

History of RSB Interview: Éric Vincent

January 13, 2023, 9:00 to 10:30am (EST). Final revision: May 10, 2023

Interviewers:

Patrick Charbonneau, Duke University, patrick.charbonneau@duke.edu

Francesco Zamponi, ENS Paris

Location:

Over Zoom, from Dr. Vincent's home in Paris, France.

How to cite:

P. Charbonneau, *History of RSB Interview: Éric Vincent*, transcript of an oral history conducted 2023 by Patrick Charbonneau and Francesco Zamponi, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2023, 26 p.

<https://doi.org/10.34847/nkl.04a4bo4n>

PC: Bonjour, docteur Vincent. Comme nous discutons il y a un instant, cette entrevue porte sur l'histoire de la brisure de la symétrie des répliques en physique, une période que l'on borne plus ou moins de 1975 à 1995. Mais avant de nous plonger dans le vif du sujet, nous aimerions vous poser quelques questions sur vos antécédents personnels. Tout d'abord, comment vous êtes-vous intéressé à la science et ensuite qu'est-ce qui vous a amené à poursuivre des études supérieures en physique nucléaire expérimentale ?

EV: [0:00:42] Je dois dire que j'ai toujours aimé déchiffrer ce qui se passe autour de moi, essayer de comprendre les phénomènes. Quand j'étais enfant, par exemple, pour mes cadeaux de Noël, j'ai eu un train électrique, bien sûr, mais assez vite j'ai eu un coffret du petit chimiste et puis ensuite du petit électronicien. Pour la chimie, par exemple, mon père m'avait laissé m'installer dans un petit coin de la salle de bain, par-dessus la baignoire. Je faisais des petits mélanges, des réactions colorées, je laissais parfois tomber des produits chimiques dans la baignoire... Ça m'amusait, j'avais déjà un intérêt pour ce genre de choses. Et puis, j'étais nourri aussi par l'imagerie du moment... J'étais admiratif de l'image du savant dans la bande-dessinée, par exemple Blake et Mortimer¹, les bandes-dessinées de Edgar P. Jacobs, où on voyait des savants avec des blouses blanches, qui travaillaient sur d'énormes machines dans des sous-sols extraordinaires. Ça me paraissait très enviable. Je me disais : « Ils font des choses très intéressantes. » Donc, enfant, j'avais déjà assez envie de tout ça. Ensuite, dans mes études, j'ai été intéressé par beaucoup de choses. La littérature me plaisait beaucoup. J'aurais peut-être volontiers fait un choix littéraire, mais mes parents m'ont dit : « Non, fais des mathématiques. Comme ça,

¹ Blake and Mortimer: https://en.wikipedia.org/wiki/Blake_and_Mortimer

après, tu pourras choisir de faire tout ce que tu veux. » J'ai fait des maths de bon cœur. Au lycée, j'ai eu de la chance. J'ai eu des profs qui étaient très bons, excellents pédagogues. Je me souviens d'un prof qui nous a expliqué la théorie des ensembles quand j'avais 12-13 ans. Enfin, voilà ! Les maths me plaisaient beaucoup.

J'ai passé le bac². Je pouvais rentrer dans les classes préparatoires aux Grandes Écoles³. Je ne savais pas très bien ce que c'était, mais je comprenais que c'était la manière de poursuivre des études assez intensives avec des bons profs, dans des classes d'effectif limité. Faire ce qu'on appelait les classes préparatoires, maths sup⁴ et maths spé⁵, c'était être dans une classe de 25-30 élèves. Par rapport à aller dans un grand amphithéâtre d'université, ça me plaisait bien. Donc, je suis allé en maths sup puis en maths spé. J'ai passé les concours. Sans trop me poser de questions, je suis allé dans l'école la plus renommée que j'ai pu réussir à atteindre — ce n'était pas la numéro un, ni la numéro deux, mais peut-être la troisième ou la quatrième—l'École Centrale⁶, dans laquelle j'ai passé trois années intéressantes et très agréables.

Je ne savais toujours pas très bien ce que je voulais faire. Là, j'ai commencé à me poser la question. J'étais en contact avec le monde industriel, puisque c'était une école d'ingénieurs tout en étant une école avec un bon niveau scientifique. Je me suis rendu compte que, ce qui m'intéressait, c'était de rentrer dans le monde universitaire que je commençais à découvrir un petit peu à travers les laboratoires de recherche. J'ai fait des stages, des travaux pratiques. C'était ça qui me plaisait. À un moment, il y a des chercheurs du CEA⁷ qui sont venus nous proposer des thèses. Ils sont venus à l'école nous faire des exposés sur leurs sujets de recherche en demandant : « Est-ce que vous voulez venir faire une thèse avec nous ? » Ça m'a décidé. Il y avait plusieurs propositions en physique nucléaire. C'était de la physique nucléaire expérimentale, avec un accélérateur d'électrons installé à Saclay, dans le centre de recherche du CEA, qui est le Commissariat à l'énergie atomique *et aux énergies alternatives*, maintenant. Donc, j'ai choisi une de ces thèses, présentée par Gabriel Tamas, sans avoir beaucoup comparé avec d'autres domaines de recherche. Ce qu'on m'en avait expliqué m'avait intéressé, aiguisé ma curiosité. Le chercheur, responsable de l'équipe, était sympathique et

² Baccalauréat : <https://en.wikipedia.org/wiki/Baccalaur%C3%A9at>

³ Grandes écoles : https://en.wikipedia.org/wiki/Grande_%C3%A9cole

⁴ Mathématiques supérieures: https://fr.wikipedia.org/wiki/Math%C3%A9matiques_sup%C3%A9rieures

⁵ Mathématiques spéciales: https://fr.wikipedia.org/wiki/Math%C3%A9matiques_sp%C3%A9ciales

⁶ École Centrale Paris : https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%89cole_Centrale_Paris

⁷ Commissariat à l'énergie atomique:

https://en.wikipedia.org/wiki/French_Alternative_Energies_and_Atomic_Energy_Commission

donnait envie de travailler avec lui. Je leur ai rendu visite, ça avait l'air très stimulant. C'est comme ça que je me suis retrouvé à démarrer une thèse en physique nucléaire aux énergies intermédiaires⁸, sous la direction de Christophe Tzara, qui était un des pères fondateurs du laboratoire de l'accélérateur linéaire d'électrons à l'Orme des Merisiers (CEA Saclay).

PC: Durant votre thèse même, vous avez rejoint le CEA comme permanent. Et pour un bon nombre d'années après la thèse vous avez continué à travailler en physique nucléaire. Quelles questions poursuiviez-vous alors? Quels étaient vos intérêts?

EV: [0:05:48] La thèse, c'était un contrat temporaire, mais qui durait cinq ans à l'époque, puisqu'on faisait une thèse d'État. On se sentait vraiment intégré dans le laboratoire pour une bonne durée. Et puis, j'ai eu la chance effectivement de pouvoir être recruté juste après ma thèse, ce qui serait exceptionnel actuellement. Ça n'arrive pratiquement plus.

Les questionnements? Il s'agissait d'essayer de comprendre les mécanismes de production des mésons pi à partir des noyaux les plus simples possibles. J'ai étudié l'hydrogène, le deutérium, l'hélium-3, l'hélium-4 essentiellement. On essayait de déterminer quel rôle jouait chacun des quelques éléments du noyau : un ou deux protons et neutrons. Pour ma thèse, j'étudiais la production de pi-zéro⁹. On faisait ça en envoyant des photons de haute énergie. Ces photons étaient produits avec l'accélérateur d'électrons de l'Orme des Merisiers. Les électrons frappaient une cible dont il sortait quantité de trucs, y compris des photons, d'énergie distribuée jusqu'à l'énergie des électrons incidents (spectre de freinage). On envoyait ces photons sur la cible. En comparant ce qui se passait sur un noyau qui avait un neutron ou un proton de plus ou de moins, on essayait de comprendre le mécanisme de production du pi-zéro, juste à la limite du seuil de la réaction, aux alentours de 135 MeV. C'était ce qu'on appelait des énergies intermédiaires à l'époque.

⁸ Éric Vincent, *Préliminaire à l'étude expérimentale de la photoproduction de mésons pi-zéro sur les noyaux légers au voisinage du seuil*, thèse de 3e cycle, Université Paris-Sud (1977).

http://upsaclay.focus.universite-paris-saclay.fr/permalink/f/1gllaij/33PUP_Alma_UNIMARC21249600100006051 (Accessed March 26, 2023).

Éric Vincent, *Mesure de la photoproduction de π^0 sur les noyaux légers au voisinage du seuil*, thèse d'état, Université Paris-Sud (1980). http://upsaclay.focus.universite-paris-saclay.fr/permalink/f/1gllaij/33PUP_Alma_UNIMARC21135868250006051

⁹ See, e.g., P. Argan, G. Audit, A. Bloch, P. Bosted, N. De Botton, J.-L. Faure, C. Schuhl, G. Tamas, C. Tzara, E. Vincent and J. Deutsch, "Measurement of π^0 Photoproduction in Deuterium near Threshold," *Phys. Rev. Lett.* **41**, 629 (1978). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.41.629> ; P. Argan, G. Audit, A. Bloch, N. De Botton, J.-L. Faure, C. Schuhl, G. Tamas, C. Tzara, E. Vincent, J. Deutsch, D. Favart, R. Prieels and B. van Oystaeyen, " π^0 photoproduction near threshold on hydrogen, deuterium, ^3He , and ^4He ", *Phys. Rev. C* **21**, 1416-1425 (1980). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.21.1416>

Ce questionnement me paraissait très ardu. C'est à dire, les théories qu'il y avait derrière pour comprendre ce qu'on observait étaient difficiles d'accès. En fait, il y avait une séparation assez nette entre le monde des théoriciens et le monde des expérimentateurs. Il y avait des théoriciens avec nous. Ils prenaient nos mesures de sections efficaces, et rentraient ça dans des gros programmes. Ils comparaient avec leurs prédictions. C'était intéressant, mais au bout de quelques années, j'étais un petit peu frustré par le fait que la physique profonde du problème échappait un peu à mon activité de tous les jours. Cela dit, le travail au quotidien était tout à fait intéressant : s'occuper de faisceaux de particules et de détecteurs, de problèmes d'identification des produits de la réaction, etc. J'ai fait des simulations Monte Carlo à l'époque, pour calculer l'efficacité d'un détecteur en modélisant toute sa géométrie et en tirant au hasard des réactions suivant des distributions de probabilités. Chercher à comprendre ce qui se passait dans les coïncidences entre les différents détecteurs, c'était passionnant, mais la physique qui était derrière était très compliquée, et peut-être un peu lointaine par rapport au quotidien. Je trouvais que ça n'apportait pas beaucoup à ma compréhension du monde. Et puis toutes ces grosses théories du noyau étaient vraiment assez lourdes.

PC: Dans ce contexte, quand avez-vous entendu parler des verres de spin la première fois? Qu'est-ce qui vous a intéressé dans ce sujet ?

