

History of RSB Interview: Vincent Hakim

April 2, 2024, 16:00 to 17:00 (CET). Final revision: December 11, 2024

Interviewer:

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

Thomas Tulinski, ENS-Paris, thomas.tulinski@phys.ens.fr

Francesco Zamponi, Sapienza Università di Roma

Location:

Over Zoom from Prof. Hakim's office in Paris, France.

How to cite:

T. Tulinski and P. Charbonneau, *History of RSB Interview: Vincent Hakim*, transcript of an oral history conducted 2024 by Patrick Charbonneau, Thomas Tulinski and Francesco Zamponi, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2024, 20p. <https://doi.org/10.34847/nkl.ef63394g>

PC: Bon après-midi, Professeur Hakim. Merci beaucoup de vous joindre à nous. Comme nous en discutons à l'instant, le thème de cette série d'entretiens est l'histoire de la brisure de la symétrie des répliques en physique, que nous bornons plus ou moins de 1975 à 1995. Mais avant de se lancer dans le vif du sujet, nous avons quelques questions contextuelles à vous poser. Tout d'abord, pouvez-vous nous en dire un peu plus sur vos jours avant de rejoindre l'ENS ? Par exemple, le contexte familial, le lycée auquel vous êtes allé, les classes prépas...

VH: Bien, donc là nous commençons par la sociologie de la société française... Le lycée où j'étais [72-5] est un lycée parisien qui s'appelle Chaptal,¹ mais pour les classes préparatoires j'ai rejoint le Lycée Louis-le-Grand,² et après le lycée Louis-le-Grand je suis entré à l'ENS par le concours maths [77].

PC: Alors qu'est-ce qui vous a intéressé à la physique à cette époque-là ?

VH: Typiquement, ce qui m'a intéressé c'était la physique [des hautes énergies] [...] Je savais bien qu'il y avait de la physique des liquides, de la physique de la matière condensée et tout ça, mais ce qui m'intéressait c'était la physique des hautes énergies. J'étais un peu fasciné par l'unification des théories des champs et de la gravité... Je ne savais pas du tout ce que c'était, mais ça me paraissait très intéressant de comprendre la structure de l'univers.

PC: Et ça, dès votre enfance, ou est-ce venu par la suite ?

¹ Lycée Chaptal : https://en.wikipedia.org/wiki/Lyc%C3%A9e_Chaptal

² Lycée Louis-le-Grand : https://en.wikipedia.org/wiki/Lyc%C3%A9e_Louis-le-Grand

VH: Disons mon adolescence, plutôt la fin de mon adolescence. En première, j'ai eu un prof de physique qui nous a parlé un peu de la relativité restreinte, d'objets qui se raccourcissaient, du temps qui n'était pas exactement le même dans les différents référentiels... Ça m'a un peu perturbé : là, j'ai commencé à m'intéresser un petit peu, et je me suis aperçu qu'il y avait toutes ces choses absolument, disons à la fois baroques et merveilleuses, inaccessibles par le sens commun. Ça m'a semblé très intéressant. Voilà. Mon père, lui, était un biologiste – en fait, un médecin biologiste³ – et il m'avait abonné quand j'étais peut-être en seconde ou en première à ce qui s'appelait *Scientific American*, et qui n'était qu'en anglais à l'époque. Donc, j'essayais de lire un petit peu ces articles auxquels je ne comprenais pas grand-chose, à vrai dire, mais il y en avait qui m'intéressaient. Je me rappelle d'un article sur les cordes, de [John] Schwarz.⁴ Il y avait aussi des choses de biologie qui m'avaient intéressé : comment on fait un organisme à partir d'un œuf... Tout ça me paraissait assez mystérieux, ça me paraissait intéressant. Et quand je suis entré à l'École normale [supérieure], je me suis dit « Bon, je vais faire de la physique théorique » et on m'a dit : « Oh bien, ça va être très, très dur tu sais : il n'y a de postes. » Et puis Joseph Oesterlé,⁵ pour ne pas le citer, m'a dit : « La physique théorique, ça n'existe pas. » Mais bon, j'ai quand-même fait ça : j'ai fait un DEA de physique théorique [79]. (À l'époque, ça s'appelait le DEA.) J'ai commencé, en fait, à Orsay, à faire des théories de jauge sur réseau.

PC: Qu'est-ce qui vous a intéressé vers la théorie des champs et vers la mécanique statistique à cette époque-là ?

VH: Ce qui m'a intéressé, ce sont surtout les interactions fortes. Donc, très simplement, en fait, je voulais aller soit à l'École normale [supérieure], soit au service de physique théorique à Saclay. Mais, à cette époque-là, l'École normale—tout ça est un peu sociologique—c'était un labo quand-même assez important, mais qui ne prenait qu'un seul étudiant par an, et même plutôt un tous les deux ans. Ils avaient pris l'année précédente Marc Mézard, donc ils ont dit : « Cette année, on ne prend personne. » À part ça, j'avais postulé au service de physique théorique à Saclay, et là, nous étions deux. Après de très longues interviews, les gens ont décidé de ne

³ See, e.g., "Jacques Hakim," *thèse.fr* (n.d.). <https://theses.fr/179740733> (Accessed October 7, 2024.); Jacques Hakim, *Étude de quelques effets métaboliques de l'alcool et du fructose chez l'homme et chez le rat et de certains de leurs rapports avec la stéatose hépatique*, Thèse de médecine, Université de Paris (1968). <http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb359204364>

⁴ John H. Schwarz, "Dual-Resonance Models of Elementary Particles," *Scientific American* **232**(2), 61-69 (1975). <https://www.jstor.org/stable/24949730>

⁵ Joseph Oesterlé: https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Oesterlé

pas me prendre, mais plutôt de prendre Jean-François Logeais qui était en DEA avec moi. Donc, je suis allé à Orsay avec Victor Alessandrini et André Krzywicki, qui commençaient à s'intéresser aux théories de jauge sur réseau. Donc, j'ai commencé à travailler sur ces sujets.⁶ En commençant à travailler sur les théories de jauge sur réseau, j'ai commencé à apprendre (j'en savais déjà un peu) de la mécanique statistique.

PC: Est-ce qu'il y avait des cours en particulier au DEA sur le thème de la mécanique statistique ?

VH: Ah oui ! Des cours de mécanique statistique, il y en avait. Il y avait un très bon cours, que j'aimais beaucoup, de Bernard Jancovici.⁷ Il y avait aussi un cours de Jean-Pierre Hansen,⁸ qui n'était pas mal, qui était sur la réponse linéaire, des choses comme ça. Jean-Pierre Hansen avait fait quelque chose qui m'avait assez intéressé, qui était la dérivation du théorème H pour des processus de Markov. C'était assez intéressant. [À part] ça, il y avait des cours de théories des champs qui étaient très élémentaires, plutôt champ libre, des choses comme ça. C'était cela qu'on faisait au DEA de physique théorique à l'époque.

TT: Et en parallèle de votre intérêt pour la physique des hautes énergies, vous aviez aussi peut-être un intérêt naissant pour la neurobiologie ?

