

Al dente

Comment cuire les pâtes alimentaires.

Comment cuire les pâtes ? Qui-conque se contente de plonger des spaghettis dans l'eau chaude, pendant huit minutes environ, n'obtient pas un bon résultat : bien que simple, la cuisson des pâtes pose de nombreuses questions. Le sel tout d'abord : doit-il être mis dans l'eau de cuisson et pourquoi ? L'huile qui, dit-on, doit être ajoutée à l'eau de cuisson, est-elle vraiment nécessaire ? Et les pâtes elles-mêmes : peut-on en préparer chez soi d'aussi bonnes que dans l'industrie ? Enfin comment éviter que les pâtes collent ?

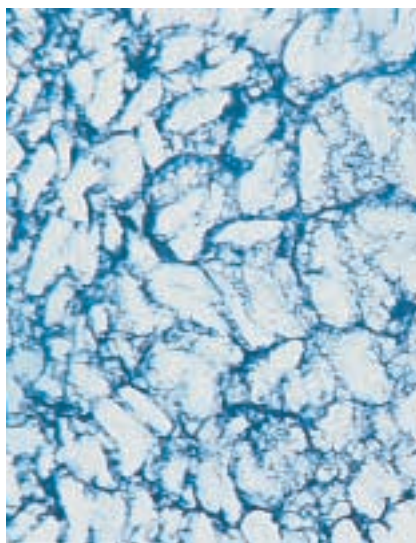
Chez soi, on prépare rapidement de bonnes pâtes en mélangeant de la farine (de blé, à laquelle on peut ajouter de la farine de maïs, de châtaigne...), un peu de sel, de l'eau, de l'huile et des œufs. Un long malaxage donne du corps à la pâte, qu'on lamine et qu'on découpe, avant de la cuire pendant trois à six minutes. Lors de cette cuisson, les grains d'amidon de la farine gonflent en absorbant de l'eau (ils s'«empêsent») pendant que les protéines de l'œuf et de la farine forment un réseau insoluble qui enserme les grains d'amidon, limitant leur lessivage dans l'eau de cuisson. Pour ces pâtes domestiques, le collant est évité par l'augmentation de la proportion d'œuf ; si le réseau de protéines est formé avant que l'amidon ne s'empêse, les pâtes restent fermes et ne collent pas ; si, au contraire, l'empesage de l'amidon intervient avant la formation du réseau protéique, une partie de l'amidon (surtout une de ses deux sortes de molécules, nommée l'amylose) diffuse dans l'eau de cuisson, enrichissant la surface des pâtes en amylopectine (l'autre sorte), qui fait coller. Après égouttage, un bon morceau de beurre ou une large rasade d'huile d'olive évite aux pâtes, maintenues chaudes, de coller dans l'assiette.

Pour étudier la fabrication industrielle des pâtes, Pierre Feillet, Joël Abecassis, Jean-Claude Autran et leurs collègues du Laboratoire INRA de technologie des céréales, à Montpellier, ont exploré la biochimie de la cuisson des pâtes. Ils cherchent à déterminer les protéines qui communiquent aux pâtes leur bonne qualité culinaire.

L'industrie prépare les pâtes à partir de blé dur. En l'absence d'œuf, le réseau de protéines est formé par les protéines de la farine et, plus précisément, du gluten. Ce gluten s'observe par malaxage

de farine et d'eau : après une longue trituration, la masse obtenue, mise sous un filet d'eau courante, n'est pas totalement lessivée ; la matière élastique restante est composée des protéines du gluten. Ce gluten est plus abondant dans les blés durs que dans les blés tendres. Aussi des laboratoires tels que celui de Montpellier se préoccupent de la composition et de la variabilité génétique des protéines des blés durs, ainsi que des procédés de fabrication des pâtes qui favorisent la formation du réseau protéique.

La qualité d'une pâte industrielle s'apprécie par sa couleur jaune-ambéré et par sa qualité culinaire, c'est-à-dire son apti-



Sur cette coupe d'un spaghetti observé au microscope, Daniel Gallant (INRA-Nantes) a coloré en bleu le réseau de protéines.

tude à ne pas coller après cuisson et, même, après une légère surcuisson. Pour satisfaire cette demande de l'industrie, les sélectionneurs ont donc mis au point des blés durs possédant un gluten ferme et élastique. Les chercheurs de Montpellier ont montré que ce dernier caractère était associé à la présence d'une protéine particulière, nommée gliadine gamma 45, qui n'est en fait que l'indicateur de variétés de blés durs riches en gluténines de faible masse moléculaire.

