



L'intelligence en physique

PIERRE-GILLES DE GENNES

Comment devenir un bon physicien? Chaque nouveau problème apporte son lot de difficultés. Le physicien théoricien a besoin d'intuition et de chance pour naviguer entre le Charybde du formalisme excessif et le Scylla de l'expérimental inextricable.

La préoccupation centrale est la recherche de modèles simples qui décrivent les phénomènes. Attention : le modèle utile n'est pas nécessairement unique. Ainsi, dans les années 1950 s'est posée la question du comportement des noyaux atomiques dans un champ magnétique. Le groupe d'Edward Purcell, à l'Université de l'Illinois, a tout fondé sur les niveaux d'énergie du proton dans un champ magnétique : leur position, leur largeur, etc. À l'Université Stanford, Felix Bloch procéda très différemment : il assimila le spin (ou moment magnétique) des atomes à un petit gyroscope soumis à des couples qui le faisaient précesser (la précession d'une toupie est la rotation de son axe de rotation) et retrouva les résultats de Purcell. Toutefois son modèle lui donnait beaucoup plus : il décrivait les mécanismes transitoires, qui ont ensuite été utilisés pour la mise au point des techniques de résonance magnétique nucléaire. Au total, deux modèles très différents d'une même réalité.

L'étude des polymères nous a montré, aussi, que le bon choix des modèles est parfois conjoncturel. Les polymères sont composés de très longues molécules ; un matériau composé de polymères à l'état fondu, ressemble à un plat de spaghettis enchevêtrés. Comment calculer son comportement? Samuel Edwards, à l'Université de Cambridge, avait remarqué que les polymères faisaient des nœuds, et il avait utilisé la théorie mathématique des nœuds pour déterminer les propriétés physiques des polymères fondus. Bien qu'intéressante, cette approche fut peu féconde.

Plus tard est apparue une description différente, qui considère que chaque chaîne est un serpent qui ondule dans un tube étroit, autour de sa position initiale ; c'est la théorie de la reptation. On comprend aujourd'hui que la description en termes de nœuds était limitée pour plusieurs raisons : premièrement le problème

de la classification des nœuds est un problème mathématiquement inachevé ; deuxièmement les nœuds mathématiques exigent des fils infiniment longs ou refermés sur eux-mêmes, contrairement aux molécules de polymères, qui sont de longueur finie ; enfin c'est la façon de défaire les nœuds qui détermine la dynamique des matériaux polymères.

Au total, le physicien passe une bonne partie de son temps à tester des représentations. Il fait souvent de mauvais choix, mais, parfois, ceux-ci lui donnent des idées pour progresser : on modélise avec les bonnes idées, mais les brouillons sont utiles.

Dans la physique que je rencontre, les idées viennent rarement comme des éclairs divins. Les nuits de Pascal sont exceptionnelles, et les maturations sont lentes. Voici un exemple : la description des solutions de polymères au contact d'une surface solide. Ce problème est important, car les solutions de polymères contenant des particules solides sont omniprésentes : le blanc d'œuf est une solution de polymères ; un pot de peinture contient des pigments et des polymères.

Les physico-chimistes avaient lentement déterminé les particularités de l'absorption des polymères sur les surfaces, et les physiciens théoriciens avaient modélisé l'ensemble des données. Toutefois il fallut encore dix ans de réflexion pour qu'apparaisse le modèle qui éclaire vraiment le problème : on assimile le polymère à une grille dont la maille est de plus en plus serrée quand on se rapproche de la surface. Ce modèle permet l'explication quantitative d'une foule de phénomènes. Il a permis d'obtenir une vision simple. Nous avons eu de la chance.

Le formalisme est parfois un danger (aggravé par l'informatique) : il permet de décrire les phénomènes dans trop de détails, au détriment de la compréhension profonde. Le physicien doit ignorer certains détails. Dans le cas des polymères au contact des surfaces, par exemple, on cherche une représentation qui ne fasse pas intervenir les particularités chimiques des molécules de polymère et des surfaces ; on regarde seulement les formes globales. En revanche, si l'on veut cor-

rectement résoudre le problème technique de recouvrir une surface solide d'une couche de polymères isolants, par exemple, on devra se préoccuper de la structure tridimensionnelle des chaînes et de leurs liaisons éventuelles avec les molécules de la paroi : ces propriétés dépendront de la constitution chimique précise des chaînes.

