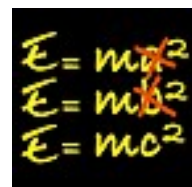


Pierre-Gilles de Gennes et l'aventure de la matière molle


$$E = mc^2$$
$$E = mc^2$$
$$E = mc^2$$

Liliane Léger

UMR 8502 Laboratoire de physique des solides, CNRS, Université Paris-Sud 11, Orsay

En 1967-68, en pleine explosion de résultats expérimentaux du groupe d'Orsay sur les supraconducteurs, Pierre-Gilles décide d'explorer d'autres sujets de physique de la matière condensée. Tandis qu'il continue d'encadrer plusieurs thèses théoriques, à discuter et à animer le travail des expérimentateurs du groupe supraconducteurs, il se lance dans une exploration bibliographique de plusieurs domaines aux frontières de la physique des solides traditionnelle. Il renouvelera plusieurs fois dans la suite de sa carrière cette sorte de temps d'arrêt, de lecture intense de la bibliographie, abordant de nouveaux domaines comme par petites touches successives, passant rapidement d'un sujet à un autre en quelques mois, avant de se fixer sur l'un d'entre eux pour quelques années. J'ai à chaque fois été frappée par la capacité tout à fait étonnante qu'avait Pierre-Gilles à identifier, dans une littérature parfois touffue, les questions de fond, les expériences significatives, puis à reformuler ces questions (voire à les faire émerger) dans des termes qui n'avaient souvent que peu à voir avec ceux utilisés initialement par les auteurs. Les articles de la littérature revus et racontés par Pierre-Gilles apparaissaient alors sous un jour bien différent, et il devenait possible, en focalisant la pensée sur les points les plus fondamentaux, de révéler des analogies, et d'entrevoir des pistes à suivre pour tenter de comprendre, de bâtir des scénarii de mécanismes possibles, de déployer un programme expérimental ciblé, parce que les paramètres pertinents étaient clairement identifiés. Après ce temps d'exploration large de la bibliographie, très vite, Pierre-Gilles sélectionnait un domaine dans lequel il sentait qu'il était armé pour avancer et proposer du neuf. Toutes les grandes étapes de sa carrière scientifiques ont ainsi été marquées par la traversée d'une année de transition, durant laquelle lui-même ne savait pas encore ce qu'il adviendrait de ce travail bibliographique.

Ainsi, en cette année 67-68, il tourne son regard successivement vers les solutions de polymère (à l'incitation de Henri Benoit de Strasbourg), les cristaux liquides nématiques et cholestériques, puis vers différents problè-



Crédit photo : CNRS Photothèque / Losange Photo

mes relevant de la biophysique : le fonctionnement des muscles, la transmission de l'influx nerveux, les membranes lipidiques... Le cours de seconde année de DEA qu'il donne cette année là (et que j'ai eu la chance de suivre, comme première expérience de contact avec le monde de la recherche) garde la trace de cette sorte de ballade bibliographique qui marque pour Pierre-Gilles le passage de la physique de la matière « dure » vers celle de la matière « molle » (à un moment où ce dernier terme n'existait pas encore). Ce cours est un concentré du « style de Gennes ». À l'époque, la question de la description statistique de chaînes de polymères flexibles en solution restait ouverte, et

des outils expérimentaux récents (diffusion de neutrons aux petits angles, diffusion quasi-élastique de la lumière) avaient fourni des ensembles de données expérimentales non encore expliquées. Pierre-Gilles avait lancé, en pleine période supraconductrice une thèse théorique (Elisabeth Dubois-Violette) sur la dynamique d'une chaîne unique. Le début du cours donné en 67-68 présente une approche bibliographique de ces sujets. Partant d'une description élémentaire de chaîne polymère, Pierre-Gilles incorpore très vite les approches les plus récentes dues à Sam Edwards pour décrire les conformations d'une chaîne auto-évitante à partir d'invariants topologiques et de propagateurs. Puis, il passe à la question réelle des solutions moyennement concentrées où les chaînes sont interpénétrées les unes dans les autres, ce qui conduit à un effet d'écran des interactions entre monomères d'une même chaîne via les autres chaînes. C'est un exemple de problème à N corps, qu'on ne sait traiter à l'époque que dans l'approximation du champ moyen. Les expériences montrent les limites de cette approche, mais on ne sait pas faire mieux. Pierre-Gilles identifie le problème, présente l'approche de champ moyen d'Edwards et, faute d'outil théorique, passe à d'autres sujets (même s'il poursuit les discussions avec les équipes de Saclay et de Strasbourg sur ces questions). La suite du cours aborde successivement la description de phases cristal liquide nématique et cholestérique, puis quelques éléments sur le fonctionnement



