



Sébastien Balibar



Leticia Cugliandolo



Stéphane Douady

Comment je suis devenu **Physicien**

SOUS LA DIRECTION DE
FABRICE NICOT



Albert Fert



Daniel Kaplan



Étienne Klein



Michelle Leduc



Annick Loiseau



Jean-Paul Poirier



Jean-Claude Risset



Stéphane Roux



Ionel Solomon

Le Cavalier Bleu
ÉDITIONS

Fabrice Nicot est journaliste scientifique à *Science & Vie junior*.

À mes Parents

Sommaire

<i>Préface de Maciek Stepinski</i>	5
Introduction	9
1. Sébastien Balibar	17
2. Leticia Cugliandolo	31
3. Stéphane Douady	43
4. Albert Fert	59
5. Daniel Kaplan	75
6. Étienne Klein	89
7. Michèle Leduc	105
8. Annick Loiseau	121
9. Jean-Paul Poirier	137
10. Jean-Claude Risset	153
11. Stéphane Roux	167
12. Ionel Solomon	181
Annexes	
Glossaire	196
Cahier pratique	199
(les formations, les métiers, les secteurs, les sites utiles, à lire ou à consulter)	

Introduction

Qui fut le premier physicien de l'Histoire ? Le mot « physique » venant du grec « phusikè », « connaissance de la nature », il faut donc chercher du côté des fins observateurs de notre monde pour le trouver. Un nom semble alors s'imposer : Thalès de Milet (625-547 av. J.-C.). Ne connaissait-il pas intimement la nature pour annoncer cet inquiétant prodige : une visite de la nuit au beau milieu du jour ? En 585 avant Jésus-Christ, Thalès aurait en effet prédit une éclipse du soleil. Oui, voilà bien un candidat sérieux. Seulement... La vie du fondateur de l'École milésienne, philosophe, mathématicien, se perd dans la nuit des temps. Son histoire, devenue sa légende, colportée au cours des siècles, a tant grossi qu'on ne sait plus guère aujourd'hui qui il fut vraiment : un homme aux talents multiples ou bien la figure idéalisée du sage grec par excellence ?

Continuons notre enquête. Voici Démocrite (460-370 av. J.-C.) qui se présente à nous. Avec Leucippe (460-370 av. J.-C.), il élabore la première théorie atomique. Selon lui, la nature se divise entre ce qui est plein, les atomes – corpuscules solides et indivisibles – et le vide. Intuition géniale, certes, mais quel raisonnement vient la confirmer ? Où est l'acte du physicien, de l'homme de science, qui émet une hypothèse et imagine une expérience pour la vérifier ? Non, décidément, il faut poursuivre.

Le premier physicien nous échappe encore, mais sa patrie sort de l'ombre : la Grèce. Durant l'époque classique, du VII^e au III^e siècle avant Jésus-Christ, les philosophes tentent de comprendre la nature de façon rationnelle. Cette connaissance se mêle alors à la philosophie, qui est la connaissance en général. Mais au gré des écoles de pensées, des spécialisations apparaissent ça et là, prémices d'une compartimentation de la science. La physique naît ainsi lorsque les philosophes s'interrogent, par exemple, sur la nature de la matière. Chez les philosophes de Milet (Thalès, Anaximandre, Anaximène), elle est formée à partir d'un élément unique (le feu ou l'eau). Pour Empédocle, les pythagoriciens et Platon, elle en compte quatre (l'eau, le feu, la terre et l'air)¹. Dans tous les cas, il est bien question de physique.

Dans ce climat si favorable à la science naît à Syracuse, en 287 av. J.-C., l'homme que nous cherchons. « Eurêka ! » (« j'ai trouvé »), serions-nous tentés de crier, tant ce mot lui reste attaché : voici le grand Archimède (287-212 av. J.-C.). Il a posé les bases de la mécanique des fluides avec son fameux principe qui lui serait venu dans sa baignoire, selon la légende. Rappelons-le pour mémoire, dans son énoncé moderne : « Un corps solide, complètement immergé dans un liquide en équilibre, est soumis, de la part de ce liquide, à une force verticale, dirigée de bas en haut, égale en intensité au poids du liquide déplacé, et appliquée au centre de gravité de ce liquide. »

Voilà pourquoi les navires flottent, ou comment passer rapidement de la théorie à l'application... Archimède fut aussi un mécanicien (on lui doit le principe du levier), un opticien et un mathématicien. Ne se contentant pas d'émettre des théories, il expérimente, construit des machines, et il retranscrit ses travaux en langage mathématique. Par ailleurs, il est rémunéré pour son travail par le souverain de Syracuse, ce qui en fait un des tout premiers physiciens professionnels². Ses travaux seront repris par les physiciens arabes, il deviendra un symbole à la Renaissance et aujourd'hui encore, son nom résonne dans toutes les écoles.