Je tiens à insister sur le travail à effectuer : le physicien ne se contente pas de rêver à une solution jusqu'à ce qu'elle vienne. Pour obtenir une description simple des phénomènes physiques, il doit avoir une solide culture : celle-ci s'acquiert lentement, laborieusement. Bloch, par exemple, n'a comparé le spin atomique à un gyroscope que grâce à sa connaissance fine de la mécanique quantique et, notamment, du travail de Julian Schwinger, de l'Université Harvard. On ne trouve pas de bonne analogie quand on n'est pas guidé par des mathématiques puissantes.

C'est notamment pour cette raison que je recommande souvent aux étudiants français d'utiliser le cours de Lev Landau, assez mathématique, plutôt que le cours de Richard Feynman. Ce dernier est plus profond que le texte de Landau, mais il s'adresse à des personnes qui ont déjà assimilé le formalisme.

Peut-on devenir «intelligent»? Il ne s'agit pas d'être malin : la rapidité d'esprit à la française, la «pointe» de Cyrano de Bergerac, me semble nuire à nos étudiants, qui oublient alors parfois de creuser les sujets. Je crois beaucoup à l'échange d'idées, mais cet échange ne doit pas se transformer en duel intellectuel ; il n'est fructueux que s'il est une invitation à une réflexion ultérieure. Personnellement, je dois beaucoup à Feynman que je n'ai jamais rencontré, mais dont j'ai lu très tôt deux articles sur la superfluidité de l'hélium. Ces articles qui contenaient peu d'équations, m'ont plus appris, par leur style, que des années d'étude. Les enseignants ne devraient-ils pas faire lire des articles de ce genre à tous les étudiants?

Ce serait en tout cas une contribution à l'élaboration de cette culture. L'inculture est redoutable : il est naïf de croire que n'importe qui peut trouver

de bons modèles physiques sans un entraînement patient.

Inversement l'excès de culture paralyse, tout comme l'excès d'informations! Quand notre groupe s'est intéressé aux polymères, l'information était pléthorique : les physiciens et les chimistes faisaient une multitude d'expériences, de résonance magnétique nucléaire ou de spectroscopie infrarouge, par exemple, qui donnaient des informations excessivement détaillées. Les théoriciens étaient égarés : ils accumulaient les effets physiques simultanés et les paramètres ajustables, de sorte que les modèles qu'ils élaboraient étaient nécessairement obscurs.

Pour simplifier, nous avons décanté l'information, avant d'identifier les données qui ont conduit à des modèles clairs. Je crains fort que l'usage du réseau *Internet* ne crée ainsi un excès d'informations, dont on devra se dégager avant d'identifier les données utiles.

Landau lui-même a souffert d'un excès de culture, à propos de l'antiferromagnétisme. On avait d'abord compris le ferromagnétisme : c'est une situation où les aimantations des atomes voisins tendent à se mettre parallèles. Puis les physiciens s'intéressèrent à d'autres matériaux, qui présentaient des caractéristiques magnétiques inhabituelles. Louis Néel et Landau se sont alors demandé théoriquement quels effets on obtiendrait si les aimantations des atomes voisins préféreraient être antiparallèles, c'est-à-dire dans la même direction, mais de sens opposés. Néel a correctement prévu les effets possibles d'une telle situation : ses descrip-

tions ont expliqué nombre d'observations. Landau, également, avait eu cette idée du couplage antiparallèle, mais il était trop savant : connaissant bien le problème quantique à deux moments magnétiques (qui est un peu pathologique), il pensa que le couplage antiparallèle ne pouvait conduire à une phase ordonnée... et il manqua la théorie de l'antiferromagnétisme. Méfions-nous des *a priori* théoriques.