D'autre part, les chercheurs ont exploré les conditions optimales de fabrication des pâtes et ils ont montré que le séchage des pâtes vers la température de 90 °C prépare la formation d'un réseau de protéines qui s'insolubilise plus rapi-

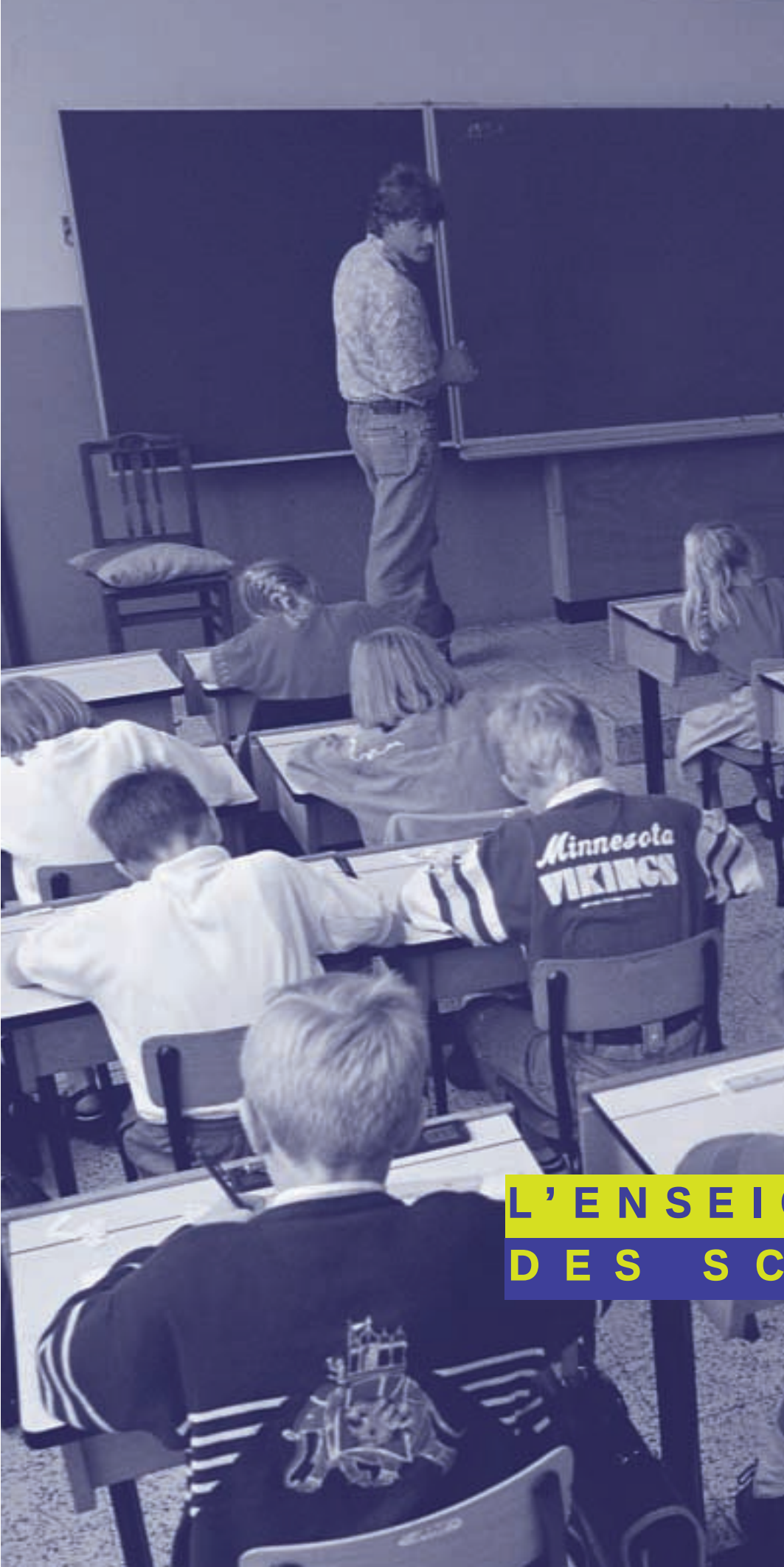
dement, à la cuisson. La haute température doit être appliquée en fin de séchage, afin de ne pas endommager les grains d'amidon. Le malaxage et le tréfilage, dans une vis d'Archimède sous pression, doivent également respecter ces grains. L'application de hautes températures (90 °C) agit sur la couleur, parce qu'elle inactive les enzymes (lipoxygénases) qui détruisent les pigments jaunes et celles (peroxydases) qui développent le brunissement.