EV: [0:09:35] Je suis allé chercher ailleurs d'autres sujets d'intérêt scientifique. J'ai démarré ma thèse en '75, je l'ai passée en '80, cinq ans après. En '80, j'ai été recruté au CEA et j'ai continué à travailler environ cinq ans en physique nucléaire dans ce même laboratoire, le Service de Physique Nucléaire à Haute Energie (DPhH/HE). On a réalisé un projet, dans cette dernière période, qui était assez remarquable. On fabriquait un faisceau de positrons en envoyant le faisceau d'électrons dans une cible et en sélectionnant les positrons parmi les nombreuses particules produites¹⁰. Les positrons, par annihilation avec les électrons d'une autre cible, donnaient une paire de photons, émis dos à dos à 180° dans le centre de masse. Dans le laboratoire, il y en avait un qui était émis un peu de côté, de plus faible énergie, qu'on pouvait détecter et qui servait d'étiquette à celui de plus forte énergie qui partait devant. Grâce à ce système d'étiquetage de photons, on avait un faisceau de photons d'énergies

¹⁰ See, e.g., P. E. Argan, G. Audit, J. Bechade, A. Bloch, N. de Botton, G. Colin, J.-L. Faure, D. Foucaud, M. L. Ghedira, C. Guerra, J. E. Martin, E. Mazzucato, C. Schuhl, G. Tamas, and E. Vincent, "A 130 to 530 MeV tagged photon beam obtained by in-flight positron annihilation," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **228**, 20–32 (1984). [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(84\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(84)90005-6)

connues, ce qu'on appelait des photons quasi-monochromatiques. Ils n'étaient pas tout à fait monochromatiques, mais ils étaient étiquetés par leurs cousins. Ça a ouvert pas mal de nouvelles possibilités d'expérience, c'était très excitant, mais j'avais commencé à regarder un peu ailleurs.

Vers 1984, j'ai assisté à un séminaire qui a été une sorte de déclencheur pour moi. C'était un séminaire donné par Pierre Bergé¹¹, qui était physicien au CEA dans un autre laboratoire, et qui travaillait sur les questions de chaos, de transition vers le chaos¹². Pendant ses séminaires il montrait des petits systèmes chaotiques très simples, des pendules couplés, des mélanges de fluides, des choses comme ça. Il expliquait qu'avec quelques équations très simples, on pouvait obtenir des solutions chaotiques, avec une forte sensibilité aux conditions initiales. Il a aussi parlé un peu de la physique du désordre. Ça m'a passionné tout de suite. Je me suis dit que j'aimerais beaucoup travailler sur ce genre de chose. » Je me suis dit : « Après tout, j'ai un poste permanent au CEA. Le CEA, c'est grand. Je peux essayer d'aller dans un autre laboratoire. »

De fait, ça a été possible de bouger relativement facilement. J'ai reçu un accueil très encourageant du chef du « Département de Physique Générale » du CEA à l'époque, Daniel Cribier, avec qui j'ai eu une longue discussion qui m'a ouvert beaucoup d'horizons. Je suis allé voir des gens de l'entourage de Pierre Bergé, puis d'autres. J'ai rencontré quelqu'un dont vous avez fait aussi l'interview, qui s'appelle Jacques Michel Hamman¹³, et m'a parlé des verres de spin. Il cherchait à renforcer son groupe à ce moment-là, un volontaire était bienvenu. Il m'a donné de nombreuses explications —je n'avais presque jamais entendu parler de ça— devant un tableau, avec tous les rappels nécessaires. Il m'a dit : « Voilà ! Le ferromagnétique c'est comme ça, l'antiferromagnétisme c'est comme ça. Si on prend des interactions désordonnées, il se passe aussi quelque chose qu'on peut étudier. On peut définir un paramètre d'ordre, il y a des phénomènes qui sont reproductible et qu'on peut mesurer. » Cette idée qu'on puisse étudier le désordre m'a beaucoup plu. Pour moi, la démarche de la physique statistique, c'est déjà quelque chose d'intellectuellement très intéressant. Partir des propriétés élémentaires des atomes et faire des moyennes jusqu'à arriver au comportement macroscopique, c'est remarquable, je trouve que c'est très satisfaisant pour l'esprit de réussir à faire ça. Alors, réussir à le faire dans des systèmes

¹¹ Pierre Bergé : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_Berg%C3%A9_\(physicien\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_Berg%C3%A9_(physicien))

¹² See, e.g., P. Bergé, Y. Pomeau and C. Vidal, *L'ordre dans le chaos : vers une approche déterministe de la turbulence* (Paris : Hermann, 1984).

¹³ See, e.g., P. Charbonneau, *History of RSB Interview: Jacques M. Hamman*, transcript of an oral history conducted 2022 by Patrick Charbonneau, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2022, 12 p. <https://doi.org/10.34847/nkl.651f1p4p>

désordonnés, j'ai trouvé que c'était un défi vraiment intéressant. J'ai vu qu'il y avait dans le groupe de Hammann toute une activité importante à cette époque. Il y avait Catherine Pappas qui terminait sa thèse sur les verres de spins¹⁴, Michel Alba qui était en train de faire la sienne¹⁵. Il y avait Miguel Ocio¹⁶, qui était un physicien remarquable, et qui malheureusement est décédé en 2003. C'était un type formidable. Il y avait vraiment un environnement favorable au développement des expériences dans le laboratoire. Techniquement, c'était très intéressant. Par exemple, il y avait, à côté des laboratoires de physique, un laboratoire de cryogénie dirigé par Patrick Pari¹⁷, qui travaillait main dans la main avec les physiciens pour construire des réfrigérateurs répondant aux exigences des expériences, et développer de nouvelles idées techniques. On pouvait avoir notre frigo sur mesure et interagir avec la personne qui le mettait au point. Par rapport à ce que je faisais en physique nucléaire, où les expériences se faisaient dans une sorte d'usine, ici on était à l'échelle d'une table de manip.

Pour démarrer une expérience, il n'y avait pas de demande de temps de faisceau à faire à l'avance comme avec un accélérateur, il suffisait de refroidir le montage avec de l'hélium liquide pour commencer une campagne de mesures. À l'époque, l'hélium liquide était déjà cher, mais il était payé par le laboratoire de manière centralisée, on pouvait l'utiliser librement. En 1985, il n'y avait pas besoin de déposer un projet à l'ANR pour demander si cette idée est suffisamment intéressante pour qu'on achète de l'hélium. C'était génial. On mettait de l'hélium dans le cryostat et puis on testait l'idée qu'on avait eu la veille. On augmente le champ magnétique, on refroidit brusquement, on refroidit plus lentement, on regarde ce que ça donne. Cette atmosphère m'a beaucoup plu.

¹⁴ Catherine [Katia] Pappas, *Étude magnétique des composés isolants frustrés et désordonnés CsMnFeF₆ et CsNiFeF₆*, thèse, Université Paris XI (1984). <https://www.sudoc.fr/043382738>

¹⁵ Michel Alba, *Étude de la dynamique des verres de spin*, thèse, Université Paris XI (1986). <http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb37595393x>

¹⁶ Miguel Jose Marie Ocio (1943-2003). See, e.g., "Conference in memory of Miguel Ocio," IRAMIS News (2005). https://iramis.cea.fr/en/Phocea/Vie_des_labos/News/index.php?id_news=1570 (Accessed March 26, 2023.)

¹⁷ See, e.g., P. Pari, "Atteindre 70 mK sans azote ni hélium liquide : c'est possible !," *Phases Magazine* 2 (June 1989). https://iramis.cea.fr/ComScience/Phases/phases_02/P2Article2.html (Accessed May 9, 2023); P. Pari, "Techniques de réfrigération à très basse température," École doctorale de Physique en Île de France (2016). <https://www.edpif.org/misc/2016/Cours%20Patrick%20Pari.pdf> (Accessed May 9, 2023.)

J'ai démarré comme une deuxième carrière dans ce service de recherche¹⁸. En '85, c'était l'année de mes 32 ans. Ce n'était pas trop tard, mais j'arrivais un peu vierge de compétences dans ce domaine. Je veux dire, en physique nucléaire, je commençais à être sur le point de pouvoir diriger des thèses, je donnais des séminaires et j'étais invité à des conférences. Mais là, j'ai redémarré dans un nouveau domaine où il fallait apprendre et découvrir, et aussi prendre patience. Il a fallu quelques années pour ce redémarrage. Le CEA m'a permis d'aller suivre en auditeur libre les cours du DEA¹⁹ de physique des solides à l'université d'Orsay²⁰, par exemple, pour approfondir mes connaissances dans ce domaine. Après quelques années j'ai pu de nouveau présenter des résultats dans des conférences, mais il y a eu une petite période de latence à la suite de ce changement de spécialité.

PC: D'un point de vue technique, est-ce qu'il y a une quelconque expertise que vous avez pu transférer de la physique nucléaire à la physique des verres de spin, ou était-ce là aussi complètement différent?

EV: [0:16:52] Bien sûr j'ai pu utiliser mon expérience. Dans la démarche de l'expérimentateur, il y a aussi une compétence d'ordre général, qui se construit petit à petit. Conduire une expérience, traiter des données, faire des ajustements, savoir procéder avec rigueur, pour tout cela et bien d'autres choses mes 10 années de recherche ont été tout à fait utiles. Ceci dit, l'électronique qu'on utilisait en physique nucléaire était de nature assez différente. On traitait énormément de signaux *online*, directement pendant l'expérience, avec de l'électronique rapide. Ça, c'était assez différent, mais enfin savoir utiliser un voltmètre, un oscilloscope, chercher une panne dans un circuit, ça se fait partout. La cryogénie, j'en avais connu un peu en physique nucléaire—on avait des cibles d'hydrogène, de deutérium, d'hélium liquide—mais le travail était plus compartimenté. C'était une équipe spécialisée qui s'en occupait. Je n'avais jamais manipulé des bouteilles d'hélium liquide moi-même, par exemple. J'ai appris à le faire, et j'ai bien aimé. Aussi, pour tout ce qui concerne les basses températures, il faut apprendre à faire des montages dans lesquels les branchements sont réalisés avec des fils très petits, de manière à perdre le moins possible de chaleur, à minimiser les fuites thermiques. Il faut faire

¹⁸ **EV:** En 1985 c'était le Service de Physique du Solide et de Résonance Magnétique, devenu par la suite le Service de Physique de l'Etat Condensé (SPEC, Unité Mixte de Recherche CEA-CNRS, faisant maintenant partie de l'Université Paris-Saclay). <https://iramis.cea.fr/spec/index.php> (Accessed May 9, 2023.)

¹⁹ Diplôme d'études approfondies:

https://fr.wikipedia.org/wiki/Dipl%C3%B4me_d%27%C3%A9tudes_appfondies

²⁰ **EV:** Cet enseignement était organisé par le Laboratoire de Physique des Solides à l'Université Orsay Paris-Sud, maintenant intégrée à l'Université Paris-Saclay.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Laboratoire_de_physique_des_solides

des choses qui sont un peu de de l'ordre de l'horlogerie, souvent très minutieuses. Ça, j'aime bien. Je me sens plus à l'aise à faire des toutes petites soudures sous la loupe qu'à démonter de la grosse mécanique avec des énormes outils. Donc, ça c'était assez nouveau et ça me plaisait.

PC: Vous avez mentionné les cours que vous avez suivis en auditeur libre à l'université d'Orsay. Est-ce qu'il y a quoi que ce soit de cette éducation qui impliquait une compréhension ou un développement des idées de la brisure de la symétrie des répliques? Ou était-ce en étude personnelle? Comment vous êtes-vous familiarisé avec cet aspect de la théorie?

EV: [0:19:03] Non, il n'y avait rien de ce genre dans cet enseignement. C'était un DEA, l'équivalent du Master 2 actuel. C'étaient des cours assez généraux de physique du solide, de physique statistique, sur les semi-conducteurs, les défauts dans les solides, mais pas grand-chose sur les systèmes désordonnés.

PC: Donc, vous n'avez pas suivi de cours avec Bernard Derrida²¹, par exemple, qui je pense enseignait à l'époque?

