

Un maître de la physique quantique exprime son mépris pour l'étude de la matière ordinaire. ¶ L'ardent besoin d'ordre des physiciens est une constante. ¶ L'histoire du développement des semi-conducteurs suit de près l'évolution de la pureté des matériaux de base. ¶

Hors du réseau technologique occidental, point de salut pour la physique expérimentale. ¶ L'usage de la géométrie fractale a brisé une barrière psychologique. ¶ L'exploration du domaine mésoscopique est la nouvelle frontière des physiciens. ¶

Les physiciens aiment l'ordre, ils sont même prêts à payer très cher pour l'obtenir. Dans leurs laboratoires, la matière est purifiée à l'extrême pour ressembler à un objet géométrique. La matière désordonnée, celle de notre vie quotidienne, serait-elle hors de portée de leurs outils traditionnels ?

# MATÉRIAUX REBELLES

**Pablo Jensen**

est chercheur au CNRS,  
département de physique des  
matériaux, université Lyon-I.  
[Pablo.Jensen@dpm.univ-lyon1.fr](mailto:Pablo.Jensen@dpm.univ-lyon1.fr)

**A**U DÉBUT DES ANNÉES 1930, Wolfgang Pauli, futur prix Nobel et déjà grande figure de la mécanique quantique, délivre un conseil lapidaire. A ses collègues qui pourraient se sentir attirés par la toute nouvelle science des matériaux, il explique combien ce domaine lui paraît d'une « saleté dégoûtante » et ajoute que, bien entendu, « les bons physiciens ne devraient pas se vautrer dans la crasse<sup>(1)</sup> » !

Deux décennies plus tôt, les chercheurs avaient montré que tous les matériaux – les couteaux et les verres, l'eau et les montagnes... – sont constitués d'atomes, minuscules particules aux propriétés bizarres et mal maîtrisées. Grâce à l'effort assidu de figures comme Albert Einstein, Niels Bohr et Max Planck, une nouvelle physique était née. Les propriétés de la matière « ordinaire » s'expliqueraient-elles grâce à la combinaison d'atomes soumis aux règles déroutantes de la mécanique quantique ? Au moment où Pauli exprime son mépris, de nombreux physiciens sont effectivement tentés par l'aventure.

Ils auront de nombreux descendants puisque, aujourd'hui, on estime qu'environ le tiers des physiciens se consacre à l'étude des matériaux. Les propos de Pauli étaient-ils aussi ridicules qu'ils paraissent ? Nous verrons qu'ils

éclaircissent en fait une facette essentielle du travail des physiciens : leur ardent besoin d'ordre. Deux épisodes récents de l'histoire de la physique nous montreront que cette science a le plus grand mal à comprendre et maîtriser la matière si elle ne lui impose pas d'abord un ordre strict. Pour les physiciens, le concept d'ordre a une signification précise : il doit s'entendre autant du point de vue de la structure atomique de la matière, c'est-à-dire de son organisation spatiale, que de sa composition chimique (voir l'encadré : « Une définition négative », p. 24).

**LE TRANSISTOR,**

**PAR ORDRE DU SILICIUM.** Nul besoin d'insister sur les bouleversements qu'a provoqués l'électronique dans notre vie quotidienne. Au cœur de cette révolution, se trouve un dispositif imaginé par des physiciens : le transistor. Tout commence en 1931, lorsque le théoricien britannique Alan Wilson prédit l'existence de matériaux nouveaux : dotés d'une conductivité intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants comme le verre, ils seraient « semi-conducteurs » et, de plus, leur conductivité pourrait être facilement modifiée par l'ajout d'infimes quantités d'impuretés. La fin de l'article de Wilson témoigne néanmoins d'une saine prudence : « Du point de vue



Pour le futur prix Nobel Wolfgang Pauli, ici entouré de ses collègues Paul Dirac (à gauche) et Rudolph Peierls, la physique des matériaux n'a aucun intérêt : elle est « d'une saleté dégoûtante » !