VH: Ça, c'était un peu plus tard. À l'époque, on faisait une thèse de troisième cycle. J'ai fait cette thèse de troisième cycle sur les théories de jauge.⁹ J'ai aussi été au CERN à l'époque, un mois. En '82, j'ai été à quelque chose qui a joué un rôle important : l'École de physique des Houches,¹⁰ qui m'a fait vraiment découvrir [la physique statistique moderne] [...] Moi, j'étais un physicien des hautes énergies. Je ne connaissais pas grand-chose à la physique statistique moderne. Et donc là, il y a effectivement eu, par exemple, un cours de Giorgio [Parisi] que j'avais trouvé très intéressant, où il expliquait le modèle d'Ising en champ aléatoire, les théories de verre de

⁶ Vincent Hakim, *La morphologie des amas et la mécanique quantique dans un environnement dissipatif : deux illustrations des méthodes de la physique des phénomènes critiques*, Thèse d'état, Université Paris XI (1985). http://upsaclay.focus.universite-paris-saclay.fr/permalink/f/1gllaij/33PUP_Alma_UNIMARC21165259560006051

⁷ "Bernard Jancovici (1930–2013): In Memoriam," *J. Stat. Phys.* **160**, 1–3 (2015).

<https://doi.org/10.1007/s10955-015-1213-1>

⁸ P. Charbonneau, *History of RSB Interview: Jean-Pierre Hansen*, transcript of an oral history conducted 2023 by Patrick Charbonneau, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2023, 5 p. <https://doi.org/10.34847/nkl.8c89n6x5>

⁹ Vincent Hakim, *Deux aspects [des] théories de jauge sur réseau : la diffusion et les séries en couplage fort*, thèse 3e cycle, Paris 6 (1981). <https://www.sudoc.fr/042431158>

¹⁰ J.B. Zuber and R. Stora (eds). *Recent advances in field theory and statistical mechanics*. Proceedings, 39th summer school, Les Houches, France, August 2 - September 10, 1982 (Amsterdam: North-Holland, 1984).

spin, et où il avait expliqué à la fois la brisure de symétrie des répliques, et même son interprétation qui n'était pas encore publiée à cette époque-là. Ça m'avait paru très intéressant. Il y avait aussi d'autres cours qui m'avaient plu. Il y avait un cours de Faddeev¹¹ sur les systèmes intégrables qui m'avait beaucoup intéressé.

En revenant de cette école des Houches, j'ai commencé un petit peu à travailler en mécanique statistique, simplement parce que – comme je l'ai décrit récemment, à l'occasion du départ à la retraite de Jean-Pierre Nadal – j'avais rencontré Jean-Pierre. À cette école des Houches, il y avait aussi Marc Mézard,¹² Vincent Pasquier, d'autres gens. Mais, en particulier, Jean-Pierre Nadal avait fait un séminaire. Il avait fait un travail sur les animaux, sur ce qui s'appelle les animaux dirigés, des amas dans le plan qu'il avait dénombrés avec Bernard Derrida,¹³ ou plutôt ils avaient trouvé une formule qui donnait leur nombre, mais ils ne savaient pas vraiment la démontrer.¹⁴ Donc, avec le cours de Faddeev, on a eu l'idée d'utiliser ces – je ne sais pas comment on dit en français – *matrix product state*. C'était une des premières fois, je pense, qu'on les utilisait hors du cadre intégrable et nous avons pu dénombrer ces animaux dirigés.¹⁵ Donc cela m'a fait connaître à la fois Jean-Pierre, bien sûr, un petit peu Bernard, mais pas beaucoup à l'époque, et surtout Jean Vannimenus, qui lui, après, m'avait dit : « Tu sais, il y a aussi tous les problèmes d'agrégation... » (Il y avait le papier de Witten et Sander, qui était sorti à l'époque sur la diffusion limitée par l'agrégation.¹⁶) Il m'a dit : « Voilà, on ne comprend pas ça. Est-ce que tu ne veux pas regarder ? » Donc, j'avais commencé un petit peu à travailler sur ça.

C'est vrai qu'en parallèle de ça, je ne sais pas... J'avais un peu de sentiment que la physique, tout le monde faisait un peu la même chose, qu'il n'y avait pas grand-chose de nouveau finalement. Donc, j'avais suivi le DEA de neurobiologie ici [à l'ENS]. J'avais fait aussi un stage expérimental dans un labo qui était assez récent, assez neuf, au département de biologie, le labo

¹¹ Ludvig Faddeev: https://en.wikipedia.org/wiki/Ludvig_Faddeev

¹² P. Charbonneau, *History of RSB Interview: Marc Mézard*, transcript of an oral history conducted 2022 by Patrick Charbonneau and Francesco Zamponi, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2023, 49 p. <https://doi.org/10.34847/nkl.abc22iqw>

¹³ 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>

¹⁴ J.-P. Nadal, B. Derrida, and J. Vannimenus. "Directed diffusion-controlled aggregation versus directed animals," *Phys. Rev. B*, **30**, 376 (1984). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.30.376>

¹⁵ V. Hakim and J.-P. Nadal. "Exact result for 2D directed lattice animals on a strip of finite width," *J. Phys. A*, **16** 7 L213. 1983. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/16/7/003>

¹⁶ T. A. Witten Jr. and L. M. Sander. "Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon," *Phys. Rev. Lett.* **47**, 1400 (1981). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.47.1400>

de Philippe Ascher.¹⁷ J'y avais appris effectivement de la biologie. Pendant que je faisais ce stage, il est sorti dans *Nature* un article de Francis Crick sur le modèle de Hopfield qui disait que les rêves étaient intéressants pour enlever les états spurieux dans le modèle de Hopfield.¹⁸ J'avais vu cet article, j'avais eu le cours de Giorgio sur les verres de spin, donc ça m'avait paru assez intéressant. J'avais été ressortir l'article de Hopfield¹⁹ que j'avais regardé et j'avais été voir Philippe Ascher en disant : « Qu'est-ce que tu en penses ? » Philippe Ascher, qui était le directeur du labo de neurobiologie, qui était un neurobiologiste très éminent, m'a dit : « Bof, c'est vraiment loin de ce qu'on fait. » C'est vrai que c'était assez loin. C'étaient des spins +1/-1, eux ils regardaient de vrais neurones... D'ailleurs, moi aussi je plantais des électrodes dans les neurones : tout ça était un peu loin. Bref, ça m'avait paru intéressant, mais voilà... Puis, en '83, je suis parti aux États-Unis pour un postdoc.

PC: Je vais vous ramener un petit peu avant. On reviendra à Santa Barbara plus tard. Je veux savoir un peu quelle était votre impression... Vous avez parlé du cours de Giorgio Parisi [aux] Houches. Quelle avait été la réception des gens ? C'était un enthousiasme ou c'était...

VH: Oui, oui ! Tout le monde était très content. Je me rappelle qu'il y avait Bertrand Duplantier – il était là-bas aussi – qui avait refait le calcul de Giorgio.²⁰ Tout ça paraissait... Enfin, nous étions très jeunes. À vrai dire, cela ne nous paraissait pas si miraculeux que ça. Moi, ça me paraissait bien, disons, mais je me disais : « OK, après tout, c'est une théorie de champ moyen : on maximise... D'accord, il faut briser n , on ne comprend pas très bien ce qu'on fait, mais d'une certaine façon ça nous apparaissait – enfin, moi, ça m'apparaissait – plutôt comme une sorte de performance technique, qui était amusante. Mais d'une certaine façon, j'avais trouvé ça très bien... Ce qui m'avait beaucoup impressionné, c'était Giorgio lui-même, j'avoue, plus que [sa solution au modèle SK] [...] C'était la façon dont il faisait cours. On avait l'impression qu'il réfléchissait à chaque phrase qu'il disait, que d'une certaine façon il repensait à ce qu'il faisait pendant qu'il faisait cours. Par exemple, je me rappelle, pour des maximisations avec des paramètres de Lagrange, il réexpliquait pourquoi on mettait le paramètre de Lagrange... Enfin bref, c'était une sorte de cours. On voyait qu'il pensait en même temps qu'il faisait le cours. Mais il

