

1 Curriculum Vitae

1.1 *Etat-civil*

Boris Pioline

Nationalité française

Né le 4 juillet 1972 à Saint Martin de Fontenay, Calvados, France

1.2 *Adresse personnelle*

54 avenue Maurice Thorez

F-94200 Ivry-sur-Seine

1.3 *Adresse scientifique*

Activité partagée à égalité entre:

- Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies
UMR 7589, direction Olivier Babelon

Universités Pierre et Marie Curie (Paris 6) et Denis Diderot (Paris 7)

Boîte 126, Tour 24, 5^{eme} étage

4 place Jussieu,

F-75252 Paris Cedex 05

- Laboratoire de Physique Théorique
UMR 8549, direction Bernard Julia

Département de Physique de l'École Normale Supérieure

24, Rue Lhomond

F-75231 Paris Cedex 05

1.4 *Cursus académique*

- juin 1990 : Baccalauréat en section scientifique C, académie de Caen, mention très bien avec les félicitations du jury ;
- septembre 1990 - juin 1992: Classes préparatoires au Lycée Malherbe, Caen, section mathématiques.
- **juin 1992 : Admission à l'École Normale Supérieure de Paris, concours Mathématiques.**

- septembre 1992 – juin 1994 : Second cycle en Physique et Mathématiques: Licence, Maîtrise et Magistère de Physique, Université Paris VI ;
- janvier – juin 1994 : Stage de recherche long à Stanford University, Physics Department dans le groupe de Profs. Chu et Kasevich: *interférométrie atomique* ;
- septembre 1994 – juin 1995 : Diplôme d'Etudes Approfondies en Physique Théorique, Université Paris VI, direction E. Brézin, mention très bien ; Stage de recherche court à l'Ecole Polytechnique, laboratoire Plasmas et Milieux Ionisés, dans le groupe du Prof. Grésillon: *Mesure de la turbulence par diffusion acoustique*.
- septembre 1995 – avril 1998 : Thèse de Doctorat de 3ème cycle en Physique Théorique au Centre de Physique Théorique, Ecole Polytechnique, Paris, sous la direction de I. Antoniadis: *Aspects non perturbatifs de la théorie des supercordes*.
- **21 avril 1998: obtention du grade de Docteur de l'Université Paris VI** avec mention très honorable et les félicitations du jury.
- septembre 1996 – décembre 1997 : Service National comme Coopérant à la Division Théorie du CERN, Genève, Suisse.
- janvier 1998 – septembre 1999 : Allocataire moniteur à l'École Polytechnique, assistant d'enseignement en Mathématiques.
- **1er octobre 1999 : Entrée au CNRS dans le grade de chargé de recherches de seconde classe**, section 02. Nomination au LPTHE, direction L. Baulieu.
- octobre 1999 - septembre 2001: Stage post-doctoral au Jefferson Physical Laboratory, Harvard University, dans le groupe des Profs. Maldacena, Strominger, Vafa.
- 15 mai 2001 : Titularisation dans le grade de chargé de recherches de seconde classe
- 1er octobre 2002 : Promotion au grade de chargé de recherches de première classe
- **19 septembre 2003 : Obtention de l'habilitation à diriger les recherches, Université Paris 6** avec les félicitations du jury.
- 1er septembre 2004 : Coaffiliation au LPTHE et LPTENS
- 2004: Admission sur la liste de qualification "Professeur"
- 13 mai 2005: Classé 2ème sur le concours du poste de professeur PR 3411 en 29eme section, université Paris VI.

2 Liste de publications

2.1 Publications dans les revues à comité de lecture

- [1] I. Antoniadis and B. Pioline, “Higgs branch, hyperKaehler quotient and duality in SUSY $N = 2$ Yang-Mills Int. J. Mod. Phys. A **12** (1997) 4907 [arXiv:hep-th/9607058].
- [2] E. Kiritsis and B. Pioline, “On R^4 threshold corrections in type IIB string theory and (p,q) string Nucl. Phys. B **508** (1997) 509 [arXiv:hep-th/9707018].
- [3] I. Antoniadis, B. Pioline and T. R. Taylor, “Calculable $e^{-1/\lambda}$ effects,” Nucl. Phys. B **512** (1998) 61 [arXiv:hep-th/9707222].
- [4] A. Gregori, E. Kiritsis, C. Kounnas, N. A. Obers, P. M. Petropoulos and B. Pioline, “ R^2 corrections and non-perturbative dualities of $N = 4$ string ground Nucl. Phys. B **510** (1998) 423 [arXiv:hep-th/9708062].
- [5] B. Pioline and E. Kiritsis, “U-duality and D-brane combinatorics,” Phys. Lett. B **418** (1998) 61 [arXiv:hep-th/9710078].
- [6] N. A. Obers, B. Pioline and E. Rabinovici, “M-theory and U-duality on T^d with gauge backgrounds,” Nucl. Phys. B **525** (1998) 163 [arXiv:hep-th/9712084].
- [7] B. Pioline, “A note on non-perturbative R^4 couplings,” Phys. Lett. B **431** (1998) 73 [arXiv:hep-th/9804023].
- [8] N. A. Obers and B. Pioline, “U-duality and M-theory,” Phys. Rept. **318** (1999) 113 [arXiv:hep-th/9809039].
- [9] I. Antoniadis and B. Pioline, “Low-scale closed strings and their duals,” Nucl. Phys. B **550** (1999) 41 [arXiv:hep-th/9902055].
- [10] N. A. Obers and B. Pioline, “Eisenstein series and string thresholds,” Commun. Math. Phys. **209** (2000) 275 [arXiv:hep-th/9903113].
- [11] B. Pioline and A. S. Schwarz, “Morita equivalence and T-duality (or B versus Theta),” JHEP **9908** (1999) 021 [arXiv:hep-th/9908019].
- [12] C. Bachas and B. Pioline, “High-energy scattering on distant branes,” JHEP **9912** (1999) 004 [arXiv:hep-th/9909171].
- [13] E. Kiritsis, N. A. Obers and B. Pioline, “Heterotic/type II triality and instantons on $K3$,” JHEP **0001** (2000) 029 [arXiv:hep-th/0001083].

- [14] A. Hanany and B. Pioline, “(Anti-)instantons and the Atiyah-Hitchin manifold,” JHEP **0007** (2000) 001 [arXiv:hep-th/0005160].
- [15] N. A. Obers and B. Pioline, “Exact thresholds and instanton effects in $D = 3$ string theories,” JHEP **0007** (2000) 003 [arXiv:hep-th/0006088].
- [16] E. D’Hoker and B. Pioline, “Near-extremal correlators and generalized consistent truncation for JHEP **0007** (2000) 021 [arXiv:hep-th/0006103].
- [17] C. Bachas, J. Hoppe and B. Pioline, “Nahm equations, $N = 1^*$ domain walls, and D-strings in $AdS(5) \times S(5)$,” JHEP **0107** (2001) 041 [arXiv:hep-th/0007067].
- [18] S. Elitzur, B. Pioline and E. Rabinovici, “On the short-distance structure of irrational non-commutative gauge JHEP **0010** (2000) 011 [arXiv:hep-th/0009009].
- [19] H. Partouche and B. Pioline, “Rolling among $G(2)$ vacua,” JHEP **0103** (2001) 005 [arXiv:hep-th/0011130].
- [20] B. Pioline, H. Nicolai, J. Plefka and A. Waldron, “ R^4 couplings, the fundamental membrane and exceptional theta correspondences,” JHEP **0103** (2001) 036 [arXiv:hep-th/0102123].
- [21] D. Kazhdan, B. Pioline and A. Waldron, “Minimal representations, spherical vectors, and exceptional theta series” Commun. Math. Phys. **226** (2002) 1 [arXiv:hep-th/0107222].
- [22] B. Pioline, “Comments on the topological open membrane,” Phys. Rev. D **66** (2002) 025010 [arXiv:hep-th/0201257].
- [23] E. Kiritsis and B. Pioline, “Strings in homogeneous gravitational waves and null holography,” JHEP **0208** (2002) 048 [arXiv:hep-th/0204004].
- [24] B. Pioline and A. Waldron, “Quantum cosmology and conformal invariance,” Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 031302 [arXiv:hep-th/0209044].
- [25] B. Durin and B. Pioline, “Open strings in relativistic ion traps,” JHEP **0305** (2003) 035 [arXiv:hep-th/0302159].
- [26] B. Pioline and M. Berkooz, “Strings in an electric field, and the Milne universe,” JCAP **0311** (2003) 007 [arXiv:hep-th/0307280].
- [27] M. Gutperle and B. Pioline, “Type IIB colliding plane waves,” JHEP **0309** (2003) 061 [arXiv:hep-th/0308167].

- [28] B. Pioline and A. Waldron, “The automorphic membrane,” *JHEP* **0406** (2004) 009 [arXiv:hep-th/0404018].
- [29] D. S. Berman and B. Pioline, “Open membranes, ribbons and deformed Schild strings,” *Phys. Rev. D* **70** (2004) 045007 [arXiv:hep-th/0404049].
- [30] M. Berkooz, B. Pioline and M. Rozali, “Closed strings in Misner space,” *JCAP* **0408** (2004) 004 [arXiv:hep-th/0405126].
- [31] M. Berkooz, B. Durin, B. Pioline and D. Reichmann, “Closed strings in Misner space: Stringy fuzziness with a twist,” *JCAP* **0410** (2004) 002 [arXiv:hep-th/0407216].
- [32] B. Pioline and J. Troost, “Schwinger pair production in AdS(2),” *JHEP* **0503** (2005) 043 [arXiv:hep-th/0501169].
- [33] A. Dabholkar, F. Denef, G. W. Moore and B. Pioline, “Exact and asymptotic degeneracies of small black holes,” *JHEP* **0508** (2005) 021 [arXiv:hep-th/0502157].
- [34] B. Pioline, “BPS black hole degeneracies and minimal automorphic representations,” *JHEP* **0508** (2005) 071 [arXiv:hep-th/0506228].
- [35] A. Dabholkar, F. Denef, G. W. Moore and B. Pioline, “Precision counting of small black holes,” *JHEP* **0510** (2005) 096 [arXiv:hep-th/0507014].
- [36] B. Durin and B. Pioline, “Aspects of Dirichlet S-branes,” *Phys. Lett. B* **625** (2005) 291 [arXiv:hep-th/0507059].
- [37] M. Gunaydin, A. Neitzke, B. Pioline and A. Waldron, “BPS black holes, quantum attractor flows and automorphic forms,” *Phys. Rev. D* **73** (2006) 084019 [arXiv:hep-th/0512296].
- [38] M. Gunaydin, A. Neitzke and B. Pioline, “Topological wave functions and heat equations,” arXiv:hep-th/0607200.
- [39] A. Neitzke, B. Pioline and S. Vandoren, “Twistors and Black Holes,” *JHEP* **0704**, 038 (2007) [arXiv:hep-th/0701214].
- [40] Y. Michel and B. Pioline, “Higher Derivative Corrections, Dimensional Reduction and Ehlers Duality,” *JHEP* **0709**, 103 (2007) [arXiv:0706.1769 [hep-th]].
- [41] M. Gunaydin, A. Neitzke, B. Pioline and A. Waldron, “Quantum Attractor Flows,” *JHEP* **0709**, 056 (2007) [arXiv:0707.0267 [hep-th]].