Parmi les plus anciens noms de la physique, il ne faut pas oublier Aristote (384-322 av. J.-C.) qui tentera notamment de définir le mouvement. Mais Aristote est d'abord un philosophe, il ne peut être assimilé à un physicien. L'Antiquité produira encore quelques remarquables savants, et aussi des astronomes comme Ptolémée (100-170). Mais astronomes et astrophysiciens feront l'objet d'un autre volume de « Comment je suis devenu », aussi nous n'en parlerons pas ici. Faisons quelques bonds dans le temps, car ce texte n'a pas vocation à retracer une histoire exhaustive de la physique. Que voit-on en parcourant les siècles ? La mécanique progresse un peu à l'époque arabe, et l'optique aussi. Jusqu'au XI^e siècle, les physiciens étudient les propriétés de l'œil en imaginant qu'il émet des rayons et non qu'il en reçoit. Le premier à considérer la lumière comme une réalité physique et à l'étudier comme telle est un physicien arabe, Ibn Al-Haytham (965-1039).

Dans l'Europe médiévale, la physique est profondément marquée par le dogmatisme de l'Église chrétienne. La description du monde se trouve dans les paraboles, les images de la Bible qui sont présentées comme des informations objectives sur l'origine du monde et son fonctionnement. Remettre en cause cette vision revient à risquer sa vie. L'un des dogmes fameux est le géocentrisme. Le Soleil tourne autour de la Terre puisque selon les Écritures, Josué commanda au Soleil de s'arrêter, ce qui se produisit effectivement, raconte-t-on. L'astronome (et chanoine, et médecin...) Copernic (1473-1543) ose réfuter le géocentrisme en chassant la Terre du centre du monde pour lui substituer le Soleil. Mais cette théorie échafaudée de longue date, il ne la publie qu'à 70 ans, l'année même de sa mort.

Lentement, les esprits se libèrent du carcan des anciens et de l'Église. Il s'agit non plus de faire correspondre les observations avec des théories philosophiques, mais bien de bâtir ses théories sur l'observation. Cela ne va toutefois pas sans risque comme en témoigne le procès dont est victime Galilée (1564-1642), copernicien convaincu. Il doit abjurer officiel-

lement en 1633 devant le tribunal de l'Inquisition de Rome. En soutenant l'héliocentrisme, le physicien a vu juste et ce n'est pas la seule fois ! Galilée mérite bien le titre de premier grand physicien moderne. Le fondateur de la mécanique ne tire ses conclusions que de l'expérimentation accompagnée d'une réflexion rigoureuse. Il développe l'utilisation des mathématiques pour traduire ces résultats, ce qui l'amènera à dire que la nature est un livre écrit en langage mathématique (*L'Essayeur*, 1623). L'usage des mathématiques sous l'impulsion de Galilée entraînera peu à peu une spécialisation de la physique puisqu'il faut désormais disposer de ce bagage pour prendre part aux progrès de cette science.

Les différentes branches de la physique ne se développent pas au même rythme. La mécanique et l'optique sont assez précoces, connaissant des avancées cruciales dès le ^{xvi}e et le ^{xvii}e siècle. La mécanique est indispensable aux prédictions astronomiques qui mobilisent beaucoup de savants. L'optique permet l'observation des astres. Ces deux disciplines bénéficieront des considérables avancées d'un autre immense physicien, Isaac Newton (1642-1727), père de la théorie de la gravitation universelle. La thermodynamique naît des travaux autour de la température et de la pression, qui déboucheront sur la machine à vapeur au milieu du ^{xix}e siècle. En électricité, l'électrocinétique, qui débute avec Volta (1745-1827) et sa fameuse pile en 1800, est à peu près achevée à la fin du ^{xviii}e siècle. Mais la synthèse menant à l'électromagnétisme ne sera effectuée qu'en 1868 par le Britannique Maxwell (1831-1879)³.

Jusqu'au début du ^{xix}e siècle, la physique est pratiquée par des non professionnels. Le grand Pierre de Fermat (1601-1665), qui apporta à l'optique le principe qui porte son nom, était juge au tribunal de Tours. Beaucoup financent leurs travaux grâce à leur fortune personnelle. À partir du début du ^{xix}e siècle, la spécialisation et la professionnalisation de la physique deviennent systématiques. Par ailleurs, la recherche s'organise. Les « physiciens » travaillent dans des laboratoires qui appartiennent désormais à des écoles ou à des universités,

et non plus à des particuliers. Le premier laboratoire public est celui de l'École polytechnique fondée en 1794.

Sous la houlette d'une académie des sciences toute puissante, et un soutien politique important, en particulier de Napoléon, le ^{xix}e siècle est un âge d'or de la physique française. L'École polytechnique et l'École normale supérieure (fondée en 1794 mais qui ne démarre réellement qu'en 1808) forment parmi les plus brillants esprits du siècle : Lagrange, Monge, Laplace, Poisson, Fourier, Biot, Ampère, Arago, Fresnel, Carnot... On s'essouffle à citer tous ces noms qui désormais appartiennent à l'histoire de la physique⁴, accompagnant une loi ou un principe fondamental de l'optique, de l'électricité et autre. Sous leur impulsion se développe une physique très mathématique et bon nombre de ces esprits brillent autant dans les deux disciplines.