¹⁷ Philippe Ascher: https://en.wikipedia.org/wiki/Philippe_Ascher

¹⁸ F. Crick and G. Mitchison, "The function of dream sleep," *Nature* **304**, 111-4 (1983). <https://doi.org/10.1038/30411a0>

¹⁹ J. J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities." *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* **79**, 2554-2558 (1982). <https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554>

²⁰ B. Duplantier, "Comment on Parisi's equation for the SK model for spin glasses," *J. Phys. A.* **14**, 283 (1981). <https://doi.org/10.1088/0305-4470/14/1/027>

y avait d'autres choses qui [étaient intéressantes] [...] Je me rappelle qu'il avait expliqué la réduction dimensionnelle, et aussi pourquoi ça ne marchait pas. C'était aussi un petit peu compliqué de comprendre pourquoi ça ne marchait pas. Il y avait beaucoup de choses dans ce cours qui étaient intéressantes. D'une certaine façon, je pense qu'on doutait beaucoup moins que tous les gens seniors. En tout cas, moi, je ne me rappelle pas que j'aie mis en doute que ce n'était pas une bonne solution. En fait, ça me paraissait... Enfin, je ne sais pas. Je n'en ai pas discuté vraiment avec d'autres gens, mais j'avais l'impression que c'était un peu le sentiment de tous les gens assez jeunes.

PC: Vous mentionniez que vous êtes parti pour la Californie en 1983. Qu'est-ce qui vous a amené...?

VH: Là, franchement, c'est mon directeur de thèse, Victor Alessandrini, qui m'a dit : « Il faut que tu partes. » Donc, j'ai dit : « S'il faut partir, je vais partir! » Puis, j'avais dit : « Bof, si je vais aux États-Unis, j'aime autant aller en Californie que sur la côte Est. » La Californie, ça me faisait plus rêver que la côte Est. Donc, il m'a dit : « J'ai un copain qui (c'était Doug Scalapino²¹) vient de monter cet institut. Ça m'a l'air bien. Tu vas aller là-bas. » Et donc, il m'a dit : « Et puis si tu travailles avec Frank Wilczek,²² ça sera bien. » Moi, je suis arrivé là-bas et en fait j'étais un peu intimidé d'aller voir Franck Wilczek ou les gens de là-bas. Donc, j'ai commencé à discuter avec le postdoc avec qui je partageais mon bureau. Il se trouvait que c'était Francisco Guinea,²³ qui est quelqu'un de très bien, et que, à cette époque-là, il s'était mis à travailler – parce qu'il allait y avoir aussi un workshop après avec Tony [Anthony] Leggett²⁴ – sur la dissipation en mécanique quantique. Je me suis dit : « Tiens ! C'est amusant. » Ça, c'était un autre sujet, qui était la mesure en mécanique quantique. Donc, c'était l'occasion de comprendre réellement ce que c'est que la mesure en mécanique quantique. On a travaillé là-dessus,²⁵ et donc je n'ai en fait jamais travaillé avec Franck Wilczek. Même pratiquement, [je ne lui ai] jamais parlé, je crois. Je n'ai jamais travaillé non plus avec quelqu'un qui me l'a reproché par la suite – enfin, gentiment – Jim Langer.²⁶ Parce que Jim Langer travaillait à ce moment-là sur la solidification avec des gens comme Gaby

²¹ Douglas Scalapino: https://en.wikipedia.org/wiki/Douglas_James_Scalapino

²² Frank Wilczek: https://en.wikipedia.org/wiki/Frank_Wilczek

²³ Francisco Guinea: https://es.wikipedia.org/wiki/Francisco_Guinea

²⁴ Anthony J. Leggett: https://en.wikipedia.org/wiki/Anthony_James_Leggett

²⁵ F. Guinea, V. Hakim, and A. Muramatsu. "Diffusion and Localization of a Particle in a Periodic Potential Coupled to a Dissipative Environment," *Phys. Rev. Lett.* **54**, 263 (1985). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.54.263>; "Bosonization of a two-level system with dissipation," *Phys. Rev. B* **32**, 4410 (1985). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.32.4410>

²⁶ James S. Langer : https://en.wikipedia.org/wiki/James_S._Langer

Kotliar,²⁷ Nigel Goldenfeld,²⁸ etc. avec qui j'étais très copain. Donc, ça aussi, ça m'avait un peu intéressé à l'équation KPP,²⁹ etc. Mais bon, bref, moi, je travaillais sur la dissipation en mécanique quantique. Donc, là-bas, je n'avais pas vraiment regardé ça. En plus, c'était lié à ce truc qui avait commencé – qui m'avait un petit peu intéressé quand j'étais en France – ce DLA [*diffusion-limited aggregation*]. Donc, j'avais quand-même ça en tête. Mais bon, là-bas, je n'ai pas travaillé du tout [là-dessus]. J'ai fait ça au retour en France. Et donc, quand j'ai rencontré Jim Langer après, il m'a dit : « Mais pourquoi tu n'as jamais travaillé avec moi quand tu étais à Santa Barbara ? » Voilà, mais bon.

PC: C'étaient donc les premiers jours de l'Institute of Theoretical Physics (ITP)?

VH: Oui ! C'était à l'ITP. C'était très sympathique. On était au sixième étage. Ce n'est pas le bâtiment qui existe maintenant, qui a été construit plus tard. On était au 6ème étage d'un building qui s'appelait Ellison Hall, qui existe toujours. Il y avait deux couloirs. C'était une architecture en T, avec deux couloirs en T, donc il y avait une assez grande proximité entre les postdocs, les gens qui passaient...

PC: Donc, votre passage à la mécanique statistique, alors si ce n'est pas en Californie, c'est donc au retour...

VH: Alors voilà! C'est au retour. Je me suis dit : « Je ne vais pas retourner à Orsay... » Donc, j'ai demandé à Jean : « Est-ce que je peux venir à l'École normale ? » Il m'a dit : « Oui oui, pas de problème. » Donc, je suis venu ici. Là, en fait, les gens ne s'intéressaient pas tellement – enfin, au moins dans le groupe de mécanique statistique – à ces problèmes de dissipation en mécanique quantique. Donc, j'étais un peu isolé sur cette histoire. Par contre, c'était effectivement, très dynamique sur les verres de spin... En fait, quand j'étais aux États-Unis, Jean m'avait envoyé les papiers de Marc,³⁰ avec une petite note, en me disant : « Toulouse³¹ pense que la structure ultramétrique est intéressante pour les modèles de mémoire – Hopfield, Anderson – et lui-même veut s'orienter dans cette direction. » Donc, il m'avait envoyé ces deux papiers, le PRL de Marc – enfin, les *preprints* de l'époque, puisqu'il n'y avait pas d'internet – par courrier, en

²⁷ Gabriel Kotliar: https://en.wikipedia.org/wiki/Gabriel_Kotliar

²⁸ Nigel Goldenfeld: https://en.wikipedia.org/wiki/Nigel_Goldenfeld

²⁹ KPP—Fisher equation: https://en.wikipedia.org/wiki/KPP%E2%80%93Fisher_equation

³⁰ M. Mézard, G. Parisi, N. Sourlas, G. Toulouse, and M. Virasoro. "Nature of the Spin-Glass Phase," *Phys. Rev. Lett.* **52**, 1156 (1984). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.52.1156>; "Replica symmetry breaking and the nature of the spin glass phase," *J. Physique* **45**, 843-854 (1984). <https://doi.org/10.1051/jphys:01984004505084300>