- [42] M. Gunaydin, A. Neitzke, O. Pavlyk and B. Pioline, “Quasi-conformal actions, quaternionic discrete series and twistors: $SU(2, 1)$ and $G_{2(2)}$,” arXiv:0707.1669 [hep-th].
- [43] M. Berkooz and B. Pioline, “Five-dimensional black holes: the power of reduction”, à paraître.
- [44] P. Gao and B. Pioline, “Topological amplitudes and the 4d/5d lift”, à paraître.
- [45] S. Alexandrov, B. Pioline, F. Saueressig and S. Vandoren, “Linear deformations of hyperkähler manifolds”, à paraître.
- [46] Y. Michel, B. Pioline and C. Rousset, “ $N = 4$ black holes and twistors”, à paraître.

2.2 Actes de conférences à comité de lecture

- [47] H. Partouche and B. Pioline, “Partial spontaneous breaking of global supersymmetry,” Contribution aux actes du “International Symposium Ahrenshoop on the Theory of Elementary Particles”, Buckow, Allemagne, 27-31 Aout 1996; Nucl. Phys. Proc. Suppl. **56B** (1997) 322 [arXiv:hep-th/9702115].
- [48] B. Pioline, “D-effects in toroidally compactified type II string theory,” Contribution aux actes du colloque “Quantum Aspects of Gauge Theories, Supersymmetry and Unification”, Université de Neuchâtel Suisse, 18-23 Septembre 1997; Fortsch. Phys. **47** (1999) 271 [arXiv:hep-th/9712155].
- [49] N. A. Obers and B. Pioline, “U-duality and M-theory, an algebraic approach,” Contribution aux actes du colloque “Quantum Aspects of Gauge Theories, Supersymmetry and Unification”, Corfu, Septembre 1998, et aux Rencontres Physiciens-Mathématiciens, Strasbourg, décembre 1998 [arXiv:hep-th/9812139].
- [50] N. A. Obers and B. Pioline, “Eisenstein series in string theory,” Class. Quant. Grav. **17** (2000) 1215, Proceedings de Strings 99, Potsdam, Germany, 19-25 jul 1999, [arXiv:hep-th/9910115].
- [51] I. Antoniadis and B. Pioline, “Large dimensions and string physics at a TeV,” in Proceedings of the Conference on Fundamental Interactions from Symmetries to Black Holes (EnglertFest), Brussels, Belgium, 24-27 Mar 1999 and 2nd International Conference Physics Beyond the Standard Model: Beyond the Desert 99: Accelerator, Nonaccelerator and Space Approaches, Ringberg Castle, Tegernsee, Germany, 6-12 Jun 1999 [arXiv:hep-ph/9906480].

- [52] *Duality, Eisenstein Series and Exact Thresholds*, par Niels A. Obers et Boris Pioline, in Proceedings du workshop “Strings, geometry and duality”, Montreal, Québec, 22-25 mars 2000, *Mirror Symmetry* 4 **28** (2002).
- [53] N. A. Obers and B. Pioline, “Exact thresholds and instanton effects in string theory,” *Fortsch. Phys.* **49** (2001) 359, in Proceedings of Berlin RTN network meeting, juillet 2000, [arXiv:hep-th/0101122].
- [54] B. Pioline, “Cubic free field theory,” in Proceedings de l’Ecole de Physique “Progress in String, Field and Particle Theory”, Cargèse, 25 juin - 11 juillet 2002 arXiv:hep-th/0302043.
- [55] B. Durin and B. Pioline, “Closed strings in Misner space: A toy model for a big bounce?,” in Proceedings de l’Ecole de Physique de Cargèse “String theory: from gauge interactions to cosmology”, du 9 juin au 17 juin 2004, NATO Science Series [arXiv:hep-th/0501145].

2.3 Ouvrages et chapitres d’ouvrages

- [56] L. Baulieu, E. Rabinovici, J. Harvey, B. Pioline and P. Windey, “Progress in string, field and particle theory”, Proceedings of NATO Advanced Study Institute, EC Summer School, Cargese, France, June 25-July 11, 2002”
- [57] B. Pioline and A. Waldron, “Automorphic forms: A physicist’s survey,” in “Frontiers in Number Theory, Physics and Geometry II’’, P. Cartier, B. Julia, P. Moussa, P. Vanhove eds, Springer 2006 [arXiv:hep-th/0312068].
- [58] L. Baulieu, B. Pioline, J. de Boer and E. Rabinovici, “String Theory: From Gauge Interactions To Cosmology. Proceedings of Nato Advanced Study Institute, Cargese, France, June 7-19, 2004,”
- [59] B. Pioline, “Lectures on on black holes, topological strings and quantum attractors,” *Class. Quant. Grav.* **23**, S981 (2006), in “Lectures from the European RTN Winter School on Strings, Supergravity and Gauge theories”, CERN, January 16-20, 2006, *Class. Quant. Grav.* **23** (2006) S981-S1045 [arXiv:hep-th/0607227].

3 Conférences et séminaires

3.1 Exposés invités dans des ateliers et conférences

1. *D-effects in Toroidally Compactified Type II String Theory* au colloque “Quantum Aspects of Gauge Theories, Supersymmetry and Unification”, Université de Neuchâtel, Suisse, 18-23 Septembre 1997
2. *D-effects in string theory* à la rencontre du GDR de Physique théorique, Tours, juin 1998;
3. *U-duality in M-theory*, au colloque TMR 1998 à Corfu (Grèce), 15-19 septembre 1998;
4. *U-duality in M-theory, an algebraic approach*, au colloque “Conformal field theory of D-branes” à Hamburg (Allemagne), 7-12 septembre 1998;
5. *U-duality in M-theory, an algebraic approach*, aux Rencontres entre Mathématiciens et Physiciens Théoriciens, à Strasbourg, 10-12 décembre 1998;
6. *Eisenstein series and exact string thresholds* au colloque “Extended Workshop on String Theory”, ICTP, Trieste (Italie), 1er juin - 16 juillet 1999;
7. *Automorphic functions and string thresholds* au colloque “D-Branes, vector bundles and bound states”, à l’IHES, Bures-sur-Yvette, 28 juin - 9 juillet 1999;
8. *Automorphic functions and string thresholds*, exposé invité à la rencontre du GDR “Systemes integrables et cordes”, Annecy, 8-10 septembre 1999;
9. *Eisenstein series and Heterotic - type II triality*, exposé invité au workshop TMR 2000 à Tel Aviv (Israel), 7-11 janvier 2000;
10. *Eisenstein series, string thresholds and triality*, exposé invité au workshop “Strings, Duality and Geometry”, à Montreal (Québec), 22-25 mars 2000, contribution aux Proceedings;
11. *Irrational non-commutative field theories*, exposé invité au workshop “Particle Physics and Gravitation: Quantum Fields and Strings”, Kolymbari, Crete, 9-15 Septembre 2000;
12. *Non-pertubative Amplitudes and Instanton Effects in String/M-theory*, trois cours à l’école “5th Winter school of APCTP/KIAS and 9th Haengdang Workshop on Strings and Field theory”, Hanyang University (Corée du sud), 11-16 décembre 2000;

13. *Quantizing the membrane ?*, exposé invité au colloque “Extended workshop on M-theory” de l’ITP, Santa Barbara (USA), 5 mai 2001;
14. Participant invité à l’ Institut d’été “String Theory, Gauge Theory and Gravity”, Amsterdam, 9-14 juillet 2001.
15. *Quantum membranes and automorphic theta series*, exposé invité au colloque “M-theory, gravity and geometry”, Cambridge, Royaume Uni, 11-15 février, 2002;
16. *Holography in homogeneous wave backgrounds*, exposé invité à la conférence EU-RESCO ”Particle Physics and Gravitation”, Bad Herrenalb, 1-6 juin 2002;
17. Participant invité à l’ Institut d’été “Summer Workshop on String Theory”, Amsterdam, 27 juillet - 2 Aout 2002;
18. *Non Gaussian Theta series and the supermembrane*, exposé invité à la conférence TH2002, Unesco, Paris, 22-25 juillet, 2002;
19. *Volume-preserving diffeomorphisms and the topological membrane*, exposé invité au colloque du GDR 144 ”Géométrie de dimension infinie et théorie des champs”, Marseille-Luminy, 25-29 novembre 2002;
20. *Conformal quantum mechanics and Quantum cosmology*, exposé invité au colloque “Across the Energy Frontier”, Ecole Polytechnique, Palaiseau, 11-14 décembre 2002;
21. *Non-Gaussian Theta series and the quantum membrane*, exposé invité à l’école d’hiver “Frontiers in Number Theory, Physics and Geometry”, Les Houches, 9-21 mars 2003;
22. *Open strings in electric fields and the Milne universe* exposé invité à la conférence Strings 2003, Kyoto, 6-11 juin 2003, contribution aux Proceedings sur internet;
23. Participant invité au workshop ”Strings in the Pyrenees 2003”, Benasque, Espagne, 13-25 juillet 2003;
24. Participant invité au workshop ”Time in string theory”, Aspen, Etats-Unis, 19-31 juillet 2003.
25. *Closed strings in the Misner Universe, aka the Lorentzian orbifold*, exposé invité au String Cosmology workshop, Institut d’Astrophysique de Paris, 5-20 juin 2004.
26. “Small black hole degeneracies and the topological string amplitude”, exposé invité à la “Conference on Theoretical Physics”, Lebedev Institute, Moscou, 11-16 avril 2005.

27. “Closed strings in the Misner Universe, a toy model of the Big Crunch ?” exposé invité au String Cosmology Workshop, Uppsala, 25/04/05
28. “The quantum attractor mechanism”, exposé invité au workshop ”Mathematical Structures in String Theory”, KITP, Santa Barbara, Etats-Unis, août à décembre 2005.
29. “Black hole degeneracies, topological strings and quantum attractors”, 4 lectures at the RTN Winter School on Strings, Supergravity and Gauge theories, CERN, 16-20 janvier 2006
30. “Black hole degeneracies, topological strings and quantum attractors”, 4 lectures at the 11-th APCTP/KIAS String Winter School, Pohang, Corée du sud, 8-15 février 2006
31. “Black hole degeneracies, topological strings and quantum attractors”, 3 lectures at the Winter School on the Attractor Mechanism, Frascati, Italie, 20-24 mars 2006.
32. “Quantum attractor flows”, exposé invité au “ASC workshop on black holes, black rings and topological strings”, Munich, 03/04/06
33. “Black holes and automorphic forms”, exposé invité au CIRM workshop “Affine Hecke Algebras, Langlands program, Matrix Models and Conformal Field Theory”, 5/07/06
34. “Quantizing BPS black holes”, exposé invité au workshop “M-theory in the City”, Queen Mary University, London, 10/11/06
35. “Quantizing BPS black holes”, exposé invité au “Indian Strings Meeting”, Puri, Inde, 12/12/06
36. ”Representation Theory and Automorphic Black Hole Partition Functions”, Workshop ”Formes automorphes: Physique et Mathématiques”, Univ. de Lille I, 12/12/07

3.2 Séminaires récents

1. “Morita Equivalence and T-duality”, Harvard University, oct. 1999.
2. “Eisenstein series, string thresholds and triality”, Rutgers University, New Jersey, mars 2000.