À la fin du ^{xix}e siècle, de nombreux physiciens estiment que leur science est achevée. Elle s'apprête au contraire à vivre de profonds bouleversements. La découverte de l'électron en 1895, des rayons X, un an plus tard, puis de la radioactivité naturelle préfigurent la naissance d'une nouvelle branche de la physique, la physique atomique. À la même époque se développe la mécanique quantique et Einstein bouleverse les théories de Newton avec la relativité restreinte (1905) puis générale (1915). Le socle de notre physique contemporaine est achevé. L'un des grands enjeux de la physique aujourd'hui n'est-il pas précisément de rendre compatible ces deux grandes théories aux extrémités de l'échelle de longueur : la physique quantique régissant l'infiniment petit et la relativité l'infiniment grand ?

Désaffection de la physique ?

Selon l'Observatoire des sciences et des techniques, la France comptait 4 171 physiciens en 2005 (dont environ 20 % de femmes) dans les établissements publics à caractère scientifique et technologique (CNRS, IRD, etc.)⁵. Mais ce chiffre ne

comprend pas les sciences de l'ingénieur (3 859). Par ailleurs, il faut inclure les physiciens du Commissariat à l'énergie atomique (3 000) et les enseignants chercheurs de l'université (10 000 personnes environ avec les sciences pour l'ingénieur). Soit environ 21 000 physiciens et ingénieurs. Mais ce chiffre ne prend pas en compte tous ceux qui exercent dans les entreprises du secteur privé (St-Gobain, Thomson...). Difficile, donc, de recenser avec précisions les physiciens.

Comme en témoignent les portraits à suivre, la physique offre aujourd'hui de nombreuses perspectives à ceux qui demain la pratiqueront : les atomes froids, les nanotechnologies, l'électronique et la physique des particules proposent des défis aussi bien théoriques qu'expérimentaux aux jeunes générations. Et pourtant, cette discipline serait frappée par une crise des vocations sans précédent. Il est vrai qu'à partir du milieu des années 90, les effectifs des premiers cycles universitaires ont commencé à chuter, en science en général et en physique en particulier. Ainsi, alors que ces filières gagnaient des étudiants chaque année, elles ont commencé à en perdre : -46 % entre 1995 et 2000⁶. Si depuis le début des années 2000, la chute est moins sévère, il est vrai que la physique ne semble plus faire recette. À qui la faute ? On a tôt fait d'accuser l'enseignement au lycée jugé trop académique, et sans lien avec le monde réel. Cette critique faite à l'enseignement ne date pas d'aujourd'hui, comme le montrent les témoignages de ce livre. Pourtant, il y a 20 ans encore, les filières scientifiques refusaient du monde. En réalité, comme le souligne le sociologue Bernard Convert⁷, ce n'est pas tant la physique qui est boudée que l'ensemble des disciplines académiques. De fait, en regardant les statistiques, on s'aperçoit que les mathématiques, les lettres, le droit, les sciences économiques sont également touchés... Selon le sociologue, « la "désaffection pour les études scientifiques", tout comme la chute des inscriptions dans les universités en lettres et en droit qui lui est contemporaine, est la conséquence d'un mouvement de fond qui fut un temps

masqué par la très forte croissance du nombre de bacheliers : le détournement des orientations des étudiants vers les formations professionnalisées. Ce déplacement trouve lui-même son origine dans la crise de l'emploi, qui porte, depuis une vingtaine d'années, les générations nouvelles – et parmi elles en premier lieu les élèves de milieu défavorisé, bénéficiaires de la démocratisation – à valoriser les diplômes les plus facilement monnayables sur le marché de l'emploi. »

Le pragmatisme serait donc à l'origine de ce désamour des étudiants pour la physique, qui se traduit bien évidemment jusque dans la crise des vocations dans la recherche. Souhaitons que les perspectives d'embauches de chercheurs offertes par les départs à la retraite massifs annoncés pour les années à venir encourageant les étudiants séduits par la physique à croire en elle pour les faire vivre.

Espérons-le car de toute évidence, les trois physiciennes et les neuf physiciens que nous avons rencontrés ne regrettent pas leur choix. C'est un lieu commun de dire que la recherche est un métier que l'on exerce avec passion, c'est une tout autre chose de le constater de visu. Cette passion se traduit notamment par l'incapacité de s'arrêter. Bien que plusieurs de nos invités aient dépassé l'âge de 65 ans, évoquer la retraite paraît incongru, voire franchement déplacé. Décide-t-on un jour d'arrêter de chercher à comprendre ? Assurément non. Tous poursuivent leur activité d'une façon où d'une autre, comme professeur émérite, membre de l'Académie des sciences, auteur d'ouvrages scientifiques.

En parcourant ces portraits, nous remarquons que la vocation ne vint pas à tous dès l'enfance. Si certains sont « nés chercheurs », beaucoup ont trouvé leur voie bien après les classes préparatoires. Les premières amours portaient d'ailleurs sur les mathématiques, dont l'abstraction pure fascinait souvent les adolescents avant de rebuter quelque peu le jeune adulte. Ces vocations tardives sont souvent mises sur le compte d'un enseignement jugé de tout temps assez catastrophique par son manque de dynamisme et de modernité.

Sur le volet formation toujours, on constate l'écrasante domination de trois écoles dans la formation de nos chercheurs. Tous sont passés par l'École normale, l'École polytechnique ou l'École centrale.