³¹ Gérard Toulouse: https://en.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9rard_Toulouse

me disant : « C'est ça que tu dois faire. » J'avais trouvé ça très bien. Donc, quand je suis revenu ici, effectivement, tout le monde s'intéressait à ça. Il y avait Marc qui était là, Bernard qui faisait son modèle REM et son GREM, etc. Donc, ça parlait beaucoup de ça. Il y avait aussi toutes les choses de *simulated annealing*, de recuit simulé, qui étaient là... Je me rappelle que j'avais programmé un jeu où il faut remettre les pièces avec le recuit simulé. Mais en fait, moi, j'étais intéressé par cette histoire de DLA, de *diffusion-limited aggregation* et donc j'ai commencé à regarder la limite, sans bruit, disons, d'une interface contrôlée par un champ Laplacien. À cette époque-là, il y avait évidemment le groupe de Jim Langer qui faisait ça, à Santa Barbara. Et puis ici, il y avait Yves Pomeau.³² Donc, j'ai commencé un petit peu à travailler avec Yves Pomeau et surtout avec Thierry Dombre.³³ (Je partageais le bureau de Thierry Dombre.) En fait, Yves Pomeau nous l'avons peut-être vu [seulement] deux fois parce qu'il était parti aux États-Unis. Le sujet c'était de comprendre analytiquement comment les formes étaient sélectionnées dans des problèmes de solidification hydrodynamique comme le problème de Saffman-Taylor. [Avant de partir], Yves nous avait dit : « Je crois que la solution est dans une note du Landau, » ce qui était vrai, en fait, rétrospectivement³⁴. Mais cela nous a quand même pris un an pour essayer de comprendre cette remarque d'Yves et trouver cette solution.³⁵ En parallèle de ça, il y avait effectivement tous les gens qui faisaient des répliques, les brisaient... À cette époque-là, j'avais quand même refait – j'ai même retrouvé mon calcul – le calcul de Giorgio du papier où il brise les répliques et il trouve une équation aux dérivées partielles pour [obtenir] la solution. J'avais refait ce calcul-là, j'avais refait le calcul de Marc sur l'ultramétrie, mais je n'ai rien fait du tout de tout ça.

À vrai dire, mon idée, c'était d'essayer de trouver une solution un petit peu combinatoire. J'avais un petit peu réfléchi à un papier que j'avais trouvé... Il y avait bien sûr le papier de Bernard sur le modèle à énergies aléatoires,³⁶ mais il y avait aussi le modèle, le papier de David Gross et Marc,³⁷ qui redérivaient ça. Ça, ça m'avait paru quand même aussi très bien, et je me demandais si on ne pouvait pas pousser un peu ces techniques pour avoir

³² Yves Pomeau: https://en.wikipedia.org/wiki/Yves_Pomeau

³³ T. Dombre, V. Hakim and Y. Pomeau, "Sélection de la largeur des doigts dans l'instabilité de Saffman-Taylor," *Comptes rendus Acad. Sci. Sér. 2* **302**, 803-808 (1986).

³⁴ L. Landau and E. Lifshitz, *Mécanique – Volume 1* (Moscou : Mir, 1969) : p. 214, note 1, « La question de la précision de la conservation de l'invariant adiabatique... »

³⁵ R. Combescot, V. Hakim, T. Dombre, Y. Pomeau, and A. Pumir. "Analytic theory of the Saffman-Taylor fingers," *Phys. Rev. A*, **37**, 1270 (1988). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.37.1270>

³⁶ B. Derrida. "Random-energy model: An exactly solvable model of disordered systems," *Phys. Rev. B* **24**, 2613 (1981). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.24.2613>

³⁷ D. J. Gross and M. Mézard. "The simplest spin glass," *Nucl. Phys. B* **240**, 4 (1984). [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(84\)90237-2](https://doi.org/10.1016/0550-3213(84)90237-2)

une solution un peu sans réplique, plus combinatoire... J'avais réfléchi un peu, mais je n'avais jamais réussi. Je n'avais pas vraiment fait ça assez sérieusement, donc je n'avais pas obtenu de résultats très intéressants. Je me demandais si dans une approche microcanonique plus combinatoire, on ne pouvait pas redériver la solution de Gorgio... mais bon, voilà !

PC: Pouvez-vous nous écrire un peu la structure de la communauté de méca stat à Paris à ce moment-là ou à l'ENS? Est-ce qu'il y avait des séminaires? Est-ce qu'il y avait des réunions de groupes? Est-ce qu'il y avait beaucoup d'échanges?

VH: Non, il n'y avait pas vraiment de réunions de groupe... Il y avait des séminaires. Oui, certainement, il y avait des séminaires, mais des grands séminaires où tout le monde allait. Par exemple, je me rappelle, plus tard, il y avait eu – je pense – David Huse,³⁸ qui avait dû donner un séminaire sur leur approche avec Daniel Fisher, des gouttes pour les verres de spin. Sans ça, non, on discutait plus à deux... À cette époque-là, à vrai dire, moi je discutais surtout avec Thierry Dombre, parce que j'étais pas vraiment encore dans... Je n'interagissais pas trop avec Bernard directement. Après, quand j'ai commencé à travailler avec Bernard, là, il y avait Bernard qui venait dans mon bureau tous les jours, disons. Mais sans ça...

PC: Il n'y avait donc pas de groupe comme tel ?

VH: Il y avait un groupe. Il y avait Gérard Toulouse, il y avait Jean Vannimenus. Mais Gérard, il était plutôt dans... Quand j'avais déjeuné parfois avec Gérard Toulouse, c'était plus les orientations. On ne faisait pas des calculs au jour le jour. Je me rappelle que Marc avait donné un cours sur les verres de spin, sur les répliques qui était très bien, mais c'était...

PC: En '86-'87, vous êtes parti en sabbatique, à l'unité de recherche en génétique et de pathologie moléculaire, de l'Inserm...

VH: Ces années étaient peut-être un peu compliquées pour moi. [...] On avait trouvé cette solution du modèle de Saffman-Taylor et de la solidification, mais cela dit, j'avais toujours cette idée que la physique, c'était quand même un peu limité. Ou que ce n'était pas limité, mais que l'on était dans un domaine un peu labouré. Donc, je m'étais dit... Il y avait cette histoire qui m'avait aussi intéressé de comment on fait un organisme. J'avais lu – peut-être dans *Scientific American*, je ne me rappelle plus – cette

³⁸ P. Charbonneau, *History of RSB Interview: David Huse*, transcript of an oral history conducted 2023 by Patrick Charbonneau and Francesco Zamponi, History of RSB Project, CAPHÉS, École normale supérieure, Paris, 2023, 28 p. <https://doi.org/10.34847/nkl.8717c159>

découverte qui était absolument fantastique sur la mouche d'Eric Wieschaus et Nüsslein-Volhard,³⁹ où ils trouvaient des tas de gènes qui faisaient des patterns. Donc là, je m'étais dit quand même : « C'est fantastique ce truc-là ! » Puisque moi, je travaillais un peu sur les formes, je m'étais dit ça serait quand même bien que je comprenne la biologie moléculaire et que j'en fasse, après tout. Et donc, j'avais été... J'avais démarché pas mal de labos, et puis j'étais tombé sur Axel Kahn⁴⁰ qui était un ami de mon père, et qui avait accepté que j'aie dans son labo. Donc, en fait, j'ai fait un an de biologie moléculaire dans le labo d'Axel Kahn [86-87]. Au bout d'un an, il fallait que je décide ce que j'allais faire. Là, j'ai consulté beaucoup de gens et puis je suis revenu vers la physique, mais un petit peu la mort dans l'âme.