Japanese Maple Leaves, Supported by a Woven Birch Ring [Feuilles d'érable japonais, sur un anneau de bruyère tissée], 1987, « sculpture » de l'artiste britannique Andy Goldsworthy, dont l'œuvre joue avec les frontières du naturel et de l'artificiel, de l'ordre et du désordre.

Qu'est-ce qu'un matériau parfaitement ordonné ? Il s'agit d'un corps possédant une structure atomique parfaitement périodique, un motif de base se répétant d'un bout à l'autre. Cette situation est idéale pour le physicien, car le système d'étude est parfaitement défini, et tous les

## UNE DÉFINITION NÉGATIVE

atomes ont le même environnement. Ils sont donc rigoureusement équivalents, ce qui sim-

plifie considérablement les calculs car il suffit de comprendre le comportement d'un seul atome, même si l'on étudie un solide infini !

Le désordre est ensuite défini de manière négative, comme tout écart à cette structure ordonnée qui sert de référence. Il existe deux types principaux de désordre, que l'on peut quantifier par l'entropie [lire l'article de Gérard Chevalier, p. 82]. D'abord un désordre de la structure atomique, quand les atomes ne sont pas à « leur » place. On parle aussi de désordre [cette fois de composition] lorsque d'autres types d'atomes s'insèrent au hasard dans la structure, même si celle-ci reste géométriquement ordonnée. Dans ces deux cas, les atomes ne sont plus équivalents, et les calculs deviennent très compliqués [les raisons, un peu techniques, sont expliquées dans l'ouvrage *Entrer en matière*, voir « Pour en savoir plus », p. 27].

Cette définition purement négative du désordre est significative de l'approche physicienne de la matière, privilégiant les structures qui se prêtent le mieux à un traitement mathématique. Comme le dit Bergson (voir l'extrait de *L'Évolution créatrice* dans ce numéro, p. 19) : « Le désordre est de l'ordre que nous ne cherchons pas. » ♦

*expérimental, l'existence ou l'inexistence des semi-conducteurs demeure une question ouverte. Du point de vue théorique, il n'y a pas de raison pour interdire leur existence. Expérimentalement, cependant, les seules substances qui présentent des caractéristiques semi-conductrices convaincantes sont très impures, et il se pourrait qu'il s'agisse d'isolants<sup>(2)</sup>. »*

Cette réserve n'empêche pas les spéculations de Wilson de susciter un grand intérêt chez les ingénieurs de la Bell, la grande compagnie de téléphonie. Celle-ci est alors sous la pression d'innombrables petites compagnies locales, et, pour ses dirigeants, le salut réside dans la commercialisation de liaisons téléphoniques transcontinentales. Malheureusement, la voix transmise par un courant électrique s'affaiblit trop rapidement : les appels se révèlent incapables de traverser les États-Unis d'est en ouest... Les ingénieurs sont donc sommés d'imaginer des dispositifs permettant d'amplifier efficacement les courants électriques. Les semi-conducteurs prédits par Wilson sont des candidats sérieux. Leurs caractéristiques électriques semblent pouvoir être facilement modulées, ce qui ouvre la porte à des amplificateurs nouveaux, s'appuyant sur un contrôle précis du comportement des électrons, et,

potentiellement, à des dispositifs beaucoup plus compacts et rapides que les lampes à vide utilisées jusqu'alors.

L'énorme enjeu industriel provoque une grande effervescence au sein de la Bell, et de nombreux dispositifs sont imaginés à partir des calculs des théoriciens. Toutes ces tentatives se soldent d'abord par des échecs. Les matériaux utilisés sont trop capricieux, trop désordonnés pour être fiables. Par exemple, les ancêtres des transistors, les redresseurs en cuivre oxydé destinés à capter les signaux radio, ne fonctionnent qu'avec un seul type de cuivre, en provenance du Chili. Il faut de plus chercher à tâtons un endroit précis du redresseur qui soit efficace (le « *hot spot* »), ce qui exige beaucoup, beaucoup de patience. L'étude de ces matériaux s'apparente ainsi un peu à de la magie noire, ce qui apporte de l'eau au moulin de Pauli !

