



sel de cuisine ou d'autres molécules de notre environnement : celles qui font le parfum des oranges ou des roses, celles qui font le goût des pommes vertes. Ou même certaines molécules telles que l'aspirine, qui permettent de jeter des ponts entre plusieurs disciplines.

L'approche architecturale devra être complétée par une présentation des propriétés macroscopiques des objets microscopiques que sont les molécules. L'expérience du lait de chaux qui se trouble quand on souffle dedans est pleine d'enseignements : il faudrait un acte de foi extraordinaire pour croire que les molécules sont responsables du trouble, car que voit-on ? Au mieux, si l'on a la patience de laisser sédimenter le précipité, on récupère une poudre blanche qui, au microscope, se révèle constituée de petits grains blancs : que sont ces grains et quel est leur rapport avec les molécules dont on parle ? À l'école, l'instituteur pourrait utiliser cette expérience comme thème, autour duquel il broderait : il serait amené à évoquer la solubilité des corps (un phénomène qui suscite toujours des questions), il parlerait de gaz comme le dioxyde de carbone, il parlerait de la craie, il régénérerait le dioxyde de carbone en attaquant cette dernière par du vinaigre... Les enfants n'admettront l'idée des molécules que si

l'on cerne celle-ci progressivement. On ira inductivement du gros vers le petit, en refaisant des expériences de l'histoire de la chimie. Je ne suis pas seul à penser que les leçons de choses contenaient dans leur esprit beaucoup de ce qu'il convient de refaire.

Quel rôle doit être celui des enseignants ? L'enseignement doit être renoué par l'emploi des ordinateurs et des réseaux. Si l'on admet que les connaissances se transmettent de façon efficace à la manière platonicienne, par des questions qui font dire par l'élève ce que l'on veut lui enseigner, on a un nouvel objectif didactique, qui pourrait se fonder utilement sur l'utilisation d'ordinateurs, de leurs banques d'informations et de leur interactivité.

Enfin l'enseignement actuel est aberrant de formalisme, même pour des élèves des grandes classes du secondaire. Les faits chimiques ne doivent pas être utilisés uniquement pour faire des exercices de mathématiques, jusqu'à ce qu'ennui s'ensuive. Les professeurs de mathématiques peuvent utiliser le formalisme chimique, s'ils en ont envie, comme illustration de leurs cours, et les professeurs de chimie peuvent en montrer le fonctionnement pour enseigner à formaliser un problème, c'est-à-dire, en fait, pour présenter la méthode scientifique. Mais la mise en équations mathématiques de la chimie doit être secondaire à ce stade.

Il y a bien trop à faire pour ne pas se focaliser sur le formalisme : c'est un grand plaisir de comprendre que la chimie révèle des cohérences de la nature, des régularités, des lois. Considérons par exemple la fonction alcool. Chaque alcool est particulier, mais tous les alcools ont quelque chose de commun, un comportement semblable. Et la chimie est avant tout créative dans son essence, permettant de transformer la matière dans son intimité.

Texte établi à partir d'un entretien avec Jean-Marie Lehn, prix Nobel de chimie, professeur au Collège de France et à l'Université de Strasbourg.

L'Éducation scientifique renouvelée

CLAUDE ALLÈGRE

L'enseignement peut être, doit être, dès le collège, arrimé au réel.

Toute rénovation de l'enseignement des sciences est prise dans un étau polygonal. Faut-il enseigner toutes les avancées de la Science ou se limiter à quelques méthodes choisies ? Faut-il aborder les sciences dans une vision axiomatique finie ou présenter les

questions dans leur mouvance historique et incertaine ? Faut-il commencer par les mathématiques dans une hiérarchie comtienne pour examiner ensuite comment elles débrouillent l'écheveau des autres disciplines ? Il

ne fait pas de doute que le lecteur devinera, dans ces alternatives, où vont mes préférences, mais je souhaiterais les argumenter, surtout en ce qui concerne le contenu de l'enseignement.

D'abord le contenu est-il si important ? Richard Feynman, citant Gibbons, s'interrogeait : « L'enseignement est rarement très efficace, sauf quand de rares et heureuses dispositions d'esprit des élèves font qu'il est presque superflu. » Cette affirmation, pour provocatrice qu'elle soit, me semble démobilisante et fautive. La crise actuelle de l'enseignement français, car crise il y a, montre que l'importance exagérée, voire la primauté, du raisonnement abstrait oriente mal les jeunes esprits. Tous les exercices intellectuels n'ont pas la même valeur éducative, tous les enseignements n'ont pas la même pertinence. Une abstraction biaisée est pernicieuse : la que-

relle des universaux, philosophiquement importante au Moyen Âge, préparait mal les écoliers à comprendre les enseignements de Bruno ou de Galilée.