3. "Eisenstein series, string thresholds and triality", Brown University, Rhode Island, 5 avril 2000.
4. "Eisenstein series, string thresholds and triality", séminaire Singer-Jaffé, MIT-Harvard, 11 avril 2000.
5. "Self-duality and fuzzy branes", Theory Division, CERN, 9 août 2000.
6. "Fuzzy branes and solitons", Tokyo University, Japon, 21 dec 2000.
7. "Fuzzy branes and solitons", Kyoto University, Japon, 25 dec 2000.
8. "Fuzzy branes and solitons", KEK, Japon, 26 dec 2000.
9. "Fuzzy topology-changing solitons", Institute of Advanced Studies, Princeton, 29 janvier 2001.
10. "The quantum BPS membrane and theta correspondences", MIT, Boston, avril 2001.
11. "Non-commutative open membranes", AEI, Potsdam, 25 juillet 2001.
12. "Supermembranes et theta correspondances", biséminaire mathématique physique, Paris, 24 octobre 2001.
13. "String theory in homogeneous wave backgrounds and null holography", rencontres théoriciennes, IHES, 27 mars 2002.
14. "String theory in homogeneous wave backgrounds and null holography", Harvard University, 11 avril 2002.
15. "Strings in homogeneous wave backgrounds and null holography", U Penn, 1er mai 2002.
16. "M-theory and automorphic forms", LPM, Montpellier, 24/10/02.
17. "Conformal quantum mechanics and Quantum cosmology", Leuven, 14 nov 2002.
18. "Open strings in electric fields and time-dependent backgrounds", Spinoza Institute, Utrecht, 16 mai 2003 .
19. "Open strings in electric fields and time-dependent backgrounds", Tor Vergata, Rome, 21 mai 2003 .

20. “Open strings in electric fields and time-dependent backgrounds”, Rencontres Theoriciennes, Institut Henri Poincare, 21 mai 2003 .
21. “Open strings in electric fields and time-dependent backgrounds”, Tor Vergata University, Rome, 26 mai 2003.
22. “Open strings in electric fields and the Milne Universe”, DAMTP, Cambridge, 25 septembre 2003.
23. “Closed strings in the Milne Universe, and electric fields”, Neve Shalom, Israel, 28 octobre 2003.
24. “Closed strings in the Misner Universe”, Niels Bohr Institute, Danemark, 2 décembre 2003.
25. “Closed strings in the Misner Universe”, GreCO, Institut d’Astrophysique de Paris, 11 février 2004 .
26. “Closed strings in the Misner Universe, aka the Lorentzian orbifold”, Université d’Amsterdam, 17 février 2004 .
27. “Closed strings in the Misner Universe, aka the Lorentzian orbifold”, Harvard University, 11 mars 2004 .
28. “Closed strings in the Misner Universe, aka the Lorentzian orbifold” at Imperial College, London, 7 mai 2004 .
29. “Closed strings in the Misner Universe, aka the Lorentzian orbifold”, Division Théorie du CERN, 25 mai 2004 .
30. “Closed strings in the Misner Universe, aka the Lorentzian orbifold”, Durham University, 12 novembre 2004 .
31. “Small black hole degeneracies and the topological string amplitude”, SPhT, Saclay, 18 février 2005 .
32. “Small black hole degeneracies and the topological string amplitude”, CPHT, Ecole Polytechnique, 22 mars 2005 .
33. “Black hole entropy and topological string theory”, LPTHE, Paris, 29/04/05
34. “Black hole entropy and topological string theory”, CERN, Genève, 24/05/05
35. “Automorphic forms and black holes”, Leiden, 30/08/05 .

36. "The quantum attractor mechanism", Caltech, 11/11/05
37. "The quantum attractor mechanism", Berkeley 29/11/05
38. "Théorie des cordes topologiques et entropie des trous noirs", séminaire de géométrie de l'Université C. Bernard, Lyon, 1/2/06
39. "Small black hole degeneracies and the topological string amplitude", "London Triangular Meeting", 16 mars 2005 .
40. "Quantum attractor flows", Amsterdam Univ. , 23/05/06
41. "Quantizing BPS black holes", Utrecht Univ., 05/10/06
42. "Quantizing BPS black holes", ICTP Trieste, 10/10/06
43. "Quantizing BPS black holes", Oxford 06/11/06
44. "De la pomme à la supercorde", exposé de vulgarisation à l'attention des étudiants des classes préparatoires Maths Sup/Spé, Caen, 22/12/06
45. "Quantum Attractor Flows", Pisa, 27/03/07
46. "Quantum Attractor Flows", Newe Shalom, 10/04/07
47. "Quantum Attractors and Black Hole Partition Functions", at SPhT Saclay, 28/09/07
48. "Quantum Attractors and Black Hole Partition Functions", LPTA Montpellier, 22/10/07
49. "Quantum Attractors and Black Hole Partition Functions", at Toronto Univ., 22/11/07

4 Travaux antérieurs et impact scientifique

Mon activité de recherche a été consacrée pour l'essentiel à l'étude des théories de supercordes et de la théorie M. En dépit d'une formulation encore insatisfaisante, ces théories sont généralement reconnues comme les candidats les plus prometteurs à une description cohérente de la gravité quantique, naturellement unifiée avec les autres interactions de jauge. Les résultats que j'ai obtenus peuvent être regroupés en 5 thèmes principaux:

- Dualités cordistes, amplitudes exactes et instantons
- U-dualité, Théorie M, et quantification de la membrane
- Dynamique des D-branes, théories de jauge et correspondance AdS/CFT
- Champs de fond dépendant du temps et cosmologiques
- Trous noirs, cordes topologiques et formes automorphes

Je les développe successivement ci-dessous, dans l'ordre chronologique de mes travaux à quelques déviations près.

4.1 *Dualités cordistes, amplitudes exactes et instantons*

L'étude des effets non perturbatifs à l'aide des symétries de dualité a constitué l'essentiel de mon travail de thèse (direction I. Antoniadis), ainsi qu'une partie de ma recherche post-doctorale. L'idée essentielle consiste à utiliser les symétries non perturbatives de la théorie des cordes, en combinaison avec les contraintes posées par la supersymétrie et des calculs perturbatifs, pour déterminer exactement certaines amplitudes physiques. L'intérêt de cette démarche réside non pas tant dans le résultat lui-même, qui concerne des théories de supersymétrie élevée et de ce fait peu pertinentes pour la phénoménologie, que dans le test de la conjecture de dualité qu'il autorise, et dans l'information qu'il apporte quant à la nature des effets non perturbatifs en théorie des cordes. En étudiant la limite à faible couplage de ce résultat exact, on peut en effet comparer les termes analytiques au calcul perturbatif dans une théorie duale, et ainsi valider la dualité; mais aussi extraire les termes non analytiques en e^{-1/g_s^2} et tenter de les identifier comme des contributions de configurations semi-classiques d'instantons. On découvre ainsi les bases du calcul semi-classique en théorie des cordes, que l'on espère être valables de manière plus générale dans des cas moins supersymétriques.

Dans mon premier article sur ce thème [2], en collaboration avec E. Kiritsis, nous nous sommes intéressés aux contributions des instantons de D-branes à l'amplitude exacte de diffusion de quatre gravitons en R^4 dans les théories de type II toroïdalement compactifiées

en dimension $D \geq 7$. Ce processus possède des propriétés supersymétriques particulières qui en autorisent le calcul exact. Nous avons obtenu les contributions provenant du multiplet $Sl(2, Z)$ des cordes non perturbatives de type IIB à ce processus, et exprimé l'amplitude exacte comme une série d'Eisenstein du groupe de U-dualité, généralisant le résultat de Green et Gutperle en dimension 10.

Alors que les instantons de la théorie contribuent à l'ordre de e^{-1/λ^2} , où λ est la constante de couplage de jauge, la théorie des cordes prévoit des contributions d'ordre $e^{-1/\lambda}$ provenant des instantons de D-branes. En collaboration avec Antoniadis et Taylor [3] nous avons calculé certains termes du type $(\partial^2\phi)^2$ dans l'action effective des théories $N = 4$, en utilisant la dualité entre les cordes hétérotiques et les cordes de type II compactifiées sur une surface $K3$. Nous avons ainsi obtenu les contributions de D-brane pour des compactifications sur des variétés non plates. Une retombée de notre étude a été le dénombrement des cycles algébriques de genre donné dans la surface $K3$, obtenu indépendamment par Vafa et al. Un autre intérêt de ce résultat est qu'il est l'exemple le plus simple de amplitudes topologiques \tilde{F}_1 dans le secteur des hypermultiplets des théories $N = 2$, qui reste très mal connu.

Dans l'article [4] avec Gregori et al, nous avons étudié les implications de la dualité hétérotique - type II mentionnée au paragraphe précédent pour les couplages gravitationnels à quatre dérivées de l'action effective. Contrairement aux couplages mentionnés plus haut, ceux-ci ne reçoivent pas de contributions de D-branes, mais des cinq-branes de théorie des supercordes hétérotiques. Nous avons ainsi déterminé l'ensemble des couplages gravitationnels pour plusieurs modèles (dits CHL) avec supersymétrie $N = 4$ à quatre dimensions, et rang du groupe de jauge variable. Nous avons mis en évidence la restriction de la S-dualité à un sous-groupe de $Sl(2, Z)$ dans ces modèles d'orbifold sans points fixes. Ces résultats ont récemment joué un rôle important dans l'étude des corrections à l'entropie des trous noirs supersymétriques dans les théories $N = 4$.

Le travail avec Kiritsis [2] mentionné plus haut a trouvé son prolongement dans [5], où l'on utilise la dualité perturbative T pour déterminer les contributions de D-branes de plus grande dimensionalité aux couplages à quatre gravitons dans les théories des cordes de type II compactifiées toroïdalement. Nous montrons également que la U-dualité ne peut être réalisée sans l'inclusion de contributions d'ordre e^{-1/λ^2} , qui en dimension supérieure à quatre n'ont pas d'interprétation instantonique satisfaisante à ce jour.

Suite à ces travaux, en utilisant le formalisme de superchamp linéarisé sur la couche de masse de Berkovits, j'ai pu déterminer la valeur propre des couplages en R^4 sous l'opérateur de Laplace-Beltrami sur l'espace des modules [7], confirmant ainsi les conjectures de Green-Gutperle et Kiritsis-Pioline (citées plus haut). Cet argument permet ainsi d'exclure de possibles contributions de formes modulaires cuspoïdales, invariantes sous la

U-dualité et non visibles en théorie des perturbations, que les arguments antérieurs ne permettaient pas de contrôler.

