

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 relouer 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 une 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

qu'ils contiennent? On en arrive aux problèmes de l'organisation de la matière et de son évolution vers une complexité croissante, matière divisée, condensée, organisée, matière vivante, matière pensante. Un vaste programme !

Mes conseils pratiques à un jeune chimiste? Apprends pour comprendre bien sûr, mais, surtout, garde un contact direct avec la matière, fais des expériences pour cultiver cette faculté de transformer la matière. Toutefois, ne reste pas

le nez collé à la paillasse, car ce métier de chimiste est aussi plein de grandes idées. Regarde autour de toi les grandes questions et traduis-les dans ton langage de chimiste. S'il y a un risque de te laisser griser par des idées générales, la paillasse te ramènera au concret, à la réalisation qui laisse sa marque dans la matière. La chimie aide à suivre le précepte de San Antonio : «Dans la vie, il faut choisir, mon prince, s'écouter parler ou se faire entendre». Sois donc fier

de ce que tu fais, de ce pouvoir sur la matière que te donne la chimie, de cette capacité qu'elle a de créer molécules nouvelles et matériaux nouveaux, qui relève d'une faculté créatrice, semblable à celle de l'art.

Jean-Marie LEHN est professeur au Collège de France et directeur du Laboratoire de chimie supramoléculaire ISIS – ULP-CNRS ESA-7006, à Strasbourg.



L'intelligence en mathématique

ALAIN CONNES

J'éprouve une certaine réticence à parler d'intelligence, car j'ai toujours considéré les mathématiques comme une école quotidienne d'humilité. Je me méfie lorsqu'un mathématicien se vante de ses succès sans mentionner ses échecs. En revanche, je saisis volontiers l'occasion de parler de mathématiques et de la difficulté qu'il y a à décrire de l'extérieur l'activité du mathématicien : l'employée de maison d'un mathématicien célèbre, interrogée sur l'activité de celui-ci, répondit qu'il passait son temps, dans son bureau, à écrire sur des bouts de papier qu'il jetait ensuite consciencieusement à la poubelle. L'activité du mathématicien pose ainsi un problème spécifique qui a trait à la nature de la réalité mathématique.

Si toute science ne se réduit pas à son objet, le physicien, le chimiste, le géologue ou l'astronome savent quel est l'objet de leur travail : à diverses échelles, ils étudient la structure et l'organisation de la matière. L'existence d'un monde matériel extérieur est un *a priori* simple, qui n'est remis en cause qu'en mécanique quantique. La distinction entre invention et découverte est également claire : on invente des outils nouveaux d'exploration, tel le microscope à effet tunnel ; on découvre des structures, telle la double hélice de l'ADN.

En mathématiques, le problème est différent : l'évidence des considérations précédentes fait place à une interrogation philosophique légitime devant la difficulté qu'il y a, pour un mathématicien, à spécifier, devant un matérialiste pur et

dur, la nature de la réalité mathématique et du travail de mathématicien. Pour situer le problème, il convient d'opposer, d'une part, les «platoniciens», qui se considèrent comme les explorateurs d'un «monde mathématique» dont l'existence ne fait pour eux aucun doute et dont ils découvrent la structure et, d'autre part, les «formalistes» qui se retranchent derrière une attitude sceptique, les mathématiques n'étant pour eux qu'une suite de déductions logiques dans un système formel, une sorte de langage purifié.

Pour le non-mathématicien, les mathématiques apparaissent trop souvent comme un jeu sans autre objet que celui d'aiguiser l'acuité intellectuelle ; elles sont généralement rencontrées et utilisées comme un langage. Le chimiste ou le biologiste, par exemple, doivent parfois utiliser le langage mathématique pour préciser leur pensée. Cette utilisation du langage mathématique, avec l'intérêt génératif et déductif qui est propre à tout langage, donne au scientifique non mathématicien l'impression de comprendre le sens des mathématiques, en même temps qu'elle fait croire que les mathématiques se réduisent à un langage. Ce point de vue est cohérent avec celui des formalistes, qui a donc *a priori* la sympathie du scientifique non mathématicien.

Les mathématiciens ont deux sources vigoureuses d'expérimentation et d'information directes : l'espace physique, source de la géométrie, et les entiers naturels, source de la théorie des nombres. Un nombre entier est premier, tel 1997,

s'il n'a pas d'autre diviseur que 1 et lui-même. Une expérimentation simple avec les nombres, par exemple compris entre 1 et 100 ou entre 1 et 1 000, montre que la liste des nombres premiers semble continuer indéfiniment. Une exploration plus poussée, à l'aide d'un ordinateur, n'infirme pas cette impression, mais ne peut en rien la prouver, puisque la vérification d'un tel énoncé nécessiterait une infinité de calculs (c'est ce que l'on appelle un énoncé de type universel).

Le travail du mathématicien consiste à remplacer la constatation expérimentale par une preuve. Pour les nombres premiers, ce travail remonte à Euclide. Que dit le résultat? Qu'à toute personne qui prétendra avoir trouvé le plus grand de tous les nombres premiers, disons $2^{132\,049} - 1$, on pourra rétorquer «vous vous trompez» et expliquer une méthode par laquelle on trouvera un nombre premier plus grand. On se heurte ainsi à une réalité, tout aussi contraignante que la réalité extérieure familière ; dit autrement, peu importe le temps que nous laisserions à quelqu'un pour trouver le plus grand nombre premier, nous savons l'entreprise vouée à l'échec.

En démontrant qu'il n'existe pas de plus grand nombre premier, le mathématicien réussit à dévoiler un aspect – ici, l'infinité des nombres premiers – d'une réalité tout aussi mystérieuse et *a priori* incohérente que la réalité qui nous entoure. S'il veut entrevoir comment cette infinité de nombres premiers est répartie parmi les nombres entiers, l'expérimentation peut être largement aussi déroutante que n'importe quelle exploration du monde