

La modélisation dans l'enseignement et la vulgarisation des sciences

André Giordan

La pratique de la modélisation est encore peu fréquente dans l'enseignement et la vulgarisation des sciences. Pourtant, c'est un outil très performant pour la recherche, mais aussi pour décoder des situations issues de la vie quotidienne (explicitations, prévisions, simulations). S'appuyant sur des recherches didactiques, notamment sur le nouveau modèle d'apprentissage « allostérique », ce texte discute les usages habituels des modèles et propose des directions (environnement didactique) pour introduire de façon opératoire cette pratique.

Alors que les travaux de neurobiologie mettent l'accent sur l'extrême plasticité du système nerveux, les travaux sur l'apprentissage réalisés au Laboratoire de didactique et épistémologie des sciences (LDES) ont surtout montré l'importance de la résistance des apprenants face au changement et au remodelage conceptuel. Ces investigations ont débouché sur un nouveau modèle d'apprentissage appelé « modèle allostérique » (Giordan et de Vecchi, 1987 ; Giordan, 1989).

Ce modèle introduit un renversement de perspectives sur les processus d'apprentissage, que l'on peut résumer schématiquement de la façon suivante :

1. Les méthodes habituelles de transmission du savoir, les diverses innovations pédagogiques dites « non directives », « actives » ou de « découverte » ne donnent pas les résultats attendus. Le rendement éducatif reste très faible, voire parfois nul. Un certain nombre d'erreurs reviennent avec une reproductibilité déconcertante chez les élèves, même après plusieurs séances d'enseignement.
2. Les apprenants possèdent un certain nombre de questions, d'idées, de références et de pratiques que nous appelons « conceptions ». Si l'enseignement ou l'activité de média-

Depuis 1980, André Giordan est professeur à l'Université de Genève, où il a créé le Laboratoire de didactique et épistémologie des sciences. Ses recherches principales portent sur la communication, l'éducation et la culture scientifiques et industrielles, et plus particulièrement sur les mécanismes de diffusion de messages et d'élaboration de savoirs. Il est également directeur de recherche à l'Université de Paris VII et consultant en culture et communication scientifiques auprès de divers organismes internationaux. A. Giordan est le correspondant suisse du réseau INISTE (UNESCO), vice-président de l'Association européenne de didactique de la biologie, et représentant francophone de la Commission for Biological Education (IUBS). Il est l'auteur ou le directeur scientifique de plusieurs ouvrages traduits en de nombreuses langues, notamment *L'éducation relative à l'environnement : principes d'enseignement et d'apprentissage* (1986), *Histoire de la biologie* (2 tomes, 1987), *L'éducation pour l'environnement : mode d'emploi* (1991). On peut le contacter à l'adresse suivante : Laboratoire de didactique et épistémologie des sciences, Université de Genève, 24, rue Général Dufour, 1211 Genève, Suisse.

tion n'en tiennent pas compte, les conceptions en place résistent. Elles font même obstacle : les notions proposées sont déformées. Au mieux, ces dernières se « plaquent » ou restent isolées à côté du savoir familier.

3. Le nombre de conceptions sur un domaine n'est pas infini. Il est possible de les catégoriser en quelques grands types.
4. Tout apprentissage dépend des conceptions mobilisées. C'est à travers elles que l'apprenant interprète les informations diffusées, élabore le nouveau savoir. L'apprentissage ne peut être le résultat d'un processus de transmission. L'appropriation d'un savoir résulte d'une démarche de transformation de conceptions où le principal acteur du processus est l'apprenant, et lui seul.
5. Cette appropriation peut être largement favorisée par un « environnement didactique », mis à la disposition de l'apprenant par l'enseignant ou le médiateur, et d'une manière générale par tout le contexte éducatif.
6. Pour interférer avec les conceptions de l'apprenant, un environnement didactique performant doit comporter les caractéristiques suivantes : induction d'un déséquilibre conceptuel pertinent, mise en place d'une activité élaboratrice, nécessité de confrontations multiples, accès à une pratique de modélisation, intégration du savoir sur quelques concepts structurants, mise en œuvre d'un savoir sur le savoir.