- PC:** Parce que c'était vraiment de la biologie moléculaire, les mains sur le...
- VH:** Ah oui ! Je faisais des manip, en fait. Là, je suis tombé avec quelqu'un avec qui je suis toujours très ami, qui s'appelle Pascal Maire,⁴¹ et je me suis rendu compte qu'ils ne faisaient pas que des règles de trois. Là, par contre, on a discuté 24 heures sur 24. En une année, j'ai appris beaucoup, beaucoup de biologie moléculaire, et de biologie en général. Ça n'a pas joué directement de rôle au début, mais ça a quand même été très important parce que ça m'a permis de comprendre ce que les gens faisaient en biologie par la suite. Mais bon, ça n'a pas de rapport avec les répliques.
- TT:** Il semblerait qu'au début des années '90, vous vous soyez intéressé à des idées liées à la brisure de symétrie des répliques dans le cadre d'une analogie avec la DLA.⁴²
- VH:** Ça, c'était plus une idée de Bernard. Donc, Bernard voulait qu'on essaie de calculer des recouvrements dans la DLA, mais j'avoue que ça ne m'était pas paru enthousiasmant... J'avais fait ça, mais je ne trouve pas que cela soit très passionnant... D'ailleurs, c'est un papier qui a zéro postérité. Je pense [que] ce n'était pas très prometteur, cette voie. Giorgio, à vrai dire, a travaillé aussi sur DLA à cette époque-là. Il avait fait un papier avec Yi-

³⁹ C. Nüsslein-Volhard and E. Wieschaus. "Mutations affecting segment number and polarity in *Drosophila*," *Nature* **287**, (1980). <https://doi.org/10.1038/287795a0>

⁴⁰ Axel Kahn: https://en.wikipedia.org/wiki/Axel_Kahn

⁴¹ See, e.g., P. Maire, S. Gautron, V. Hakim, C. Gregori, F. Mennecier and A. Kahn, "Characterization of three optional promoters in the 5' region of the human aldolase A gene," *J. Mol. Bio.* **197**, 425-438 (1987). [https://doi.org/10.1016/0022-2836\(87\)90556-0](https://doi.org/10.1016/0022-2836(87)90556-0)

⁴² B. Derrida, V. Hakim, and J. Vannimenus, "Growth histories and overlap distributions of diffusion-limited-aggregation clusters," *Phys. Rev. A* **43**, 888 (1991). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.43.888>

Cheng Zhang sur la correction en $1/d$.⁴³ Avec Jean Vannimenus, on avait calculé des choses sur l'arbre de Bethe, et Giorgio avait aussi fait ça. Ils avaient calculé la correction en $1/d$, mais qui n'était pas non plus très passionnant. Le problème, je crois, est resté un peu difficile, mais là, il n'y a pas eu de solution miracle, comme avec les répliques.

TT: Quand on discutait l'autre jour, vous disiez avoir fait un calcul de répliques avec Bernard et Jean [que vous n'avez jamais publié] ?

VH: Bernard a toujours été intéressé à relier son approche pour le REM et celle des répliques... Bernard, par exemple, avait réussi à calculer les corrections en $1/N$ avec son approche... Il avait assez envie de comprendre comment pour le modèle – disons le REM – cela [pouvait se] faire directement par les répliques. Donc, on avait regardé un petit peu, mais on n'avait jamais été très loin. On s'était un peu perdu dans les maximisations et minimisations, je crois – parce que quand tu fais des n qui tendent vers 0, après ce n'est plus très clair comment maximiser, minimiser, enfin, [ce sont] des choses que vous savez beaucoup mieux que moi.

TT: Dans un exposé que vous avez donné pour le colloquium du département de physique en 2020, vous avez dit qu'un des événements qui avaient été clés dans votre accès aux neurosciences, c'était votre participation à un colloque organisé par Agnessa Babloyantz en '93. Qu'en est-il ?

VH: Oui, ça, tout à fait, mais là, ça n'a pas de rapport du tout avec les répliques. En fait, on avait fait un calcul avec Wouter Rappel.⁴⁴ Enfin, lui, il avait fait des simulations; moi, j'avais fait le calcul. L'idée – c'était très influencé par Yves Pomeau – était que la turbulence est un problème non résolu. Donc, on avait regardé des oscillateurs en grande dimension, l'équation de Ginzburg-Landau en grande dimension, dans l'idée que peut-être en allant en grande dimension, ça simplifierait les choses. Là, on avait trouvé une sorte de chaos collectif où chaque oscillateur fait quelque chose, mais la valeur moyenne fait un truc plus compliqué et chaotique.⁴⁵ J'avais été invité – je ne sais pas pourquoi – à cette conférence aux îles Canaries, à Lanzarote, par Agnessa Babloyantz, et j'avais raconté ça. À la fin, il y a quelqu'un qui s'appelle Reinhard Eckhorn, qui est venu me voir en me disant : « Ce que vous avez raconté, c'est bien. » Lui, il s'intéressait aux

⁴³ G. Parisi and Yi-Cheng Zhang, "Eden model in many dimensions," *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1791 (1984).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.53.1791>

⁴⁴ V. Hakim and W. J. Rappel, "Dynamics of the globally coupled complex Ginzburg-Landau equation," *Phys. Rev. A* **46**, R7347(R) (1992). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.46.R7347>

⁴⁵ M. L. Chabanol, V. Hakim and W. J. Rappel, "Collective chaos and noise in the globally coupled complex Ginzburg-Landau equation," *Physica D* **103**, 1-4 (1997). [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(96\)00263-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(96)00263-1)

oscillations, aux rythmes cérébraux. Il m'a dit : « Quand j'enregistre dans le cerveau, il y a des rythmes mais les neurones eux-mêmes ne sont pas du tout périodiques. Est-ce que vous pourriez expliquer ça ? » Alors j'avais dit : « Bah, non, je ne peux pas, mais... » Mais bon, je m'étais dit quand-même, oui : « Est-ce qu'on pourrait trouver un modèle de ça ? » Je n'avais pas de très bonnes idées ; j'avais suggéré ça à un postdoc, qui est justement Wouter Rappel, mais on n'avait fait que des modèles avec de l'excitation. Il a publié un papier,⁴⁶ mais cela ne me satisfaisait pas, donc je n'ai pas participé. Et puis après, quand Nicolas Brunel est revenu de son stage post-doctoral à Rome avec Daniel Amit... Lui, il avait fait des simulations que des modèles intègre-et-décharge excitateurs-inhibiteurs, et il s'était aperçu avec Daniel Amit [qu'il y avait des oscillations].⁴⁷ Eux, ils voulaient [...] un modèle où les neurones déchargeaient à bas taux, ce qu'ils avaient réussi à faire en balançant l'excitation et l'inhibition. Mais là-dedans, il y avait des oscillations qui apparaissaient dans certains régimes de paramètres, [oscillations] qu'ils avaient bien mis de côté, parce que ça les embêtait plus qu'autre chose. Quand Nicolas m'a montré ça, je me suis dit : « Mais c'est exactement ce que Reinhardt Eckhorn m'a raconté ! » J'ai dit à Nicolas : « Écoute, intéressons-nous à ces oscillations plutôt que les mettre de côté. » Et donc là, effectivement, avec Nicolas, j'ai rebasculé un petit peu vers les neurosciences.⁴⁸

TT: On a parlé plus tôt de la réaction de Philippe Ascher lorsque vous lui avez parlé du modèle d'Hopfield. Est-ce que, selon vous, cette posture était représentative ?