En collaboration avec E. Kiritsis et N. A. Obers [13], nous avons effectué un test détaillé de la dualité entre la corde hétérotique $E_8 \times E_8$ compactifiée sur T^4 et la théorie de type IIA sur K_3 . Nous nous sommes intéressés au cas des couplages à quatre bosons de jauge en F^4 , qui sont saturés par les états 1/2 BPS dans les théories $N = 4$. La dualité requiert une égalité apparemment miraculeuse entre une amplitude à une boucle du côté hétérotique, et une amplitude à l'ordre des arbres du côté de type II, sans contamination par des effets d'ordre plus élevé. En se plaçant au point d'orbifold T^4/Z_2 de K_3 , nous montrons que le calcul sur la sphère en type IIA conduit en fait à une courbe elliptique, en raison des opérateurs de vertex des champs de jauge twistés qui introduisent deux coupures sur la sphère; grâce à certaines identités de Hecke sur les fonctions modulaires, l'égalité entre les résultats hétérotiques et de type II est alors ramenée à l'invariance de la série d'Eisenstein pour $SO(4, 4, Z)$ sous la triality, une conséquence de la publication [10] décrite plus bas. Cet accord remarquable est une confirmation très forte de la dualité hétérotique/ type II. Dans ce même article nous étudions également les couplages F^4 dans les théories M et F compactifiées sur K_3 , ainsi qu'en dimension 5 et 4, en utilisant la symétrie non perturbative $SO(5, 21, Z)$ de la corde de type IIB compactifiée sur K_3 , ou de type IIA sur $K_3 \times S_1$. Nous pouvons ainsi extraire la mesure de sommation des D-instantons, ainsi que celle des 5-branes de Neveu-Schwarz, qui contribuent en dimension $D \leq 4$, ce qui conduit à une prédiction pour la contribution principale $\mu(N)$ à l'index de la théorie de volume d'univers de N NS5-branes enroulées sur $K_3 \times T^2$.

Avec N. Obers [15], nous avons poursuivi cette étude et étudié les effets non perturbatifs dans les théories des cordes en dimension 2+1 avec 16 supersymétries. On utilise cette fois l'extension non perturbative $SO(8, 24, Z)$ du groupe de T-dualité $SO(7, 23, Z)$, qui mélange le dilaton hétérotique avec les modules géométriques. En covariantisant l'amplitude hétérotique à une boucle, nous proposons une expression exacte pour le couplage $(\partial\phi)^4$, invariante sous la dualité, qui reproduit les résultats perturbatifs connus dans la limite de faible couplage hétérotique, type I et type II. L'expansion à faible couplage reproduit les D-instantons et instantons de NS5-brane déjà connus, plus les instantons de Kaluza-Klein (correspondant à des monopoles de Kaluza-Klein dont la ligne d'univers enroule la quatrième dimensions) propres à la dimension 2+1, dont on peut ainsi extraire la mesure de sommation.

Dans un article avec A. Hanany, je me suis intéressé au problème des corrections non perturbatives à l'espace des modules des hypermultiplets dans les théories avec 8 supersymétries [14] (ce problème m'avait été posé dès 1995 par mon directeur de thèse I. Antoniadis, et avait donné lieu à un premier article [1]). Par contraste avec l'espace des

modules des multiplets vectoriels, l'absence d'une description simple pour la géométrie hyperkählerienne rend l'étude générale de ce problème très difficile (cette difficulté est sur le point d'être surmontée grâce aux techniques twistorielles, voir plus loin). Néanmoins, en dimension basse et en utilisant les symétries du problème, on peut quelquefois la déterminer exactement, comme dans le cas de l'espace des modules de monopoles de 't Hooft-Polyakov dans la théorie de jauge $SU(2)$ à 3+1 dimensions, donné par la métrique d'Atiyah et Hitchin. La même variété hyperkählerienne apparaît dans plusieurs autres problèmes, incluant l'espace des modules de la théorie de jauge $SU(2)$ $\mathcal{N} = 4$ à 2+1 dimensions, et l'espace des modules des cordes hétérotiques au voisinage d'une singularité R^4/Z_2 . La métrique exacte sur l'espace des modules étant connue, on peut considérer comme précédemment son développement à faible couplage, et en extraire les effets non-perturbatifs. Selon le contexte, ces effets s'interprètent comme des contributions d'instantons de Polyakov en 3 dimensions, ou des instantons de feuille d'univers dans la corde hétérotique à l'ordre des arbres. Notre analyse montre qu'il faut en réalité interpréter ces contributions comme des états liés de n instantons et \bar{n} anti-instantons, avec $n - \bar{n} = 0, \pm 1$ selon la composante de la métrique considérée. Ce résultat est à première vue surprenant, car ces configurations semblent briser toutes les supersymétries, et posséder plus de modes zéros fermioniques qu'il n'en faut pour saturer le vertex à quatre fermions qui décrit la courbure de l'espace des modules, mais en accord avec le théorème d'indice qui ne prévoit que $4(n - \bar{n})$ modes zéros fermioniques *exacts*. Ce phénomène est autorisé par l'absence de fonction holomorphe sous-jacente à la géométrie hyperkählerienne, et devrait persister dans le cas plus général (quaternionique-Kähler) de l'espace des modules des hypermultiplets couplés à la gravité.

Réduisant encore le nombre de supersymétries, je me suis ensuite intéressé avec H. Partouche aux corrections instantoniques au superpotentiel des théories des cordes de supersymétrie $\mathcal{N} = 1$, potentiellement relevant pour la phénoménologie [19]. Une construction simple consiste à considérer la M-théorie compactifiée sur une variété de dimension 7 et holonomie restreinte G_2 . Cette condition garantit l'existence d'un spineur de Killing et donc d'une supersymétrie. Les variétés d'holonomie G_2 peuvent à leur tour être construites en quotientant le produit $CY_3 \times S_1$ par une involution antiholomorphe de l'espace de Calabi-Yau, fois une réflexion du cercle S_1 . Il est donc intéressant d'étudier jusqu'à quel point les propriétés géométriques des espaces de Calabi-Yau – symétrie miroir, transitions de flop et de conifold – se généralisent au cas des variétés d'holonomie G_2 . Dans cet article, nous considérons les transitions de conifold dans le cas où l'espace de Calabi-Yau est obtenu par intersection complète d'hypersurfaces dans un espace projectif complexe. Nous en déterminons les involutions anti-holomorphes, et en particulier celles qui n'ont pas de points fixes, et qui conduisent donc à un quotient régulier. La transition de conif-

fold ordinaire entre espaces de Calabi-Yau conduit à une transition entre espaces G_2 de topologie différentes, et s'interprète dans la théorie effective incluant les trous noirs massifs à la Strominger, selon les cas comme un changement de branche dans le potentiel des champs scalaires ou comme un mécanisme de Higgs. Comme retombées de ces constructions, nous obtenons également des exemples d'espaces G_2 qui ont la même valeur pour la somme des nombres de Betti $b_2 + b_3$, et qui donc pourrait être des candidats à une paire d'espaces-miroir selon la conjecture de Vafa et Shatashvili.

Finalement, en collaboration avec I. Antoniadis [9], nous avons étudié les implications des dualités de cordes sur les possibilités de séparer l'échelle des cordes de l'échelle de Planck, une question d'intérêt phénoménologique important. Nous avons en particulier montré que les théories des cordes de type II faiblement couplées fournissent un nouveau cadre pour la construction de modèles phénoménologiques où l'échelle des cordes peut être abaissée au TeV (à la portée des prochains accélérateurs) tout en maintenant les interactions gravitationnelles à l'échelle de Planck grâce à un couplage de corde très faible. Ceci fournit une alternative aux théories de cordes ouvertes de type I', dont l'échelle ne peut être abaissée qu'en introduisant de grandes dimensions où seule la gravité se propage, et conduit à des signatures expérimentales très différentes.

4.2 *U-Dualité, théorie M et quantification de la membrane*

Les résultats décrits dans la section précédente étaient principalement obtenus en utilisant les dualités entre théories de supercordes dans des régimes de couplage différents. Dans cette section, nous décrivons des résultats reliés, mais dans le cadre de la théorie M, une extension non-perturbative de la théorie des cordes dont la limite de basse énergie est donnée par la supergravité de Cremmer, Julia et Scherk à 11 dimensions. Il faut signaler que cette extension est encore hypothétique, et que la formulation microscopique de la théorie M reste un problème ouvert. L'outil principal que nous utilisons pour cette étude est la U-dualité, obtenue en combinant la T-dualité et la S-dualité des cordes de type IIB.

En collaboration avec Obers et Rabinovici [6], nous avons étudiée la formulation matricielle de la M-théorie dans la jauge du cône de lumière proposée par Banks, Fischler, Shenker et Sussking. Après compactification toroïdale, cette mécanique quantique matricielle devient une théorie quantique des champs sur le tore dual. La U-dualité des théories de supergravité à supersymétrie maximale doit alors apparaître comme symétrie de ces théories de jauge. Nous montrons comment les états BPS de la M-théorie se regroupent en multiplets de la U-dualité, obtenons leur masse, invariante sous cette symétrie, en présence de valeurs moyennes non triviales des champs de jauge de la M-théorie, ainsi que l'énergie des états de la théorie des champs qui leur correspondent. Nous mettons également en évidence l'existence d'une U-dualité étendue, requise

par l'invariance de Lorentz à onze dimensions (non manifeste dans la jauge du cône de lumière).

À la suite de cette étude, et indépendamment de ces considérations matricielles, Obers et moi-même avons continué à étudier la structure algébrique du groupe de U-dualité, et nous avons en particulier obtenu une réalisation particulièrement simple de son groupe de Weyl, qui mène immédiatement au diagramme de Dynkin de la série de groupes exceptionnels E_n . Ces résultats ont été présentés dans l'article de revue [8], devenu une référence classique sur la U-dualité, qui offre une introduction pédagogique à la M-théorie sous l'angle de son groupe de symétrie.

Utilisant les formules de masse invariantes sous la U-dualité obtenues dans ces travaux, nous avons alors procédé à la construction, dans un article à contenu plus mathématique [10], de fonctions automorphes généralisant les séries d'Eisenstein apparues dans les couplages R^4 décrits plus haut. Nous avons étudié les équations aux dérivées partielles qu'elles satisfaisaient, et obtenu un certain nombre d'identités mathématiques intéressantes (dont l'invariance sous la triplé de la série d'Eisenstein de $SO(4, 4, Z)$, indiquée plus haut). Nous avons montré comment certaines amplitudes à g -boucles en théorie des cordes se ramenaient à ces fonctions automorphes, et généralisé les conjectures de Berkovits et Vafa sur les termes en $R^4 H^{4g-4}$ en dimension inférieure.

Revenant au cas le mieux compris des couplages R^4 à 4 gravitons dans les théories à supersymétrie maximale, je me suis intéressé à reproduire ces résultats exacts à partir d'une formulation microscopique de la M-théorie, et non seulement des contraintes de dualité et supersymétrie. La description en termes de supermembranes fondamentales à 11 dimensions, reliée au modèle de matrices décrit plus haut, semblait être le candidat le plus naturel. En collaboration avec H. Nicolai, J. Plefka et A. Waldron [20], et par analogie avec l'amplitude à une boucle en théorie des cordes, nous proposons que le couplage R^4 dans les compactifications toroïdales de la M-théorie soit donnée une amplitude BPS à une boucle de membranes, c'est-à-dire par la fonction de partition des plongements minimaux de T^3 dans T^n , intégrée sur l'espace $Gl(3, R)/SO(3)$ des métriques constantes sur T^3 , modulo le groupe modulaire $Sl(3, Z)$. Afin d'implémenter la U-dualité, nous proposons de déterminer cette fonction de partition comme *correspondance* entre les formes automorphes sous $Sl(3)$ et sous E_d . La manière la plus simple d'obtenir cette correspondance est de construire une série theta sous un groupe plus grand, $G = E_{d+2}$, qui contient $Sl(3) \times E_d$ comme paire duale.