La modélisation apparaît ainsi comme l'un des moments forts pour tout enseignement scientifique. Pourtant, si la modélisation est reconnue et appréciée dans un processus de production de savoir scientifique, elle reste le plus souvent absente des pratiques de communication ou d'appropriation de savoir. A ce jour, nous n'avons trouvé ni programmes scolaires ni livres de vulgarisation « grand public » mettant en valeur cette approche. Au mieux, on présente des modèles « tout faits » et de façon frontale au travers de quelques images conventionnelles (fig. 1).

Cette absence de pratique de la modélisation se poursuit d'ailleurs à l'université, et même parfois au niveau de la recherche. La pratique de la modélisation est ainsi limitée à une minorité de scientifiques. Pourtant, il s'agit d'une méthode indispensable, et, de plus, captivante pour l'enseignement et la vulgarisation. Outil de médiation privilégié entre un phénomène et sa représentation, elle autorise des réductions et, ce faisant, une approche simplifiée du réel, tout en favorisant, dès le plus jeune âge, les possibilités de sortir du monde des sensations.

D'ailleurs, plusieurs arguments convergent. D'abord, la pratique des modèles démythifie le fonctionnement des sciences. Les modèles conventionnels de la cellule, de l'atome, de la molécule, de l'ADN, pour ne prendre que quelques-uns parmi les plus célèbres, ne sont pas la réalité, comme le croit le grand public, et même certains enseignants scientifiques ; ce sont des outils élaborés à des fins de description et de compréhension.

Cette pratique met en évidence mieux que d'autres les voies de la recherche. Elle permet notamment de distinguer le côté arbitraire de certains postulats de base, le rôle respectif des faits et des hypothèses, le rôle médiateur des langages (symboles, schémas, codes) et la place de l'interprétation dans toute tentative d'appréhension du réel.

Ensuite, la pratique des modèles procède de mécanismes qui certes peuvent être rencontrés ailleurs, mais qui, rassemblés, créent un effet de « synergie » original. Il s'agit d'une démarche qui permet de matérialiser dans une structure aux contours pas toujours délimités des éléments, des relations internes et externes avec une loi de composition interne (mode d'emploi) dont on doit corroborer la cohérence et les conséquences (fig. 2).

Cette fixation temporelle favorise la formalisation en la détachant de l'expérience immédiate. S'appuyant sur des éléments visuels ou symboliques, elle permet surtout des extrapolations. Elle oblige à sélectionner, hiérarchiser, expliciter à la fois les variables, les