Concernant l'avenir de la physique, s'il est incontestable qu'aujourd'hui les nanotechnologies et les atomes froids sont parmi les secteurs les plus dynamiques et les plus prometteurs de la physique, nombre de physiciens attirent l'attention des futurs étudiants sur la physique du solide, considérée à tort comme achevée et un peu poussiéreuse. Au fil des portraits, il apparaît que ce secteur, et notamment dans le domaine des matériaux, est très prometteur et mériterait d'attirer davantage d'étudiants.

Enfin, s'il est vrai que ces douze personnalités sont enthousiastes quant à l'avenir de leur discipline, elles le sont beaucoup moins quant à celui de la recherche en France. À l'heure où le gouvernement souhaite réformer en profondeur le CNRS, les voix sont à peu près unanimes pour saluer l'action de cet organisme et lui souhaiter une longue vie. Par sa capacité à structurer et organiser la recherche, il a permis à la physique française de tenir son rang dans le monde, comme l'a rappelé encore récemment l'attribution du prix Nobel de physique, le quatrième depuis 1991, à Albert Fert.

¹Une histoire de la physique et de la chimie, de Jean Rosmorduc, Points Sciences, 1998.

²Entretien de l'auteur avec Jean Rosmorduc.

³Op. cit.

⁴Histoire de la physique et des physiciens, de Jean-Claude Boudenot, Ellipse 2001.

⁵http://www.obs-ost.fr/fileadmin/medias/tx_ostdocuments/Rapport_Chercheurs_29nov2006.pdf

⁶Note de Veille n° 30 (lundi 16 octobre 2006) - Analyse : La France souffre-t-elle d'une désaffection de ses étudiants pour les filières scientifiques ?

⁷Les impasses de la démocratisation scolaire. Sur une prétendue crise des vocations scientifiques, Raisons d'Agir, 2006.

4.

Albert Fert



En décembre 2007, il fut le dixième Français à recevoir le prix Nobel de physique (avec Peter Grünberg) pour sa découverte de la magnétorésistance géante. Ses travaux de physique fondamentale ont ouvert la voie vers une nouvelle électronique et de nombreuses applications.

1938*Naissance à Carcassonne***1957***Entre à l'École normale supérieure***1970***Docteur ès sciences physiques***1976***Professeur à l'université Paris-XI***1988***Découvre avec son équipe la magnétorésistance géante***1995***Directeur scientifique à l'Unité mixte de physique
(CNRS-Thales)***2003***Médaille d'or du CNRS***2004***Élu à l'Académie des sciences***2007***Prix Nobel de physique*

La vocation

« Mes plus anciens souvenirs me ramènent à Montclar, au pied des Pyrénées, où je vécus les premières années de ma vie. Les nécessités de la guerre nous avaient menés, mon frère et moi, dans la modeste ferme de mes grand-parents. Ma mère, professeur d'économie au collège, exerçait à Toulouse. Elle venait nous rendre visite chaque week-end, seule. Mon père, qui enseignait la physique au lycée, était prisonnier en Allemagne. J'étais bien loin de la physique et des sciences en général. J'étais plus près des plantes et des animaux. Cueillir des fruits, traire les chèvres m'étaient des occupations familières et, pour imiter les adultes chasseurs de lapins et de lièvres, mon frère et moi tentions de faire aussi bien, mais sans fusil, en posant des pièges, des collets. Dès l'âge de 5 ans, je fréquentais la classe unique du village, qui vous menait jusqu'au certificat d'études. Hors de l'école, je menais la même vie que mes petits camarades. Cependant, je savais que mon destin n'était pas de vivre ainsi pour toujours. On m'avait expliqué qu'un beau jour, mon père reviendrait de la guerre et que nous partirions pour la ville. C'est avec une certaine crainte que j'attendais cette vie nouvelle.

Elle débuta en septembre 1945 lorsque mon père revint d'Allemagne. Comme prévu, je quittais Montclar pour Toulouse. Je devins un petit citadin nostalgique de la vie à la campagne. Mon père reprit ses études et passa une thèse en physique. Il quitta bientôt le lycée pour enseigner à la faculté des sciences de Toulouse. Il suivait de près nos études, et je fus sans aucun doute influencé par sa pensée rigoureuse, lorsque je dus, plus tard, étudier les mathématiques et la physique.

Je n'avais pas d'intérêt particulier pour les matières scientifiques. Comme tous les bons élèves à l'époque, j'étudiais le latin et le grec, et nos professeurs de latin-grec-français nous faisaient partager leur idée sur la supériorité des arts et des lettres. D'autant qu'ils savaient faire revivre Homère, Stendhal ou Balzac lors de cours passionnants. Je vivais ainsi avec la

conviction que la physique serait peut être un moyen pratique pour gagner ma vie, mais que, pour l'épanouissement personnel, il fallait chercher du côté des arts. Ainsi, en dépit de mes bons résultats en mathématiques et en physique, mon cœur battait pour la littérature, le cinéma, la photographie et le sport, surtout le rugby que j'ai pratiqué à un bon niveau jusqu'à l'âge de 35 ans.