En collaboration avec D. Kazhdan, du département de mathématiques de Harvard et A. Waldron [21], nous avons procédé à la construction explicite de cette série theta pour tous les groupes simplement lacés, basée sur la construction de la représentation minimale unitaire de D. Kazhdan et G. Savin en 1990. En déterminant le vecteur sphérique de cette

représentation (i.e. le vecteur invariant sous le sous-groupe compact maximal de G), nous avons obtenu l'expression du terme général de la série theta. La mesure de sommation a été déterminée peu après par D. Kazhdan et A. Polishchuk, en utilisant des techniques p -adiques. Ces résultats présentent un intérêt sur le plan mathématique, car ils constituent une généralisation non-gaussienne (“cubique”) explicite de la série theta gaussienne de Jacobi. Ces techniques sont décrites de manière pédagogique dans les notes du cours que j’ai donné aux Houches, publiées dans [57].

Dans l'article [28], nous appliquons ce résultat au problème de la supermembrane en dimension 8, et vérifions que la série theta basée sur le groupe exceptionnel E_6 reproduit en effet l'amplitude à quatre gravitons en R^4 , déterminée précédemment dans [2]. Ce résultat indique qu'il est nécessaire d'introduire des degrés de liberté “topologiques” supplémentaires sur le volume d'univers de la membrane afin de réaliser ces symétries de U-dualité.

Plus bas, nous décrivons d'autres applications de ces représentations minimales et formes automorphes, dans les domaines de la cosmologie [24], des cordes topologiques [38] et des trous noirs [34, 37].

4.3 *Dynamique des branes, théories de jauge et correspondance AdS/CFT*

Dans cette section, nous décrivons une série de travaux quelque peu disparates, qui ont trait à la dynamique des D-branes et des théories de jauge qui les décrivent à basse énergie.

En collaboration avec A. Schwarz, je me suis intéressé aux théories de jauge non-commutatives qui décrivent la dynamique des D-branes en présence d'un champ de Kalb-Ramond B non-trivial, dans une certaine limite de découplage. En particulier, nous avons montré que la T-dualité était équivalente à l'équivalence de Morita trouvée par Rieffel dans son étude des tores non-commutatifs [11].

En collaboration avec S. Elitzur et E. Rabinovici [18], nous avons étudié les conséquences physiques de cette équivalence de Morita, élaborant sur le travail de Hashimoto et Itzhaki qui ont montré que ces descriptions duales étaient valables à des énergies différentes. Par des techniques d'approximations par fractions continues, nous construisons une tour de descriptions duales valide à une énergie arbitrairement élevée. Dans le cas où le paramètre θ originel est rationnel, cette tour comprend un nombre fini d'étages, le dernier étant commutatif et donc valable jusque dans l'ultraviolet. Dans le cas irrationnel, il faut un nombre infini de descriptions duales, dont la succession dépend des propriétés diophantiennes de θ . Ce comportement est en fait générique dans les modèles présentant un groupe de dualité arithmétique. Nous étudions également ce phénomène du point de vue de la description gravitationnelle duale (au sens de la dualité AdS/CFT, voir plus loin), et nous montrons que le comportement radial de la solution obtenue en choisissant

sant la description T-duale la plus adéquate à toute distance présente des caractéristiques multi-fractales liées à l'irrationalité de θ .

En raison de la similarité formelle entre théories de jauge non-commutatives et théories de jauge non-Abéliennes, et au vu du mystère qui entoure la théorie non-Abélienne décrivant des 5-branes coincidentes, il est intéressant d'étudier la dynamique de membranes ouvertes en présence d'un champ magnétique de 3-forme constant. De même que la déformation de Moyal peut s'interpréter comme une "quantification" du groupe des symplectomorphismes, il est naturel de considérer le groupe des difféomorphismes préservant le volume (ou plutôt la 3-forme), et sa description en termes de crochet de Nambu. Basé sur ces idées, j'ai pu construire une déformation non-abélienne de l'invariance de jauge d'une 2-forme à 3+1 dimensions basée sur le crochet de Nambu, analogue à la déformation "symplectique" de l'invariance d'une 1-forme de Maxwell [22]. Je suis revenu à ce problème en collaboration avec Berman [29], où nous avons montré qu'en présence d'un champ magnétique de 3-forme constant, les membranes ouvertes acquièrent une tension non nulle et se comportent comme des rubans de largeur proportionnelle à la densité de moment, ce qui implique une déformation non-locale analogue à la phase de Moyal dans la théorie effective de champ de cordes.

Motivés par l'idée que l'échelle des cordes puisse être accessible aux accélérateurs, nous nous sommes demandé avec C. Bachas [12] s'il existait un régime universel de diffusion à haute énergie pour ces cordes ouvertes. Dans le cas habituel des cordes fermées, la diffusion à haute énergie et angle fixé (soit en termes des variables de Mandelstam, $s \rightarrow \infty, s/t$ fixé) est exponentiellement supprimée, et dominée par des configurations semi-classiques. Nous considérons la déformation du problème de point col introduite par des conditions de Dirichlet correspondant à des D-branes séparées l'une de l'autre, sur lesquelles se déplacent les cordes ouvertes dans l'état initial. Il existe donc en plus de l'angle de diffusion ϕ un paramètre sans dimension $v = r/(\pi\alpha'\sqrt{s})$. Lorsque v est varié de $+\infty$ à 0, l'amplitude interpole entre l'échange de cordes fermées de masse nulle et le comportement doux de Gross-Mende, avec une transition de phase au seuil de production $v = 1$ de cordes ouvertes tendues entre les deux D-branes. Par T-dualité, la collision de deux états de grand moment est équivalente à la transposition de cordes ouvertes très étirées. Nous montrons que cette transition requiert un effet tunnel dominé par une surface minimale, qui reproduit précisément la suppression exponentielle caractéristique du régime de Gross-Mende. Ce calcul préfigure celui de Alday et Maldacena dans le cas des D-branes en espace anti-de Sitter.

Une autre spécificité des D-branes est que leur position est intrinsèquement non-Abélienne, i.e. à valeur matricielle. En présence d'un champ électrique de Ramond, il existe en particulier des configurations stables de D-branes "fuzzy", dont les coordonnées

satisfont l'algèbre de $SU(2)$ $[X^i, X^j] = \epsilon_{ijk} X^k$. C'est le cas par exemple pour une D-corde étendue selon la direction radiale d' $AdS_5 \times S^5$. En collaboration avec C. Bachas et J. Hoppe [17], nous étudions les états supersymétriques d'une D-corde qui interpolent entre deux configurations différentes aux deux extrémités de la corde: ils vérifient une équation qui est une déformation de l'équation de Nahm, système intégrable familier dans la physique des monopoles, $\partial_\sigma X^i = \epsilon_{ijk} [X^j, X^k] + X^i$. Un changement de variable élémentaire montre que cette équation est équivalente à l'équation de Nahm, mais avec des conditions aux limites qui sélectionnent une courbe spectrale complètement dégénérée. L'espace des modules des solutions est un variété hyperkählér en général singulière, considérée dans la littérature mathématique par Kronheimer. Nous utilisons ses résultats pour calculer la dimension de l'espace des modules et sa structure dans certains cas, établissant en particulier une règle de sélection simple quant à l'existence de configuration interpolant entre deux configurations données, en termes des tableaux d'Young représentant la partition $N = \sum N_i$. Notons que le même problème mathématique a resurgi dans le contexte de la description matricielle de la théorie M dans un champ de fond d'onde gravitationnelles planes (décrit plus bas), où ces configurations de sphères "fuzzy" correspond à des "gravitons géants": les configurations qui interpolent entre différentes sphères peuvent être interprétés comme des instantons dans la mécanique quantique matricielle.

Dans sa formulation originale, la conjecture AdS/CFT originale stipule que la fonctionnelle génératrice des fonctions de corrélation d'opérateurs invariants de jauge \mathcal{O}_{Δ_i} dans la théorie de Yang-Mills $SU(N)$ $\mathcal{N} = 4$ est égale à la fonction de partition de la théorie des cordes de type IIB compactifiée sur $AdS_5 \times S^5$ (ou supergravité dans la limite de grand couplage de 't Hooft $\lambda = g_{YM}^2 N \gg 1$). Cette correspondance a pu être vérifiée grâce à l'étude de quantités protégées par des théorème de non renormalisation, dits "corrélateurs extrémaux" ou "presque extrémaux". En collaboration avec E. d'Hoker [16], nous étendons ce résultat au cas de la M-théorie dans $AdS_4 \times S^7$ et $AdS_7 \times S^4$, équivalents sous la correspondance AdS/CFT aux théories de jauge conformes $\mathcal{N} = 8$ à 2+1 dimensions, et $\mathcal{N} = (2, 0)$ à 5+1 dimensions. Dans les deux cas, il n'existe pas de régime de faible couplage pour la théorie de jauge, donc la question de non renormalisation ne se pose pas, mais la factorisation des corrélateurs et l'absence de couplage dans la supergravité jaugée peut se démontrer par de considérations de supergravité. Ces résultats généralisent la propriété de troncation consistante de la supergravité jaugée, qui autorise à ne garder que les premiers modes de Fourier dans la réduction dimensionnelle sur la sphère.

Les progrès dans la compréhension de la correspondance AdS/CFT se sont heurtés principalement aux difficultés à quantifier la corde dans un espace de grande courbure et

en présence de flux de Ramond. La découverte par Berenstein, Maldacena et Nastase qu’il existait une limite dite de Penrose dans laquelle l’espace $AdS \times S$ se réduisait à une onde gravitationnelle plane exactement soluble (en dépit de la présence de champs de Ramond), et l’identification de cette limite du point de vue de la théorie des champs duale ont relancé l’activité dans ce domaine. En collaboration avec E. Kiritsis [23], nous avons construit une description holographique duale de la théorie des cordes dans le champ de fond d’une onde gravitationnelle plane, en généralisant la correspondance entre observables off-shell sur le bord de l’onde et amplitudes on-shell à l’intérieur de l’onde. En étudiant la manière dont les isométries sont réalisées au bord, nous conjecturons l’existence d’une théorie des champs symétrique sous le groupe de Heisenberg, dont on ne connaît malheureusement pas d’exemple à ce stade.

4.4 *Champs de fond dépendant du temps et cosmologiques*

L’étude des champs de fond dépendant du temps en théorie des cordes est motivée par l’affluence grandissante de données observationnelles cosmologiques de plus en plus précises, qui laisse penser que la cosmologie pourrait constituer un terrain de choix pour valider la théorie des cordes. Les techniques perturbatives habituelles de la théorie des cordes le plus souvent inadéquates pour ce type de problème, et il est important de développer de nouvelles approches.