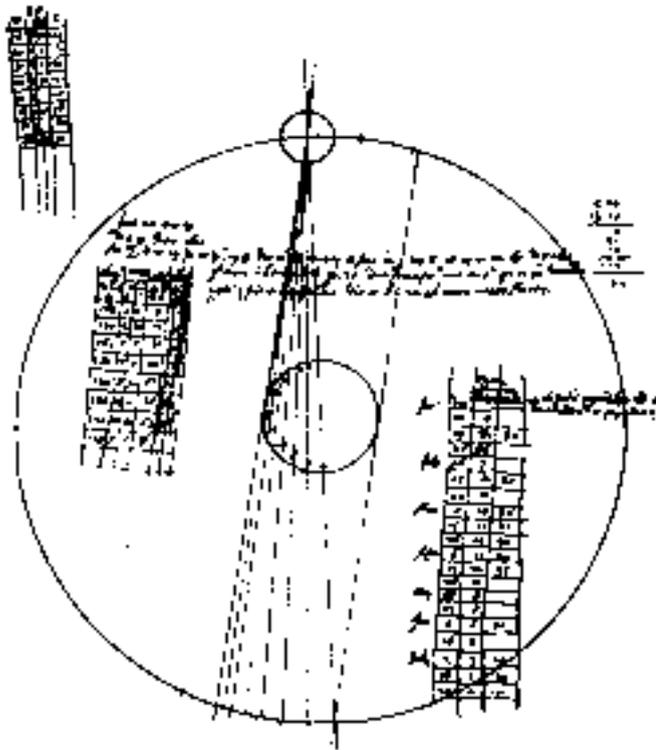
Autre exemple de ces difficultés, la déconvenue qui frappe l'Allemagne nazie lorsqu'elle décide de changer le lieu d'approvisionnement du matériau de soudure employé dans ses redresseurs au sélénium. La modification dégrade terriblement leurs performances, sans qu'on sache trop pourquoi. On revient simplement à la source d'approvisionnement première, ce qui élimine les pannes, mais n'avance guère la compréhension du phénomène...

Même après la mise au point de procédés fiables pour la production en masse, des complications peuvent survenir. Ainsi, les laboratoires Bell seront confrontés à d'énormes problèmes de fiabilité avec leurs transistors au début des années 1950. Les ingénieurs les attribueront en plaisantant à de mystérieux atomes de *death-nium* (« *mortium* »). Après des mois d'inquiétude et d'errements, on découvrira qu'il s'agit plus banalement d'infimes quantités de cuivre provenant des poignées de portes des ateliers...

De fait, comme le signalent Michael Riordan et Lillian Hoddeson dans leur ouvrage de référence sur l'histoire du transistor, les physiciens pouvaient bien imaginer tous les systèmes qu'ils voulaient, leurs croquis resteraient « *une sorte de masturbation mentale* » tant que les matériaux qui devaient les concrétiser resteraient capricieux. Pour que les dispositifs idéaux imaginés par les théoriciens puissent être inscrits dans la matière, il faut donc d'abord réussir à mieux en contrôler les propriétés. C'est à William Pfann, entré à la Bell sans le moindre diplôme, que l'on doit une méthode rapide et peu coûteuse de purification des semi-conducteurs.

Pfann profite de ce que les impuretés « préférées » se trouvent dans le semi-conducteur à l'état liquide plutôt que solide. Il a ainsi l'idée astucieuse de balayer un barreau solide par un petit four qui, produisant une fonte locale, permet de faire passer une petite zone liquide d'un bout à l'autre du barreau. Les atomes d'impureté sont alors contraints, telles les souris du conte, à suivre le four qui, comme le flûtiste de Hamelin, les conduit jusqu'à l'extrémité du barreau, purifiant du coup le solide. En repassant plusieurs fois le four sur le barreau et en coupant chaque fois les bouts qui concentrent les impuretés, Pfann parvient dès le début des années 1950 à obtenir des échantillons de germanium purs à plus de 99,99999999 % : soit moins d'un atome d'impureté pour 10 milliards d'atomes de semi-conducteur ! La Bell souligne l'exploit, digne de figurer dans le *Livre des records* : c'est l'équivalent d'une pincée de sel dans 35 wagons de sucre... Pour l'historien Ernest Braun, l'anecdote est d'importance : « *L'histoire du développement des dispositifs à semi-conducteurs suit de très près l'évolution de la qualité du matériau de base [silicium, germanium]. [...] Malgré de chauds débats sur la possibilité de bâtir toute une filière industrielle sur un matériau aussi [exigeant], contrôlé et parfaitement ordonné, [...] il s'est avéré qu'il aurait été impossible de construire en grande échelle des transistors sans cela<sup>(3)</sup>. »*