des muscles, les cellules nerveuses et la transmission de l'influx nerveux, les membranes lipidiques... en un survol rapide de grands pans de bibliographie. Mais le style de Gennes tient dans la façon de les aborder : sur le tableau, des schémas d'une sobriété étonnante, qui focalisent l'attention sur l'essentiel, aident à mémoriser la question posée et les mécanismes physiques mis en jeu ; peu de calculs, mais des explications où chaque mot compte. Et puis surtout, une vision personnelle des questions, des limites des approches existantes, des analogies avec d'autres problèmes de physique de la matière condensée, qui entraîne chaque auditeur à prendre lui-même de la hauteur et à unifier ses connaissances. Enfin, un enthousiasme communicatif, laissant à chacun l'impression que le problème qui vient d'être discuté est non seulement important, mais passionnant, et que la solution est à portée. Chaque année, et pendant presque quarante années, Pierre-Gilles proposera ainsi sous forme de cours, à Orsay, puis au Collège de France, les résultats les plus récents de ses recherches, étude bibliographique ou réflexions propres représentant ses découvertes des semaines précédentes. Ces cours joueront un rôle essentiel dans l'émergence de la notion de physique de la matière molle, en identifiant des questions ouvertes, aussi bien au niveau théorique qu'expérimental, en proposant des pistes de modèles et des pistes d'expériences, en provoquant la discussion et l'enthousiasme, en fédérant chercheurs jeunes et moins jeunes, autour des thématiques que lui-même, Pierre-Gilles défriche. Les thématiques s'y succéderont, par cycles de quelques années sur un même sujet, séparés par des années charnière, comme en cette année 68. Si l'exploration d'un nouveau sujet s'avérait peu fructueuse, Pierre-Gilles ne s'attardait pas et portait ses efforts ailleurs. Et puis, à la fin d'un cycle, lorsqu'une question d'ampleur avait été résolue et comprise, Pierre-Gilles présentait dans un cours d'une limpidité toujours surprenante sa vision personnelle du domaine, focalisée vers les effets importants, et c'était alors un vrai régal, car les notions un peu disparates prenaient toute leur cohérence. J'ai suivi tous ses cours, à Orsay puis au Collège de France. Ce style ne s'est jamais démenti, même dans les toutes dernières années malgré la maladie et la fatigue.

Fin 1968, après cette exploration un peu tous azimuts de problèmes à l'interface physique-biologie, Pierre-Gilles de Gennes centre ses efforts sur les cristaux liquides thermotropes. Ces phases intermédiaires entre cristaux ordonnés et liquides sont un véritable régal pour Pierre-Gilles : l'ordre d'orientation des molécules, allié au comportement fluide, fait que ces systèmes répondent de façon spectaculaire à de faibles sollicitations extérieures. C'est la base de leur utilisation pour fabriquer des affichages. Très vite, Pierre-Gilles assimile les descriptions de leur élasticité particulière, liée à l'ordre d'orientation, et bâtit la description statistique (statique et dynamique) des fluctuations thermiques de l'orientation moléculaire des nématiques, ce qui permet d'en comprendre les propriétés optiques d'opalescence. Puis il décrit la façon dont un champ extérieur appli-