Après mon baccalauréat, mes parents ont souhaité que je suive la voie des classes préparatoires et des grandes écoles. De mon côté, je songeais à l'École normale supérieure de la rue d'Ulm car j'avais très envie de faire des études à Paris et de goûter à la vie étudiante du Quartier latin. Je m'inscrivis donc en classes préparatoires scientifiques. Je ne me souviens que d'un bachotage intense, plutôt inintéressant, mais qui me permit d'intégrer l'ENS à la première tentative. »

Le cursus

« Mes années à l'École normale supérieure, de 19 à 24 ans, représentent une période très intense de ma jeunesse. La richesse de la vie sur le petit campus de la rue d'Ulm venait des contacts quotidiens entre étudiants de disciplines très diverses, sciences, philosophie, littérature, histoire, etc. Paris était tout autour avec ses musées, ses expositions, ses cinémas, ses salles de concert et ses clubs de jazz. Je découvrais le jazz à St-Germain-des-Prés, j'écoutais tous les disques de Thelonious Monk et de John Coltrane... La nouvelle vague déferlait au cinéma, je me souviens d'avoir assisté dans un amphithéâtre de la Sorbonne à une des premières projections d'*À bout de souffle* de Godard. J'étais enthousiasmé par la liberté des films de Godard, Truffaut ou Eustache, et le cinéaste préféré de ma période toulousaine, le Bergman de *Monika* ou des *Fraises sauvages*, fut rapidement remplacé par les auteurs de la nouvelle vague. L'ENS était toute proche de la cinémathèque et j'y allais souvent, au hasard, découvrant

pêle-mêle tous les cinémas du monde. Je me souviens notamment d'un cycle sur le cinéma japonais : Kurosawa, Ozu, Mizogushi... Les films n'étaient pas toujours sous-titrés, mais quelques étudiants japonais se dévouaient pour traduire.

L'été se poursuivait sur le même rythme. Avec quelques amis, nous avions l'habitude de louer une maison à Cadaqués, en Espagne, le village de Dali. Par l'intermédiaire d'une amie, modèle du peintre, je participais ainsi à quelques unes des fêtes folles qu'il organisait. Prévenu de ma présence, il avait tenu une fois à me rencontrer, amusé d'avoir un physicien parmi ses hôtes. C'est ainsi que j'eus l'occasion de lui parler de physique quantique. Il ne comprenait pas tout, mais la sonorité des mots l'intéressait. Il en glissa ensuite quelques-uns dans ses phrases.

J'EUS L'OCCASION DE
PARLER DE PHYSIQUE
QUANTIQUE AVEC DALI. IL
NE COMPRENAIT PAS TOUT,
MAIS LA SONORITÉ DES
MOTS L'INTÉRESSAIT. IL
EN GLISSA ENSUITE
QUELQUES-UNS DANS SES
PHRASES.

Dans ce contexte, je m'interrogeais sérieusement sur mon avenir, peu convaincu d'être fait pour la recherche. Le cinéma m'attirait bien davantage. J'ai même tourné un court métrage en vallée de Chevreuse avec quelques amis. Je n'avais pas de contacts dans ce milieu et je manquais de débrouillardise. Sinon, j'aurais sans doute persévéré. D'autant que j'hésitais sur la voie à suivre en sciences. En mathématiques, je trouvais vite mes limites. La physique et la possibilité de travailler sur des choses concrètes m'attiraient davantage. Je décidais donc de suivre cette voie. Les cours qui étaient délivrés à la Sorbonne me semblaient quelque peu désuets mais je fus séduit par l'enseignement de troisième cycle en physique des solides que créa à cette époque Jacques Friedel, le père de cette matière en France. C'était un enseignement très complet avec des cours de mécanique quantique et de mécanique statistique. Je suivis

cet enseignement. Ensuite, après deux ans dans un laboratoire de Grenoble, une ville qui ne me séduisit pas, et un an de service militaire, j'eus justement la chance de pouvoir commencer une thèse dans le laboratoire de Jacques Friedel à Orsay. J'y avais rencontré Ian Campbell, un jeune britannique qui venait tout juste d'être embauché au CNRS et qui m'avait proposé une thèse inspirée par des travaux de Nevill Mott (1905-1996, prix Nobel 1977). Dans les années 30, ce physicien britannique avait suggéré que la mobilité des électrons dans un métal aimanté dépendait de l'orientation de leur spin. Cela n'avait encore jamais été vérifié.

Cette thèse a sans doute été importante pour moi. D'abord, ce sujet m'aurait, 18 ans plus tard, à la découverte de la magnétorésistance géante qui me vaut aujourd'hui le prix Nobel, avec Peter Grünberg. Surtout, c'est en approfondissant mon sujet que je découvrais à quel point la recherche pouvait être passionnante. Jusqu'alors la science m'était apparue comme une pile de vérités établies par des esprits remarquables et je n'imaginai pas qu'il y eût de la place pour moi ni beaucoup de choses nouvelles à inventer. Je fus rapidement séduit par la possibilité de créer. Le physicien se pose une question, par exemple, sur tel comportement des électrons dans un métal et imagine une expérience pour tester ses idées sur le problème. Et cette expérience va amener un élément de réponse, éclairer le paysage, ouvrir la porte à de nouvelles idées, amener de nouvelles perspectives. Je réalisais que la science n'était pas un empilement de savoirs figés, mais au contraire quelque chose de mouvant qu'un jeune chercheur avait le pouvoir de faire vivre. »