Comment cuire les pâtes, à la lumière de ces travaux ? Notons tout d'abord que la proportion de protéines doit être élevée. Si l'on n'utilise pas du blé dur, on devra ajouter des œufs, ou bien triturer ou laminer soigneusement la pâte, afin de développer le réseau de gluten, en présence d'une quantité d'eau suffisante pour hydrater les protéines et permettre leur liaison. Quelle que soit leur composition, les pâtes doivent être jetées dans l'eau bouillante, de sorte que le temps de cuisson soit réduit et que la délitescence soit diminuée. L'huile ajoutée à l'eau de cuisson est-elle utile ? Des expériences qui consistent à cuire trop longtemps des spaghettis dans de l'eau additionnée ou non d'huile n'ont pas montré de différences sur le collant quand les pâtes ne traversaient pas l'huile de la surface de l'eau, en fin de cuisson. L'huile est surtout utile parce qu'elle enrobe les pâtes quand celles-ci sont sorties de l'eau, en fin de cuisson, de sorte qu'il revient au même d'ajouter un bon morceau de beurre ou une rasade d'huile d'olive dans le plat de service.

Enfin l'eau de cuisson a son importance. À l'INRA de Nantes, Jacques Lefebvre a montré que l'amidon perd moins d'amylose dans l'eau de cuisson si celle-ci contient des protéines : on pourra donc cuire les pâtes dans un bouillon riche. L'équipe de Montpellier a aussi montré que la cuisson dans une eau minérale s'accompagne d'un accroissement progressif de la délitescence et du collant, tandis que les pâtes cuites dans une eau légèrement acide (par exemple additionnée d'une cuillerée à soupe de vinaigre ou de jus de citron, ou encore une eau de pluie) conservent un état de surface satisfaisant, même après surcuisson. En effet, une légère acidité de l'eau (pH égal à 6) permet aux protéines de se trouver sous une forme électriquement neutre, de sorte qu'elles s'associent davantage, formant un réseau capable de piéger l'amidon.

Hervé THIS

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 30 avril 1996, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.



Comment doit-on enseigner les sciences, à l'école, puis au collège et au lycée?

Pour la Science participe au débat sur une réforme de l'enseignement en présentant les points de vue de *Pierre-Gilles de Gennes*, de *Jean-Marie Lehn*, de *Claude Allègre* et de *Jean-Christophe Yoccoz*.

Aucun de ces chercheurs n'enseigne sa discipline à des élèves de l'école primaire ou du secondaire, mais ils ont accepté de regarder d'un œil critique, indépendamment les uns des autres, l'enseignement des sciences. Leurs points de vue sont parfois contradictoires : c'est la preuve que le débat est nécessaire.

L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

PIERRE-GILLES DE GENNES

Je me suis intéressé aux polymères, aux cristaux liquides, aux colloïdes, etc. Aujourd'hui, je me préoccupe aussi d'éducation ; je ne suis pas content de notre système éducatif, de ses filières de formation et de ses critères.

Les enfants du XIX^e siècle appartenaient en majorité à une civilisation agricole : élevés dans la nature, ils apprenaient à travailler de leurs mains, à observer, à développer leur sens pratique. L'école de Jules Ferry apportait un complément abstrait mais utile. Les enfants de la fin du XX^e siècle vivent en majorité dans des villes ; ils ont perdu le contact avec la nature. La télévision diminue leur potentiel d'observation, et ils n'ont plus l'occasion de travailler de leurs mains. Pourtant l'école reste aussi abstraite que du temps de Ferry. Il faut corriger le déséquilibre.