qué, parce qu'il tend à orienter les molécules parallèlement à lui-même, peut dérouler l'hélice d'un cholestérique, ou conduire à des transitions d'orientation moléculaire dans les nématiques, faisant apparaître des parois entre domaines très analogues aux parois entre domaines magnétiques. Un petit groupe expérimental autour de Georges Durand et Madeleine Veysié, avec deux jeunes thésards (Francis Rondelez et moi-même), démarre un programme expérimental sur ces questions. Très vite, en deux ans, les résultats pleuvent, le débobinage des cholestériques fait apparaître toute une série de lignes de défauts d'orientation qui ouvre la voie à un grand champ de recherches qui sera repris par Maurice Kléman et ses élèves. Les mécanismes d'apparition des instabilités d'orientation sous champ électrique (base des affichages à cristaux liquides) sont élucidés, une nouvelle instabilité – dite en chevron – est mise en évidence expérimentalement puis expliquée, l'analyse de la dynamique des fluctuations thermiques d'orientation par diffusion quasi-élastique de la lumière conduit à la première détermination des six coefficients de viscosité – les coefficients de Leslie – nécessaires à la description des écoulements de ces fluides anisotropes... Devant cette moisson impressionnante et le jaillissement constant des idées nouvelles, devant aussi l'apparente facilité d'un certain nombre des expériences correspondantes, le nombre des chercheurs qui, à Orsay, s'intéressent aux cristaux liquides croît très vite, aussi bien au niveau théorique qu'expérimental. Plusieurs thèses démarrent. Le laboratoire de Physique des Solides devient un pôle qui attire des chercheurs américains d'universités prestigieuses (Harvard, MIT...). Ils viennent se former puis repartent et développent aux USA leur propres équipes. L'effervescence règne autour des cristaux liquides, qui se traduit par des séries de grandes conférences internationales, dans lesquelles la communauté française est invitée et reconnue. Pierre-Gilles continue à grands pas de défricher le domaine, s'intéresse aux transitions entre phases cristal liquide, utilise les ruptures de symétrie et ce qu'il connaît bien des approches des lois d'échelles et des systèmes magnétiques pour identifier les exposants critiques de ces transitions, bâtit une analogie entre la transition smectique – nématique et la transition λ de l'hélium... C'est une moisson impressionnante de résultats qui est engrangée, et Pierre-Gilles sent de nouveau l'envie de porter ses efforts ailleurs.

L'année 1971 marque ce tournant : Pierre-Gilles est particulièrement impressionné par la rencontre de Kenneth G. Wilson, qui vient d'appliquer aux transitions de phases les techniques de groupe de renormalisation, et d'expliquer les relations entre exposants critiques et classes d'universalité, en montrant que les exposants critiques ne dépendent que de la dimension du paramètre d'ordre et de la dimension de l'espace. C'est une révolution dans le monde des transitions de phase. Je garde un souvenir précis de Pierre-Gilles entrant dans mon bureau, le soir de cette rencontre, très excité, et disant « j'ai rencontré un gars qui a tout compris des transitions de phases ». Je travaillais alors à mesurer les exposants critiques caractérisant la divergence des constantes élastiques et de certains coefficients de



viscosité à la transition smectique-nématique. Nous étions bien sûr préoccupés par ces questions de classe d'universalité des exposants critiques. Pierre-Gilles avait immédiatement saisi l'importance de l'approche de K. Wilson pour les problèmes de transitions entre phases mésomorphes bien sûr, mais aussi bien au-delà comme la suite immédiate allait le montrer. Ayant gardé en tête les relations entre le rayon d'une chaîne de polymère et sa masse, sur lesquelles il avait réfléchi quelques années auparavant, il avait immédiatement remarqué que les relations de Wilson permettaient de retrouver les exposants des lois d'échelles des polymères, à condition de faire tendre la dimension du paramètre d'ordre vers zéro. C'est le fameux « théorème $n = 0$ », reçu comme une révolution à Orsay, à Saclay et à travers le monde (que signifiait un paramètre d'ordre de dimension égale à zéro ?). Pierre-Gilles, lui, réussissait à étayer l'analogie entre une solution de polymères et un système magnétique proche d'un point critique, permettant d'une part de comprendre l'origine du théorème $n = 0$ (qui stipule qu'en faisant tendre la dimension du paramètre d'ordre vers zéro on ne conserve que les chemins d'interaction sans boucle, et donc on décrit les chaînes de polymère auto-évitantes) et d'autre part de transposer aux solutions de polymères les résultats bien établis des transitions de phases magnétiques. C'était la porte ouverte à l'aventure des polymères. Cette même année 1971, à l'automne, Pierre-Gilles était nommé Professeur au Collège de France, et décidait de quitter Orsay pour monter au Collège de France son propre laboratoire, le laboratoire de Physique de la Matière Condensée (qui deviendrait plus tard, à la demande du CNRS le laboratoire de Physique des Fluides Organisés). À Orsay, les thèses en cours sur les cristaux liquides continuaient, et Pierre-Gilles continuait de les encadrer (Françoise Brochard, Albert Rapini et moi-même). Au Collège de France, il commençait ses cours, et attirait des chercheurs issus d'Orsay pour monter son laboratoire, Christiane Taupin et Madeleine Veyssié, qui démarraient chacune un groupe expérimental respectivement sur les microémulsions et sur les interfaces et tensio-actifs.