L'apport à la physique

Spintronique – Acte I :

Influence du magnétisme sur le mouvement des électrons (1965-1970)

« Le chemin qui devait mener à la découverte de la magnétorésistance géante et à la spintronique commence dans les années 30, lorsque Nevill Mott émet l'hypothèse que dans un conducteur magnétique, le mouvement des électrons doit entre autre dépendre de l'orientation de leur spin. L'objet de ma thèse fut de vérifier cette hypothèse. Effectivement, je pus mettre en évidence expérimentalement que dans un métal ferromagnétique, comme le fer par exemple, les électrons peuvent être freinés différemment dans leur déplacement selon l'orientation de leur spin. Le débit de courant peut varier dans un rapport de 1 à 20 selon les orientations respectives du spin et de l'aimantation du métal. Ian Campbell et moi avons réalisé divers types d'expériences sur des métaux et des alliages afin de vérifier et quantifier cette influence. J'ai aussi construit le modèle théorique décrivant de façon générale la conduction électrique dans les métaux ferromagnétiques. C'était une marque de fabrique de ce que l'on pourrait appeler "l'école Friedel" : il n'y avait pas de frontière entre expérimentation et théorie. Il fallait savoir faire les deux.

L'influence du spin sur le mouvement des électrons dans un matériau ferromagnétique allait permettre d'interagir avec un électron non seulement par l'intermédiaire de sa charge électrique mais aussi à l'aide d'une deuxième prise : son spin. Ce sera le principe de la spintronique. Certaines expériences de ma thèse sur des métaux dopés de deux différents types d'impuretés exploitaient déjà un concept très semblable à celui de la magnétorésistance géante (GMR). Pour passer à la GMR, il suffisait de remplacer les deux types d'impuretés par deux couches de métal ferromagnétique et d'exploiter la possibilité d'orienter les aimantations de ces

couches dans la même direction ou dans des directions opposées. Mais, pour cela, il fallait fabriquer des couches ultraminces, de l'ordre du nanomètre, ce qui au début des années 70 était impensable. Alors, durant plusieurs années, je travaillais sur d'autres sujets dans des domaines variés. J'ai notamment travaillé sur les verres de spin (voir les recherches sur ces verres dans le portrait de Leticia Cugliandolo, ndr). »

Spintronique – Acte II :

Découverte de la magnétorésistance géante (1988)

« C'est sous les palmiers de San Diego (États-Unis), en 1985, que mes idées sur l'exploitation du spin des électrons dans des multicouches ont repris vie. Dans ce cadre bien agréable, lors d'un congrès de physique, j'eus l'occasion de discuter avec Alain Friedrich. J'avais dirigé sa thèse à Orsay et il était devenu depuis directeur d'un groupe de recherche au sein du Laboratoire centrale de recherche de Thomson-CSF (aujourd'hui le groupe Thales). Je savais que le laboratoire de Friedrich maîtrisait une nouvelle technique de dépôt de matière sous ultravide qui permettrait la fabrication de multicouches de quelques nanomètres d'épaisseur. Nous avons donc décidé de collaborer pour la réalisation et l'étude de multicouches magnétiques. Le spécialiste de dépôt sous ultravide à Thomson-CSF, Patrick Étienne, mes doctorants Frédéric Nguyen, Agnès Barthélémy et Frédéric Petroff réalisèrent un travail remarquable qui déboucha, en 1988, sur la découverte de l'effet de la GMR.

La mise en évidence de la GMR fut obtenue avec des multicouches de fer et de chrome, sortes de mille-feuilles composés de très fines tranches de fer (deux à trois atomes d'épaisseur) séparées par des couches de chrome. En l'absence de champ magnétique, les aimantations des couches de fer sont en configuration antiparallèle. Chaque couche de fer possède alors une aimantation pointant dans une direction opposée à celle des deux couches voisines. Ainsi, le champ de la

couche 1 pointera vers la droite, celui de la couche 2 vers la gauche, celui de la couche 3 vers la droite et ainsi de suite... Dans cette configuration, nos mesures montraient que la résistance du matériau au passage du courant était très élevée. Maintenant, il est possible, en appliquant un champ magnétique, d'orienter toutes les aimantations dans le même sens, à droite par exemple. La résistance du matériau au passage du courant chute alors très brutalement, un effet que nous avons appelé magnétorésistance géante.

Cela se comprend en prenant en compte l'effet du spin des électrons sur leur mouvement.

Nous pouvons décomposer la population des électrons parcourant le mille-feuille en deux groupes : ceux dont l'orientation du spin est telle qu'ils traversent facilement les couches dont l'aimantation est orientée vers la droite, et ceux dont le spin favorise le passage à travers celles à orientation vers la gauche.

Dans la configuration à aimantations alternées, chaque groupe d'électrons est bloqué par une couche sur deux. Le courant électrique passe difficilement, autrement dit la résistance du matériau est très forte. En revanche, lorsque toutes les couches ont leurs aimantations orientées dans le même sens, l'un des deux groupes d'électrons peut circuler sans entrave et la résistance électrique est beaucoup plus faible.