Avant de m’attaquer des problèmes d’intérêt cosmologique, je me suis intéressé avec mon étudiant B. Durin à la propagation de cordes ouvertes dans un champ de fond d’onde électromagnétique plane [25]; il s’agit d’un problème de champ de fond dépendant du temps, mais que l’existence d’une isométrie de genre lumière permet tout de même de traiter par les techniques classiques dans la jauge du cône de lumière. A la suite de Bachas et Hull, qui avaient étudié des ondes planes homogènes, nous avons considéré le cas d’un potentiel quadratique, qui reste soluble exactement. Nous montrons l’existence d’une valeur critique pour le gradient du champ électrique, au-delà de laquelle des cordes de taille macroscopique sont créées. Ce phénomène est une version ultra-relativiste du champ critique de Born-Infeld. Il existe aussi dans ce système une instabilité cinématique concurrente due au fait que le point critique quadratique du potentiel en l’absence de charges électriques doit être un point-selle, que l’on peut réparer par les techniques habituelles utilisées dans le piègeage des ions. Nous considérons également le cas où l’intensité du potentiel électrique $h(x^+)$ varie au cours du “temps” x^+ , ce qui reste une solution exacte des équations du mouvement quelle que soit le profil $h(x^+)$. Bien que le nombre de cordes soit conservé au cours du temps, l’état d’excitation d’une corde ouverte donnée varie au fur et à mesure qu’elle traverse l’onde, et nous calculons la matrice de Bogolioubov reliant l’état final à l’état initial.

Par ailleurs, avec Gutperle [27] j'ai poursuivi l'étude des ondes gravitationnelles planes commencée avec Kiritsis, en m'intéressant à la collision de deux ondes planes. Nous généralisons les métriques de Kahn-Penrose et Bell-Skezeres en dimension supérieure, où le champ électromagnétique est remplacé par une 5-forme auto-duale. Nous analysons la collision perturbativement au voisinage du cône de lumière, et montrons que les singularités de genre lumière des ondes incidentes donnent lieu simultanément à des singularités de genre espace et temps après la collision.

Je me suis ensuite intéressé au problème de la singularité initiale de Big Bang, qui est une prédiction générale des modèles cosmologiques classiques y-compris inflationnaires. On sait par les travaux de Belinsky, Khalatnikov et Lifshitz (BKL), dans les années 1970 que les équations d'Einstein au voisinage d'une singularité de genre espace se réduisent à un degré de liberté par point de la section spatiale, découplé de ses voisins dans la limite $t \rightarrow 0$. La dynamique classique de ce degré de liberté est en générale chaotique, correspondant au mouvement d'une particule virtuelle sur un billard hyperbolique. Avec Waldron [24], nous considérons une version quantique du scénario de BKL, dans laquelle seuls les degrés de liberté du minisuperspace sont quantifiés canoniquement. Nous montrons que le Hamiltonien de Wheeler-DeWitt n'est autre que l'Hamiltonien introduit par de Alfaro, Fubini et Furlan (DFF) en 1976 comme modèle de brisure douce de la symétrie conforme, et admet donc une symétrie cachée sous le groupe conforme $SO(2, 1)$ à 0+1 dimensions, agissant par transformations linéaires rationnelles $t \rightarrow (at + b)/(ct + d)$. La fonction d'onde de l'univers correspond à un état d'énergie nulle de ce Hamiltonien, soit au vecteur sphérique de la représentation de $SO(2, 1)$. L'existence d'une symétrie conforme temporelle au voisinage d'une singularité cosmologique n'est a posteriori pas surprenante, puisque l'approche à la singularité est en loi de puissance $t^{2\alpha} g_{ij} dx^i dx^j$, et donc invariante sous les changements d'échelle dans le temps. Dans une seconde partie, nous montrons que les représentations minimales apparues dans notre construction des séries theta [21] fournissent une nouvelle classe de systèmes quantiques invariants sous la symétrie conforme, et en fait sous un groupe non compact qui la contient. Dans le cas le plus simple du groupe D_4 , on retrouve précisément le Hamiltonien décrivant la gravité en dimension 2+1 au voisinage d'une singularité cosmologique.

L'étude précédente n'ayant inclus que le champ du graviton, il est légitime de demander si les autres états de la théorie des cordes (excitations de Regge, D-branes, etc), peuvent résoudre la singularité initiale de genre espace, comme dans le cas des singularités statiques habituelles. Cette question est particulièrement relevante dans le contexte des scénarios de cosmologie "pre-Big-Bang" ou "ekpyrotique", dans lesquels on postule que la transition entre Big Crunch et Big Bang peut se faire de manière douce.

Dans une série d'articles écrits en collaboration avec Berkooz et al [30, 31, 55], nous

avons étudié un des modèles les plus simples d'une singularité cosmologique en théorie des cordes: l'orbifold de Misner. En mettant à profit l'analogie formelle qui existe entre cet orbifold et le problème de Schwinger de particules chargées en champs électrique, nous avons élucidé le spectre de la théorie des cordes dans ce champs de fond, et en particulier l'existence d'états étendus (dits twistés) enroulés autour de la direction compacte. Nous avons également calculé le taux de production de ces états à l'ordre des arbres. Par analogie avec le problème de Schwinger – ou au regard du fait que ces états contribuent au tenseur énergie-impulsion de manière équivalente à une constante cosmologique positive à deux dimensions – on s'attend à ce que leur production ralentisse l'effondrement gravitationnel (Big Crunch) antérieur à la singularité, et peut-être permette une continuation douce entre cette phase de contraction et la phase d'expansion (Big Bounce).

L'approche de première quantification ne permettant pas de traiter les effets de cette production dynamique de paire, nous avons considéré dans [31] le problème plus simple de la déformation de l'orbifold de Misner par des opérateurs twistés marginaux, et extrait la back-réaction gravitationnelle au niveau classique. Sans avoir obtenu un résultat définitif à ce sujet, nous avons néanmoins pu montrer que les états twistés conduisaient à un facteur de forme analogue à celui des théories de jauge non-commutatives, qui indique que la métrique effective est de type "fuzzy" au voisinage de la singularité. Ces résultats sont décrits dans la revue [55].

Dans un article avec Durin [36], nous avons étudié la quantification des cordes en présence de S-brane, analogue cosmologique des D-branes. Il s'agit d'un défaut localisé dans le temps, sur lequel les cordes ouvertes peuvent s'attacher. Alternativement, on peut le comprendre comme la trajectoire d'une particule ou brane tachyonique. Nous avons montré que ce type de configuration était T-dual à une D-brane avec un champ électrique super-critique, ce qui indique qu'elle est instable à la création de cordes ouvertes. Nous avons calculé le taux de production de ces cordes, et montrait qu'il conduisait à une taille caractéristique de ces défauts, analogue au temps de désintégration des D-branes instables. Nous avons également montré que cette configuration ne respectait pas les contraintes de réalité de la théorie des supercordes, et qu'elle n'en compromettait donc pas la stabilité.

En collaboration avec Troost [32], nous nous sommes intéressés à la production de Schwinger dans l'espace anti-de Sitter à deux dimensions, en présence d'un champ électrique. Ce type de champ de fond est motivé par l'étude de la géométrie de proche-horizon des trous noirs extrémaux (sur lesquels nous revenons dans la section suivante), mais c'est aussi un exemple de champ de fond dépendant du temps. Nous avons mis en évidence l'existence d'un champ électrique critique en-deçà duquel la production de paires n'existe pas (par contraste, dans l'espace de Minkowski la production de paire se produit pour un champ électrique infinitésimal) et calculé le taux de production de ces paires.

4.5 Entropie et micro-états des trous noirs extrémaux

Depuis les travaux de Bekenstein et Hawking, on sait que les trous noirs possèdent des propriétés macroscopiques analogues aux principes thermodynamiques régissant le comportement macroscopique d'un gaz, ce qui suggère l'existence d'un grand nombre de micro-états (tels les molécules du gaz) dont les propriétés statistiques expliqueraient le comportement thermodynamique du trou noir. Comme l'ont montré Vafa et Strominger en 1995, la théorie des cordes identifie les degrés de liberté microscopiques des trous noirs, tout au moins dans le cas particulier des trous noirs dits extrémaux, à des cordes fondamentales se propageant en présence de D-branes et autres défauts. Cette description cordiste reproduit le terme dominant de l'entropie de Bekenstein-Hawking dans la limite de grande charge, mais il est légitime de se demander si les termes correctifs (dus aux corrections gravitationnelles dans l'action effective) sont également reproduits par la description microscopique. Avant de répondre à cette question, il est nécessaire d'identifier correctement l'ensemble statistique implicite dans l'entropie de Bekenstein et Hawking, puisque les corrections à la limite thermodynamique sont en général non universelles. Un tel ensemble a été proposé par Ooguri, Strominger et Vafa (OSV), conduisant à une relation conjecturale très intéressante entre les dégénérescences des trous noirs extrémaux et la théorie des cordes topologique.

En collaboration avec Dabholkar, Denef et Moore [33, 35], nous avons montré que, sous l'hypothèse de cet ensemble et dans le cas des "petits trous noirs" 1/2-BPS, l'accord entre l'entropie macroscopique et le comptage d'états microscopiques persiste en effet *à tous les ordres* dans un développement à grandes charges. Ces "petits trous noirs" ont la particularité d'avoir un horizon d'aire nulle dans l'approximation de supergravité; la contribution dominante à leur entropie géométrique provient alors des termes aux dérivées plus élevées (R^2) dans l'action effective, qui doivent être traités selon la prescription de Wald. L'intérêt de ces petits trous noirs est que leur dégénérescence peut être calculée exactement en utilisant la dualité entre les cordes de type II et hétérotiques, et comparée avec le résultat macroscopique. Nous avons également mis en évidence que certaines contributions non-perturbatives échappaient à cette identification, et précisé certains aspects de la conjecture de Ooguri Strominger et Vafa.

Dans l'article [34], je me suis intéressé au cas des trous noirs extrémaux génériques dans les théories à supersymétrie élevée, $N = 4$ ou $N = 8$. En utilisant la construction des séries theta décrite plus haut, j'ai proposé une modification de la conjecture de Ooguri Strominger et Vafa qui prend en compte les contraintes de U-dualité. En particulier, j'ai proposé que le groupe de U-dualité à 3 dimensions ($SO(8, 24)$ pour le cas $N = 4$) contrôle les dégénérescences des trous noirs extrémaux à 4 dimensions. Cette proposition offre une alternative à la conjecture de Dijkgraaf, Verlinde et Vafa de 1996, qui postulaient

une fonction de partition automorphe sous le groupe de Siegel (ou groupe modulaire des surfaces de Riemann de genre 2) $Sp(2, Z)$, dont l'origine physique était obscure.