# GALILÉE ET LES MATHÉMATIQUES



Pour justifier son choix d'une science fondée sur les mathématiques, Galilée offre deux arguments. D'abord un argument ontologique bien connu : « *La philosophie est écrite dans ce livre gigantesque qui est continuellement ouvert à nos yeux [je parle de l'Univers], mais on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langage mathématique, et les caractères sont des triangles, des cercles, et d'autres figures géométriques, sans lesquelles il est impossible d'y comprendre un mot. Dépourvu de ces moyens, on erre vainement dans un labyrinthe obscur.* » Cela est joliment dit, mais malheureusement assez peu vérifiable, car qui sait de quoi est « réellement » constitué le monde ?

Galilée propose alors un autre argument, plus sérieux, qui repose sur notre connaissance parfaite des vérités mathématiques, à l'inverse de nos connaissances dans d'autres domaines : « *Les hommes savent planter un sarment de vigne, mais Dieu seul sait faire pousser les racines, puiser la nourriture, en tirer et en distinguer les éléments propres à former les feuilles, les vrilles, les grappes, les grains et les pépins. Mais en ce qui concerne les propositions géométriques, l'entendement humain en comprend quelques-unes aussi parfaitement et en a une certitude aussi absolue que Dieu lui-même.* »

Désormais, pour la toute nouvelle science mise en place par Galilée, « *expliquer, c'est transformer, grâce à une construction adéquate, un fait physique en un problème mathématique, puis utiliser pour sa résolution les résultats déjà établis par la science mathématique.* ». Ce programme de recherche est toujours d'actualité ! ◇

Note de calculs astronomiques de Galilée,  
datée du 6 janvier 1611.

## ORDONNER POUR

**COMPRENDRE.** Ce besoin de matériaux aussi parfaitement ordonnés s'exprime-t-il uniquement dans les applications technologiques de la physique ? Il n'en est rien, car les physiciens ont aussi besoin d'ordre pour comprendre la matière. Songeons à l'exemple des métaux, dont l'humanité avait su tirer profit bien avant l'invention de la physique. Comment les physiciens s'y sont-ils pris pour essayer de comprendre (et de perfectionner) les pratiques des métallurgistes ? Le même Ernest Braun, faisant l'histoire du domaine, résume la situation : « *Probablement l'étape la plus importante pour passer de la métallurgie, au sens de l'ingénieur, à la physique des métaux fut l'introduction de monocristaux très purs à la place des polycristaux utilisés jusqu'alors pour l'expérimentation.* »

En effet, quand les théoriciens de la matière voulurent calculer la résistance mécanique d'un métal, ils supposèrent « *tout naturellement* » qu'il est constitué d'un empilement parfaitement ordonné d'atomes d'une seule sorte. C'était en fait la seule configuration sur laquelle ils savaient effectuer les calculs ! Mais il leur était malheureusement impossible de comparer leurs prédictions à des valeurs réelles, car les résultats expérimentaux se révé-

laient trop variables. L'un des spécialistes du domaine, le physicien anglais Geoffrey Taylor, le souligne à l'époque : « *De toutes petites quantités d'impureté peuvent significativement changer les résultats et il est donc difficile d'être certain que ceux-ci correspondent aux résultats qui seraient obtenus sur des échantillons parfaits du point de vue cristallin et de la pureté.* » On fabriqua donc des cristaux bien contrôlés... qui se déformaient sous des forces beaucoup plus faibles que celles prédites par les théoriciens ! Il fallut alors admettre que même les cristaux bien contrôlés contiennent des défauts de structure facilitant leur déformation.