Car il faut, en permanence, faire des choix, l'éducation ne pouvant procéder par empilement. C'est un truisme et une triste réalité que de répéter que le nombre d'heures de cours au lycée et au collège, et aussi à l'université, est beaucoup trop élevé. Pourquoi cette inflation ? Parce que les scientifiques, murés dans leurs engouements et la perpétuation des critères passés, ne savent pas préconiser des enseignements plus formateurs et mieux adaptés. Adaptés à quoi, me direz-vous ? À l'étude de la réalité. La géométrie descriptive avait ses beautés, mais les études des réalités architecturales sont mieux appréhendées aujourd'hui par les programmes informatiques. Exit la descriptive, elle n'a plus d'intérêt qu'historique. Nous sommes une des premières générations qui doit éliminer des pans entiers de sciences, en raison de l'augmentation de nos connaissances.

Je prônerai une « remise à zéro » des compteurs et une interrogation détaillée sur les sujets qui sont le mieux à même d'exciter la curiosité de l'enfant. Car la naïveté de l'enfant l'incite à l'optimisme, et c'est très bien ainsi. Le jeune esprit est attiré par le difficile, il attend de l'enseignement une explication du monde. Si l'enseignement ne satisfait pas sa curiosité, il fuira vers un désintérêt, puis vers un irrationnel plein de bruit et de fureur.

Au collège, un enseignant de sciences, de toutes les sciences, et un enseignant de mathématiques différent, seraient mieux à même de suivre le développement des jeunes intellects. En complémentarité mais en distinction.

L'enseignant des sciences montrerait d'abord ce que nous savons des processus de la vie : il exposerait, à travers les fossiles, la diversité du vivant et la théorie de l'évolution telle qu'énoncée par Darwin, aborderait la notion d'espèces par l'interfécondité, les lois de Mendel et les aléas de la reproduction. La montée en puissance du questionnement et la découverte des limites actuelles de la connaissance se feraient naturellement. L'heure n'est plus aux idéologies et aux systèmes complets : la science n'est pas omnipotente. Mais elle n'est pas impuissante.

En quatrième, après l'exposé des lois biologiques, l'introduction de l'ADN en tant que code sera une première synthèse attendue et perçue, car elle succédera à l'analyse de l'évolution.

La description du ciel étoilé, de ses composants (planètes, étoiles, galaxies) et de ses évolutions calendaires illustrerait des idées forces de la mécanique de Newton, la structure et les dimensions du monde. Évidemment sans équations. L'intuition des lois de la mécanique n'est pas innée, il s'en faut, mais la compréhension initiale de ces lois ne passe pas nécessairement par leur écriture mathématique. L'enseignement de la mécanique quotidienne peut être appréhendé par des interrogations et des expériences, par le récit des erreurs aristotéliennes (la force ne crée pas le mouvement), par la déclinaison des intuitions d'Archimède, vérifiables sur des exemples simples (l'avion, le bateau) dont l'interprétation n'est pas immédiate. L'optique pourrait commencer par les interférences pour indiquer très tôt ce qu'est une onde, et la physique par les expériences de Galilée de la tour ou du plan incliné et du pendule.

Dans la même veine de diversité féconde, je souhaiterais que la chimie soit enseignée dès le collège par la manipulation de modèles d'atomes en bois. La chimie est une combinatoire où des éléments simples se combinent à l'infini en des substances variées : les modèles montrent comment la géométrie et la combinaison des atomes engendrent les structures des matériaux qui nous entourent.

L'enseignement des systèmes serait formateur : un organisme vivant, un écosystème, les cycles de l'atmosphère, des eaux et des continents sont des systèmes bouclés dont on peut appréhender l'organisation à travers des lois simples de la mécanique, de la chimie et de la physique. Les phénomènes naturels constituent une bonne approche pour amener les enfants à poser les questions sur le comment et le pourquoi. Et naturellement, tout cela complété par une incitation à l'observation et à l'expérience.

La technologie peut attendre : je ne souhaiterais pas que soient enseignées des notions techniques non étayées par la compréhension préliminaire du fondamental. Un tel enseignement, trop opératoire et algorithmique, habitue les enfants à suivre des recettes plutôt qu'à comprendre un fonctionnement. Avez-vous essayé de régler votre nouveau magnétoscope en suivant le mode d'emploi, sans comprendre la fonctionnalité des opérations ?