EV: [0:19:25] Ah si, en effet. Vous avez raison. Mais ça n'était pas dans le cadre du DEA de physique des solides. C'étaient des cours d'École Doctorale, pour les gens qui démarraient leur doctorat. C'étaient des cours d'accès libre. Oui, Bernard Derrida a fait un cours sur les verres de spin—je m'en souviens très bien—à l'École normale, rue Lhomond. Ça devait être à peu près à l'époque où je commençais, '86-'87. Oui, j'y suis allé, dans ce cadre-là, des cours proposés aux doctorants. Le cours de Bernard Derrida était déjà très, très bien. Il a toujours été un pédagogue formidable. Ces temps-ci, il fait un cours au Collège de France qui est très bien aussi, je dois dire²².

PC: Alors, quand vous vous êtes finalement réengagé avec les expériences, quelle question physique, en particulier, poursuiviez-vous?

EV: [0:20:36] Au départ, c'était la question de la nature de la transition verre de spin. Avec Hammann et ses collègues, j'ai eu ce qu'il fallait au laboratoire pour commencer un travail là-dessus. Il y avait deux aspects, mais le premier auquel je me suis attaqué, c'était la nature de la

²¹ P. Charbonneau, *History of RSB Interview: Bernard Derrida*, transcript of an oral history conducted 2020 by Patrick Charbonneau and Francesco Zamponi, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2021, 23 p. <https://doi.org/10.34847/nkl.3e183b0o>

²² "Bernard Derrida: Physique statistique", *Collège de France* (2014). <https://www.college-de-france.fr/chaire/bernard-derrida-physique-statistique-chaire-statutaire> (Accessed March 26, 2023.)

transition²³ (l'autre est celui de la dynamique lente et des effets de vieillissement). Est-ce que c'est un point critique ou pas ? Les premières manip que j'ai faites étaient des mesures de susceptibilité alternative, dans lesquelles on examinait soigneusement comment la température de gel du verre de spin changeait avec la fréquence d'observation. Si on fait ça, sur une assez large gamme de fréquences, on peut chercher à tester des lois d'échelle. S'il y a une transition de phase, il y a divergence d'une longueur de corrélation en approchant la température critique par le haut, avec un exposant ν . Dans les hypothèses de scaling dynamique, on considère que les temps de réponse varient comme la longueur de corrélation avec un exposant z . La fréquence de la susceptibilité alternative, c'est comme l'inverse du temps de réponse, donc on a pu tester des lois d'échelles. On a trouvé que les lois de ralentissement critique, avec un certain exposant $z\nu$, étaient celles qui rendaient le mieux compte des résultats. Donc, on a conclu : ça se passe comme dans un cas critique. Puis, immédiatement après, sur les mêmes échantillons de verre de spin²⁴, j'ai commencé une étude de la transition du point de vue statique —tout ça c'était avec Michel Hammann et Miguel Ocio qui me guidaient, moi je ne connaissais pas grand-chose—. On s'est dit : « Bon, alors comment atteindre le paramètre d'ordre ? » C'est un peu compliqué, mais on peut établir que, dans le cas du verre de spin, la susceptibilité du paramètre d'ordre est la susceptibilité non-linéaire par rapport au carré du champ magnétique, donc j'ai démarré des mesures de susceptibilité non-linéaire à l'approche de T_g . Ça, c'est difficile parce que la plus grande partie du signal est la partie linéaire, donc il faut faire des *fits* en fonction de la valeur du champ pour extraire la partie non-linéaire. Puis, on regarde si ça a l'air de diverger sur des intervalles de température en se rapprochant de T_g . Naturellement, on n'observe pas directement une divergence dans une expérience, mais enfin on regarde la pente et on regarde si ça colle bien à une loi d'échelle critique. On a trouvé comme ça des exposants critiques statiques qui étaient bien cohérents avec les résultats de la dynamique.

Dans le même temps, il y avait des tas d'autres gens qui s'intéressaient à ces questions. Juste à côté, il y avait Hélène Bouchiat²⁵, au laboratoire de Physique des Solides d'Orsay, qui faisait sa thèse et qui travaillait aussi sur

²³ See, e.g., E. Vincent, J. Hammann and M. Alba, "Dynamic critical behaviour of the $\text{CdCr}_{2 \times 0.85}\text{In}_{2 \times 0.15}\text{S}_4$ spin-glass," *Solid State Comm.* **58**, 57-62 (1986). [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(86\)90887-2](https://doi.org/10.1016/0038-1098(86)90887-2); E. Vincent and J. Hammann, "Critical behaviour of the $\text{CdCr}_{2 \times 0.85}\text{In}_{2 \times 0.15}\text{S}_4$ insulating spin glass," *J. Phys. C* **20**, 2659 (1987). <https://doi.org/10.1088/0022-3719/20/18/004>

²⁴ EV: Préparés par Marc Noguès au CNRS Meudon-Bellevue. See, e.g., M. Alba, J. Hammann, and M. Noguès, "Phase diagrams of two dilute insulating systems with competing interactions," *J. Phys. C* **15**, 5441 (1982). <https://doi.org/10.1088/0022-3719/15/26/022>

²⁵ Hélène Bouchiat: https://en.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9l%C3%A8ne_Bouchiat

le comportement critique des verres de spin²⁶. Elle a eu de très beaux résultats sur le comportement critique en fonction de l'anisotropie de spin dans un système argent-manganèse qui était dopé avec un petit peu d'or. On était en contact régulier avec Hélène Bouchiat, et avec Philippe Monod²⁷. Miguel Ocio, en particulier, était beaucoup en relation avec eux. Il y avait toute une émulation sur la question du point critique.

Je peux citer aussi des relations avec Grenoble sur ce sujet, parce qu'il y avait Jean-Louis Tholence, Jean Souletie et d'autres gens—Laurent Lévy, Jacques Villain aussi—qui s'intéressaient à ces questions et en particulier à la dépendance en fréquence de la température de gel. Jean Souletie a développé une comparaison entre les verres structuraux et les verres de spin²⁸. Dans le verre structural, on peut regarder comment évolue la viscosité en fonction de la température (la viscosité varie comme l'inverse d'un temps caractéristique). On peut regarder dans des graphes d'Arrhenius comment la viscosité diverge en baissant la température. On regarde les mêmes choses en susceptibilité alternative dans les verres de spin et on compare les graphes. Jean Souletie a fait un papier très bien avec Dominique Bertrand de Toulouse là-dessus, dont j'ai encore utilisé des résultats récemment, parce qu'ils sont très illustratifs. Voilà ce qu'on faisait sur la problématique de la nature de la transition vers l'état verre de spin, et on concluait bravement en disant : « C'est comme une transition de phase thermodynamique, ça en a toutes les caractéristiques. »

PC: Pouvez-vous nous donner un peu plus de perspective sur comment ces interactions avaient lieu? Étaient-ce des gens qui se retrouvaient tous au CEA ? Comment est-ce que ces équipes multidisciplinaires et multi-centres fonctionnaient ?

EV: [0:25:56] Avec Orsay, c'était facile, il y a deux kilomètres de distance avec Saclay. A cette époque, il y avait un projet commun, Hélène Bouchiat commençait à développer avec Miguel Ocio des manips originales et très difficiles pour mesurer les fluctuations spontanées de l'aimantation²⁹. Donc, Hélène était souvent au labo. Philippe Monod venait souvent

²⁶ Hélène Bouchiat, *Transition verre de spin : comportement critique et bruit magnétique*, thèse, Université Paris-Sud (1986). <https://www.theses.fr/1986PA112055> (Accessed March 26, 2023.)

²⁷ Philippe Monod: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Philippe_Monod_\(physicien\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Philippe_Monod_(physicien))

²⁸ See, e.g., J. Souletie, "Spin-Glasses Versus Glassy Glasses," In: M. Pineri, A. Eisenberg, eds. *Structure and Properties of Ionomers. NATO ASI Series* (Dordrecht: Springer, 1987), 247-254.

https://doi.org/10.1007/978-94-009-3829-8_20; J. Souletie and D. Bertrand, "Glasses and spin glasses: a parallel," *J. Physique I* **1**, 1627-1637 (1991). <https://doi.org/10.1051/jp1:1991230>;

²⁹ See, e.g., M. Ocio, H. Bouchiat and P. Monod, "Observation of $1/f$ magnetic fluctuations in a spin glass," *J. Physique Lett.* **46**, 647-652 (1985). <https://doi.org/10.1051/jphyslet:019850046014064700> ; M. Alba, J. Hammann, M. Ocio, P. Refregier and H. Bouchiat, "Spin-glass dynamics from magnetic noise, relaxation, and susceptibility measurements," *J. Appl. Phys.* **61**, 3683-3688 (1987). <https://doi.org/10.1063/1.338661>

discuter aussi, ou bien on allait chez eux. On pouvait aussi se rencontrer à l'occasion de séminaires, mais c'étaient vraiment des contacts plus directs que ça. Il y a eu des directions de thèse en commun aussi. Par exemple, chez nous, Philippe Refrégier a soutenu sa thèse en 1987³⁰, sous la direction de Philippe Monod. C'étaient des gens qui prenaient le temps de réfléchir en profondeur, de chercher à poser les bonnes questions, d'examiner les résultats. Pour les collaborations avec Grenoble, tant avec le CEA qu'avec le CNRS, qui sont voisins, c'était un peu plus loin, il n'y avait pas encore le TGV à l'époque. Mais on était en contact. Souletie a organisé des mini-colloques quelquefois, pour rassembler les gens des verres et polymères avec ceux des verres de spin, à Grenoble et à la fac de Jussieu.

PC: Et avec les théoriciens la région parisienne de cette époque-là, donc Derrida et les gens de l'IPhT³¹?

EV: [0:27:52] Ça, c'était assez intéressant aussi. Il y avait effectivement, dans le même bâtiment que nous, l'IPhT, et puis, à Paris, les laboratoires de l'École Normale Supérieure rue Lhomond. Certains chercheurs étaient un peu à cheval entre l'École normale et l'IPhT. Localement, à l'IPhT, il y avait Cirano De Dominicis³² qui travaillait sur ces questions. On le rencontrait régulièrement. On lui expliquait ce qu'on faisait. Il nous expliquait ce qu'il faisait, ce qui me paraissait très compliqué. C'était vraiment très sympathique, mais ce n'est pas allé beaucoup plus loin. Il y avait aussi Bernard Derrida, mais à part pour son cours je ne l'ai pas beaucoup rencontré à cette époque-là.

Ensuite on a commencé à échanger avec Marc Mézard³³. Il revenait probablement à ce moment-là de sa période sabbatique à Rome. Il venait de sortir le bouquin, en 1987, avec Virasoro et Parisi, qui donnait les bases de la brisure de la symétrie des répliques³⁴. Marc Mézard avait tout ça en tête de manière très claire et il avait envie de comprendre ce qu'on pouvait observer dans les expériences. C'est lui, je crois, qui a pris contact avec nous, il a invité Hammann à venir donner à un séminaire à l'École normale. Hammann a présenté un certain nombre de résultats et il y a eu des discussions intéressantes. Voilà, ça s'est fait principalement avec Marc

³⁰ Philippe Refrégier, *Étude de la cinétique lente de l'aimantation des verres de spin isolants: réponse et fluctuations*, thèse, Université Paris XI (1987). <https://www.theses.fr/1987PA112321>

³¹ Institut de physique théorique – IPhT Saclay :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Institut_de_physique_th%C3%A9orique_-_IPhT_Saclay

³² Cirano De Dominicis: https://de.wikipedia.org/wiki/Cyrano_de_Dominicis

³³ Marc Mézard: https://en.wikipedia.org/wiki/Marc_M%C3%A9zard

³⁴ M. Mezard, G. Parisi and M. A. Virasoro, *Spin Glass Theory and Beyond* (Singapore: World Scientific: 1987).