VH: Complètement, complètement. Je pense que le papier d'Hopfield – en tout cas en France – sur les neurobiologistes, avait zéro impact. L'idée de Philippe, c'était que peut-être on peut passer directement [du récepteur à la guérison.] Si on a une perspective où on veut, disons, guérir les maladies, ou des choses comme ça, on peut se dire – ce qui n'est peut-être pas faux – qu'on peut passer directement du récepteur à la guérison. En agissant avec une drogue sur un récepteur, peut-être que ça va marcher. Il y a des tas de choses en médecine, où on ne comprend pas toutes les étapes, mais on arrive quand même à aider les gens. C'était plutôt ça [l'approche des neurobiologistes à l'époque]. Les gens travaillaient sur les canaux ioniques dans un seul neurone. Moi, ce que j'avais fait, c'est que j'avais mis des

⁴⁶ W. J. Rappel and A. Karma, "Noise-induced coherence in neural networks," *Phys. Rev. Lett.* **77**, 3256 (1996). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3256>

⁴⁷ See, e.g., D. J. Amit and N. Brunel, "Model of global spontaneous activity and local structured activity during delay periods in the cerebral cortex," *Cerebral cortex* **7**, 237-252 (1997). <https://doi.org/10.1093/cercor/7.3.237>

⁴⁸ N. Brunel and V. Hakim, "Fast global oscillations in networks of integrate-and-fire neurons with low firing rates," *Neural Computation*. **11**, 1621–1671 (1999). <https://doi.org/10.1162/089976699300016179>

électrodes dans des neurones d'escargot, et on essayait de regarder si on ajoute un petit truc. Est-ce que ça le fait décharger plus, est-ce que ça le fait décharger moins ? On n'avait pas du tout les moyens d'enregistrer plein de neurones à la fois.

TT: À cette époque, il y avait un certain nombre de groupes de discussion qui avaient été créés entre physiciens statisticiens et neurobiologistes. Que pourriez-vous nous en dire ?

VH: Gérard Toulouse, quand il s'était intéressé au modèle de Hopfield avec Jean-Pierre Nadal, a été voir Jean-Pierre Changeux⁴⁹ et donc ils ont écrit plusieurs articles... Enfin, je crois qu'ils en ont écrit [plusieurs]. Gérard, je ne sais pas combien il en a écrit, mais en tout cas ils ont écrit un PNAS avec Jean-Pierre Changeux.⁵⁰ Puis, Gérard s'est brouillé assez fortement avec Jean-Pierre Changeux, et Jean-Pierre a dû écrire un autre papier.⁵¹ Il y avait Stanislas Dehaene,⁵² qui à l'époque était un étudiant de master, donc voilà. Mais disons, leur brouille a un peu aussi coupé les ponts complètement entre la neurobiologie et la physique à cette époque-là. Jean-Pierre Changeux, était quand-même peut-être le neurobiologiste qui était le plus important en France, ou en tout cas à Paris.

PC: C'était un conflit au niveau personnel, au niveau scientifique ?

VH: Je pense que, comme souvent avec Gérard, c'était au départ des conflits scientifiques, mais qui ont peut-être un peu dégénéré. Enfin, les deux, je pense, sont de fortes personnalités. En fait, je ne sais pas très bien, parce que je n'y étais pas, mais je pense que c'est plus que Jean-Pierre Changeux voulait soutenir sa théorie de sélection neuronale. Il a toute une théorie de la formation des réseaux de neurones par sélection plutôt que par apprentissage et je pense que Gérard trouvait que c'était... Peut-être qu'il n'y avait pas matière à soutenir vraiment cette théorie, mais enfin... Après, je crois que ça a vraiment dégénéré.

⁴⁹ Jean-Pierre Changeux: https://en.wikipedia.org/wiki/Jean-Pierre_Changeux

⁵⁰ G. Toulouse, S. Dehaene and J.-P. Changeux, "Spin glass model of learning by selection," *Proc. Nat. Acad. Sci.* **83**, 1695-1698 (1986). <https://doi.org/10.1073/pnas.83.6.1695>; J.-P. Nadal, G. Toulouse, J.-P. Changeux and S. Dehaene, "Networks of formal neurons and memory palimpsests," *Europhys. Lett.* **1**, 535 (1986). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/1/10/008>

⁵¹ S. Dehaene, J.-P. Changeux and J.-P. Nadal, "Neural networks that learn temporal sequences by selection," *Proc. Nat. Acad. Sci.* **83**, 2727-2731 (1987). <https://doi.org/10.1073/pnas.84.9.2727>

⁵² Stanislas Dehaene : https://en.wikipedia.org/wiki/Stanislas_Dehaene

- TT:** Quand il y a eu les développements de Amit, Gutfreund, Sompolinsky,⁵³ autour du modèle d'Hopfield, est-ce que c'est quelque chose que vous suiviez malgré tout ?
- VH:** Oui, oui ! Je crois que je l'avais entendu aux Houches. Je ne sais plus quand c'était. Je pense que c'était Amit – je ne sais plus très bien – qui avait expliqué ça à une conférence des Houches où j'étais. Ça m'avait semblé pas mal, mais, disons, pas spectaculaire non plus. Par contre, le truc de Gardner m'avait semblé beaucoup plus intéressant en fait.⁵⁴ Mais quand même, il m'était peut-être resté un peu de ce que Philippe Ascher m'avait dit et aussi ce que je savais. Il y avait quand même une foule de physiciens qui ne savaient pas ce que c'étaient des neurones, et qui s'en fichaient, à vrai dire. Si tu parlais à Bernard, le fait que des neurones existent, il s'en fichait complètement. Alors que ce n'était certainement pas vrai pour Gérard Toulouse [et d'autres], mais leur connaissance de ce qu'était la neurobiologie était hyper limitée. Donc moi, je partageais aussi un peu ce sentiment que bon, c'était sympathique, le modèle de Hopfield, mais on était quand même assez loin du vrai cerveau.
- PC:** Est-ce que vous avez interagi avec Elizabeth Gardner⁵⁵ pendant son temps à Paris ?
- VH:** Malheureusement, non. Bernard me l'avait présentée, mais on n'a jamais vraiment discuté... Elle, elle était à Saclay ; moi, j'étais ici. Je pense qu'elle était aussi assez timide. Mais certainement Bernard avait une grande estime pour elle, ça, c'est sûr.
- PC:** De votre point de vue, est-ce que les verres de spins ont permis des progrès en neurosciences ou non, à cette époque-là ?
- VH:** À vrai dire, en neurosciences, non. Ils n'ont pas permis de progrès. Par contre, ça a influencé très durablement un certain nombre de gens, et c'est vrai que l'approche attracteurs, finalement, est quelque chose d'important. D'abord, il y a eu tout un tas d'autres attracteurs, beaucoup plus structurés, mais ça, c'était presque indépendant de Hopfield. Donc, il y a eu tout ce que les gens appellent le *ring model*. Et puis les gens ont vu des attracteurs dans les réseaux de neurones. Simplement cette idée que les mémoires sont peut-être des attracteurs, qu'on peut sauter d'un

⁵³ See, e.g., D. J. Amit, H. Gutfreund and H. Sompolinsky, "Storing infinite numbers of patterns in a spin-glass model of neural networks," *Phys. Rev. Lett.* **55**, 1530 (1985).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1530>

⁵⁴ E. Gardner, "Maximum storage capacity in neural networks," *Europhys. Lett.* **4**, 481 (1987).