Quelle doit être la place respective des physiciens théoriciens et des expérimentateurs? Parfois la théorie guide l'expérimentation : ce fut le cas pour la théorie de la superfluidité, qui suscita beaucoup d'expériences dès le début de son développement. En revanche, la théorie risque toujours de se figer : après l'explication de la supraconduction par John Bardeen, Léon Cooper et John Schrieffer, les physiciens théoriciens ont cru le sujet achevé... et ils n'ont pas prévu l'existence des oxydes supraconducteurs à haute température critique!

Pour en revenir au rôle des théoriciens, je les vois comme des catalyseurs. Leur proportion n'est pas nécessairement importante, dans les équipes, mais ils jouent un rôle important de «pollinisation» quand ils visitent beaucoup de laboratoires.

Les grandes lignes d'une forme d'aptitude à la physique ayant été ainsi considérées, quelles qualités sont-elles utiles? Certaines qualités spécifiques sont un atout : par exemple, en France, deux chercheurs, Jacques Friedel et Yves Bouligand, sont doués d'une

exceptionnelle vision dans l'espace : elle a considérablement facilité la recherche sur les défauts dans les cristaux liquides.

D'autre part, les physiciens théoriciens ont intérêt à suivre couramment le catalogue des nouveaux outils théoriques ; et à évaluer leurs potentialités pour leur recherche personnelle.

Il y a aussi une gymnastique mentale utile à tous : c'est la détermination d'ordres de grandeur, qui permet au physicien de s'assurer qu'il perçoit bien le problème qu'il étudie. C'est un garde-fou, qui évite de croire prépondérants des phénomènes de deuxième ordre. On peut s'amuser à chercher des ordres de grandeur à propos de n'importe quoi. On utilise un stylo en matière plastique : quelle est la production annuelle de plastique en France? On joue du piano : peut-on estimer le nombre d'accordeurs de piano à Paris (c'est un problème que le physicien Enrico Fermi posait, jadis)? On disperse dix tonnes d'atomes radioactifs sur l'Europe occidentale, à partir de Tchernobyl : combien de molécules chimiques ou biologiques seront détruites par mètre carré? Le jeu des ordres de grandeur n'est pas suffisant, pour faire un bon physicien, mais il est sans doute nécessaire.

Pierre-Gilles de GENNES est professeur au Collège de France et directeur de l'École de physique et de chimie industrielles de Paris.



L'intelligence du chimiste

JEAN-MARIE LEHN

L'intelligence du chimiste? La difficulté de cette question est aggravée par la diversité de la chimie : un chimiste qui cherche à synthétiser des molécules organiques ne met pas en œuvre les mêmes talents qu'un spécialiste d'analyse, par exemple. Toutefois la chimie fait appel à trois types d'intelligence.

Tout d'abord, une faculté «conceptuelle» qui permet de dégager une règle, une caractéristique générale, d'un ensemble souvent touffu de faits expérimentaux. La grippe se manifeste diffé-

remment chez les divers individus, mais c'est toujours la grippe ; de même, un groupe fonctionnel, tel le groupe thiol -SH, a des propriétés différentes selon la nature exacte de la molécule qui le contient, mais tous les groupes thiols ont une réactivité commune. Savoir identifier ces propriétés communes ou savoir dégager des règles qui expliquent le mécanisme des réactions, dans la forêt des faits expérimentaux : voilà une capacité que le chimiste gagne à acquérir.

La deuxième faculté importante est l'observation : un bon chimiste doit savoir

observer, ne pas passer à côté de détails qui peuvent se révéler importants, être attentif et ne pas rejeter l'inattendu par lequel les faits veulent en quelque sorte nous dire quelque chose.

Enfin, le chimiste doit être capable de percevoir l'organisation, l'organisation spatiale d'abord – c'est une évidence, car les molécules sont des constructions dans l'espace – et aussi l'organisation logique : la logique des séquences réactionnelles. Une synthèse est une longue séquence de réactions dans laquelle la stratégie est importante ; il faut savoir se représenter