Mézard. Il y a eu aussi Nicolas Sourlas³⁵, avec qui j'ai eu pas mal de discussions. Ce sont les noms qui me reviennent dans l'immédiat. Mais les ponts avec les théoriciens se sont construits progressivement. Ce sont un peu deux mondes qui se sont rejoints. J'ai eu la chance que ça se soit produit à mon époque, donc c'était très stimulant, très intéressant.

PC: On va y revenir. Je voulais poser, tout d'abord, une autre question. Vous avez rejoint le domaine un peu à l'époque des grands débats sur les *droplet scaling theory* de Huse et Fisher. En étiez-vous conscient ? Si oui, pouvez-vous me décrire comment ça s'est joué ?

EV: [0:30:40] Fisher et Huse ont fait une première PRL en '86³⁶, que je n'avais peut-être pas trop remarquée, mais j'ai remarqué les deux articles fleuves de 1988³⁷. J'avais un preprint de l'un des deux articles entre les mains dans un séminaire à Saclay. À côté de moi, il y a quelqu'un qui m'a dit : « Ah, ça vous intéresse ? Je suis David Huse³⁸. » C'était rigolo, mais c'était un peu anecdotique, on a juste discuté un petit peu. Ensuite, on a entrepris de se plonger dans la compréhension du *droplet model*, qui avait l'avantage d'être une approche phénoménologique, relativement accessible, pas très lourde du point de vue mathématique. Il y avait des arguments généraux faciles à saisir, donc on a été évidemment très intéressés. Il y a eu des rencontres avec Daniel Fisher³⁹ dans des colloques principalement, mais je me souviens qu'il est venu à Saclay aussi. En tout cas, on était en contact assez direct avec lui. Dans notre labo, c'était l'époque de la thèse de François Lefloch, avec qui nous avons fait des manips visant à départager les visions droplet et hiérarchique⁴⁰. En 1993 il y a eu une Gordon Conference dans le New Hampshire⁴¹, j'y étais avec Jean-Philippe Bouchaud⁴², qui nous avait rejoints au CEA en '92 je crois. Pendant cette rencontre il y a eu des grosses discussions avec Daniel Fisher, c'était

³⁵ Voir e.g., P. Charbonneau, *History of RSB Interview: Nicolas Sourlas*, transcript of an oral history conducted 2021 by Patrick Charbonneau and Francesco Zamponi, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2021, 23 p. <https://doi.org/10.34847/nkl.2a55p6c3>

³⁶ D. S. Fisher and D. A. Huse, "Ordered phase of short-range Ising spin-glasses," *Phys. Rev. Lett.* **56**, 1601 (1986). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.1601>

³⁷ D. S. Fisher and D. A. Huse, "Nonequilibrium dynamics of spin glasses," *Phys. Rev. B* **38**, 373 (1988). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.38.373>; "Equilibrium behavior of the spin-glass ordered phase," *Phys. Rev. B* **38**, 386 (1988). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.38.386>

³⁸ David A. Huse: https://en.wikipedia.org/wiki/David_A._Huse

³⁹ Daniel S. Fisher: https://en.wikipedia.org/wiki/Daniel_S._Fisher

⁴⁰ F. Lefloch, J. Hammann, M. Ocio and E. Vincent, "Can Aging Phenomena Discriminate Between the Droplet Model and a Hierarchical Description in Spin Glasses?," *Europhys. Lett.* **18**, 647 (1992). DOI 10.1209/0295-5075/18/7/013

⁴¹ *Condensed Matter Gordon Conference*, Mehran Kardar, Brewster Academy, Wolfeboro, New Hampshire, June 27—July 12, 1993. <https://www.grc.org/condensed-matter-physics-conference/1993/> (Accessed May 9, 2023.)

⁴² Jean-Philippe Bouchaud: https://en.wikipedia.org/wiki/Jean-Philippe_Bouchaud

passionnant. Nous lui expliquions que le modèle des droplets reproduisait mal les formes des courbes de relaxation, et aussi nous commençons à parler de l'effet des changements de température sur le vieillissement, qui nous semblaient nécessiter un schéma hiérarchique qu'on ne trouvait pas dans les droplets. A Orsay, Henk Hilhorst avait développé au même moment que les droplets un modèle de « domaines⁴³ » qui était un peu dans le même esprit, c'était la thèse de G. Koper. Nous avons souvent discuté avec lui, Henk Hilhorst s'est beaucoup intéressé à nos manips à cette époque.

Je voudrais citer un autre laboratoire où il y a eu énormément de travaux expérimentaux, c'est celui de l'université d'Uppsala, près de Stockholm, avec au départ Leif Lundgren, et puis Per Nordblad⁴⁴, et beaucoup d'autres chercheurs brillants. Ils ont fait un travail formidable sur les verres de spin, à la fois sur le comportement critique, et puis sur la dynamique lente. Eux aussi ont été très intéressés par le modèle des droplets⁴⁵. Ils ont même collé de très près à cette vision du verre de spin, cherchant à décrire un maximum de résultats avec ce modèle, tout en restant bien sûr dans une démarche d'une rigueur scientifique totale. Il y a eu beaucoup de discussions très animées entre notre équipe et celle d'Uppsala, car de notre côté on trouvait qu'il y avait des résultats qui ne collaient vraiment pas bien avec le modèle des droplets. Ça nous a amenés à regarder plus du côté de ce qui venait des résultats de champ moyen. Je peux expliquer ça, si vous voulez.

PC: Absolument.

EV: [0:34:01] On a d'abord regardé des choses très simples à partir du modèle de droplets, des lois d'échelles de relaxation. Ça ne marchait pas très bien dans les détails. Ensuite, c'est l'époque, '86-'87, où on s'est mis à développer une nouvelle classe d'expériences, qui étaient l'étude de l'effet des variations de température sur le vieillissement. A ce propos, j'aimerais faire passer un message. On ne l'a pas fait à partir d'une suggestion faite par les théoriciens à propos de l'arbre hiérarchique des états dans la

⁴³ G. J. M. Koper and H. J. Hilhorst, "A domain theory for linear and nonlinear aging effects in spin glasses", *J. Phys. (Paris)* **49**, 429 (1988). <https://doi.org/10.1051/jphys:01988004903042900>

⁴⁴ Per Nordblad: https://sv.wikipedia.org/wiki/Per_Nordblad. See also "Per Nordblad: 2015 John Wheatley Award Recipient," *APS* (2015). https://www.aps.org/programs/honors/prizes/prizerecipient.cfm?last_nm=Nordblad&first_nm=Per&year=2015 (Accessed March 26, 2023.)

⁴⁵ See, e.g., L. Sandlund, P. Granberg, L. Lundgren, P. Nordblad, P. Svedlindh, J. A. Cowen, G. G. Kenning, "Dynamics of Cu-Mn spin-glass films," *Phys. Rev. B* **40**, 869 (1989). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.40.869>; J. Mattsson, C. Djurberg, P. Nordblad, L. Hoines, R. Stubi, and J. A. Cowen, "Overlap length in two-dimensional Cu(Mn) spin-glass films", *Phys. Rev. B* **47**, 14626(R) (1993). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.14626>

solution de Parisi du verre de spin en champ moyen. On est partis dans cette direction parce qu'on se posait une question très simple. Les verres de spin, on les trouve toujours hors d'équilibre en dessous de T_g . La première chose qu'on a étudiée, qui se faisait avant que j'arrive—la thèse de Michel Alba—c'étaient les phénomènes de vieillissement, l'effet du temps d'attente⁴⁶. Après avoir refroidi un verre de spin depuis sa phase paramagnétique, si on attend plus longtemps, la dynamique est plus lente et les courbes de relaxation sont différentes. C'est un effet de temps d'attente qui s'appelle le vieillissement, *aging*. On se disait : « Enfin, comment est-ce qu'on pourrait faire pour aider un verre de spin à s'approcher de l'équilibre ? Quel truc pourrait-on trouver ? » Par exemple, dans les verres structuraux, les gens tracent des courbes où ils montrent le volume effectif en fonction de la température. S'ils refroidissent brutalement, il tombe complètement hors d'équilibre. S'ils refroidissent très lentement, ils arrivent un peu plus près de l'équilibre. C'est ce qui s'appelle les effets de *cooling rate*, de vitesse de refroidissement. Donc, on s'est dit—ça, c'était avec Philippe Refrégier en 1988⁴⁷: « Si on essayait... » La première manip qu'on a essayée, c'est de prendre un verre de spin, descendre légèrement dessous de T_g et là, attendre très longtemps. On s'est dit : « On est encore à pas trop basse température. Tout n'est pas gelé, donc il va réussir à s'équilibrer. Après, quand on refroidira, on trouvera un système qui est plus proche de l'équilibre. » La surprise, ça a été que d'attendre longtemps en dessous de T_g ne changeait absolument rien, en tous cas dans la gamme de temps qu'on était capable d'explorer. Les courbes de relaxation présentaient les mêmes effets de vieillissement. À partir de là, on a imaginé des tas de protocoles de variation de température qui permettaient de faire des tests. Dans une mesure où on reste longtemps à une température donnée, on mesure les effets de vieillissement, très bien. Mais, quand on descend à partir de là à une température un peu plus basse, on trouve une sorte de relance du vieillissement, comme un redémarrage. En fait ce n'est pas une réinitialisation complète, ça se passe dans la fenêtre de temps qu'on peut observer, mais c'est spectaculaire. Les courbes de relaxation sont comme

⁴⁶ M. Ocio, M. Alba and J. Hammann, "Time scaling of the ageing process in spin-glasses : a study in CsNiFeF6," *J. Physique Lett.* **46**, 1101-1107 (1985). <https://doi.org/10.1051/jphyslet:0198500460230110100> ; M. Alba, E. Vincent, J. Hammann and M. Ocio, "Field effect on aging and relaxation of the thermoremanent magnetization in spin glasses (low-field regime)," *J. Appl. Phys.* **61**, 4092-4094 (1987). <https://doi.org/10.1063/1.338538>

⁴⁷ P. Refrégier, M. Ocio, J. Hammann and E. Vincent, "Nonstationary spin glass dynamics from susceptibility and noise measurements," *J. Appl. Phys.* **63**, 4343-4345 (1988). <https://doi.org/10.1063/1.340169>

rajeunies. Plus tard, on a appelé ça rajeunissement. C'est Jean-Philippe Bouchaud, je crois, qui a proposé le terme de *rejuvenation*⁴⁸.