<https://doi.org/10.1209/0295-5075/4/4/016>

⁵⁵ Elizabeth Gardner: [https://en.wikipedia.org/wiki/Elizabeth_Gardner_\(physicist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Elizabeth_Gardner_(physicist))

attracteur à l'autre, ça a certainement eu une grosse influence. Par exemple, Nicolas Brunel ou Misha Tsodyks,⁵⁶ ce sont des choses très importantes pour eux. C'est vrai qu'il y a eu des travaux expérimentaux qui ont essayé de voir ça dans un cadre un peu plus élaboré que le modèle d'Hopfield, et c'est vrai que c'est quand même quelque chose qui est important [...] Il y a un papier que je trouve très très joli, qui est un papier de Misha Tsodyks sur le système visuel où en regardant... Le système visuel est ordonné par des cartes d'orientation. Donc, Misha Tsodyks, avec Amiram Grinvald, ont fait une imagerie du cerveau du chat, sans images, juste dans le cortex visuel. Là, on voit par l'activité spontanée qu'on peut reconstituer toutes les colonnes de direction, les préférences de direction des neurones. Donc, on a l'impression qu'ils sautent d'attracteur à attracteur. Je trouve ça un papier très impressionnant, mais qui était écrit en 1999,⁵⁷ avec une version un peu plus élaborée en 2003,⁵⁸ qui sont des papiers purement expérimentaux, mais qui sont vraiment très inspirés par cette image d'attracteur [...]

TT: Vous disiez que le manque de technique expérimentale pour enregistrer simultanément des grandes populations de neurones à l'époque limitait peut-être l'interaction entre physique statistique et neurosciences. Est-ce que les progrès qui ont été faits depuis y changent quelque chose ?

VH: En neurosciences, je pense que le paysage n'a plus rien à voir avec ce qu'il était. Maintenant, enregistrer des canaux ioniques, c'est complètement hors de mode, et donc la plupart des labos – enfin, beaucoup de labos expérimentaux – font des enregistrements *in vivo*, et ils essaient d'enregistrer le plus de neurones possibles. Dans ces conditions, simplement pour analyser les données, il faut des méthodes de traitement du signal un peu sophistiquées. Ça commence avec – je ne sais pas – de l'analyse en composantes principales, mais il y a des tas de raffinements de cela. Simplement même pour analyser les données, il faut avoir une approche numérique, et donc maintenant, il y a une interaction absolument essentielle entre les gens qui font des choses numériques – au moins des choses numériques – et les gens qui font des expériences. C'est aussi vrai, je dirais – un peu moins, mais ça commence à l'être vraiment aussi – en biologie du développement, où là, à partir du moment, où l'on dit qu'une partie de la signalisation est due à de la mécanique. Il faut alors reconstruire les forces, reconstruire les contraintes, et donc, et même si

⁵⁶ Misha Tsodyks: https://en.wikipedia.org/wiki/Misha_Tsodyks

⁵⁷ M. Tsodyks, T. Kenet, A. Grinvald and A. Arieli, "Linking spontaneous activity of single cortical neurons and the underlying functional architecture," *Science* **286**, 1943-1946 (1999). <https://doi.org/10.1126/science.286.5446.1943>

⁵⁸ T. Kenet, D. Bibitchkov, M. Tsodyks, A. Grinvald and A. Arieli, "Spontaneously emerging cortical representations of visual attributes," *Nature* **425**, 954-956 (2003). <https://doi.org/10.1038/nature02078>

on veut reconstruire le développement d'un organisme en regardant toutes les cellules, à ce moment-là aussi il faut beaucoup d'analyses [de données] [...] On ne peut pas le faire simplement comme on faisait habituellement en biologie, qui était plus ou moins logique [à savoir] [...] de se dire : j'ai A qui donne B qui donne C.

- FZ:** Et les idées, les développements de Hopfield, les idées, par exemple, d'attracteur continu un peu les travaux...
- VH:** Ce n'est pas vraiment Hopfield les attracteurs continus, mais oui...
- FZ:** Mais est-ce que c'est quelque chose qui a eu un impact du côté des neurosciences ?
- VH:** Un impact énorme. Énorme. Si tu veux, tous les attracteurs continus, maintenant, on les voit.
- FZ:** Pardon, mais je voulais dire les modèles. J'étais toujours un peu intéressé à l'interface entre neurosciences et physique statistique, donc je me demandais si les modèles d'attracteurs continus qui ont été développés du côté un peu physique statistique, tels les travaux de Rémi Monasson,⁵⁹ de Sompolsky, etc. Est-ce que c'est quelque chose qui peut faire un vrai pont entre les neurosciences et la physique statistique ?
- VH:** C'est plus qu'un vrai pont, parce que disons ces modèles... La première chose que les gens ont vue, ce sont des cellules de direction de la tête. Ça, ça a été vu par quelqu'un qui s'appelle Taube dans les années '84, disons, et où là, il y a des cellules chez le rat qui codent pour la direction de la tête, c'est-à-dire pas par rapport au corps.⁶⁰ Mais dans l'absolu, ils sont actifs, un ensemble de cellules, quand la tête pointe dans une direction, et un autre ensemble quand elle pointe dans une autre direction. Donc, les gens commençaient par faire des modèles à attracteurs, où l'idée était que c'était des populations différentes [qui codaient pour différentes directions] [...] Les premiers qui ont fait ça, c'est Jacques Droulez,⁶¹ Kechen

⁵⁹ See, e.g., R. Monasson and S. Rosay, "Transitions between spatial attractors in place-cell models," *Phys. Rev. Lett.* **115**, 098101 (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.098101>

⁶⁰ J. S. Taube, R. U. Muller and J. B. Ranck Jr. "Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis," *J. Neurosci.* **10**, 420-35 (1990). <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.10-02-00420.1990>

⁶¹ J. Droulez and A. Berthoz. "A neural network model of sensoritopic maps with predictive short-term memory properties," *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* **88**, 9653-7 (1991). <https://doi.org/10.1073/pnas.88.21.9653>

Zhang,⁶² et après Haim Sopolinsky⁶³ qui a proposé son *ring model*, qui est exactement la même idée, mais qui est plus tractable analytiquement. Ça a été aussi appliqué à ce que les gens appellent les cellules de lieu, où il y a des cellules qui déchargent quand la souris est à un certain endroit dans son environnement, donc à 2D au lieu de 1D. Donc, ça déjà, ce sont des choses que les gens voient.

Il n'y avait aucune preuve que c'était un modèle attracteur jusqu'à ce que, disons, il y a peut-être six ans, on trouve quelque chose comme ça. Chez la mouche, on trouve une structure, qui a une forme ellipsoïde, qui s'appelle l'*ellipsoid body*, où on voit cet attracteur. C'est-à-dire que l'ont voit l'activité qui est sur cet anneau.⁶⁴ En plus, chez la drosophile on a de la connectomique. On sait comment sont les connexions, donc ça reconstitue tout à fait, non seulement l'attracteur en anneau, mais même une autre couche de cellules qui dit comment cette activité doit tourner quand la mouche tourne la tête pour qu'elle indique toujours la direction. À la fois quand la mouche tourne la tête, il faut faire tourner l'activité sur l'anneau. Il y avait un modèle qui avait été proposé par McNaughton,⁶⁵ que je trouvais un peu alambiqué, un petit peu genre Ptolémée avec une autre couche de cellules qui fait tourner l'activité, mais c'est ce qu'on voit dans la mouche. Donc ça, maintenant, c'est complètement *mainstream*. Et là, par exemple, il y a Ruben Portugues qui a trouvé l'analogie chez le poisson, où il y a de nouveau une activité qu'on peut voir chez le poisson.⁶⁶ Parce que maintenant, chez le poisson, on peut aussi faire de l'imagerie et voir l'activité des neurones. Donc ça, il n'y a pas de doute que ça existe, en tout cas, chez la mouche et chez le poisson; chez la souris, on ne connaît pas encore la connectivité, mais je pense que beaucoup de gens pensent que c'est aussi le cas aussi chez la souris. Maintenant, il y a une très, très grande connexion.