On introduisit le concept de « dislocation », qui désigne une distorsion de la structure cristalline et qui, après quelques débats, fut accepté par l'ensemble des physiciens. Encore faut-il préciser que les dislocations ne sont pas forcément très utiles aux métallurgistes, qui font rarement appel aux résultats de la recherche fondamentale en physique des métaux. Ils travaillent en effet sur des échantillons trop désordonnés (du point de vue de la structure atomique comme de la composition) pour que les calculs des physiciens leur soient utiles et, pour d'évidentes raisons économiques (le coût très élevé de la purification), ils ne sont pas près d'en changer !

## LES FORCES

**DE L'ORDRE.** Nous comprenons mieux à présent le dégoût de Pauli pour ce domaine des matériaux, si rebelle dans les années 1930 aux superbes théories des physiciens. Car ce qui motive Pauli, et nombre de ses collègues théoriciens, c'est une quête quasi religieuse d'un savoir sûr, sans contestation ni polémique. Dans cette quête d'absolu, le savoir rigoureux que l'on peut bâtir sur les mathématiques constitue un outil irremplaçable. Galilée fut le premier, dès le début du XVII<sup>e</sup> siècle, à proposer d'utiliser les raisonnements rigoureux des mathématiques pour comprendre le réel, fondant du même coup les sciences modernes (voir l'encadré : « Galilée et les mathématiques », ci-dessus).

Bien sûr, un problème demeure : si les mathématiques permettent de fonder un savoir parfaitement rigoureux, rien ne garantit que ce savoir sera pertinent pour l'étude de notre bas monde. Après tout, les tentatives d'utilisation des mathématiques pour comprendre les émotions ou prédire l'évolution de l'économie nous laissent plutôt perplexes. Pourquoi en va-t-il autrement dans l'étude de la matière ? Parce que, justement, les physiciens sont parvenus à transformer la matière pour la purifier, l'ordonner et la rendre assez semblable à un objet géométrique !

D'autres domaines n'ont pas cette chance. Songeons aux difficultés des médecins ou des nutritionnistes pour déterminer des règles générales applicables à tous les êtres humains. Nous réagissons conformément à notre constitution particulière, et ce qui marche pour une personne n'est pas forcément applicable à une autre. Voilà un cauchemar pour le physicien, qui a besoin que tous les corps réagissent de la même façon... Galilée avait d'ailleurs bien perçu la difficulté dans ses *Dialogues*: « *Le philosophe géomètre qui veut retrouver dans le concret les effets démontrés dans l'abstrait doit commencer par compenser les obstacles dus à la présence de la matière.* » Le vocabulaire est révélateur: la matière réelle, désordonnée, est considérée comme un obstacle pour les physiciens. Ils n'étudieront donc pas la matière « naturelle » directement, mais utiliseront leurs laboratoires pour la standardiser et s'éviter, autant que possible, les problèmes de variabilité, de propriétés mal maîtrisées.

#### LIMITES

**À L'ORDRE.** Ce besoin de simplification impose des limites à la compréhension du monde par les physiciens. D'abord, tout bêtement, à cause du coût qu'entraînent ces transformations. Ainsi, on peut acheter du silicium standard, garanti pur à 99 %, pour 30 euros les 100 grammes. Mais si l'on veut le même poids de silicium parfaitement ordonné et garanti pur à 99,9995 %, il faudra déjà déboursier une bonne centaine d'euros. Le silicium représente pourtant une heureuse exception, car les autres matériaux sont bien plus difficiles à purifier et reviennent beaucoup plus cher! La technologie de fabrication des circuits électroniques actuels, qui exige des conditions extrêmes de pureté, entraîne ainsi des coûts se chiffant en milliards d'euros, ce qui oblige les industriels à des regroupements pour supporter les investissements.