Deuxième phénomène : après avoir attendu assez longtemps à un peu plus basse température, quand on revient à la température précédente—moyennant certaines conditions—on retrouve l'état qu'on avait laissé. C'est-à-dire qu'il y a une *mémoire* de l'état précédent qui a été gardée. Ça, c'était vraiment très inhabituel. Nous nous sommes dit : « Il nous faut un schéma qui soit dissymétrique en température. Si on pense à un arbre des états un peu comme celui de Parisi, qu'on regarde non plus en fonction du recouvrement des états, mais en fonction de la température, se développant vers des ramifications multiples quand on baisse la température, on a là une image qui explique assez bien les phénomènes de rajeunissement et mémoire qu'on est en train de voir. » Quand on baissait la température, on créait de nouveaux états entre lesquels il y avait une nouvelle dynamique, et puis quand on remontait la température on effaçait ces nouveaux états et on revenait à la répartition entre les états du dessus. On avait alors la mémoire. Évidemment, c'était un peu sacrilège de parler d'arbre hiérarchique, puisque ça évoquait des objets théoriques et conceptualisés à propos des états purs, et puis se développant en fonction du recouvrement des états, de l'*overlap*. Nous, on regardait ça à propos d'états métastables, parce qu'en gros il n'y a que ça qu'on peut voir dans une expérience, et en fonction de la température. Donc, le rapprochement paraissait hardi. On a eu des discussions à ce moment-là avec Victor Dotsenko. L'arbre hiérarchique, tel qu'on l'a représenté en schéma dans beaucoup de publications et que vous l'avez repris sur votre page web⁴⁹, je pense qu'au départ c'était un schéma dans un papier de Dotsenko⁵⁰. Puis, on a discuté avec Mézard, qui était très intéressé, qui nous aidés à préciser tout ça.

Philippe Refrégier, qui était en thèse dans notre équipe, avait bien cette idée de brisure de symétrie des répliques en tête. Il a trouvé que c'était un bon guide pour la pensée pour cette série de résultats. Il a été très moteur

⁴⁸ J.-P. Bouchaud, L. F. Cugliandolo, J. Kurchan and M. Mézard, "Out of equilibrium dynamics in spin-glasses and other glassy systems," In: A. P. Young, ed. *Spin glasses and random fields* (Singapore: World Scientific, 1998), 161. <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/9702070>; F. Alberici-Kious, J.-P. Bouchaud, L. F. Cugliandolo, P. Doussineau and A. Levelut, « Aging in $K_{1-x}Li_xTaO_3$: A Domain Growth Interpretation," *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4987 (1998). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.4987>

⁴⁹ See, e.g., D. Denéchaud, "L'Histoire de la brisure des répliques en physique / The History of Replica Symmetry Breaking in Physics," CAPHÉS (2022). <https://caphes.ens.fr/history-of-replica-symmetry-breaking-in-physics/> (Accessed March 26, 2023.)

⁵⁰ V. S. Dotsenko, "Fractal dynamics of spin glasses," *J. Phys. C* **18**, 6023 (1985). <https://doi.org/10.1088/0022-3719/18/32/013>; Vik. S. Dotsenko, M. V. Feigel'man and L. B. Ioffe, "Spin Glasses and Related Problems," *Sov. Sci. Rev. A. Phys.* **15**, 1-150 (1990). https://qmeso.itp.ac.ru/extra_lectures/SpinGlass2/SpinGlassDFI.pdf (Accessed May 9, 2023.)

dans ces expériences, qu'on a faites ensemble, et je voudrais lui rendre hommage. On a un peu entraîné les autres... On a dit à nos collègues : « On va essayer de publier ça, parce que c'est quand même très original et étonnant. L'histoire de l'arbre, c'est un peu bizarre, mais peut-être les referees accepteront quand même. » Les collègues proches nous ont dit : « Oh là, là ! Cette comparaison avec l'arbre de Parisi ne tiendra pas la route, elle n'est pas assez fondée mathématiquement. » On a pu publier notre premier papier sur les effets de variations de température sur vieillissement en 1987, dans le *Journal de Physique*, avec un schéma hiérarchique⁵¹. C'est le premier. Je veux dire que les autres groupes expérimentaux ont aussi étudié ces phénomènes, mais je pense que c'était plus tard. Voilà comment on en est arrivés là. Après, il y a eu beaucoup de développements sur ces questions de rajeunissement et mémoire.

PC: Le nom de Jean-Philippe Bouchaud est revenu déjà quelques fois dans notre discussion. Comment est-ce que cette collaboration s'est développée quand il a rejoint le CEA ?

EV: [0:40:52] Ça, ça a été très sympa et très stimulant. Il a eu envie de rejoindre un labo expérimental. Ça a dû se passer en '92, je pense. Il travaillait à l'École normale, mais il avait envie d'explorer d'autres centres de recherche. Il a rejoint le SPEC, et a vraiment été le bienvenu. Immédiatement, il s'est intéressé de très près à tous nos résultats expérimentaux sur les verres de spin. Il y a eu trois volets sur lesquels il a d'ailleurs fait trois étapes de modélisation.

Le premier volet était : qu'est-ce que c'est que cet effet de vieillissement ? Qu'est-ce qui se passe en fonction du temps d'attente t_w ? Ça l'intriguait, et il avait en tête quelque chose. Il avait déjà travaillé sur des phénomènes de physique où il y avait des lois de probabilité avec des ailes larges, des lois de Lévy⁵², des lois de puissance qui décroissent avec un exposant faible⁵³. Il m'a expliqué que, si on prend des variables tirées selon une loi de Lévy et qu'on en fait la somme, cette somme est dominée par le plus grand terme. Finalement, si on réfléchit aux verres de spin comme un point dans un espace des états métastables—lui, il les a appelés des pièges ou puits, les *traps*—il y a des arguments pour dire que les temps de piégeage sont distribués suivant une loi large—ça s'obtient assez facilement. Quand

⁵¹ P. Refrégier, E. Vincent, J. Hammann and M. Ocio, "Ageing phenomena in a spin-glass: effect of temperature changes below T_g ," *J. Physique* **48**, 1533-1539 (1987). <https://doi.org/10.1051/jphys:019870048090153300>

⁵² Lévy distribution: https://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9vy_distribution

⁵³ See, e.g., J.-P. Bouchaud, A. Comtet, A. Georges and P. Le Doussal, "Classical diffusion of a particle in a one-dimensional random force field," *Ann. Phys.* **201**, 285-341 (1990). [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(90\)90043-N](https://doi.org/10.1016/0003-4916(90)90043-N)

le verre de spin se balade d'un puits à l'autre pendant un temps d'attente t_w , finalement il a passé l'essentiel de son temps dans le puits le plus profond. La somme des temps passés dans les pièges est dominée par le temps le plus grand, passé dans le puits le plus profond, temps qui est de l'ordre du temps d'attente t_w lui-même. Il a construit comme ça un petit modèle de pièges, le *trap model*, qui a donné une image permettant d'expliquer le vieillissement et la dépendance en t_w des courbes de relaxation⁵⁴. Ce n'était pas une image microscopique, il n'y avait pas de spins, c'était une image statistique.

C'était vraiment très agréable de travailler avec Jean-Phillippe, parce qu'il s'intéressait de près aux résultats expérimentaux. C'est-à-dire qu'on a passé des heures, assis ensemble devant mon ordinateur, à regarder des courbes ou des tableaux de chiffres, à faire des *fits*, à changer des paramètres. Il a tout épluché dans le détail. C'était vraiment sympa d'avoir quelqu'un qui s'intéressait autant que ça et qui avait plein d'idées, en plus. On a continué sur cette voie.

La deuxième étape conceptuelle avec lui, c'était à propos des lois d'échelle du vieillissement où on disait : « Ce qui compte, ce n'est pas exactement le temps d'attente t_w , mais c'est le temps d'attente avec un exposant μ qui est un peu inférieur à 1. » Ça, entre parenthèse, c'était un résultat qui venait des lois d'échelle sur le comportement mécanique des polymères. Les polyméristes avaient établi ces choses-là depuis l'époque du bouquin de Struik en 1978⁵⁵. Ils avaient écrit des choses très claires là-dessus. Miguel Ocio, dans notre équipe, avait bien compris tout ça, et il avait développé des lois d'échelle, qui rendaient très précisément compte du vieillissement dans les verres de spin en faisant intervenir une variable t_w^μ , μ étant un exposant un peu inférieur à 1. Jean-Philippe a dit : « Ce t_w^μ , ça ne va pas. Il y a forcément à côté un temps à la puissance $1-\mu$, pour que ça soit homogène du point de vue dimensionnel. » C'était un argument de bon sens. Il avait indubitablement raison. Il a dit : « Il y a une autre échelle de temps qui est cachée là-dedans. » On a réfléchi, et son idée a été la suivante. Les échantillons de verre de spin habituels, macroscopiques, ne sont pas un monocristal. (Une parenthèse à ce propos : il existe des expériences qui sont faites sur des vrais monocristaux. C'est très intéressant. R. Orbach développe ça actuellement à l'université du

⁵⁴ J.-P. Bouchaud, "Weak ergodicity breaking and aging in disordered systems", *J. Phys. I France* **2**, 1705-1713 (1992). <https://doi.org/10.1051/jp1:1992238>

⁵⁵ L. C. E. Struik, *Physical aging in amorphous polymers and other materials* (Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1978).

Texas⁵⁶.) À l'époque, on utilisait des échantillons qui étaient multicristallins, ça pouvait même être une poudre. Jean-Philippe a dit : « On pourrait considérer l'échantillon réel comme une collection de grains, de sous-systèmes dont les tailles et donc les nombres d'états métastables sont distribués. On va essayer de reconstruire la distribution d'après les résultats et ce fameux exposant μ . Il y a des petits grains, dans lesquels au cours de t_w finalement on arrive à l'équilibre ; et puis il y en a des plus gros où on n'arrive pas à l'équilibre. La combinaison des deux, sur un t_w fixé, ça se traduira par ce t_w^μ , qui serait multiplié par un autre temps à la puissance $1-\mu$, traduisant la saturation de certains des grains. » On a *fitté* les résultats avec cette idée et ça a bien marché. On a pu établir des estimations du nombre d'états métastables, des choses de ce genre, c'était assez amusant⁵⁷.

Ensuite, il y a eu le troisième volet des modélisations avec Jean-Philippe. Il a procédé très méthodiquement : d'abord le vieillissement, pourquoi cet exposant μ ... Entre temps, on travaillait beaucoup sur nos manip de variation de température, mais il disait : « Ça, on y réfléchira plus tard. » Puis, avec ces manip d'effet sur le vieillissement des variations de température, il a eu envie d'aller plus loin avec son modèle de pièges. À l'époque, il y avait aussi David Dean avec lui au laboratoire, il est maintenant prof à Toulouse (il vient du Pays de Galles). David et Jean-Philippe ont développé un modèle de pièges à plusieurs étages, avec des pièges dans les pièges⁵⁸. Il y a eu un passage qui est un peu comme celui que Bernard Derrida a fait du REM au generalized REM (ou GREM)⁵⁹. Jean-Philippe Bouchaud et David Dean ont fait un papier qui s'appelait *Aging on Parisi's tree*, où ils développaient ce modèle à étages qui permettait d'expliquer beaucoup de choses. Notre schéma de hiérarchie des états métastables, très intuitif, a trouvé là une forme rigoureuse. Pendant toute cette période, nous avons fait beaucoup de publications en commun avec Jean-Philippe. Par la suite, il y a eu aussi Olivier Martin, de l'université

⁵⁶ See, e.g., P. Charbonneau, *History of RSB Interview: Raymond Orbach*, transcript of an oral history conducted 2022 by Patrick Charbonneau and Francesco Zamponi, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2022, 23 p. <https://doi.org/10.34847/nkl.cfddyh9y>

⁵⁷ See J.-P. Bouchaud, E. Vincent and J. Hammann, "Towards an experimental determination of the number of metastable states in spin-glasses?" *J. Physique I* **4**, 139-146 (1994). <https://doi.org/10.1051/jp1:1994127>

⁵⁸ See, e.g., J.-P. Bouchaud and D. S. Dean, "Aging on Parisi's tree," *J. Physique I* **5**, 265-286 (1995). <https://doi.org/10.1051/jp1:1995127>; E. Vincent, J.-P. Bouchaud, D. S. Dean and J. Hammann, "Aging in spin glasses as a random walk: Effect of a magnetic field," *Phys. Rev. B* **52**, 1050 (1995). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.1050>

⁵⁹ B. Derrida and E. Gardner, "Solution of the generalised random energy model," *J. Phys. C* **19**, 2253 (1986). <https://doi.org/10.1088/0022-3719/19/13/015>

d'Orsay, qui s'est intéressé de près à nos résultats, au moment de la thèse de Florent Krzakala⁶⁰, mais c'est encore une autre histoire.