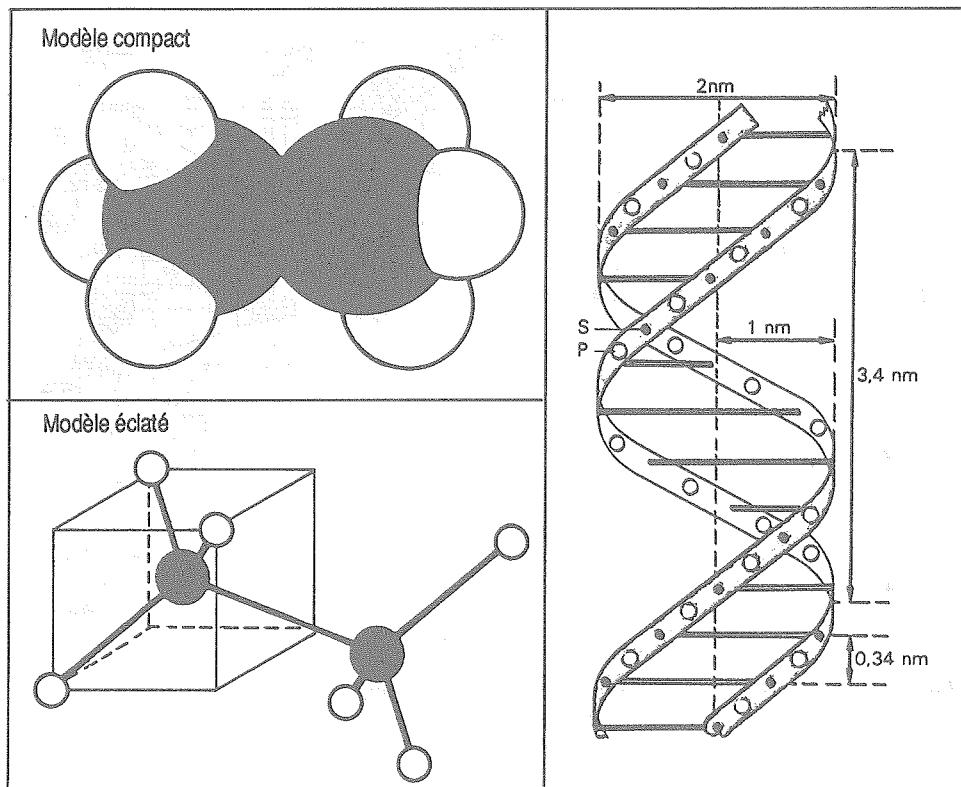


Figure 1

Modèles conventionnels de molécules relativement simples (à gauche) et d'ADN (à droite).

hypothèses, les raisonnements effectués. En substituant à un phénomène complexe un système plus simple, présentant des similitudes et dont les lois sont bien connues, elle facilite la compréhension et la prévision. Enfin, promouvoir une démarche de modélisation, c'est également restituer la démarche expérimentale et renouveler le problème de la causalité. On n'est plus limité par une causalité strictement linéaire : une cause entraîne un effet. On peut envisager plus sereinement une approche des systèmes complexes ; par exemple, des situations (santé, environnement, outils didactiques) qui n'admettent pas toujours de solutions ou une seule solution. Le modèle devient un canevas qui se substitue à la complexité de la nature, pour un moment et pour une certaine efficacité. C'est d'ailleurs cette dernière qui lui donne sa légitimité. Ces qualités s'avèrent utiles dans une formation scientifique qui nécessite une prise de recul. Elles facilitent le dépassement continual du savoir dont nos sociétés ont tant besoin en ce moment¹.

Comment alors introduire la modélisation ? Quels modèles utiliser ? Faut-il en envisager un seul ou plusieurs ? Faut-il utiliser les modèles actuels de la science ? Peut-on les simplifier pour les rendre accessibles sans les dénaturer ? Faut-il revenir aux modèles historiques quand les modèles actuels sont trop compliqués ou trop spécialisés ? Peut-on produire des modèles à des fins éducatives, détachés des modèles de la recherche ? Quelles transformations doit-on envisager, quelles adaptations doit-on entreprendre pour les faire « coller » aux questions, aux cadres de référence, aux processus d'appropriation des appre-

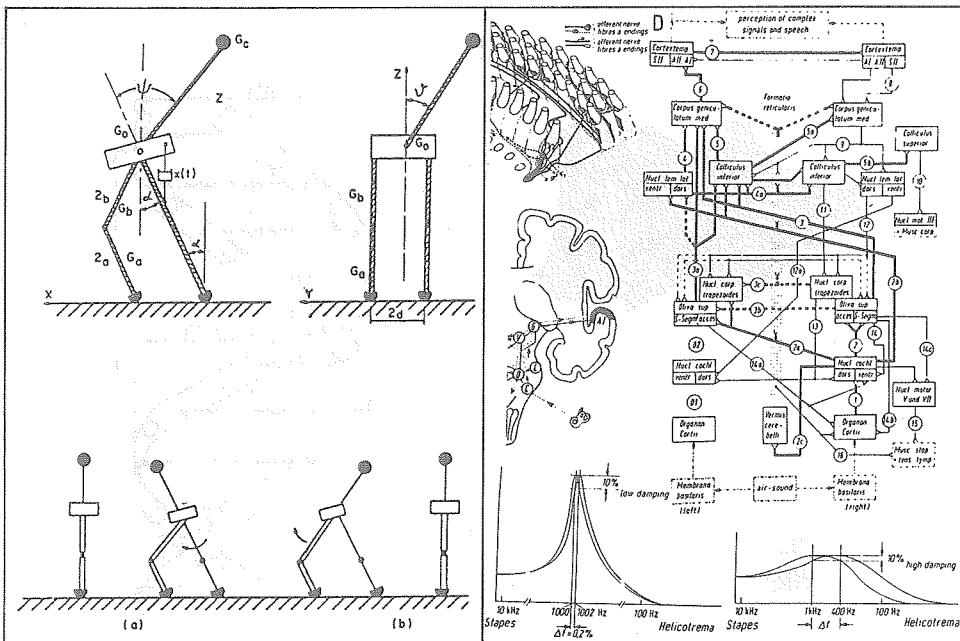


Figure 2

Définitions de modèles utilisés dans la recherche en biologie ;
à gauche, modèle mécanique d'un bipède ;
à droite, modèle systémique d'un mécanisme encéphalique.

nants ? Comment éviter d'imposer un modèle *a priori*, produit parfois par les scientifiques pour résoudre d'autres problèmes ?