Inspiré par la suggestion de Ooguri, Vafa et Verlinde d'interpréter la conjecture OSV comme une dualité holographique entre la mécanique quantique superconforme sur le bord de AdS_2 et la quantification radiale de la gravité dans le "bulk", j'ai initié avec Günaydin, Neitzke et Waldron un programme de recherche visant à effectuer la quantification radiale des trous noirs BPS en supergravité $N \geq 2$ à quatre dimensions, dans une approximation de mini-superspace (i.e. ne conservant que les configurations stationnaires à symétrie sphérique). Les principaux résultats ont été annoncés dans [37], et présentés en détail dans l'article [41]. L'outil principal dans cette étude est l'équivalence entre les équations qui régissent l'évolution radiale de la géométrie et des champs scalaires et vectoriels à 4 dimensions, avec le mouvement géodésique d'une particule fictive sur un espace \mathcal{M}_3 obtenu par réduction dimensionnelle le long de la direction temporelle (et incluant en particulier l'espace des modules \mathcal{M}_4 des champs scalaires à 4 dimensions). En supergravité $N = 2$, \mathcal{M}_3 est une variété quaternionique-Kähler obtenue à partir de la variété Kähler projective spéciale \mathcal{M}_4 par la construction dite de c -map (une variante de l'espace cotangent).

Afin de décrire les géodésiques qui correspondent aux trous noirs supersymétriques, il est utile d'introduire l'espace twistoriel \mathcal{Z} associé à \mathcal{M}_3 : le trou noir est BPS si et seulement si en tout point, le vecteur vitesse, relevé sur \mathcal{Z} , n'a que des composantes holomorphes. La quantification du secteur BPS est alors presque immédiate, en termes de sections holomorphes sur l'espace \mathcal{Z} . Remarquablement, la fonction d'onde BPS est uniquement spécifiée en termes des charges électriques et magnétiques du trou noir, ce qui n'était pas le cas des trous noirs non BPS, et s'obtient par "transformée de Penrose" de cette section holomorphe. Les détails mathématiques qui sous-tendent cette construction ont été exposés dans un papier de nature plus mathématique [39], et seront aussi utiles pour l'étude des corrections quantiques à la métrique des hypermultiplets. Dans le cas des espaces de modules symétriques, cette construction donne une interprétation géométrique transparente à la "représentation quasi-conforme" des groupes exceptionnelles de Günaydin, Koepsell et Nicolai, comme nous l'expliquons dans l'article [42].

Ayant calculé la fonction d'onde du trou noir BPS, il est naturel de la comparer à l'amplitude de la corde topologique. Contrairement à la suggestion de Ooguri, Vafa et Verlinde, les deux sont manifestement différentes, par exemple parce qu'elles dépendent d'un nombre différent de variables. Néanmoins, il apparaît que l'espace de Hilbert des trous noirs BPS (i.e. des fonctions holomorphes sur \mathcal{Z}) admet un sous-espace de Hilbert "super-BPS", correspondant aux fonctions *tri*-holomorphes sur le fibré de Swann (ou cône hyperkählerien); ce dernier est défini comme l'espace total d'un fibré en lignes sur \mathcal{Z} , et se trouve être une variété hyperkähler avec un vecteur de Killing conforme lorsque

la variété de base \mathcal{M}_3 est quaternionique-Kähler. La notion de fonction triholomorphe est en générale mal définie, mais elle peut être rendue précise dans le cas où \mathcal{M}_3 est un espace symétrique G/K . L'espace de Hilbert "super-BPS" n'est alors autre que la représentation minimale de G construite dans [21] (de dimension fonctionnelle égale à celle de l'espace de Hilbert des cordes topologiques *plus un*). Dans l'article [38], nous montrons que les équations d'anomalie holomorphe qui régissent l'amplitude topologique des cordes découlent précisément de certaines identités opératoriels (connues sous le nom d' "idéal de Joseph") satisfaites par la représentation minimale. Cette observation est une indication forte que l'amplitude topologique peut être vue comme un coefficient de Fourier-Jacobi d'une forme automorphe attachée à la représentation minimale (par analogie avec le fait que les formes modulaires de Jacobi peuvent être vues comme des coefficients de Fourier des formes modulaires de Siegel). L'article [38] considère également le cas où l'espace de modules n'est pas symétrique, et fournit une nouvelle présentation purement holomorphe de l'amplitude topologique, où la paire d'équations d'anomalies holomorphe et anti-holomorphe se réduit à une seule équation holomorphe de type équation de la chaleur, clarifiant une proposition originale de Witten.

L'ensemble des développements de cette section jusqu'à ce point fait l'objet de notes de cours [59] que j'ai donnés sur invitation à trois écoles avancées durant l'hiver 2005-2006.

Le traitement des trous noirs stationnaires à symétrie sphérique décrit plus haut était restreint au cadre de l'action effective de supergravité à deux dérivées. En collaboration avec mon étudiant Y. Michel [40], nous avons étudié l'effet des corrections en R^2 sur la réduction dimensionnelle. Cette réduction est sujette à des ambiguïtés de redéfinition des champs, mais il existe un choix préféré qui maintient le caractère Hamiltonien de l'évolution radiale (i.e. tel que seules des puissances des dérivées premières des champs apparaissent). Nous avons calculé les corrections aux dérivées supérieures au mouvement géodésique introduites par les termes en R^2 dans le cas de la gravité pure et de la gravité couplée à un champ de Maxwell ou à un champ scalaire, et montré que la symétrie d'Ehlers $Sl(2, R)$ présente à l'ordre des arbres était en général brisée. Il est toutefois possible d'en restorer un sous-groupe discret $Sl(2, Z)$, en prenant en compte les contributions des instantons gravitationnels de type Taub-NUT. Il serait intéressant d'étudier l'influence de ces contributions sur les solutions classiques de trous noirs, ainsi que sur leur quantification.

5 Résumé des travaux antérieurs et de leur impact scientifique et technologique

Mes travaux de recherches ont principalement porté sur les théories de supercordes et de la théorie M. J'ai analysé les conséquences des symétries de dualité, et calculé certaines amplitudes exactement, en les reliant à certaines fonctions automorphes du groupe de U-dualité. J'ai étudié la propagation des cordes au voisinage d'une singularité cosmologique d'orbifold, et calculé la production d'états twistés. Plus récemment, j'ai vérifié l'accord entre l'entropie de Bekenstein-Hawking-Wald de certains trous noirs et le comptage microscopique, à tous les ordres dans la limite de grande charge. J'ai effectué la quantification radiale rigoureuse des trous noirs BPS à symétrie sphérique, et suggéré l'existence d'une extension à un paramètre de la théorie des cordes topologiques (indice de citation SPIRES > 1500). Ces travaux ont donné lieu à plus de 45 publications largement citées (SPIRES: > 1500 citations) dans des journaux à haut facteur d'impact (JHEP: 5.94 in 2005).

6 Programme de recherches

Trous noirs, cordes topologiques, holographie et formes automorphes

La théorie des cordes rend compte de manière quantitative de l'origine microscopique de l'entropie de Bekenstein-Hawking des trous noirs supersymétriques. Pour autant, on est loin de comprendre le détail des dégénérescences microscopiques de ces objets, même si de nombreux progrès ont été accomplis récemment. Je poursuivrai mes recherches sur cette question, en particulier sous l'angle de (i) la relation avec les cordes topologiques, et leur généralisation éventuelle (ii) la description holographique des micro-états des trous noirs asymptotiquement AdS, (iii) les propriétés modulaires des fonctions de partition de trous noirs et (iv) la relation entre trous noirs et corrections instantoniques, particulièrement à l'espace des modules des hypermultiplets. Ces différents points de vue sont développés ci-dessous, ainsi que certains résultats préliminaires.

6.1 Trous noirs et amplitude topologique

Suite aux récents travaux de Gaiotto, Strominger et collaborateurs d'une part, Denef et Moore d'autre part, la conjecture de Ooguri, Strominger et Vafa reliant la fonction de partition des trous noirs BPS dans les théories $N = 2$ et le module carré de l'amplitude topologique est maintenant en passe d'être prouvée. Ce résultat fournit une démonstration éclatante de l'accord entre entropie macroscopique (incorporant une classe infinie de corrections aux dérivées supérieures dites F-termes) et comptage microscopique.

De nombreuses hypothèses techniques restent cependant nécessaires (sur l'équivalence entre solutions multi-centrées et les "flots d'attractors bifurqués", les estimations des invariants de Gromov-Witten, ou l'existence de "swing states") et certains aspects restent mystérieux, comme l'existence de solutions multi-centrées qui dominent l'entropie ("entropy enigma"), ou l'annulation des contributions des autres corrections aux dérivées supérieures (D-termes). Ces dérivations sont par ailleurs limitées au cas où la charge totale de D6-brane est égale à zéro. Tout progrès sur ces questions serait fort utile.

Afin de clarifier ces problèmes, il serait en particulier intéressant d'adapter ces dérivations aux cas des trous noirs dyoniques des théories $N = 4$, pour lesquelles les dégénérescences sont en principe connues exactement. Du point de vue macroscopique, la série des F-termes $N = 2$ ne contient que F_1 (soit le terme en R^2), mais la supersymétrie $N = 4$ autorise aussi une série infinie de F-termes du type $R^4 F^{4g-4}$ calculables grâce à la corde topologique $N = 4$. Par ailleurs, il est important d'analyser les solutions trous noirs multi-centrées dans les théories $N = 4$, qui sont en principe plus générales que dans les théories $N = 2$. Dans cette optique, mes étudiants et moi-même développons

des techniques twistorielles pour les théories $N = 4$ [46], généralisant mes résultats en supersymétrie $N = 2$ [39].

Une autre question concerne la relation entre cordes topologiques et entropie des trous noirs en dimension 5: Gopakumar et Vafa ont montré en 1998 que l'amplitude topologique pouvait être interprétée comme la fonction de partition d'un gaz de M2-branes enroulées sur les 2-cycles de la variété de Calabi-Yau, et ont conjecturé qu'elle était égale à la fonction de partition des trous noirs BPS (chargés électriquement et en rotation) en dimension 5. Cette conjecture est en partie prouvée par la relation entre amplitude topologique et invariants de Donaldson-Thomas d'une part, et relation entre trous noirs de dimension 4 et 5 d'autre part, mais continue de poser certains problèmes techniques probablement dues au traitement des modes zéros. Il serait aussi intéressant d'élucider cette relation dans le cas des théories $N = 4$, en principe mieux contrôlées, et de comprendre si l'amplitude topologique généralisée apporte de nouvelles informations sur les trous noirs en dimension 5. En collaboration avec P. Gao, j'ai d'ores et déjà pu établir que la relation de Gopakumar-Vafa entre invariants de Donaldson-Thomas et entropie des trous noirs en dimension 5 pouvait être vue comme une nouvelle polarisation de l'amplitude topologique, adaptée au "relèvement 4D/5D" [44].

6.2 Trous noirs, anneaux noirs et correspondance *AdS/CFT*

Il a été compris récemment que les théorèmes d'unicité habituels en dimension 4, qui déterminent la géométrie stationnaire d'un corps massif en termes de sa masse et autres charges conservées, cessent d'être valable en dimension supérieure. En particulier, en dimension 5, il existe en plus des trous noirs de Schwarzschild ou Reissner-Nordström ordinaires des "anneaux noirs", avec un horizon de topologie $S^2 \times S^1$ plutôt que S^3 . A cet horizon est associée une entropie de Bekenstein-Hawking, dont l'origine microscopique reste mal comprise. La géométrie au voisinage de l'anneau interpolant entre un trou noir à grande distance et une corde noire à courte distance, on s'attend à ce que la description microscopique fasse intervenir un flot de renormalisation dans la théorie duale.