Fort de l'analogie magnétique, Pierre-Gilles avance à grands pas dans la compréhension et la description des solutions de polymères par des approches en lois d'échelle en collaboration avec des chercheurs du service de physique théorique du CEA Saclay, Jacques Des Cloizeaux et Gérard Jannink, qui étendent ces approches aux solutions moyennement concentrées où les chaînes sont interpénétrées, permettant enfin de décrire la statistique de ces systèmes au-delà de l'approximation de champ moyen. Maurice Daoud bâtit le diagramme de phase de ces solutions et décrit les effets de température. Les expériences de diffusion de neutrons et diffusion de la lumière confirment très vite la fécondité de ces descriptions (C. Picot, R. Duplessix ; J. Strazielle à Strasbourg ; J.P. Cotton, B. Farnoux, puis un peu plus tard F. Boué, L. Leibler, C. Williams et L. Auvray à Saclay). Comme pour les cristaux liquides, une moisson de résultats marquants était obtenue dans un délai très court : validation des approches de lois d'échelle, de la notion d'écrantage des

interactions, de volume exclu, dynamique collective et fluctuations de concentration en solution semi diluée, modèle des « blobs ». Cinq ans après le théorème $n = 0$, les propriétés statiques des solutions enchevêtrées de polymères flexibles étaient essentiellement comprises, et la dynamique des fluctuations thermiques de concentration l'était aussi. Un second apport essentiel de Pierre-Gilles à la physique des polymères – le modèle de reptation – qui avait émergé en 1971, avait ouvert la voie à la compréhension des comportements viscoélastiques des polymères en solutions enchevêtrées ou à l'état liquide fondu. Au laboratoire de Physique de la matière condensée, l'équipe de Francis Rondelez (que je rejoignais en 76) mettait en place des techniques optiques originales permettant de suivre la diffusion brownienne d'une chaîne parmi les autres et ainsi de tester les limites de validité du modèle de reptation. Ce laboratoire devenait un pôle recherché pour passer une année sabbatique ou un séjour post-doctoral. Le phénomène amorcé à Orsay se poursuivait au Collège, et le style de Gennes constituait peu à peu une communauté internationale de physiciens de la matière molle.

Les comportements des polymères linéaires flexibles étant compris, Pierre-Gilles se tourne vers les polymères ramifiés, la transition sol-gel, la percolation (statique et brassée), relançant les expériences (Mireille Adam et Michel Delsanti à Saclay), puis vers les polymères aux interfaces : description des profils de concentration dans une couche adsorbée (une application remarquable des approches de lois d'échelles), diagramme de phase pour des chaînes greffées en contact avec un fondu ou une solution enchevêtrée, interaction entre plaques portant des polymères adsorbés ou greffés, stabilisation de colloïdes par des polymères, passage de polymères dans des pores fins... Les questions abordées et résolues se succèdent, mais lorsqu'on regarde la liste des publications de Pierre-Gilles dans les années 70-80, on se rend compte qu'il garde en permanence la préoccupation des anciens sujets abordés, et avance souvent en mélangeant les domaines, en s'appuyant sur ce qu'il a déjà découvert ailleurs (par exemple, il décrit le comportement de mélanges de polymères cristaux liquides). Le LPMC a atteint sa taille de croisière, que Pierre-Gilles maintient volontairement relativement petite (une cinquantaine de personnes, thésards compris) parce qu'il se méfie de la lourdeur des grosses structures. Les polymères ne constituent qu'une fraction relativement petite des sujets abordés par les équipes expérimentales, et Pierre-Gilles anime scientifiquement l'ensemble, invitant en permanence les chercheurs à ne pas se laisser enfermer dans des limites étroites de sujets spécialisés, mais au contraire, comme lui, à changer de sujet périodiquement, parce qu'il sait la fécondité de cette démarche, même s'il n'est en rien confortable de devoir presque tout réapprendre tous les cinq ans.

En 1976 Pierre-Gilles prend la direction de l'ESPCI, où il suscite une profonde réforme des études, et fonde le laboratoire de physico-chimie théorique. Puis il pousse à la création du laboratoire de physico-chimie Curie,



cherchant à mettre des physiciens directement en contact avec des biologistes.