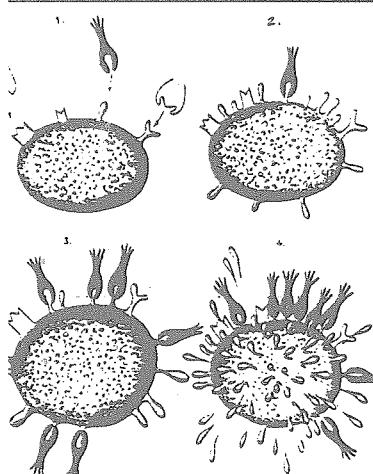
Comment orienter la communication pour obtenir un travail effectif de modélisation ? Comment passer d'une question où l'apprenant se trouve impliqué à un système de relations généralisables ? A quelles conditions l'apprenant peut-il s'approprier les instruments nécessaires (symbolisation, schématisation, etc.) ? Voilà quelques questions que nous essaierons d'aborder, après une brève description du concept de modèle et de modélisation.

Épistémologie du modèle

L'usage des modèles est l'une des caractéristiques de la pensée scientifique et industrielle contemporaine. Toutefois, depuis le modèle réduit qui permet par exemple des études balistiques, le modèle mécanique qui reproduit les propriétés principales de l'objet étudié, le modèle cybernétique qui régule des mécanismes complexes, jusqu'au modèle stochastique, il n'y a qu'un pas (fig. 3).

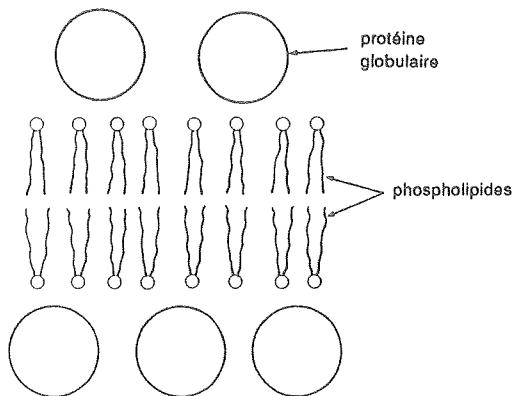
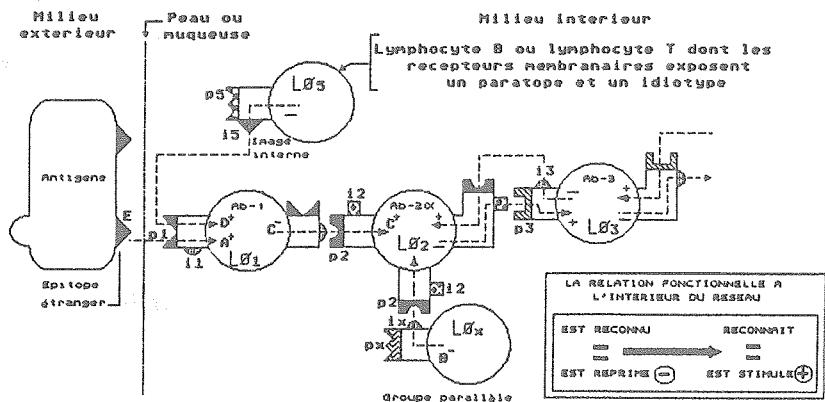
En biologie, modèle et théorie sont aujourd'hui confondus, et l'on fabrique de nombreux modèles partiels à portée limitée. En physique, la tendance est plus unificatrice, et l'on parle souvent de modèle d'une théorie ; lorsqu'on ne dispose pas des bases théoriques satisfaisantes, c'est par le biais des conséquences concrètes de différents modèles qu'il est possible d'élaborer cette théorie.