En revanche, l'apprentissage de l'observation et de l'expérience devra être enseigné très tôt. La description doit être liée à l'expression écrite et à l'acquisition du vocabulaire précis sur les plantes, les roches, les phénomènes. L'observation devra être appuyée sur un support théorique. L'expérience sur la chute des corps, le principe d'Archimède, devra inculquer la répétitivité et la notion d'erreur.

Et les mathématiques dans tout cela ? Elles ont une place de choix, mais pas la place primordiale. La durée des cours mathématiques serait de moitié inférieure à celle des sciences. Je verrai, dès le collège, un cours de probabilités fondé sur des expériences avec des dés et des cartes qui illustrerait, avec l'enseignement de la biologie, les incertitudes du monde. J'aimerais un enseignement intuitif de la géométrie, un premier examen de la notion de fonction fondé sur des exemples (surtout pas des fonctions linéaires) associés à des commentaires qualitatifs et un début de formalisation algébrique. Au lycée, on introduirait les matrices comme des tableaux de nombres, le calcul différentiel à partir des différences finies, et l'abstraction de l'algèbre serait développée doucement. Sur ces bases, on pourrait enseigner des idées mathématiques-physiques riches, telles que le chaos et les oscillateurs couplés.

Cette description non exhaustive tend à donner l'esprit et la finalité d'un tel programme : ancrer les explications du complexe sur des mécanismes intellectuels et des connaissances maîtrisés. *Pauca sed matura* disait Carl Friedrich Gauss... Serait-il utopique de débattre enfin de ce qui est important en sciences ?

Claude Allègre, Prix Crafoord, est professeur à l'Institut universitaire de France, à l'Université Paris VII.

JEAN-CHRISTOPHE YOCOZ

Ne crions pas haro sur le baudet : on critique l'enseignement des mathématiques à l'école, au collège et au lycée, mais je tiens à élever une voix contraire : je suis essentiellement content de l'enseignement que j'ai reçu, car il était globalement bien fait, tant en mathématiques que dans les autres disciplines. C'était sérieux, rien n'était absurde. J'essaierai de montrer que certaines con-

traintes de l'enseignement empêchent l'enseignement des mathématiques de différer trop de ce qu'il était hier et de ce qu'il est aujourd'hui.

Ceux qui critiquent la manière dont l'enseignement est organisé sont souvent des utopistes, qui sous-estiment le temps nécessaire aux élèves pour assimiler les notions fondamentales. Le cas des proportions, des pourcentages, est intéressant : pour manipuler cette notion, difficile mais indispensable, il faut du temps. Une fois qu'on maîtrise – opérationnellement – la notion, on a le sentiment d'avoir passé un temps excessif sur un point mineur, mais il existe une grande différence entre la connaissance et la maîtrise. C'est ce que dit le proverbe chinois : «J'écoute, j'oublie ; je vois, je me souviens ; je fais, je comprends.» Faire, c'est plus long qu'entendre et que voir. Le savoir-faire ne s'acquiert qu'au prix de longues répétitions, données à des classes entières, et non à des individus. Dans un monde idéal, utopique, on pourrait accélérer l'enseignement de ces notions, en donnant un enseignant par élève ; c'est impossible, et les instituteurs ou les professeurs ont la difficile tâche de communiquer un savoir opérationnel à des classes tout entières. En général, ils font remarquablement leur travail. Plus concrètement, les mathématiques, élémentaires ou non, sont comme la langue : il faut anonner les tables de multiplication pour les retenir, et il ne suffit pas de voir une fois l'orthographe d'un mot pour savoir l'écrire correctement. C'est une évidence qu'on oublie : la répétition s'impose dans l'enseignement, et cette nécessité coupe les ailes à bien des idées audacieuses. Il faut être pragmatique.

Répétition, certes, mais pas répétition à l'identique : un ordinateur qui dirait sans cesse la même chose aux élèves ne serait pas un bon pédagogue. C'est l'art de l'enseignant, à l'école comme à l'université, de présenter plusieurs fois les mêmes notions, en changeant de point de vue. Le cas de l'algèbre linéaire, par exemple, a un parfum qui ressemble à celui de la proportion : plus cette partie indispensable des mathématiques est enseignée tôt, plus le travail en université est facilité, car l'expérience montre qu'il faut au moins quatre ou cinq ans pour que les étudiants soient capables de dominer cet outil, à la base de bien d'autres mathématiques.