Aujourd'hui, on peut affirmer que les matériaux parfaitement cristallins et très purs ne constituent donc plus une pure abstraction, du moins si l'on se trouve à l'intérieur du réseau technologique occidental. En dehors, faire de la physique expérimentale est une tout autre histoire! Ce n'est pas un hasard si les rares pays du tiers monde qui font de la physique sont surtout réputés pour leurs théoriciens...

Mais les considérations économiques n'expliquent pas totalement pourquoi la compréhension de phénomènes simplifiés en laboratoire ne donne aucune garantie de réussite en ce qui concerne la matière réelle. Ainsi, plusieurs domaines voisins de la chimie, la corrosion et la catalyse par exemple, résistent à

l'approche des physiciens. Dans ces deux domaines, le fait de partir de situations idéales, avec des surfaces très contrôlées et peu de molécules (c'est-à-dire dans un vide très poussé), éclaire peu les phénomènes réellement intéressants, qui impliquent un nombre énorme de molécules. La catalyse industrielle se pratique sous des pressions plusieurs milliards de fois plus fortes que dans les études fondamentales, mais il est alors impossible aux physiciens de contrôler quoi que ce soit. Leur stratégie habituelle, consistant à diviser un problème compliqué en plusieurs problèmes simples et à les étudier séparément, n'a toujours pas fourni de résultats très probants dans ces divers domaines.

Enfin, la presque totalité de la matière réelle présente, outre son hétérogénéité chimique, des structures véritablement très compliquées à l'échelle atomique. Même en oubliant les impuretés, on se trouve en général bien loin du solide parfaitement ordonné, et dans ce cas aussi les physiciens sont pris à contre-pied. Les matériaux amorphes, qui constituent pourtant l'immense majorité de la matière à l'état naturel, sont encore mal compris. Par exemple, l'un des sujets les plus mystérieux de la physique concerne la formation des banales vitres des fenêtres: nul ne sait encore ce qui se passe exactement à l'échelle atomique (lire l'article d'Hervé Arribart, p. 76). Les matériaux organiques, qui présentent une hiérarchie très complexe d'organisation à différentes échelles, sont également difficiles à appréhender, car ils exigent une description trop fine des différents niveaux.