PC: À l'époque, vous aviez aussi des collaborateurs expérimentaux. Il y avait Ray Orbach, entre autres, et éventuellement des groupes japonais. Pouvez-vous nous décrire comment ça se fait que votre centre collaborait si facilement avec d'autres groupes et comment les choses procédaient ?

EV: [0:48:31] J'espère qu'on n'était pas les seuls chercheurs à être ouverts sur le reste du monde ! Avec Ray Orbach, ça a démarré, je crois, parce que Hammann est allé faire un séjour postdoctoral chez Ray Orbach, qui était à UCLA à l'époque. À partir de là, les relations se sont développées. Ray Orbach a envoyé un étudiant en thèse, Marcos Lederman⁶¹, qui est venu passer un an ou deux à Saclay. Ray Orbach était très impliqué sur ces sujets. Il a développé ce qu'il a appelé un modèle de barrières, quand Jean-Philippe développait un modèle de pièges. Au lieu d'avoir une collection de pièges, tous les états étaient au même niveau et il y avait des barrières de toutes hauteurs qui les séparaient⁶². Ray Orbach a modélisé les manips avec ce système de barrières et ça bien marché. Il a voulu aussi comprendre ce qui se passait avec les variations de température. Il a proposé que ces barrières changent d'amplitude en fonction de la température. Voyez, il y a deux choses. On peut imaginer un paysage fixe des états métastables. Quand la température change, on est capable d'explorer des états séparés par des barrières plus ou moins hautes, par l'effet de l'activation thermique. Mais une autre chose est que, quand on change la température, les hauteurs de ces barrières changent aussi. Il avait cette idée que les barrières croissent quand on baisse la température et on a développé toute une série de manips avec lui où on a mesuré la croissance des barrières en fonction des changements de température. On a reproduit les résultats expérimentaux en *fittant* un comportement de ces barrières, ce qui nous a conduits à conclure qu'il y avait des familles de barrières qui divergeaient à toutes les températures. À chaque température en dessous de T_g , certaines barrières divergeaient et quand on baissait la température d'autres barrières divergeaient. Avec ça, il a reconstruit en somme cet arbre hiérarchique expérimental, dont l'extrapolation quand les barrières divergent nous ramène à la structure

⁶⁰ Florent Krzakala, "Aspects géométriques et paysages d'énergies des verres de spins : étude d'un système désordonné et frustré en dimension finie", thèse, Université Paris VI (2002).

<https://theses.hal.science/tel-00002232>

⁶¹ Marcos Lederman, *Dynamics of random magnetic systems: spin-glasses and random fields*, PhD Thesis, University of California, Los Angeles (1991).

https://search.library.ucla.edu/permalink/01UCS_LAL/17p22dp/alma9920633463606533

⁶² See, e.g., M. Lederman, R. Orbach, J. M. Hammann, M. Ocio and E. Vincent, "Dynamics in spin glasses," *Phys. Rev. B* **44**, 7403 (1991). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.7403>

des états purs, qui eux sont séparés par des barrières infinies. Dans ce sens, les résultats expérimentaux rejoignent les résultats de brisure de symétrie des répliques en champ moyen. Ray Orbach a pu faire des choses très précises là-dessus, introduisant l'*overlap* entre les états. C'est un théoricien très intéressé par les expériences, il a pu faire des modélisations assez complexes des résultats, et il a été très moteur pour ces séries d'expériences. Certaines se faisaient chez lui, d'abord à UCLA, puis ensuite à Riverside. Et d'autres se faisaient chez nous. Je suis allé une fois à Riverside, mais pour une période courte.

Une chose qui facilitait les collaborations de manière vraiment importante, c'étaient les réseaux, dont plusieurs ont été financés par les Japonais, par leur ministère de l'Éducation *Monbu-shō*⁶³. Il y avait probablement une volonté d'encourager les chercheurs japonais à développer leurs collaborations avec le reste du monde. Ça nous a aidés à avoir régulièrement des rencontres avec des chercheurs de différents pays européens, avec les Japonais bien sûr mais aussi avec les Américains. C'était remarquable. Par ailleurs, mon groupe avait déjà des contacts depuis longtemps avec une équipe japonaise, celle du professeur Miyako⁶⁴ de l'université de Sapporo puis d'Osaka. Miguel Ocio est allé très souvent travailler avec l'équipe de Miyako à Osaka. Patrick Pari, le grand cryogéniste de notre laboratoire, est aussi allé collaborer avec les Japonais pour mettre au point leurs frigos à très basses températures. A partir d'échanges de ce style, des réseaux se sont construits assez facilement.

A Osaka, il y avait aussi Hikaru Kawamura⁶⁵, Hajime Yoshino⁶⁶ qui est venu très souvent en France, et puis j'ai développé des collaborations à plus long terme avec Seiji Miyashita⁶⁷, devenu ensuite professeur à l'Université de Tokyo. Miyashita a fait sa thèse avec le professeur Masuo Suzuki⁶⁸ sur les systèmes frustrés et les verres de spin. Il a fait des travaux sur la susceptibilité non-linéaire des verres de spin, sur les réseaux triangulaires,

⁶³ Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology:

https://en.wikipedia.org/wiki/Ministry_of_Education,_Culture,_Sports,_Science_and_Technology

⁶⁴ "Yoshihito Miyako," Prabook (n.d.) <https://prabook.com/web/yoshihito.miyako/202299> (Accessed March 26, 2023.)

⁶⁵ H. Kawamura, "Chiral ordering in Heisenberg spin glasses in two and three dimensions", *Phys. Rev. Lett.* **68**, 3785. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.3785>; H. Kawamura, T. Taniguchi, "Spin glasses", in *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 24, K. H. J. Buschow, ed. (Amsterdam: Elsevier, 2015).

⁶⁶ See, e.g., H. Yoshino, A. Lemaître and J.-P. Bouchaud, "Multiple domain growth and memory in the droplet model for spin-glasses," *Eur. Phys. J. B* **20**, 367-395 (2001). <https://doi.org/10.1007/s100510170257>

⁶⁷ S. Miyashita and E. Vincent, "A microscopic mechanism for rejuvenation and memory effects in spin glasses," *Eur. Phys. J. B* **22**, 203–211 (2001). <https://doi.org/10.1007/s100510170128>

⁶⁸ See, e.g., "Masuo Suzuki," Prabook (n.d.). <https://prabook.com/web/masuo.suzuki/202571> (Consulted March 26, 2023.)

Kagome, etc., on a beaucoup de points d'intérêt en commun. Pendant une assez longue période, Miyashita a pu m'inviter pratiquement tous les ans pour faire un séjour d'environ deux semaines dans son équipe, c'était aussi l'occasion pour moi de visiter d'autres laboratoires au Japon, de donner des séminaires. En ce qui concerne les réflexions sur la brisure de symétrie des répliques telle qu'elle pourrait apparaître dans les expériences, les rencontres de réseau étaient particulièrement importantes. Le Japon a financé des rencontres qui pouvaient se faire au Japon—à Tokyo, à Kyoto, à Osaka—mais aussi en France et aux États-Unis.

Je me souviens en particulier d'une rencontre organisée par Ray Orbach en Californie, à Lake Arrowhead⁶⁹, un très bel endroit. Ça discutait ferme. En particulier, pour nous, les contacts avec l'équipe de Per Nordblad de l'université d'Uppsala étaient particulièrement intéressants. Il y a eu des discussions très serrées en Uppsala et Saclay pour savoir si c'étaient plutôt les droplets ou une image hiérarchique qui permettaient de mieux comprendre les résultats. Ça a été vraiment très intense. À un moment, Per Nordblad a proposé d'envoyer chez nous un étudiant thèse, Kristian Jonason⁷⁰, pour qu'on travaille de près sur des manip qu'on faisait et interprétait vraiment ensemble. Ça a été très fructueux. Je ne peux pas rentrer dans le détail de tout ça maintenant, à moins que ça vous intéresse, mais disons qu'on a développé un langage commun à partir de là. On a fait plusieurs publications en commun avec Jonason et Nordblad, qui ont suscité pas mal d'intérêt semble-t-il⁷¹.

En ce qui concerne les réseaux de collaboration, je n'ai presque pas parlé des réseaux européens, financés par des instances européennes, mais ils ont joué un rôle tout à fait crucial. Je ne m'attarderai pas si vous voulez qu'on abrège, mais on en a beaucoup bénéficié.

Il y a eu en particulier un réseau financé par l'ESF (European Science Foundation) qui s'appelait SPHINX⁷² (Statistical physics of glassy and non-equilibrium systems), dirigé par David Sherrington. Ça, ça nous a permis de nous rassembler avec tous nos collègues européens très régulièrement.

⁶⁹ Lake Arrowhead: https://en.wikipedia.org/wiki/Lake_Arrowhead,_California

⁷⁰ See, e.g., K. Jonason, *Dynamics of complex magnetic systems* (Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis, 1999).

⁷¹ See, e.g., K. Jonason, E. Vincent, J. Hammann, J.-P. Bouchaud and P. Nordblad, "Memory and chaos effects in spin glasses," *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3243 (1998). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.3243>; K. Jonason, P. Nordblad, E. Vincent, J. Hammann and J.-P. Bouchaud, "Memory interference effects in spin glasses," *Euro. Phys. J. B* **13**, 99-105 (2000). <https://doi.org/10.1007/s100510050014>

⁷² "Statistical physics of glassy and non-equilibrium systems (SPHINX)," *European Science Foundation* (n.d.) <http://archives.esf.org/coordinating-research/research-networking-programmes/physical-and-engineering-sciences-pen/completed-esf-research-networking-programmes-in-pesc/statistical-physics-of-glassy-and-non-equilibrium-systems-sphinx/science-meetings.html> (Accessed March 26, 2023.)

Après, ce réseau, il y en a eu un autre qui s'appelait DYGLAGEMEM⁷³ (Dynamics and statics of glasses and spin glasses: from aging to memory and equilibrium structures), dirigé par Parisi et qui a permis aussi beaucoup de rencontres. C'était vraiment un contexte remarquable, encourageant les gens à confronter leurs résultats, discuter, les choses ont vraiment avancé grâce à ça.

PC: À travers ces réseaux-là étiez-vous plus en interaction avec les théoriciens de champ moyen? Ou les confrontations étaient-elles surtout expérimentales ?

EV: [0:58:10] C'étaient les deux, les trois, on va dire, avec les numériciens. Les simulations numériques ont commencé à pas mal se développer. Donc, c'étaient les trois. C'était bien que les expérimentateurs—Orbach, les gens d'Uppsala, les gens de Saclay—soient amenés à confronter leurs résultats. Et c'était bien d'en discuter avec les théoriciens, avec Marc Mézard, Mike Moore, Leticia Cugliandolo, Jorge Kurchan, Silvio Franz, Giorgio Parisi, Enzo Marinari, et d'autres, pour voir un peu où on allait. La démarche qui nous a amenés vers l'arbre hiérarchique a été toute bête : « Mais comment est-ce qu'on pourrait trouver des procédures en température qui amènent le verre de spin à l'équilibre ou qui l'en approchent ? » En faisant divers essais on s'est rendu compte qu'il y a quelque chose de dissymétrique en température, et qu'il faut quelque chose comme un arbre hiérarchique. C'est ce qui s'est passé. Les théoriciens comme Marc Mézard ou Giorgio Parisi ont été amusés et intéressés de voir qu'il y avait une image comme ça qui sortait des manips. Ils ont eu envie de chercher à aller plus loin avec nous dans la réflexion.