Les systèmes informels d'éducation, musées, télévision éducative, etc. ne pallient pas les insuffisances, car la visite d'un musée, par exemple, surprend plus qu'elle ne fait comprendre. Elle éveille la curiosité, mais appelle un autre travail, sans guide, autonome. Je ne crois pas à l'éducation par la télévision, et je pense même que la télévision éducative a des effets pervers : le spectateur est dans une position passive, on ne le fait pas chercher. Pour bien comprendre le monde, il faut un investissement personnel.

Il n'est pas besoin de moyens matériels pour éveiller le sens de l'observation, du concret, de la recherche. Au lieu d'utiliser l'argent à visiter des villes – encore des villes! –, on pourrait l'employer pour organiser des promenades naturalistes, chasser des fossiles, collectionner des insectes ou des plantes, etc.

Ce premier problème va de pair avec un rejet de l'éducation scientifique par les jeunes de 14 ou de 15 ans. On pense, en France, que ce rejet est en partie dû à l'utilisation des sciences, notamment des mathématiques, comme outil de sélection. Doit-on supprimer les examens? Non : je suis fermement en faveur des examens, même dans les classes du creux adolescent. Je crois qu'on a été trop laxiste et que l'exemple des pays nordiques est dangereux. Je souhaite des examens aussi bien en français, en histoire, qu'en mathématiques ou en physique. Ces examens ne doivent pas nécessairement faire le lit de la sélection, mais ils s'imposent pour beaucoup de raisons et, notamment, pour que le travail fait en classe soit pris au sérieux : on ne peut cautionner une sorte de folklore où tout le monde est accepté, où tout le monde est bon et génial. Si un dessin n'a pas été réalisé avec soin, on ne doit pas l'afficher à côté de ceux qui ont été soignés. Les professeurs et les enfants doivent avoir la liberté de s'organiser, mais je crois qu'il faut aux élèves des clignotants qui les avertissent de leurs insuffisances ou de leurs incompréhensions. C'est vrai à tous les niveaux, de l'école à l'université.

Qu'en enseigner? Un groupe de pression puissant, au sein de l'Éducation nationale, pense que l'école doit expliquer les techniques modernes. Le programme de physique, en Seconde, présente les amplificateurs opérationnels, les haut-parleurs, un certain nombre d'appareils de ce genre. C'est, à mon avis, une catastrophe, car on parle de joules et de watts sans savoir ce qu'est une énergie, une force, un travail : on met la charrue avant les bœufs. On lutte contre le trop abstrait en enseignant les amplificateurs : quelle vision restreinte du sens pratique! Ce qui est aujourd'hui proposé confond la technique et la science. Je ne fais pas de hiérarchie entre les deux, car elles sont également indispensables, mais on ne peut former à l'esprit scientifique en enseignant seulement la technique (l'inverse est également vrai).

D'autre part, il faut trouver un juste milieu entre un enseignement trop qualitatif et un enseignement excessivement formel. Je peux faire une leçon d'une heure, très qualitative, sur les polymères d'usage courant, à des étudiants de troisième cycle d'université, mais j'essaie de ne pas le faire ainsi : les étudiants pensent, à tort, que ce n'est pas sur du qualitatif qu'ils seront interrogés à l'examen ; ils écouteront d'une oreille passive, sans mémoriser, sans comprendre que, plus tard, quand ils arriveront dans l'industrie des polymères, ils feront de graves erreurs s'ils ne savent pas distinguer un polymère cristallisable d'un polymère non cristallisable, un polymère utilisable pour du textile d'un polymère inutilisable... En pratique, j'alterne des moments formels et des moments qualitatifs, afin que l'attention soit soutenue. Je pense que le professeur de lycée doit avoir un peu la même stratégie, mais je crains qu'il ne soit accablé par la sélection, les programmes et l'anxiété des parents, de sorte que les parties abstraites occupent une majorité du temps. Je conçois que ces parties soient plus faciles à contrôler, mais l'accumulation des abstractions est dangereuse.