Quelle doit être la place des mathématiques dans l'enseignement ? C'est un débat très actuel : des voix se sont élevées contre la place «exagérée» qu'on leur accorderait et contre la stérilisation des esprits que causerait leur formalisme. Pourtant, de même que nous ne pouvons vivre sans apprendre à parler notre langue, nous devons savoir quelques mathématiques. C'est ce que disait Galilée : «La philosophie est écrite dans ce livre immense perpétuellement ouvert devant nos yeux (je veux dire l'Univers), mais on ne peut le comprendre si l'on n'apprend pas d'abord à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques, sans l'intermédiaire desquels il est humainement impossible d'en comprendre un seul mot.» Rappelons-nous également l'abbé de Condillac : «Nous ne pensons qu'avec le secours des mots. L'art de raisonner se réduit à une langue bien faite.» Comme eux, je constate que la vie courante nous assène des chiffres, pas toujours de façon honnête. Pour vivre dans ma Cité, je dois être familiarisé avec les chiffres, avec les méthodes pour les interpréter. Les mathématiques ne sont pas une science formelle réservée à une élite : chacun a intérêt à savoir que deux augmentations successives de dix pour cent ne font pas une augmentation de 20 pour cent.

Lors d'une réunion de la Commission Fauroux, dont je fais partie, un représentant de l'industrie s'est ému que beaucoup de travailleurs n'aient pas intégré ce type de notions, élémentaires du point de vue des mathématiques. Et ce qui est vrai pour les nombres l'est aussi pour les figures : la géométrie élémentaire doit être enseignée, car c'est un outil pour vivre au quotidien.

Dans le fond, la critique de l'enseignement des mathématiques confond souvent deux aspects : la définition des programmes et le rôle des mathématiques comme instrument de sélection. Je crois qu'on peut difficilement rogner sur les programmes, qui sont moins ambitieux qu'on le dit (d'ailleurs, les universitaires se plaignent souvent de la formidable mise à niveau qu'ils ont à faire), et je protesterais énergiquement contre une diminution du programme de mathématiques dans le secondaire. Les programmes ne me semblent pas trop lourds ; s'ils étaient moins ambitieux, on risquerait de finir avec une coquille vide.

Au total, après avoir écouté les rapports qui sont présentés dans le cadre de la Commission Fauroux, j'ai l'impression que l'école primaire ne fonctionne pas si mal, et je craindrais de bouleverser l'enseignement qui y est donné. Le département d'évaluation et de prospective du ministère de l'Éducation nationale, outil précieux d'évaluation, a indiqué que le taux d'illettrisme est d'environ 15 pour cent en classe de sixième. J'admets que des efforts soient nécessaires, mais je me méfie du chiffre brut. Je comprends que les élèves maîtrisent insuffisamment la langue, la géométrie et le calcul, mais j'ai l'impression que l'école primaire fonctionne bien. Les collèges, eux, sont l'endroit où la fracture se manifeste le plus. Le problème est social ; ce

n'est pas un problème d'enseignement, et il faut des réponses spécifiques à des problèmes spécifiques. Je redoute les panacées pédagogiques, et j'aimerais d'ailleurs que l'on cesse d'en chercher.

Dans le premier cycle universitaire, également, les problèmes ne pourront être résolus par des solutions universelles. Un grave problème est celui de l'encadrement : en Droit, certains amphithéâtres réunissent 1 000 étudiants. C'est excessif ! En sciences, le problème est moins aigu, et l'encadrement des étudiants est mieux assuré. Je crois qu'il faut se diriger vers un premier cycle universitaire où la rupture avec le lycée soit moins brutale, où le suivi des étudiants soit vraiment assuré et qui offre une réelle pluridisciplinarité.

Dans le détail des programmes, maintenant, un examen de ce que l'on m'a enseigné et de ce que l'on enseigne à mon fils, qui est en classe de sixième, me montre ce que j'aimerais que l'on introduise, et aussi ce qu'il faut éviter. La théorie des ensembles, qui m'a été présentée longuement, a disparu : c'est un bien. En revanche, je regrette que l'algèbre linéaire ait disparu, car elle est indispensable. La géométrie est fondamentale, parce qu'elle donne une représentation du monde dans l'espace.

Je ne propose naturellement pas une géométrie trop sophistiquée, enchaînement de théorèmes fins, mais surtout des manipulations pratiques. Encore un truisme qu'il faut répéter : la compétence acquise est plus importante que le savoir emmagasiné. Il faut dominer le plan, l'espace, etc. et disposer de quelques définitions de base.