⁶² K. Zhang, "Representation of spatial orientation by the intrinsic dynamics of the head-direction cell ensemble: a theory," *J. Neurosci.* **16**, 2112-26 (1996). <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.16-06-02112.1996>

⁶³ R. Ben-Yishai, R. L. Bar-Or and H. Sompolinsky, "Theory of orientation tuning in visual cortex," *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* **92**, 3944-9 (1995). <https://doi.org/10.1073/pnas.92.9.3844>

⁶⁴ S. S. Kim, H. Rouault, S. Druckmann and V. Jayaraman. "Ring attractor dynamics in the *Drosophila* central brain," *Science* **356**, 849-53 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aal4835>

⁶⁵ A. Samsonovich and B. L. McNaughton, "Path Integration and Cognitive Mapping in a Continuous Attractor Neural Network Model," *J. Neurosci.* **17**, 5900-20 (1997). <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.17-15-05900.1997>

⁶⁶ Petrucco, L., Lavian, H., Wu, Y.K. *et al.* "Neural dynamics and architecture of the heading direction circuit in zebrafish," *Nat. Neurosci.* **26**, 765–73 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41593-023-01308-5>

Tu vois, il y a ce papier de Sompolinsky sur le chaos dans les réseaux récurrents.⁶⁷ C'est quelque chose qui est maintenant tout à fait à la mode... La vue, maintenant – enfin, telle qu'elle est aujourd'hui, ce qui est peut-être un peu extrême... Si tu prends les labos de neurobiologie qui font la neurobiologie des systèmes, ce qu'ils font, c'est qu'ils essaient de mettre l'activité des neurones dans un espace de grande dimension. Chaque neurone a sa décharge et donc tu as un espace qui est aussi grand que le nombre de neurones que tu enregistres et tu regardes la trajectoire que fait l'activité de cette population quand tu fais quelque chose. C'est ce que les gens appellent une approche « système dynamique, » ce qui est effectivement le cas. Là, l'idée, c'est que quand tu fais ça dans les expériences, tu t'aperçois que la dynamique est dans un sous espace de petite dimension par rapport au nombre de neurones : comment est-ce que tu utilises ça ? Là, on est en plein [...] dans une approche système dynamique, avec des choses chaotiques, et il faut comprendre comment tu peux utiliser ça. Là, c'est clair qu'on est en plein dans une interaction.

TT: Pour en revenir aux répliques, je crois votre seule publication un peu avec un calcul de répliques dedans, c'est celle avec Nicolas Brunel, Jean-Pierre Nadal et puis...

VH: Tout à fait. Là, on a fait ce calcul, en fait, à partir de résultats expérimentaux, parce que c'est là qu'on a commencé à collaborer vraiment avec les neurobiologistes ici. Ce qu'ils avaient mesuré, ce sont les forces synaptiques, donc les forces des synapses sur une cellule particulière du cervelet. C'est une cellule où il y a 100 000 synapses, donc ça permet de faire de la statistique, disons. Ils regardaient une synapse excitatrice – ils avaient mesuré, je crois, 600 connexions – et ils se sont aperçus que 80% des synapses qu'ils pensaient exister étaient à zéro. Donc, on a commencé à discuter avec eux un petit peu par hasard, mais ils nous ont dit : « David Marr a proposé que cette cellule agisse comme un perceptron, est-ce que vous pourriez expliquer que ces cellules ont beaucoup de connexions à zéro ? » Là, effectivement on a fait ce calcul assez simple pour voir quelle était la distribution des forces synaptiques d'un perceptron dont les synapses seraient toutes excitatrices et qui apprendrait jusqu'à sa capacité maximum. Donc, on a fait ça et on s'est aperçus qu'effectivement il y avait un grand pic à zéro, parce qu'il y a une contrainte à zéro, et que quand tu veux changer les synapses, tu ne peux

⁶⁷ H. Sompolinsky, A. Crisanti and H. J. Sommers, "Chaos in Random Neural Networks," *Phys. Rev. Lett.* **61**, 259 (1988). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.259>

pas les descendre en dessous de zéro. Donc, voilà, on a fait ça et effectivement, ça reproduisait pas mal les résultats expérimentaux.⁶⁸

PC: Vous avez parlé un peu des calculs de répliques que vous avez faits, mais ça vous est arrivé d'enseigner les calculs de répliques ?

VH: Pas vraiment, non. Je me rappelle que Nicolas a fait un cours aux Houches, où il a fait un cours sur les modèles attracteurs, pas vraiment sur les modèles de réplique.⁶⁹ C'était une époque, le début des années 2000, où ce n'était plus à la mode. Si vous regardez un livre, qui est une sorte de livre de base comme le livre de Dayan et Abbott qui s'appelle *Theoretical Neuroscience*⁷⁰ – Larry Abbott, c'est quelqu'un qui connaît ces choses-là, un petit peu en tout cas – bien, il n'y a pas une mention des réseaux attracteurs. Pas une. Donc, Nicolas, je crois a fait ce cours en 2003 aux Houches, et il avait fait ce cours sur les réseaux de Hopfield, et puis les développements de Tsodyks, Feigel'man, etc. Mais il l'avait fait en me disant : « Tu sais, je pense que c'est quand même quelque chose qui est important, » mais c'était pas du tout ce qui était à la mode. Nous, on a enseigné pas mal les neurosciences computationnelles, mais en fait, on l'a enseigné à un public un peu interdisciplinaire qui allait des biologistes aux physiciens, et donc n'est pas vraiment entrés dans des calculs pour le modèle de Hopfield, simplement parce que les étudiants n'étaient pas vraiment adaptés. Effectivement, il y a des étudiants physiciens qui nous ont dit : « Mais on voudrait bien que vous expliquiez ça ! » Mais non.

PC: On approche la fin de notre entretien. Est-ce qu'il y a des éléments ou des périodes ou des idées qu'on a négligées, que vous pensez qu'on devrait revisiter ?

VH: Non, je ne pense pas. Je pense que dans cette histoire, les gens... Il y a évidemment les neurosciences, mais, par exemple, Giorgio, je me rappelle qu'il y avait une période où il s'intéressait à l'immunologie,⁷¹ donc c'est vrai que ça essayait de partir un peu dans toutes les directions. Disons que

⁶⁸ N. Brunel, V. Hakim, P. Isope, J.-P. Nadal and B. Barbour. "Optimal information storage and the distribution of synaptic weights: perceptron versus Purkinje cell," *Neuron*. **43**,745-57 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.08.023>

⁶⁹ N. Brunel, "Course 10 - Network Models of Memory," In: *Methods and Models in Neurophysics: Lecture Notes of the Les Houches Summer School 2003*, C. Chow, B. Gutkin, D. Hansel, C. Meunier, J. Dalibard, eds. (Amsterdam: Elsevier, 2005): 407-476. [https://doi.org/10.1016/S0924-8099\(05\)80016-2](https://doi.org/10.1016/S0924-8099(05)80016-2)

⁷⁰ Laurence F. Abbott, Peter Dayan, *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems* (Cambridge: MIT Press, 2005).

⁷¹ See, e.g., G. Parisi, "A simple model for the immune network," *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* **87**, 429-433 (1990). <https://doi.org/10.1073/pnas.87.1.429>

History of RSB Interview: Vincent Hakim

la physique statistique essayait d'envahir – ou essaie toujours d'envahir – tous les domaines.

PC: Finalement, avez-vous des notes, des papiers ou de la correspondance de cette époque ? Et si oui, avez-vous un plan pour les déposer dans une archive académique éventuelle ?

VH: Non, mais pratiquement aucune correspondance. J'ai cette petite note de Jean, c'est tout, et ce *preprint*. Je pourrais le déposer ou en faire une photo, si vous voulez. J'ai retrouvé mes photocopies originales du papier de Giorgio, de très, très mauvaise qualité. Voilà!

PC: Professeur Hakim, merci beaucoup pour votre temps et pour cette discussion.

TT: Merci.