Revenons positivement à la question : qu'en enseigner? J'ai sur mon bureau un petit système composé de deux plaques de plexiglas parallèles et dont les côtés sont fermés par du ruban adhésif, sauf dans un des coins supérieurs ; en introduisant un mélange de sucre blanc et de sucre roux, des physiciens observent des avalanches, voient des stratifications blanc/roux se produire et explorent une physique inconnue. Ce système (qui coûte moins de cent francs) serait excellent pour une option expérimentale en Première S. Naturellement on ne demandera pas à des élèves de lycée de faire un travail de recherche sur ces systèmes, mais ils pourraient découvrir quelques faits simples.

On ne pourra modifier le système existant que si l'on agit simultanément sur plusieurs communautés : les professeurs, les fonctionnaires de l'Éducation nationale, les créateurs des programmes, les associations de parents d'élèves... Très souvent, un de ces milieux est prêt à une

réforme tandis que les autres ne le sont pas, et le projet échoue. La sensibilisation des élèves et des parents est fondamentale. Certains enseignants ont accueilli avec réticence l'option sciences expérimentales, installée en Première, mais les parents me semblent constituer l'obstacle le plus puissant au changement : ils craignent que leurs enfants ne «perdent leur temps» avec cette option.

Aujourd'hui je suis frappé de voir que l'angoisse remonte vers les plus jeunes, peut-être en raison de l'augmentation du chômage. Dans certaines classes poussées, les élèves de Terminales en arrivent à se comporter comme des élèves de classes préparatoires! Un fossé se creuse entre des lycées passifs et des lycées de bachotage. Ce n'est pas bon.

Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique, est directeur de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles.

JEAN-MARIE LEHN

Faut-il enseigner la chimie au collège et au lycée? Bien sûr! Le monde où nous vivons est composé de molécules et d'atomes. Nous n'avons quelque espoir de comprendre le monde que si nous explorons le monde moléculaire : c'est l'objet de la chimie. Faudrait-il enseigner cette discipline de préférence aux arts ou aux lettres? Les arts expriment l'un des aspects de la créativité humaine, les sciences un autre ; elles sont donc indispensables ; la culture sans science serait obscurantiste, régressive.

Les écoles, collèges et lycées doivent faire un choix difficile, car le nombre d'heures d'enseignement est limité. Naturellement l'art stimule la créativité, mais la créativité scientifique doit être d'autant plus encouragée qu'elle est fondée sur la curiosité naturelle des enfants. Si vous donnez une montre à un enfant, il la démontrera pour essayer de comprendre son fonctionnement. Pourquoi ne pas utiliser ce penchant spontané de notre espèce pour enseigner les sciences?

Dans la même veine, je regrette que les appareils scientifiques périmés soient jetés à la casse : pourquoi ne pas les confier aux écoles et aux collèges, afin que les enfants les démontent. Ils y trouveront un prisme? Ils s'en serviront, aidés par leur professeur, pour explorer les lois de Descartes, pour refaire les expériences de Newton. Ils y trouveront des piles? Ils les utiliseront pour récupérer le bioxyde de manganèse à partir duquel ils prépareront de l'oxygène. Ainsi répondra-t-on doublement à la question «comment ça marche?» : en montrant la constitution des appareils et en faisant marcher la tête avec les mains.

Quelle dose de chimie administrer? La chimie doit-elle avoir une place égale à celle de la physique ou des mathématiques? Je ne veux pas faire de comptes d'apothicaires, mais je constate que la chimie, aujourd'hui, a une portion excessivement congrue alors qu'elle intervient dans l'essentiel des activités humaines, indus-

trielles en particulier : le textile, la pharmacie, l'électronique, etc. Tout est chimie, puisque tout est matière.

À partir de quel âge les enfants doivent-ils apprendre la chimie? Je n'ai moi-même découvert la chimie qu'en classe de Terminale, mais la présentation des transformations moléculaires à de très jeunes enfants peut leur donner une sensation nouvelle : en faisant réagir deux poudres de couleurs différentes pour obtenir une troisième couleur, on opère une transformation intrinsèque de la matière.