Naturellement un pont doit être jeté entre la géométrie et les nombres. L'archétype d'un tel pont est donné avec les coordonnées cartésiennes, mais aussi, on l'oublie, avec la notion de mesure des longueurs, par exemple. C'est aujourd'hui enseigné assez tôt, ce qui est bien. Plus tard dans l'enseignement, on montrera, de même, que les nombres complexes peuvent être à la fois considérés comme des nombres et comme des points du plan.

J'ai déjà évoqué l'algèbre linéaire ; j'insiste pour signaler qu'elle est à la base de la maîtrise du calcul différentiel. Quand on sait que les problèmes de physique se formalisent souvent par des fonctions de plusieurs variables, on comprend son importance : cette algèbre est précisément le calcul avec de telles fonctions. En outre, ces fonctions se présentent sous la forme d'équations différentielles et d'équations aux dérivées partielles, souvent insolubles. Aussi le physicien est fréquemment obligé de remplacer les fonctions réelles par des approximations linéaires.

Comment les mathématiques doivent-elles être enseignées ? Il ne faut certainement pas verser dans un formalisme excessif. On doit donner des objets mathématiques une intuition qui n'a pas toujours à être étayée par des théorèmes précis. D'un côté, je crois formateur d'imposer une rigueur logique, mais je suis également

partisan de faire des maths «avec les mains». D'ailleurs les mathématiciens nomment arbitrairement trivial ce qu'ils n'estiment pas devoir justifier. Ce «trivial» dépend du niveau, de l'âge mathématique des élèves.

Inversement on doit s'attacher à donner aux élèves une idée claire de ce qu'est une démonstration. On ne doit pas réduire les mathématiques à des démonstrations, car ce serait contraire à leur dynamique quotidienne, à leur pratique, mais la rigueur, épaulée par l'intuition, fait beaucoup pour donner un outil intellectuel puissant. Ce que j'avance là me semble vrai même à l'université : dans mes cours, même en licence ou en maîtrise, j'alterne les parties formelles et les parties de mathématiques avec les mains, qui donnent les idées, et je fais une séparation précise entre ce qui est démontré et ce qui est suggéré. Un bon dosage est l'art de l'enseignement ; c'est ce qui est excessif qui est ridicule.

Venons-en à la question cruciale : comment intéresser les élèves ? Signalons tout d'abord que le même problème se pose en mathématiques ou en lettres : certaines techniques de conjugaison doivent être apprises et assimilées. À un niveau élémentaire, la conjugaison peut sembler sans intérêt, mais elle constitue une des bases



HEUREUSEMENT QU'IL N'Y A PLUS
DE SÉLECTION PAR LE LATIN
J'AURAIS ÉTÉ RECALÉ !

du maniement de la langue. De même, en mathématiques, les proportions, déjà évoquées, font partie de ces outils indispensables pour arriver ensuite à des mathématiques intéressantes. On peut certainement montrer des mathématiques intéressantes, mais il faut en payer le prix : on ne peut économiser l'enseignement des techniques. Comme Archimède l'avait dit au roi de Syracuse : il n'y a pas de voie royale. Je ne sais pas résoudre ce conflit mieux que ne le font les instituteurs et les professeurs : ils alternent les parties techniques et les parties intéressantes, d'une façon qui ne m'a généralement pas lassé quand j'étais à l'école, puis au collège et au lycée.

Enfin, mentionnons le problème déjà souligné de la sélection par les mathématiques. Remarquons tout d'abord que la communauté mathématique a un point de vue ambivalent. Elle est gênée qu'on lui ressasse ce refrain «Ah vous êtes mathématiciens ? Vous savez, moi je n'y comprends rien.» D'autre part, si la communauté mathématique française est une des meilleures du monde, c'est que le système de détection et d'encouragement des talents fonctionne très bien. Or ce résultat découle notamment de la sélection des élèves par les mathématiques. À vrai dire, cela ne me gêne pas que l'on sélectionne les élèves par les mathématiques, mais j'admets mal que cette sélection soit la seule. Dans le temps, la sélection par le latin permettait d'équilibrer la sélection par les mathématiques. C'était, d'une certaine façon, préférable, parce qu'avec les mathématiques seulement, on ne repère qu'un seul type de talent. Il faudrait plusieurs instruments de mesure.

Jean-Christophe Yoccoz, médaille Fields,
est professeur à l'Université Paris-Sud.