Nous avons publié nos résultats dans la revue *Physical Review Letters* en 1988. Les résultats de Peter Grünberg et son équipe de Institut für Festkörperforschung, à Jülich en Allemagne ont été obtenus à peu près en même temps que les nôtres et ont été publiés en 1989. Nous avons convenu entre nous que nos expériences avaient été quasi simultanées et que la découverte revenait à nos deux équipes. Nos relations ont toujours été très cordiales.

NOUS AVONS CONVENU
ENTRE NOUS AVEC PETER
GRÜNBERG QUE NOS
EXPÉRIENCES AVAIENT ÉTÉ
QUASI SIMULTANÉES ET
QUE LA DÉCOUVERTE
REVENAIT À NOS DEUX
ÉQUIPES.

Très vite, des applications de la GMR vont apparaître. Des capteurs de champ magnétique ultrasensibles vont ainsi être mis sur le marché dès 1993. Nous avons vu qu'une multicouche comme celle que je viens de décrire devient un bien meilleur conducteur d'électricité en présence d'un champ magnétique. Il révèle alors la présence de ce champ. C'est le principe des capteurs de champ magnétique et c'est aussi à l'origine d'une des applications les plus communes aujourd'hui : la lecture des disques durs d'ordinateur. Les informations sont stockées sur le disque sous la forme de bits, des petites zones aimantées que l'on a engendrées lors du processus d'écriture. Une tête de lecture "GMR" permettra de détecter les très faibles champs magnétiques de bits extrêmement petits. Avec des bits de taille minuscule il devient possible de stocker beaucoup plus d'informations sur le disque. La GMR a permis de multiplier par 100 la capacité des disques durs en quelques années. »

Spintronique - Acte III : Expansion actuelle et perspectives

« Aujourd'hui, la GMR est de l'histoire ancienne pour moi. Dans mon équipe de l'Unité mixte CNRS-Thales (créée en 1995 et associée également à l'université Paris-Sud), nous continuons d'explorer les différentes facettes du domaine de recherche dont le coup d'envoi a été donné par la découverte de la GMR et que l'on appelle spintronique. La spintronique, comme la GMR, exploite l'influence du spin sur le mouvement des électrons et a révélé de très nombreux phénomènes nouveaux et prometteurs d'applications. Il est bien difficile de résumer les développements multiples de la spintronique aujourd'hui, mais là encore, les applications dans la vie quotidienne ne tarderont pas, par exemple dans le domaine des télécommunications (téléphone portable, émission d'onde radio) et dans l'informatique.

Un phénomène important révélé par la spintronique est la magnétorésistance des jonctions tunnels magnétiques

(TMR). Elle est déjà appliquée à la réalisation d'un nouveau type de mémoire vive dans les ordinateurs : les mémoires vives magnétiques (MRAM). Actuellement, la mémoire vive des ordinateurs (RAM) est rapide mais volatile : les données sont perdues lorsqu'on éteint l'ordinateur. Les MRAM peuvent être aussi rapides tout en étant permanentes, ce qui présente plusieurs avantages. Par exemple, aujourd'hui, lorsque vous allumez votre ordinateur, il faut attendre quelques minutes durant lesquelles les données transitent du disque dur vers les RAM. Avec les MRAM, un tel temps d'attente ne sera plus nécessaire. À peine allumé, l'ordinateur sera prêt à travailler. Avec, entre autres, des conséquences intéressantes au niveau des économies d'énergie. Dans les bureaux, les ordinateurs restent souvent allumés la nuit, simplement parce que les gens n'ont pas la patience d'attendre qu'ils se mettent en route. C'est un gaspillage d'énergie considérable auquel les MRAM pourraient remédier. »

Albert Fert et Peter Grünberg, prix Nobel de physique 2007 pour la découverte de la magnétorésistance géante

« Le 9 octobre 2007, j'assistais à une réunion du conseil scientifique du CNRS lorsque mon téléphone a sonné. J'ai quitté discrètement la salle de réunion et pris la communication. Une voix m'a dit en anglais : « Professeur Fert, ici Stockholm. J'ai de bonnes nouvelles pour vous... » Ensuite ? Le souffle coupé, la joie immense que l'on ressent pour soi, pour ses proches et pour tous ceux qui travaillent avec vous, l'évidence que votre vie va changer, la conscience de la responsabilité qui vous incombe brusquement. En quelques minutes, vous changez de statut. Vous n'êtes pas plus savant que la veille, mais votre avis intéresse tout le monde. Les sollicitations les plus diverses, parfois sans rapport avec la physique ni la

recherche, arrivent chaque jour. Vous apprenez à être prudent avant de vous exprimer. Il m'a fallu ralentir mon activité au laboratoire pour répondre aux plus importantes d'entre elles. J'explique l'électronique de spin et ce qu'est la recherche au grand public. Par ailleurs, alors que notre système de recherche est en pleine mutation, je suis régulièrement consulté pour donner mon opinion. Après 40 ans de carrière, je pense bien connaître le sujet et mon avis peut être utile. En dehors de mes domaines de compétence, je m'abstiens. Sauf pour des sujets qui me tiennent à cœur à titre personnel. Lorsqu'en avril 2008, Elie Wiesel m'a envoyé un mail pour me demander de signer une déclaration sur la répression chinoise au Tibet, j'ai signé. »