Que présenter à ces jeunes? Le programme actuel me semble aberrant de formalisme. On devra commencer par la pratique de la discipline, présenter des transformations spectaculaires, sensibles : changements de couleur, changement d'odeur, changement de saveur. Puis, en utilisant la curiosité spontanée des élèves, on leur présentera plus en détail les objets chimiques. On insistera sur la chimie, science architecturale : les molécules sont de petites constructions que l'on édifie à l'aide de briques, comme un jeu de construction.

À quelles molécules s'intéressera-t-on? Se limitera-t-on à la chimie inorganique, dans les petites classes, et réservera-t-on la chimie organique pour les classes supérieures? Cette distinction devient inutile si l'on considère la chimie sous l'angle de la construction architecturale. La possibilité, pour les atomes de carbone, d'établir quatre liaisons avec des atomes voisins fait de la chimie organique un champ qui peut être présenté de façon simple. Je n'exclus pas que l'on présente également des molécules inorganiques : pourquoi se priver d'évoquer le

J'AI DEMANDÉ
DU MATÉRIEL
PÉDAGOGIQUE
POUR ÉTUDIER LA GRAVITÉ
TERRESTRE ET LE RECTORAT
M'ENVOIE DES PÔMES!





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 rénové 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 annoncer 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.

Le trait retrouvé

Des tracés sur les murs confirment que les constructeurs gothiques utilisaient des méthodes exposées dans le manuscrit de Villard de Honnecourt.

Villard de Honnecourt a laissé à la postérité un carnet de 66 pages, datant du XIII^e siècle, document unique sur les techniques des constructeurs du Moyen Âge. Près d'une vingtaine d'édifices religieux, dont la très belle collégiale de Saint-Quentin, située, comme Honnecourt, dans le Vermandois, ont été attribués à Villard, mais sans qu'il existe aucune preuve.

L'architecte Pierre Bénard, en 1864, Robert Branner vers 1970, et François Bucher, plus tard, relevèrent des tracés gravés sur les murs de certaines chapelles, notamment une rose, ressemblant à la principale rose de Chartres, dont je fis en 1989 un relevé exact, et le plan d'un pilier, qui rappelaient des dessins du fameux manuscrit. En 1995, la médiéviste Ellen Shortell me signala l'existence, au pied d'une paroi sur laquelle elle releva des tracés d'arcs gravés dans la pierre, d'une petite spirale (*figure g*) identique à celle représentée, à côté d'une clef d'arc, sur un croquis de Villard (*figure b*). M'étant rendu sur place pour relever cette gravure, j'examinai, de plus près, les murs d'autres chapelles. Dans la première chapelle Sud, ayant dégagé l'étroit espace situé derrière l'autel des objets au rebut qui l'encombraient, je sentis, en caressant la pierre, des incisions continues.

La surface ayant été débarrassée délicatement – à l'aide d'un blaireau – des efflorescences de salpêtre qui la couvraient, un ensemble de tracés apparut, présentant trois arcs concentriques, le plus grand ayant un rayon de 129 centimètres. Un autre arc, de même rayon que le grand arc, et symétrique, formait avec celui-ci un arc brisé dont le sommet et les naissances étaient disposés selon un triangle équilatéral, proportion harmonieuse, fréquente dans l'architecture gothique du XIII^e siècle. Avec l'aide de Bernard Delaire, de la Société académique de Saint-Quentin, je fis, après avoir suivi les incisions avec la pointe d'un fusain tendre, un relevé en vraie grandeur (*figure j*). Des joints horizontaux et verticaux refaits interrompent, par endroits, la continuité des traits incisés. Sur une trentaine de centimètres à droite, deux arcs distants de quatre millimètres témoignent d'une correction.

Mais le plus remarquable était sur la droite, au bas du panneau (*photographie i et figure j*) une série de huit traits rapprochés, normaux aux trois arcs de cercle et convergeant vers leur centre commun. J'avais là, sous les yeux, l'application d'un procédé exposé dans le manuscrit de Villard (*figure d*) qui figure entre deux faces convergentes d'un vousoir, deux échelles parallèles portent un même nombre de divisions égales. Le commentaire est «par chu tail on vosoires par escandelons», c'est-à-dire «ainsi, on taille les vousoirs par échelons». En joignant par des droites les divisions correspondantes de chaque échelle, le maçon traçait des convergentes, permettant de tailler des vousoirs d'épaisseurs différentes, selon les besoins. Ce système évite la recherche du centre de la courbe, parfois inaccessible.