Il est également intéressant d'étudier le cas des trous noirs supersymétriques asymptotiquement *AdS*, ou plus généralement des solutions des théories de supergravité jaugées. Dans ce cas, la description microscopique est fournie par la théorie de jauge sur le bord, par exemple la théorie de Yang-Mills $N = 4$ pour $AdS^5 \times S^5$. Dans ce cas, les trous noirs 1/2, 1/4 et 1/8 BPS sont bien compris du point de vue de la théorie de jauge, mais sont singulier du point de vue de la supergravité; il serait intéressant de comprendre comment cette singularité est résolue par les corrections aux dérivées supérieures. Les trous noirs 1/16-BPS sont quant à eux des solutions gravitationnelles régulières, mais leur description microscopique reste mystérieuse, car les interactions de jauge ne peuvent plus être

négligées. De plus, les solutions de supergravité ne semblent exister que lorsque une certaine condition reliant les charges et le moment angulaire est vérifiée, qui ne semble pas naturelle du côté de la théorie de jauge.

En collaboration avec M. Berkooz, je me suis intéressé à la description des solutions de trous noirs de la supergravité jaugée $N = 2$ à cinq dimensions, stationnaires et à symétrie sphérique, en termes de mouvement sur l'espace des modules \mathcal{M}_3 en présence d'un potentiel. Ceci donne un traitement uniforme des solutions trous noirs en rotation de Breckenridge Myers Peet Vafa ($\Lambda = 0$), Gutowski Reall ($\Lambda < 0$) et beaucoup d'autres solutions. Ces résultats seront publiés prochainement [43]. Nous espérons que ce formalisme permettra de produire de nouvelles solutions, par exemple des trous noirs extrémaux non-BPS ou des trous noirs BPS multi-centrés.

6.3 Entropie des trous noirs et formes automorphes

Les développements récents montrent des connections fascinantes entre l'entropie des trous noirs avec la théorie des formes automorphes en mathématiques, qui déterminent dans certains cas supersymétriques la fonction de partition des micro-états des trous noirs. Par exemple, la conjecture de Dijkgraaf, Verlinde, Verlinde (1995) exprime les dégénérescences exactes des trous noirs 1/4-BPS dans la supergravité $N = 4$ à 4 dimensions comme des coefficients de Fourier d'une forme de Siegel, automorphe sous le groupe modulaire de genre 2 $Sp(2, Z)$. Cette conjecture est maintenant fermement établie, en tout cas pour certaines orbites du groupe de U-dualité. Il serait très intéressant de l'étendre aux autres orbites du groupe de U-dualité, ce qui vraisemblablement nécessitera l'utilisation de formes de Siegel pour des sous-groupes de congruence de $Sp(2, Z)$. La généralisation au cas $N = 8$ serait aussi fort intéressante.

En dépit de sa motivation par les constructions de "string networks", l'existence d'une symétrie modulaire de genre 2 pour la fonction de partition des dyons reste peu naturelle. Comme je l'ai montré dans mes travaux [34, 37], La quantification radiale des trous noirs BPS suggère plutôt le rôle du groupe de U-dualité G à trois dimensions comme symétrie génératrice du spectre des trous noirs. Il serait très intéressant de concrétiser cette idée, en construisant ces formes automorphes correspondantes explicitement et en les comparant à la fonction de partition de Siegel. Pour ce faire, trois techniques sont en principe disponibles: i) utiliser une correspondance theta avec un autre groupe H tel que $G \times H$ forme une paire duale à l'intérieur d'un groupe plus grand G' , ii) extraire les résidus de séries d'Eisenstein ou iii) utiliser les techniques adéliques générales décrites dans [57]. Une relation générale entre formes automorphes de $Sp(2, Z)$ et formes automorphes quaternioniques ou minimales serait très intéressante du point de vue mathématique. Une difficulté à surmonter dans cette voie est la croissance sur-exponentielle e^{Q^2} du nombre de

micro-états à charge Q fixée, qui implique que la fonction de partition canonique a peu de chances d'être méromorphe.

6.4 Amplitudes topologiques et couplages des hypermultiplets

Dans le contexte de la supergravité $N = 2$ et des théories de cordes correspondantes, la confrontation de la quantification radiale des trous noirs BPS que j'ai implémentée rigoureusement, avec la conjecture de Ooguri, Strominger, Vafa suggère l'existence d'une extension à un paramètre de l'amplitude topologique ordinaire. Tandis que cette dernière décrit les couplages aux dérivées superérieures $F_g(X)R^2T^{2g-2}$ sur la branche des multiplets vectoriels à tout genre g , la symétrie miroir suggère que l'amplitude topologique généralisée décrit les couplages $\tilde{F}_g(X, S)(\partial^2 S)^2(\partial Z)^{2g-2}$ sur la branche des hypermultiplets. De plus, la fonction génératrice $\tilde{F}(X, S, \Lambda) = \sum \tilde{F}_g(X)\Lambda^g$ est naturellement interprétée comme une fonction tri-holomorphe sur la variété quaternionique-Kähler qui décrit les hypermultiplets (ou plus précisément sur son cône hyperkählerien).

Contrairement aux F_g , déterminés entièrement à l'ordre g de la série des perturbations, les couplages \tilde{F}_g reçoivent des corrections instantoniques qui dépendent du couplage S , à l'origine du paramètre supplémentaire. La description de ces corrections instantoniques sur la branche des hypermultiplets est un des problèmes ouverts les plus intrigants en théorie des cordes. Il serait très intéressant de voir si cette amplitude topologique généralisée pourrait être calculée à tous les ordres en généralisant le calcul à une boucle de Gopakumar et Vafa, et d'interpréter les invariants géométriques obtenus. Il serait aussi intéressant d'étudier dans quelle mesure les corrections instantoniques à couplages en 3 dimensions reproduisent le spectre des trous noirs à 4 dimensions, et éventuellement d'obtenir une généralisation non-perturbative de la conjecture de Ooguri Strominger Vafa.

En préliminaire à ces questions, j'ai étudié récemment avec S. Alexandrov, F. Saueressig et S. Vandoren les déformations infinitésimales des variétés quaternioniques-Kähler de dimension $4n$ avec n isométries tri-holomorphes, qui contiennent comme cas particulier les espaces de modules des hypermultiplets à l'ordre des arbres et une boucle. Nous avons montré que ces déformations pouvaient être obtenues par transformation de Penrose à partir d'une section de $H^1(Z, O(2))$. En particulier, les corrections instantoniques sont contrôlées par les fonctions d'ondes des trous noirs BPS ! Ces résultats prometteurs seront publiés prochainement [45].

7 Expérience d'enseignement et de formation

7.1 Enseignement

- Travaux dirigés de Mathématiques à l'Ecole Polytechnique, sous la direction de F. Laudenbach et R. Sénéor, janvier 1998 - septembre 1999.
- Travaux dirigés de Théorie Quantique des Champs au DEA de Physique Théorique de Paris (cours de C. Bachas), septembre 2001 à janvier 2005.
- Cours d'option "Théorie des Cordes" au DEA de Physique Théorique de Paris (en binôme avec E. Kiritsis), depuis mars 2006.

7.2 Encadrement de stages

- Encadrement du stage de majeure de Physique de l'Ecole Polytechnique de E. Boulat et T. Popov en codirection avec P. Vanhove, mars-juin 1998.
- Encadrement du stage de DEA de Physique Théorique de B. Durin "Holographie dans l'espace de Sitter", mars-juin 2002.
- Encadrement du stage de Maîtrise de Physique de R. Gicquaud "Singularités cosmologiques et billards hyperboliques", mars-juin 2004.
- Encadrement du stage de DEA de Physique Théorique de Jérôme Courtin "Propagation des cordes au voisinage d'une singularité cosmologique", avril-juillet 2005.
- Encadrement du stage de DEA de Physique Théorique de C. Rousset "Entropie des trous noirs au-delà de la limite thermodynamique", avril-juillet 2006.
- Tuteur de E. Couderc, dans le cadre de l'enseignement M1 de Physique de l'ENS, 2006-2008.

7.3 Direction de thèse

- Direction de la thèse de B. Durin "Aspects de la propagation des supercordes en espace-temps cosmologique", soutenue le 30 janvier 2006.
- Direction de la thèse de C. Rousset, "Entropie des trous noirs au-delà de la limite thermodynamique", depuis le 1er sept 2006.
- Direction de la thèse de Y. Michel, "Trous noirs et instantons", depuis le 1er sept 2006 (en remplacement de P. Vanhove).

8 Expérience administrative

- Membre du conseil d'administration de l'Institut Henri Poincaré, depuis octobre 2006
- Membre du comité d'animation du GIS "Physique des deux infinis", depuis octobre 2007

8.1 Organisation de conférences, workshops, congrès

- Coorganisation du workshop TMR 1999 "Quantum aspects of gauge theories, supersymmetry and unification", Paris, 1-7 septembre 1999, et édition des proceedings;
- Coorganisation de l'Ecole de Physique Théorique de Cargèse, "Progress in String, Field and Particle Theory", du 25 juin au 11 juillet 2002, et édition des Proceedings.
- Coorganisation du colloque "Cosmology Crash Course" à l'institut Henri Poincaré, Paris, 17-20 décembre 2002.
- Coordinateur de la session "Non perturbative field theory" à la session HEP 2003 de l'European Physical Society, Aachen, juillet 17-21, 2003.
- Coorganisateur de la conférence "Strings 2004" au Collège de France, Paris, du 28 juin au 2 juillet 2004.
- Coorganisation de l'Ecole de Physique Théorique de Cargèse, "String theory: from gauge interactions to cosmology", du 9 juin au 17 juin 2004, et édition des Proceedings.
- Coorganisation du workshop "Fundamental Strings and Cosmic Strings", institut Henri Poincaré, Paris, du 22 au 27 septembre 2005.
- Coorganisation du workshop "Black holes, black rings and modular forms", dans le cadre du XXXVII ème institut d'été de Paris, du 13 au 24 août 2007.
- Coorganisation du workshop "Formes automorphes: Physique et Mathématiques", Univ. de Lille I, du 11 au 12 décembre 2007.

8.2 Organisation de groupes de recherches et séminaires

- Coordination des Rencontres Théoriciennes “Supercordes, supergravité et théorie M” à l’institut Henri Poincaré depuis le 26 sept. 2001 (projet Jeune Chercheur ML/2001/1829);
- Coordinateur principal du PICS “Holographie, cosmologie et trous noirs” avec Israël, rassemblant la Hebrew University (Jerusalem), l’institut Weizmann (Rehovot), l’université de Tel Aviv et l’université Ben Gourion (PICS n° 35762, depuis le 10 mai 2007.

8.3 Autres contributions à la vie scientifique

- Création et maintenance du site internet “String theory in greater Paris”, <http://string.lpthe.jussieu.fr/>;
- Création et maintenance du site internet “SEMPARIS – le serveur des séminaires parisiens”, <http://semparis.lpthe.jussieu.fr/>;

Rapport préparé le 6 janvier 2008.