#### UN LABYRINTHE

##### SANS FIL

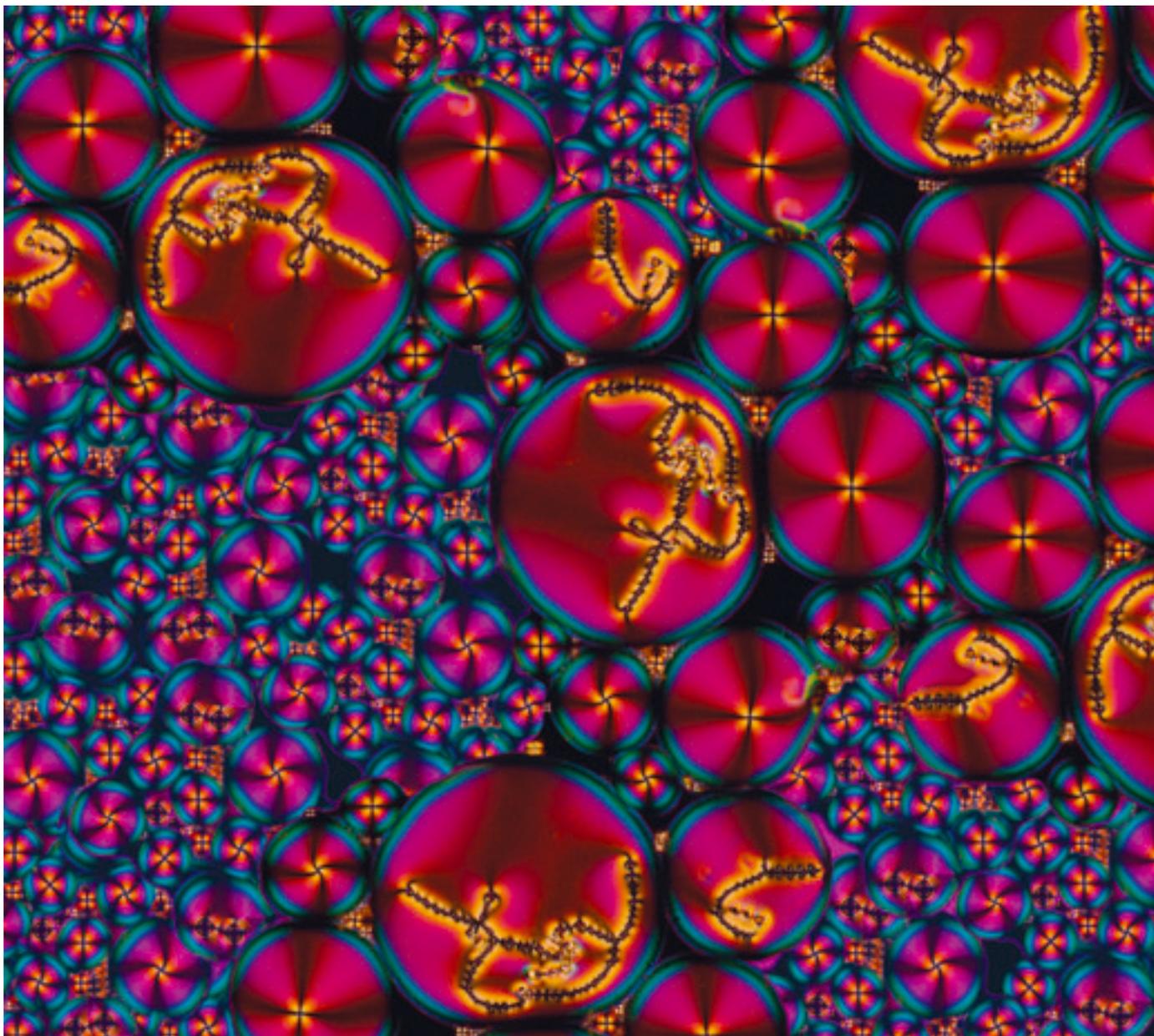
**D'ARIANE.** N'imaginons donc pas que notre bas monde quotidien est trop simple pour des physiciens qui évolueraient dans d'autres sphères, bien plus savantes. Au contraire, notre monde est en général trop compliqué, trop désordonné pour que leurs outils intellectuels soient efficaces! La tentation est alors grande d'ignorer ou de mépriser ce monde rebelle, en se réfugiant dans le monde idéal des mathématiques parfaites. Sait-on que les deux manuels de base de la physique de la matière, qui datent des années 1950 et 1970, se permettent par exemple d'ignorer totalement les solides désordonnés?

On imagine volontiers Pauli tirant la morale de ce voyage sur l'air de *La Route aux quatre chansons* de Brassens: « *Par bonheur, par consolation, me sont restées mes équations.* » Mais on ne lui laissera pas le dernier mot. Car la physique, après avoir exploré les chemins de la matière qui cédaient le plus facilement à son point de vue, s'attaque aujourd'hui

d'hui à des matériaux plus récalcitrants. Les plastiques, les colles, les verres ou les tas de farine sont parmi les nouveaux sujets préférés des physiciens. Mais les outils qui leur étaient familiers sont évidemment inadaptés. Il serait en effet trop compliqué de rentrer dans le dédale des mouvements atomiques de ces corps désordonnés, véritable labyrinthe pour lequel il n'existe pas de fil d'Ariane. Impossible aussi de « moyenner » le désordre pour aboutir à des lois macroscopiques, comme cela a été fait pour les liquides ou les gaz, dans lesquels les mouvements erratiques des molécules individuelles se compensent et donnent une densité ou une viscosité macroscopique qui suffit à décrire ces fluides. Il a donc fallu développer des approches innovantes, dont voici deux exemples.

