
Jean-Marc LUCK (CEA)
Gilbert MAHOUX (CEA) (retraite en août 1994)
Madan Lal MEHTA (CNRS) (mission longue durée en Inde depuis septembre 95)
André MOREL (CEA)
Pierre MOUSSA (CEA)
Henri NAVELET (CEA)
Christiane NORMAND (CNRS)
Jean-Marie NORMAND (CEA)
Jean-Yves OLLITRAULT (CNRS)
Henri ORLAND (CEA)
Vincent PASQUIER (CEA)
Robert PESCHANSKI (CEA)
Jacques RAYNAL (CEA) (retraite en août 1994)
Mannque RHO (CEA)
Georges RIPKA (CEA)
Hubert SALEUR (CNRS) (depuis le 1.7.1991, détaché à l'Univ. de Yale, puis à l'Univ. de Southern California)
Carlos SAVOY (CNRS)
Richard SCHAEFFER (CEA)
André VOROS (CEA)
Jean ZINN-JUSTIN (CEA)
Jean-Bernard ZUBER (CEA)

JEUNES CHERCHEURS

Etienne AMIC
Christophe GROJEAN
Kirone MALLICK
Jean-François MERCIER
Stéphane NONENNMACHER
Estèle PITARD
Georg SCHREIBER
Didina SERBAN

VISITEURS LONGUE DURÉE

Visiteurs du SPhT ayant séjourné plus d'un mois durant la période juin 94 – mai 96 (la durée du ou des séjour(s) est indiqué entre parenthèses).

Yasuhusba ABE [Université de Kyoto (Japon)]	(1)	
Ratindranath AKHOURY [Université du Michigan (USA)]	(6)	Bourse CIES
Armando BAZZANI [Université de Bologne (Italie)]	(1)	
Mabrouk BENHAMOU [Faculté des Sciences II, Casablanca (Maroc)]	(2)	
Zvi BERN [UCLA, Los Angeles (USA)]	(1)	
Andrejz BIALAS [Université de Cracovie (Pologne)]	(3)	
Alexandre BOBYLEV [Université de Kaiserlantern (Allemagne)]	(2)	Bourse CIES
Dmitri BOULATOV [Niels Bohr Institute (Suède)]	(1)	
Wojtech BRONIOWSKY [Institut Nucléaire de Varsovie (Pologne)]	(1,1)	
Norbert ELSTNER [Université de Californie, Santa-Cruz (USA)]	(7)	
Gerald GOLDIN [Rutgers University (USA)]	(1)	
Jiri HOSEK [Institut de Physique de Rez (République Tchèque)]	(1,1,5)	
Imre KONDOR [Institut d'Eötvös, Budapest (Hongrie)]	(1,1)	
Arul LAKSHMINARAYAN [Physical Research Lab., Ahmedabab (Inde)]	(1)	
Ziad MAASSARANI [UCLA, Los Angeles (USA)]	(8)	
Georghe MEZINCESCU [Institut de Physique de Bucarest (Roumanie)]	(2)	Bourse CIES
Tania MONTEIRO [Dpt of Physics Astronomy - University College London (UK)]	(12)	Bourse CIES
Ugo MOSCHELLA [SISSA de Trieste (Italie)]	(3)	
Reinhold OPPERMAN [Würzburg Universität (Allemagne)]	(1,5)	
Rajesh PARWANI [Stony Brook, New York (USA)]	(4)	
Valentina PETKOVA [Inst. de Phys. Clausthal-Zellerfeld (Allemagne)]	(1)	
Paul PIERCE [Université de Melbourne (Australie)]	(9)	
Stefan POKORSKI [Université de Varsovie (Pologne)]	(1,2,5)	
Joseph RUDNICK [UCLA, Los-Angeles (USA)]	(1)	
Pal RUJAN [Université d'Oldenburg (Allemagne)]	(1,5)	

Tamas TEMESVARI [Institut d'Eötvös (Hongrie)]	(1)
Jun TERASAKI [Université de Tokyo (Japon)]	(4)
Dave THIRUMALAI [UCLA, Los-Angeles (USA)]	(1)
Zoltan TROCSANYI [Université de Kossuth, Debrecen (Hongrie)]	(1)
Raul VALLEJOS [Université de Buenos-Aires (Argentine)]	(1)
G. VATTAY [Institut d'Eötvös (Hongrie)]	(1)
Hélène VELTMAN [DESY, Hambourg]	(4)
Edouardo VERGINI [Université de Buenos-Aires (Argentine)]	(1)
Matteo VILLANI [Université de Bari (Italie)]	(1)
Gérard WATTS [King's College, London (UK)]	(6)