Vers 1983-85, nouveau changement de cap : il aborde les phénomènes de mouillage et élucide le rôle des interactions de Van der Waals dans la formation et l'épaisseur finale du film de mouillage des fluides peu volatils, décrit l'élasticité de la ligne de contact liquide – solide – gaz en mouillage partiel, et l'accrochage de cette ligne triple sur les défauts géométriques ou chimiques de la surface solide. Cette nouvelle orientation de recherches est intense et fructueuse, et se traduit par la thèse de Jean-François Joanny et par la publication en 1985 de l'un des articles les plus cités de Pierre-Gilles (*Rev. of modern Phys.*). Trois groupes expérimentaux du Collège de France lancent des programmes sur ces questions : Françoise Brochard et David Quéré pour le mouillage des fibres, Anne-Marie Cazabat pour les étapes finales du mouillage de fluides simples, et moi-même pour la mise en évidence du film précurseur et le mouillage par un fluide polymère. Là encore, la moisson de résultats est rapidement importante. Cette fois-ci, la communauté internationale de la matière molle est constituée, et de nombreux groupes concurrents à travers le monde, en Angleterre, aux USA, en Allemagne... développent des programmes expérimentaux à la suite des idées de de Gennes.

Ayant alors en main le savoir-faire pour décrire à la fois les polymères aux interfaces et les questions de mouillage, Pierre-Gilles se tourne vers les phénomènes d'adhésion puis les phénomènes de friction des polymères. Dans ces deux directions, ses apports sont marquants, avec une proposition de mécanismes moléculaires simples : des chaînes de polymère ancrées à l'interface (par adsorption forte ou greffage chimique) agissent comme des molécules connectrices. Parce que ces chaînes sont des objets déformables, elles s'étirent sous l'effet des forces de traction ou de cisaillement, et lorsque l'assemblage est sollicité jusqu'à la rupture, toute l'énergie élastique de déformation de ces chaînes est perdue, contribuant à augmenter l'adhésion ou à produire des régimes de friction non linéaire. L'incidence pratique de ces questions est colossale, comme pour le mouillage, pour la stabilisation des colloïdes, pour la décoration d'interfaces par des polymères ou des molécules tensioactives. Pierre-Gilles est sollicité par de nombreux grands groupes industriels, et la simplicité de son langage souvent imagé permet la mise en place de nombreux

programmes de collaborations industrielles. Pierre-Gilles apprécie tout particulièrement les rencontres et discussions avec les ingénieurs, parce qu'ils ont souvent un très grand savoir pratique sur bon nombre des systèmes de la matière molle d'utilisation courante dans la vie quotidienne.

En 1991, le talent, la réussite et le rayonnement de Pierre-Gilles de Gennes sont reconnus par le prix Nobel de Physique, attribué pour l'ensemble de ses travaux. Il met à profit la notoriété qui en résulte pour partir en campagne en faveur d'un enseignement des sciences qui donnerait une meilleure place à l'observation et à l'expérience.

Et puis il continue inlassablement à explorer de nouveaux domaines : les milieux granulaires, la dynamique de chaînes de polymères confinées aux interfaces, la transition vitreuse, les matériaux biomimétiques, l'adhésion cellulaire, le fonctionnement du cerveau et de la mémoire, des sujets résolument plus proches de la biologie depuis son installation à l'Institut Curie après sa retraite du Collège de France en 2004. Les publications de ces deux dernières années montrent l'étendue de sa culture et de sa curiosité : à quelques mois d'intervalle, il aborde certains aspects de la dynamique cellulaire, la chimiotaxie des bactéries isolées, leur comportement collectif (montrant l'analogie avec l'attraction gravitationnelle), la localisation d'une information olfactive dans le cerveau, la croissance axonale dans l'hippocampe, mais aussi le mouvement d'une dislocation dans un solide quantique, la friction solide et à nouveau les supraconducteurs !

Au moment de son départ en retraite du Collège de France, nous avons voulu lui offrir l'arbre généalogique des thésards qu'il avait formés, et qui à leur tour avaient formé d'autres thésards ; en se restreignant uniquement à ceux qui sont passés par le LPMC, puis à ceux qui sont issus de chercheurs du LPMC, nous étions arrivés au chiffre impressionnant de près de 80. Et ce n'est là qu'une facette des nombreuses instances dans lesquelles Pierre-Gilles exerçait son influence : Orsay, Saclay, Collège de France, ESPCI, Bordeaux, Lyon, Strasbourg – où il avait externalisé certains de ses cours du Collège de France et aussi poussé d'anciens thésards du LPMC – et puis, bien entendu, les nombreux laboratoires étrangers – en particulier aux USA –, multiples sont les lieux où il a fait école. Ardent avocat d'une science concrète au contact des réalités, il est l'une des grandes figures de la physique française.