Leticia Cugliandolo⁷⁴ et Jorge Kurchan⁷⁵ en particulier ont été très proches à une époque, ils ont passé du temps à Saclay. Avec Leticia, on a écrit plusieurs papiers en commun analysant les résultats sur les verres de spin⁷⁶.

⁷³ "Dynamics and statics of glasses and spin glasses: from aging to memory and equilibrium structures," *European Commission* (2005). <https://cordis.europa.eu/project/id/HPRN-CT-2002-00307> (Accessed May 9, 2023.)

⁷⁴ Leticia Cugliandolo: https://en.wikipedia.org/wiki/Leticia_Cugliandolo

⁷⁵ Jorge Kurchan: https://fr.wikipedia.org/wiki/Jorge_Kurchan

⁷⁶ See, e.g., E. Vincent, J. Hammann, M. Ocio, J.-P. Bouchaud, L. F. Cugliandolo, "Slow dynamics and aging in spin glasses," In: M. Rubí and C. Pérez-Vicente, eds. *Complex Behaviour of Glassy Systems*. (Berlin: Springer, 1997), 184-219. <https://doi.org/10.1007/BFb0104827>; L. F. Cugliandolo, D. R. Gempel, J. Kurchan and E. Vincent, "A search for fluctuation-dissipation theorem violations in spin-glasses from susceptibility data," *Europhys. Lett.* **48**, 699 (1999). <https://doi.org/10.1209/epl/i1999-00541-0>

- PC:** Si j'ai bien compris, dès 1995 plus ou moins, vous avez pris la responsabilité du laboratoire de Hammann. Est-ce bien le cas?
- EV:** [1:00:08] En '94, je suis devenu responsable de l'équipe, essentiellement parce que Hammann est devenu chef de service et qu'il était occupé. L'équipe, c'était en particulier Miguel Ocio, qui connaissait bien plus de choses que moi. Je m'occupais de la gestion du groupe, mais je n'étais pas celui qui disait qui va faire quoi, c'était évidemment plus collégial que ça.
- PC:** Donc, vous n'avez pas pris la direction intellectuelle à ce moment-là.
- EV:** [1:00:56] Non, il ne faut pas voir ça comme ça. Miguel Ocio, à cette époque-là a développé une nouvelle génération de manips pour mesurer les fluctuations spontanées de l'aimantation, le bruit magnétique. Il avait fait une première campagne de manips avec Hélène Bouchiat et Philippe Monod dans les années '86-'88 qui ont donné des résultats déjà intéressants. Il a repris ça plus tard—vers '98-2000—pour la thèse de Didier Hérisson⁷⁷, avec un montage beaucoup plus sophistiquée qui leur permettait d'explorer des régimes temporels beaucoup plus larges⁷⁸. Dans la première campagne de manips sur le bruit, il avait essentiellement mesuré des transformées de Fourier du bruit. Dans la deuxième campagne de manips avec Hérisson, ils étaient capables de mesurer le bruit directement, et de calculer ensuite sa fonction de corrélation sur toutes les échelles de temps qui les intéressait. Ils ont donc pu explorer des régions temporelles beaucoup plus larges qu'avant. Dans ces problèmes de vieillissement, la dynamique est non-stationnaire, il y a deux temps qui interviennent. Avoir les enregistrements de bruit et pouvoir calculer les corrélations entre n'importe quelles valeurs des deux temps, ça permet d'explorer toute la dynamique du verre de spin. Ils ont fait un travail remarquable sur l'observation des écarts à fluctuation-dissipation dans le régime du vieillissement. Ils ont mis en évidence ces écarts. Il y avait en même temps un travail théorique très important sur ces questions, en particulier du côté de Cugliandolo, Kurchan, Franz, Mézard. Ça, c'était vraiment très chouette. Quand ces trucs-là se développaient dans l'équipe, ce n'était pas du tout moi qui était en train de les impulser. Je découvrais ça émerveillé et je m'occupais de l'administration de l'équipe.

⁷⁷ Didier Hérisson, *Mesures de relations de fluctuation-dissipation dans un verre de spin*, thèse, Université Paris XI (2002). <https://www.theses.fr/2002PA112171>

⁷⁸ See, e.g., D. Hérisson and M. Ocio, "Fluctuation-dissipation ratio of a spin glass in the aging regime," *Phys. Rev. Lett.* **88**, 257202 (2002). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.257202>

PC: Vous êtes resté dans le milieu des verres de spin plusieurs décennies. Qu'est-ce qui a gardé votre intérêt actif à travers tout ce temps ?

EV: [1:03:27] Ça, c'est un point amusant. J'ai fait d'autres choses. J'ai tenté de quitter les verres de spin et je n'y suis pas vraiment arrivé. Par exemple, j'ai étudié les nanoparticules magnétiques, du genre de celles qui sont dans les ferrofluides. Si elles sont isolées, c'est la problématique du gel superparamagnétique par rapport à leur énergie d'anisotropie, mais quand elles sont en interaction, elles finissent par se comporter comme un verre de spin⁷⁹. C'est-à-dire que c'est un verre des super-spins qui sont portés par les nanoparticules. J'ai commencé sur ce sujet en étudiant un possible retournement des super-spins par un effet tunnel quantique qui était quasi-macroscopique, c'était la thèse de Romain Sappey⁸⁰. Puis finalement plus tard j'ai continué, avec en particulier Sawako Nakamae, qui a été recrutée au laboratoire, sur le comportement verre de spin dans les systèmes de nanoparticules en interaction⁸¹. Avec Vincent Dupuis, pour sa thèse⁸², nous avons étudié des ferromagnétiques désordonnés, c'est intéressant de voir comment on passe d'un ferromagnétique frustré au verre de spin par dilution magnétique progressive⁸³. Finalement il aussi obtenu beaucoup de résultats sur les verres de spin, il a en particulier mesuré de spectaculaires effets de mémoires multiples⁸⁴.

Dans les années '87-'89 est arrivée la supraconductivité à haute température. On avait les outils pour regarder l'aspect diamagnétisme. Ces

⁷⁹ D. Parker, F. Ladieu, E. Vincent, G. Mériduet, E. Dubois, V. Dupuis and R. Perzynski, "Experimental investigation of superspin glass dynamics," *J. Appl. Phys.* **97**, 10A502 (2005). <https://doi.org/10.1063/1.1850333>; D. Parker, V. Dupuis, F. Ladieu, J.-P. Bouchaud, E. Dubois, R. Perzynski and E. Vincent, "Spin-glass behavior in an interacting γ -Fe₂O₃ nanoparticle system," *Phys. Rev. B* **77**, 104428 (2008). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.104428>

⁸⁰ R. Sappey, *Étude de la dynamique de nanoparticules magnétiques dans la limite des très basses températures*, thèse, Université Paris XI (1997). <https://www.theses.fr/1997PA112237>; R. Sappey, E. Vincent, M. Ocio, J. Hammann, "Disentangling distribution effects and nature of the dynamics in relaxation measurements: the RMR method", *JMMM* **221**, 87-98 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)00378-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00378-4)

⁸¹ E. Wandersman, V. Dupuis, E. Dubois, R. Perzynski, S. Nakamae and E. Vincent, "Growth of a dynamical correlation length in an aging superspin glass," *Europhys. Lett.* **84**, 37011 (2008).

<https://doi.org/10.1209/0295-5075/84/37011>; Nakamae S., Crauste-Thibierge C., L'Hôte D., Vincent E., Dubois E., Dupuis V., Perzynski R., "Dynamic correlation length growth in superspin glass: Bridging experiments and simulations," *Appl. Phys. Lett.* **101**, 242409 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4769840>

⁸² Vincent Dupuis, *Dynamique lente des systèmes magnétiques désordonnés*, thèse, Université Paris XI (2002). <https://theses.hal.science/tel-00002623>

⁸³ V. Dupuis, E. Vincent, M. Alba and J. Hammann "Aging, rejuvenation and memory effects in re-entrant ferromagnets", *Eur. Phys. J. B* **29**, 19–26, (2002). <https://doi.org/10.1140/epjb/e2002-00257-y>

⁸⁴ J.-P. Bouchaud, V. Dupuis, J. Hammann and E. Vincent, "Separation of time and length scales in spin glasses: Temperature as a microscope," *Phys. Rev. B* **65**, 024439, (2002). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.024439>

nouveaux supras étaient vraiment très intrigants. Ils ont une structure lamellaire, donc c'était très intéressant d'étudier des monocristaux puisque les propriétés dépendaient fortement de la direction. Mais les seuls monocristaux que les gens arrivaient à faire la première année, en '87, étaient minuscules, de l'ordre de quelques microns. Nous, on avait ce qu'il fallait pour regarder ça. Hammann a lancé le sujet, et nous avons fait des séries de manip sur des tout petits monocristaux de YCaBaCuO⁸⁵, et aussi des composés avec diverses substitutions magnétiques, pour étudier l'interaction entre magnétisme et supraconductivité. Ça, c'était une problématique qui me changeait de celle des verres de spin.

Avec ces nouveaux supras, Miguel Ocio a développé des expériences sur les aspects verres de jauge⁸⁶. Dans un supra granulaire, il y a des courants qui se développent dans les grains, et l'ensemble de ces courants forme ce qu'on appelle un verre de jauge. Il y a pas mal de travail théorique là-dessus, par Michel Gingras par exemple. Miguel Ocio a fait des tas de belles manips, en collaboration avec des théoriciens russes, Misha Feigelman⁸⁷ était très intéressé, il a passé du temps dans notre laboratoire. On pourrait dire que c'est encore un exemple d'un sujet qui est allé progressivement vers les verres de spin.

J'ai aussi fait un peu de fermions lourds⁸⁸, des choses de ce genre.