PRATIQUE DES CROQUIS

Ainsi sur les parois d'une église, nous voyons en application plusieurs croquis techniques du manuscrit. À une époque où n'existait ni support pratique et économique pour les plans ni moyen de les reproduire, le plus pratique était d'afficher, de façon indélébile, sur les murs, les modèles que les compagnons devaient exécuter. C'est ce qu'explique un des croquis de Villard où une sorte de socle ou de fondation montre qu'il s'agit d'une paroi verticale (*figure e*) ; sur ce croquis, le tracé de plusieurs arcs, comme à Saint-Quentin, est expliqué par la légende : «par chu tail om le mole don grant arc dedens III» (c'est-à-dire «Ainsi on taille le modèle d'un grand arc, (avec) trois (autres) dedans») ; il est précisé ensuite : «pies de tere», que je pense être une erreur de transcription pour «près de terre», indiquant que ces tracés se faisaient au sol, sur une paroi verticale, et non sur une aire horizontale, d'utilisation peu pratique dans l'encombrement du chantier.

L'autre confirmation que nous trouvons, à Saint-Quentin, des usages évoqués par Villard, c'est la spirale, méthode pour tracer des arcs brisés de même courbure, permettant la standardisation des cintres et des vousoirs d'une même

travée (*figure f*), ou de toute une série d'arcs dans un bâtiment (l'utilisation des spirales est confirmée par la série de spirales superposées, gravées sur une pierre retrouvée à Chartres).

Le souci de standardisation des courbes des constructeurs est marqué par le croquis, maintes fois reproduit, du manuscrit de Villard, montrant trois arcs tracés avec la même ouverture de compas (*figure c*).

La troisième confirmation, et la plus intéressante, c'est l'emploi du procédé des «escandelons» pour tracer les vousoirs (*figure h*). En ce qui concerne les vousoirs de clef qui, pour les arcs brisés, doivent être taillés à la demande, Villard nous indique (*figure b*) comment faire, en reportant l'angle qui correspond à la proportion de l'arc choisi sur le vousoir standard, sans qu'il soit besoin de rechercher le centre de la courbe, comme le montre un croquis de Villard (*figure a*), ce qui est souvent impossible sur la paroi de traçage dont la surface est limitée. Cet angle est défini par le rapport entre le rayon de l'arc et la distance entre le centre d'un des deux arcs qui forment l'arc brisé et l'axe de celui-ci (*figure b*). Est figurée ici une clef de «quint point», comme sur le croquis de Villard (*figure c*). Le rayon de l'arc est l'hypoténuse OS d'un triangle rectangle OSH dont le petit côté est la distance séparant l'axe du centre de l'arc brisé. La connaissance de ce rapport suffit pour tailler les deux demi-clefs.

Ainsi les parois de ces chapelles présentent des exemples de plusieurs procédés exposés dans le manuscrit de Villard, la spirale figurant, comme sur celui-ci, un discret rappel de méthode, au bas de tracés d'exécution. C'est la confirmation de procédés simples et pratiques employés à cette époque, par des constructeurs qui, par ailleurs, comme le montrent d'autres dessins du manuscrit (voir Dossier «Arts et sciences au Moyen Âge», *Pour la Science*, et «Villard de Honnecourt, la pensée technique au XIII^e siècle», *Picard éditeur*.) maîtrisaient dans des cas plus complexes, la stéréotomie, le «Trait».

Que ces gravures relevées sur les murs soient anciennes est plausible, car qui se donnerait la peine de faire aussi soigneusement et précisément de telles épures, si ce n'était pour faire exécuter ces éléments ? Cependant, que ces procédés correspondent à ceux décrits dans le manuscrit de Villard ne signifie pas que celui-ci les ait, personnellement, tracés, ni qu'ils lui soient exactement contemporains. L'essentiel est d'y voir confirmer des méthodes des constructeurs du Moyen Âge, indiquées dans le manuscrit de Villard de Honnecourt.

Roland BECHMANN