Le premier concerne les phénomènes dits « universels », c'est-à-dire indépendants des détails microscopiques. Ainsi, le bruit émis par un matériau qui se fracture, un papier que l'on froisse ou un tremblement de terre, provient de l'énergie dissipée à de nombreuses échelles de longueur. Les physiciens mettent ici en œuvre des approches dites « autosimilaires », qui exploitent l'équivalence de toutes ces échelles pour trouver des lois générales. La géométrie fractale, développée par Benoît Mandelbrot, est particulièrement adaptée pour décrire ce type de phénomènes. Son adoption par l'ensemble des physiciens a incontestablement cassé une barrière psychologique, qui les détournait de ces systèmes sur lesquels ils n'avaient auparavant aucune prise.

La plupart des matériaux naturels ne se prêtent cependant pas à une telle approche. Pour « oublier » la structure atomique, on peut alors tenter d'identifier, grâce à l'intuition physique, l'entité qui, à l'échelle de quelques milliers d'atomes ou quelques dizaines de nanomètres (l'échelle mésoscopique), est pertinente pour le phénomène étudié. Ainsi, pour expliquer la déformation des plastiques à l'état liquide, état très utilisé pour leur mise en forme, Pierre-Gilles de Gennes proposa le modèle de « reptation ». Chaque polymère y est vu comme un ver de terre essayant de se faufiler dans l'enchevêtrement des autres chaînes. Cette analogie lui permit d'ignorer la composition atomique précise du plastique et de prédire la vitesse à laquelle il se déforme, prédiction confirmée expérimentalement par la suite<sup>(4)</sup>. L'exploration de ce domaine mésoscopique représente aujourd'hui une « nouvelle frontière » pour les physiciens. Certains vont même jusqu'à suggérer que de nouveaux principes d'organisation – compatibles avec les lois microscopiques mais ne pouvant pas en être



© David Weitz/ Harvard

déduits – pourraient opérer à cette échelle. Ces principes seraient notamment utiles pour une approche physique des phénomènes biologiques : par exemple, en aidant à mieux comprendre les propriétés incroyables des protéines, qui sont capables de catalyser un grand nombre de réactions chimiques très différentes ou de s'assembler spontanément pour former l'enveloppe des virus (lire l'article de James Tabony, p. 48).

On le voit, les physiciens sont en train d'inventer de nouvelles façons d'aborder la matière, excluant tout mépris des matériaux complexes, et acceptant l'inévitable désordre de ces substances. Après tout, « désordre » a d'abord désigné en français (vers l'an 1200) un « manquement aux règles monastiques » imposées par les « ordres » religieux. Il serait peut-être temps de tourner la page! P.J. ♦

**Des gouttes de cristaux liquides** (diamètre des plus grandes : quelques centaines de micromètres) sont déformées par l'intrusion de gouttelettes d'eau : sous l'influence de l'ordre cristallin, celles-ci s'assemblent en chaînes (filaments noirs). Pour décrire ce type de structures complexes, les physiciens doivent inventer de nouveaux outils

#### RÉFÉRENCES

- (1) Lettre de Pauli à Rudolph Peierls du 29 septembre 1931, *Scientific Correspondence II*, p. 94.  
 (2) A. H. Wilson, *Proc. Roy. Soc.*, 277, 1931.  
 (3) E. Braun, in L. Hoddeson *et al.*, *Out of the Crystal Maze: Chapters from the*

*History of Solid State Physics*, Oxford University Press, 1992.  
 (4) En français, on pourra lire *La Juste Argile*, M. Daoud et C. Williams (éd.), Editions de Physique, 1995. Une référence plus technique est P.-G. de Gennes, *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Cornell University Press, 1979.

#### POUR EN SAVOIR PLUS

- ☞ P. Jensen, *Entrer en matière. Les atomes expliquent-ils le monde?*, Seuil, 2001.
- ☞ M. Riordan et L. Hoddeson, *Crystal Fire: The Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age*, Sloan Technology Series, 1998.
- ☞ R.W. Cahn, *The Coming of Materials Science*, Pergamon, 2001.
- ☞ Maurice Clavelin, *La Philosophie naturelle de Galilée*, Albin Michel, 1996.

www.larecherche.fr