Pourquoi mon intérêt pour les verres de spin a-t-il duré ? Je ne sais pas. À plusieurs moments, je me suis dit, on m'a dit : « Il faut que tu fasses un peu autre chose. » Donc, j'ai fait autre chose. Puis, en même temps, ce sujet continuait à être vivant. Il y avait toujours des interactions avec des gens. Il y avait des résultats qui paraissaient, ça ne s'est jamais arrêté. Maintenant, je suis à la retraite. Je ne fais plus d'expériences depuis une bonne dizaine d'années. En fait, pendant les dernières années de ma carrière, j'étais plutôt occupé avec des responsabilités d'organisation. Mais ma curiosité personnelle sur ce sujet est restée intacte. Du coup, je

⁸⁵ See, e.g., J. Hammann, M. Ocio, A. Bertinotti, D. Luzet, E. Vincent, A. Revcolevschi and J Jegoudez, "Low field magnetization measurements on single crystals of superconducting YBa₂Cu₃O_{7-δ}," *J. Physique* **48**, 1593-1597 (1987). <https://doi.org/10.1051/jphys:0198700480100159300>

⁸⁶ See, e.g., L. Leylejian, M. Ocio and J. Hammann, "Gauge glass properties in a granular La_{1.8}Sr_{0.2}CuO₄ superconductor," *Physica B* **194**, 1865-1866 (1994). [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(94\)91432-X](https://doi.org/10.1016/0921-4526(94)91432-X); L. Leylejian, M. Ocio, M. V. Feigelman and L. B. Ioffe, "Glassy superconductor state in La_{1.8}Sr_{0.2}CuO₄ ceramics," *Physica C* **235**, 2671-2672 (1994). [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(94\)92556-9](https://doi.org/10.1016/0921-4534(94)92556-9)

⁸⁷ Mikhail Feigelman: https://en.wikipedia.org/wiki/Mikhail_Feigelman

⁸⁸ See, e.g., P. Bonville, A. Ochiai, T. Suzuki and E. Vincent, "Heterogeneous Yb³⁺-Yb²⁺ mixed valency and unusual Kondo ground state in Yb₄As₃," *J. Physique I* **4**, 595-603 (1994). <https://doi.org/10.1051/jp1:1994163>; E. Vincent, J. Hammann, L. Taillefer, K. Behnia, N. Keller, and J. Flouquet, "Low-field diamagnetic response of the superconducting phases in UPt₃," *J. Phys. Condens. Matter*, **3**, 3517-3525, (1990). <https://doi.org/10.1088/0953-8984%2F3%2F20%2F013>

regarde ce qui se fait. J'ai plaisir à écouter des séminaires ou à discuter avec les collègues. Et j'ai écrit un ou deux papiers de revue à l'occasion⁸⁹, parce qu'on me l'a demandé. Ça m'a amené à m'intéresser d'autant plus près aux résultats actuels. Je trouve qu'il se passe des choses tout à fait intéressantes, en particulier du côté des simulations avec la collaboration Janus, et puis aussi il y a de nouvelles expériences⁹⁰.

PC: À Saclay ou ailleurs, avez-vous déjà eu la chance ou l'occasion d'enseigner sur les verres de spin ou la brisure de la symétrie des répliques ?

EV: [1:07:14] J'ai enseigné, mais pas là-dessus. J'ai été appointé comme chercheur à plein-temps, donc je n'étais pas obligé d'enseigner, mais il y a eu des occasions de faire un cours que j'ai acceptées. Dans quelques écoles d'été, j'ai fait des cours sur les verres de spin : à Beg Rohu⁹¹ et puis dans une école d'été au Luxembourg⁹². Mais ça, c'était pour un public de chercheurs. Le véritable enseignement, celui de l'université pour les étudiants qui sont en cours de cursus, j'en ai fait un peu en magnétisme, mais pas sur les verres de spin. J'ai enseigné à une époque à l'Université Paris 6 (Jussieu), surtout dans des laboratoires de chimie, avec Marie-Paule Piléni⁹³, qui faisait un travail très intéressant sur les nanoparticules magnétiques. Elle m'a d'abord demandé de venir faire des séminaires dans son équipe pour expliquer comment on fait des expériences en magnétisme, comment on peut caractériser les nanoparticules.

⁸⁹ E. Vincent and V. Dupuis, "Spin glasses: Experimental signatures and salient outcomes," In: T. Lookman and X. Ren, eds. *Frustrated Materials and Ferroic Glasses* (Berlin: Springer, 2018), 31-56.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-96914-5_2; E. Vincent, "Spin Glass Experiments," arXiv:2208.00981 [cond-mat.dis-nn] (2022). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.00981>

⁹⁰ See, e.g., I. Paga, Q. Zhai, M. Baity-Jesi, E. Calore, A. Cruz, C. Cummings, L. A. Fernandez, J. M. Gil-Narvion, I. Gonzalez-Adalid Pemartin, A. Gordillo-Guerrero, D. Iñiguez, G. G. Kenning, A. Maiorano, E. Marinari, V. Martin-Mayor, J. Moreno-Gordo, A. Muñoz-Sudupe, D. Navarro, R. L. Orbach, G. Parisi, S. Perez-Gaviro, F. Ricci-Tersenghi, J. J. Ruiz-Lorenzo, S. F. Schifano, D. L. Schlagel, B. Seoane, A. Tarancon, D. Yllanes, "Magnetic-field symmetry breaking in spin glasses". <https://arxiv.org/abs/2207.10640v2>

⁹¹ **EV:** Cette université d'été a eu lieu jusqu'en 1997 avec des caractéristiques inhabituelles qui ont contribué à sa popularité : longues conférences (18 heures), données en français, cours de voile l'après-midi. La plus grande force de ce séminaire résidait dans le haut niveau scientifique et pédagogique des conférences combiné au merveilleux site de Beg Rohu et la possibilité d'apprendre et de s'entraîner à la voile pendant l'après-midi. En 2007, G. Biroli et A. Lefèvre décident de redonner vie à cette Beg Rohu summer school, avec l'aide de son créateur Claude Godrèche, dans un format légèrement modifié, comprenant des cours en anglais et une durée de deux semaines seulement.

<https://www.envsn.sports.gouv.fr/liste-des-categories/22-actualites/1135-beg-rohu-summer-school-edition-n> ; <https://www.phys.ens.fr/spip.php?article2370&lang=en>

⁹² "Ageing and the glass transition," University of Luxemburg, Luxemburg, September 2005. See: E. Vincent, "Ageing, Rejuvenation and Memory: The Example of Spin-Glasses," In: M. Henkel, M. Pleimling and R. Sanctuary, eds. *Ageing and the Glass Transition* (Berlin: Springer, 2007), 7-60.

https://doi.org/10.1007/3-540-69684-9_2

⁹³ Marie-Paule Pileni: https://en.wikipedia.org/wiki/Marie-Paule_Pileni

Finalement c'est devenu un cours intégré dans un DEA où elle était prof. Pendant pas mal d'années, j'ai fait un cours dans ce DEA.

Par ailleurs, à l'École Centrale, dont je suis originaire, j'ai saisi une occasion à un moment. C'était en '99. Ils cherchaient quelqu'un pour faire des cours sur le magnétisme des couches minces, on n'appelait pas encore ça le nanomagnétisme⁹⁴. Quelqu'un à l'École Centrale avait compris qu'il pouvait se passer des choses dans ce domaine et a pensé qu'il serait utile d'avoir un cours là-dessus. J'ai démarré ce cours de magnétisme des couches minces, qui a très vite tourné au nanomagnétisme, c'est-à-dire : Quelles sont les propriétés du magnétisme à l'échelle nanométrique? Qu'est-ce qui change par rapport au macroscopique ? A ce moment sont arrivées les découvertes sur la magnéto-résistance géante, et le prix Nobel donné à Albert Fert⁹⁵. Il y a eu un boom d'intérêt sur le sujet. J'ai développé ce cours, je l'ai orienté vers la spintronique⁹⁶. Est-il possible de renverser l'aimantation en faisant simplement circuler des électrons ? Comment peut-on les polariser ? Etc. J'ai continué ce cours un certain temps après avoir pris ma retraite, j'aimais le contact avec les étudiants, ils ont un œil neuf sur le monde, c'est très stimulant. J'ai décidé de m'arrêter en 2019, et j'ai bien fait, parce que l'année suivante il y avait la crise du COVID, et les conditions d'enseignement sont devenues un peu difficiles.

PC: On approche de la fin de l'entretien. Est-ce qu'il y a quoi que ce soit qu'on a négligé le couvrir, que vous pensez qu'on devrait discuter sur cette époque?

EV: [1:11:15] A priori non. On a fait le tour de pas mal de choses. Dans la version écrite, je compléterai un peu. Je suis assez bavard, comme vous avez pu voir, ça part facilement quand vous posez une question, peut-être parfois un peu en désordre dans plusieurs directions... Il y a sûrement des noms que j'ai oubliés de citer, je m'en excuse d'avance auprès des intéressés. Mais on a fait le tour des principaux concepts que les expérimentateurs comme moi ont pu rencontrer dans leurs travaux et qui ont un lien avec le sujet qui vous intéresse, qui est cette brisure de symétrie des répliques. Puisque vous posez des questions là-dessus, on a pas mal parlé aussi du contexte de la recherche, des collaborations. Vraiment, je trouve qu'il n'y a rien de pire qu'un chercheur qui reste tout seul dans son laboratoire et qui est le seul à savoir ce qu'il fait. C'est important d'encourager les gens à se rencontrer et à discuter par la

⁹⁴ Nanomagnet: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nanomagnet>

⁹⁵ Albert Fert: https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Fert

⁹⁶ Voir par exemple <https://lejournel.cnrs.fr/articles/les-nouveaux-defis-de-la-spintronique>

création de réseaux. En plus, ça fait voyager. Moi, j'ai aimé voyager pendant ma carrière et je continue à voyager d'ailleurs.

PC: En conclusion, avez-vous toujours des notes, des papiers ou la correspondance de cette époque? Si oui, est-ce que vous avez un plan pour les déposer dans une archive académique à un point ou à un autre ?

EV: [1:12:38] Des archives papier, non. Pas grand-chose. J'ai gardé deux ou trois cahiers de manips en souvenir, mais franchement c'est inutilisable du point de vue archive. Les données des expériences ont été enregistrées. J'ai plus ou moins gardé tous les fichiers de données, je pense, mais les plus anciens sont difficilement exploitables. Vous savez, il faut pouvoir reconstituer la procédure expérimentale, et beaucoup de détails. Je ne pense pas que ça soit très utilisable.

Il y a une chose, quand même, que Giorgio Parisi avait demandée et qui est disponible. C'est un CD-ROM, que j'ai largement dupliqué, qui contient toutes les données des manips de bruit de Miguel Ocio et de Didier Hérisson. Giorgio Parisi s'est vraiment intéressé de près aux résultats des mesures. Il est venu à Saclay aussi. Dans les colloques, il a souvent envie de s'asseoir à une table et d'éplucher les résultats en détail, en posant toutes les questions possibles pour tout comprendre. C'était vraiment très intéressant de parler avec lui. Il s'est beaucoup intéressé aussi aux effets de rajeunissement et de mémoire. À un moment, il parlait d'oblivion⁹⁷, mais on n'a finalement rien écrit là-dessus à propos de nos résultats. Quand Ocio a fait ses manips de bruit magnétique spontané, il a dit : « Moi, je voudrais avoir ces traces de bruit pour jouer avec sur mon ordinateur. » Alors, on lui a fait un CD. Je ne sais pas ce qu'il en a tiré, mais ça, ça existe.

PC: Et la correspondance?

EV: [1:14:47] J'ai plus ou moins des archives de méls. Une grande quantité de discussions est nécessaire pour faire avancer un travail. Mais à la fin, ce qui en ressort et qui sera vraiment utile, ça peut être assez limité. Ce qui est ressorti et vraiment utile, c'est dans les publications, en principe. Ça, vraiment, ça a été vérifié et puis on peut le défendre. Je ne sais plus quelle autre personne dans son interview a dit : « Moi, mes archives, ce sont les publications. » Je trouve que c'est assez vrai. Quand on arrive plusieurs dizaines d'années après, ce sur quoi on peut vraiment s'appuyer et qui permet de remonter dans le passé, c'est ce qui est écrit dans les publications, parce que chaque mot a été pesé, chaque équation a été

⁹⁷ See, e.g., G. Parisi, "Spin glass theory: Numerical and experimental results in three-dimensional systems," *Physica A* **386**, 611-624 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.09.001>

History of RSB Interview: Éric Vincent

vérifiée, et des referees ont passé tout ça au crible. Si ça a été contredit, c'est écrit quelque part dans une autre publication. Je peux éventuellement trouver quelques data, stockés quelque part si quelqu'un veut ... dont celles de bruit de Miguel Ocio.

PC: Merci beaucoup pour cet entretien.

EV: [1:16:03] Merci à vous pour votre intérêt sur ces sujets.