

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 matinale 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

l'ensemble, élaborer des voies d'approche originales et conserver l'idée du but final.

Examinons plus en détail ces trois formes d'intelligence.

La capacité de voir dans l'espace, évoquée en dernier, est celle qui doit sans doute être acquise en premier : les molécules étant des assemblages d'atomes, leurs propriétés résultent de la disposition des atomes et du maillage des liaisons chimiques. Cette perception, importante en chimie moléculaire, s'impose plus encore quand on se préoccupe de chimie supramoléculaire, c'est-à-dire d'assemblages complexes de molécules qui s'asortissent de propriétés d'un genre nouveau. Elle est également fondamentale en biochimie, en physico-chimie des matériaux, etc.

Comment se familiariser avec l'agencement des atomes dans les molécules ou, plus généralement, des objets dans l'espace ? Les chimistes ont peut-être intérêt à apprendre le dessin ou la peinture, et des notions de perspective leur sont certainement utiles. Naguère, les ingénieurs bénéficiaient de cours de dessin industriel, mais cet enseignement a été progressivement éliminé ; il est absent des enseignements universitaires en sciences exactes. C'est sans doute regrettable.

Naturellement l'esprit peut être soutenu par la matière : les modèles de molécules que l'on réalise à l'aide de boules et de tiges en bois ou en plastique, représentant atomes et liaisons, sont utilisés depuis longtemps ; ils sont aujourd'hui remplacés par des programmes de modélisation moléculaire, mais le but n'a pas changé. La conviction de l'importance de la vision dans l'espace nous a même poussé à créer un jeu qui tient à la fois du *Monopoly* et du *Lego* : au lieu d'acheter des rues, des maisons et des hôtels, les joueurs collectionnent des atomes qui leur servent à construire des modèles de molécules dont ils découvrent les propriétés. Nous espérons ainsi donner aux joueurs – enfants et adultes – une idée des architectures moléculaires. Les pythagoriciens avaient écrit devant la porte du Lycée : «Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre». Les laboratoires de chimie pourraient reprendre la devise.

Le chimiste gagne également à posséder l'esprit de finesse, le sens de la beauté d'une molécule, de l'élégance d'une stratégie de synthèse. Cette perception de l'élégance, éminemment subjective, permet d'innover : pour faire progresser la science, il faut avoir l'idée de mettre ensemble des choses qui ne l'étaient habituellement pas, de voir des relations nouvelles. De nombreux enfants ont naturellement cet esprit, quand ils jouent : en chimie comme

dans le jeu, la part de l'inventivité est très importante.

D'ailleurs la chimie est aussi un jeu : celui de la fabrication de molécules ayant une géométrie et une réactivité données. Pour acquérir cette sensibilité à la forme, j'encourage les jeunes à s'arrêter devant les formes, à les admirer, à les analyser. Pourquoi pas, même, à faire de la sculpture ou de la poterie ? Le physico-chimiste britannique Michael Faraday n'a-t-il pas, toute sa vie, déclaré qu'il devait à son apprentissage de relieur la capacité de mettre au point les équipements expérimentaux ? Avec les travaux manuels, on se donne le loisir de tester, de démonter, de percevoir la résistance et la flexibilité des objets. Et cette perception aide le chimiste, qui se mesure à la matière moléculaire, également malléable et transformable.

Toutefois la chimie n'est pas une collection de papillons : les molécules ne sont pas des objets morts, épinglés dans des catalogues. Elles intéressent surtout par leurs capacités à réagir et à se transformer. La compréhension intime des transformations est importante. Je suis venu à la chimie parce que j'étais impressionné de voir que deux molécules A et B, réunies, engendraient parfois une troisième molécule C, qui n'était pas simplement un mélange de A et de B. Le chimiste a un sentiment de puissance, prométhéen, qu'il enrichit par le raisonnement. La prévision du résultat d'une certaine réaction chimique et l'invention de nouvelles réactions sont des activités majeures de la chimie, et cela commence par une meilleure compréhension des mécanismes intimes par lesquels ces transformations se font. Devrait-on au fronton des laboratoires, à côté de la première devise, inscrire aussi : «Ici, on transforme la matière ?»

Toute mise en contact de molécules amène à se poser la question : qu'obtiendra-t-on lors de la réaction chimique entre les réactifs ? Cette chimie mécanistique est intellectuellement passionnante : on applique l'arsenal des connaissances sur les réactifs, leur réactivité, le milieu, les paramètres thermodynamiques... et l'on essaie de prédire les réactions. Parfois, la réaction est conforme aux prévisions, souvent elle ne l'est pas. L'objectif du chimiste est évidemment d'acquérir la capacité de prédire le résultat de la réaction chimique. Quand on a le sentiment qu'une réaction est possible, mais qu'on manque de données pour en être certain, on effectue réellement la réaction et l'on en analyse le résultat : le chimiste doit être aventureux !

La seule connaissance des réactions individuelles ne fait pas un chimiste d'envergure. Comment apprendre à déce-

ler des combinaisons nouvelles ? Il y a quelques décennies, le sociologue strasbourgeois Abraham Moles s'était posé ce problème général et il proposait, dans son livre *La création scientifique*, l'usage de tableaux qu'il nommait «matrices d'invention». Dmitri Mendeleïev, quand il créa son *Tableau périodique*, disposa les éléments en un tableau, ce qui le conduisit à prédire l'existence d'éléments chimiques qui étaient encore inconnus. De tels tableaux sont utiles, parce qu'ils permettent une étude systématique. Face à une molécule nouvelle, comment dépister des propriétés nouvelles ? Le chimiste étudie cette question en répondant à des questions du type : «Que se passerait-il si je changeais tel ou tel groupe de la molécule ?». La rigueur donnée par les matrices d'invention, ou par un autre moyen de ce type, permet une exploration complète des propriétés chimiques.

J'ai l'impression que la philosophie, et non seulement le travail épistémologique de Moles, peut être directement utile au scientifique, dans sa réflexion sur ses recherches : les philosophes essaient de formuler une conception générale du monde. Il me semble que c'est mon intérêt pour les théories de la connaissance qui m'a finalement conduit à me demander, vers 1965-1966, comment un chimiste pourrait contribuer à l'étude du fonctionnement du système nerveux, support de la pensée. Je me suis alors intéressé au transport d'ions à travers les membranes cellulaires, un phénomène qui intervient dans l'influx nerveux, et, en conséquence, à me poser la question de la distinction des ions sodium et des ions potassium, dont les flux participent à la propagation des signaux nerveux. Ces ions étant sphériques, le problème est devenu celui de reconnaître une sphère dans un ensemble de sphères. Sa généralisation a tout naturellement conduit à l'idée de reconnaissance moléculaire.

Toutefois, la reconnaissance résulte d'interactions, en chimie comme ailleurs, et l'on aboutit ainsi au niveau supramoléculaire. Et tout s'enchaîne : s'il y a reconnaissance, il doit y avoir une information présente dans les molécules. La chimie supramoléculaire devient en quelque sorte une façon de mettre en œuvre cette information. Son apport majeur à la chimie est sans doute cette notion d'information portée par la structure moléculaire et traitée au niveau supramoléculaire.

L'étape suivante s'imposait : si l'on sait faire des objets qui se reconnaissent, pourrait-on concevoir des systèmes qui s'auto-organisent en architectures complexes sur la base des informations