Les figures marquantes

« Jacques Friedel a marqué beaucoup de chercheurs de ma génération. D'abord par son enseignement. Ce sont ses cours de physique des solides modernes qui m'ont attiré vers ce domaine. Et, en recherche, il est considéré à juste titre comme le père de la physique de la matière condensée en France. Friedel était un théoricien très proche des expérimentateurs et j'ai souvent discuté avec lui de mes expériences et de leur interprétation théorique. Les discussions avec Friedel et ses collaborateurs ont permis à ma génération d'expérimentateurs orcéens d'acquérir de solides bases de physique théorique. Personnellement, cela m'a permis de combiner souvent expériences et travaux théoriques pour leur interprétation. Je pense aussi à Louis Néel (1904-2000, prix Nobel de physique en 1970), un très grand nom de la physique, en particulier lorsque l'on travaille dans le domaine du magnétisme qu'il a profondément marqué.

J'apprécie tout particulièrement son empirisme, sa façon de décrire les concepts les plus délicats avec des images simples. Enfin, il a fait de Grenoble l'un des pôles d'excellence de la recherche en France en combinant des laboratoires classiques et des grands instruments, comme le réacteur nucléaire de recherche de l'Institut Laue-Langevin.»

Volver, Almodovar (2006)

« Almodovar est aujourd'hui l'un de mes cinéastes préférés. J'apprécie son anticonformisme et sa vision décapante du monde actuel. J'aime son génie pour filmer l'inconscient et deshabiller les sentiments de ses personnages, marginaux déjantés, bourgeois ou gens simples des classes moyennes et populaires d'Espagne. Mais c'est toujours avec beaucoup de tendresse qu'il parle des solitaires et des cœurs blessés. Et puis cette flamboyance des couleurs, qui fait que l'on reconnaît instantanément ses films. Parmi eux, j'ai aimé particulièrement *Volver*. Les films d'Almodovar ont souvent de très beaux caractères de femmes. Dans *Volver*, Penélope Cruz et les autres personnages principaux du film sont des femmes magnifiquement solides des couches populaires espagnoles. J'adore les dialogues, la langue, un espagnol populaire, rugueux et sans fioriture.

Science et art partagent en commun l'idée de création. Les expériences du scientifique concrétisent les produits de son imagination et donnent de nouveaux points d'appui pour de nouvelles constructions de son esprit. De nouveaux et magnifiques paysages se révèlent sans cesse dans monde de la connaissance. Bien sûr, la beauté de ces paysages se communique plus difficilement que celle des œuvres d'un peintre, d'un écrivain, d'un cinéaste. Mais entre physiciens nous savons reconnaître cette beauté, l'élégance d'une théorie, si importante en physique. »

Regard sur la physique actuelle

« Je suis optimiste. Il me semble que la recherche offre aux jeunes chercheurs plus de perspectives, plus de possibilités de découvertes intéressantes qu'il y a 30 ans. Les nanotechnologies sont un outil qui donne beaucoup de pouvoir à l'imagination. Le physicien peut imaginer, par exemple, quel peut être le jeu d'électrons et de spins dans un certain assemblage d'atomes à l'échelle du nanomètre pour obtenir un nouveau phénomène. Les nanotechnologies lui permettent ensuite de réaliser cet assemblage. Quelle gratification, pour le chercheur, si finalement les phénomènes prévus se concrétisent dans l'expérience ! Les nanotechnologies ont donné un bon coup de fouet à la recherche en biologie, en chimie et en physique. La spintronique n'aurait pas démarré sans elles.

Il y a bien sûr une certaine fuite des cerveaux d'Europe vers les États-Unis. En France, la fuite semble plus importante en biologie qu'en physique. Sans doute parce que la physique offre des débouchés plus diversifiés, aussi bien en recherche fondamentale que dans l'industrie. Le bon fonctionnement d'organismes comme le CNRS, l'attractivité des postes de chercheur limitent aussi la fuite.

On doit pour beaucoup la qualité de la recherche française à sa coordination par le CNRS. Il est aujourd'hui le pilote principal de la politique scientifique des laboratoires mixtes université-CNRS, les universités, appauvries et accaparées par divers problèmes, n'ayant guère les moyens d'être les moteurs de cette politique. On peut espérer que, dans quelques années, l'évolution des universités dans la cadre de la loi d'autonomie donnera à certaines les moyens de copiloter la recherche à égalité avec le CNRS. En attendant, il faut préserver l'outil qui a fait ses preuves, c'est à dire conserver au CNRS ses leviers de pilotage. Le CNRS est d'ailleurs en pleine mutation. L'instauration de "chaires CNRS" me semble un exemple d'évolution intéressante. Dans des domaines scientifiques impliquant des technologies

lourdes, les charges d'enseignement actuelles trop importantes (trois fois plus qu'à mes débuts) font que beaucoup de jeunes enseignants-chercheurs ne peuvent s'investir suffisamment dans leur recherche pour réellement prendre place dans la compétition internationale. Les "chaires CNRS" seront des postes d'accueil qui devraient permettre à de jeunes enseignants-chercheurs de s'investir pendant cinq ou dix ans sur leur projet de recherche en étant déchargés d'une grande partie de leurs tâches d'enseignement. »