Globalement, modéliser est une démarche qui consiste à produire une représentation

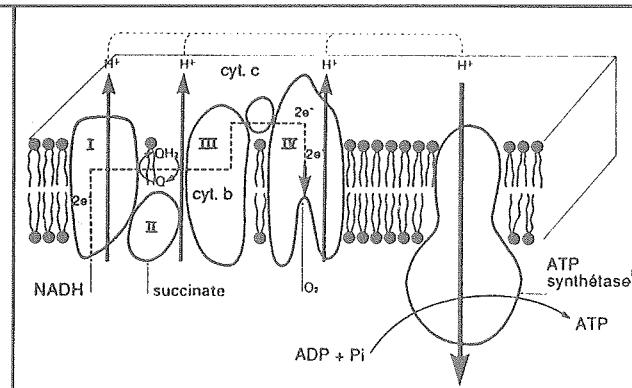


Théorie de la chaîne latérale d'Ehrlich. Ehrlich croit que l'interaction de l'antigène avec un récepteur préformé présent sur la cellule (on ignorait alors qu'il s'agissait d'un anticorps) augmentait la production et la sécrétion de ce récepteur par la cellule. Bien que le schéma de Ehrlich pensait qu'une seule cellule pouvait produire des anticorps capables de se lier à plus d'une sorte d'antigène, il est évident qu'il apporte à la fois la théorie de la sélection clonale et l'idée que le système unitaire pouvait produire des récepteurs avant même le contact avec l'antigène.

Réseau idiotypique dans le cas où l'idiotype n'est pas porté par le paratope.



Première version du modèle moléculaire de membrane produit par Danielli et Davson. Les protéines incorporées au modèle sont envisagées sous conformation globulaire.



Les conversions d'énergie dans la membrane interne de la mitochondrie. Cinq ensembles de protéines intégrées interviennent : le complexe I (contenant une flavoprotéine, NADH-oxydase), le complexe II (succinate déshydrogénase), le complexe III (à cytochrome b), le complexe IV (cytochrome oxydase) et l'ATP-synthétase. Une protéine périphérique (cytochrome c) intervient également ainsi que l'ubiquinone réduite ou oxydée (QH_2 , Q). On voit sur la figure que le transfert des électrons (du complexe I au complexe IV) dans le plan de la membrane s'accompagne d'échanges transmembranaires de protons. D'après R. Durand, *La Recherche*, 17, 162 (1986).

Figure 3

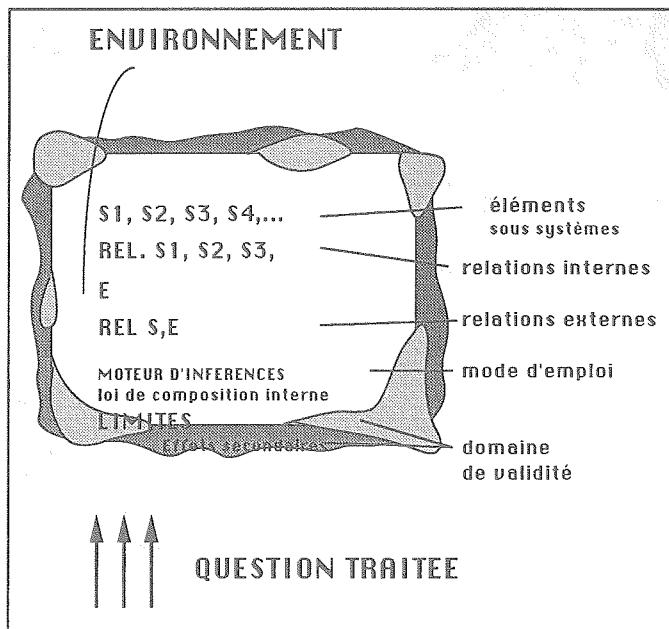
Évolution de modèles dans la recherche en biologie ;
en haut, les récepteurs membranaires en immunologie ;
en bas, la structure de la membrane cellulaire.

hypothétique se substituant à la réalité pour la décrire et la comprendre. Elle procède d'un mécanisme réducteur. Pour cela, le scientifique sélectionne les éléments issus des données expérimentales, puis reproduit *in vitro* les relations pertinentes. Le résultat du processus est un modèle, c'est-à-dire une élaboration transitive présentant des propriétés d'autonomie,

de cohérence et de pertinence par rapport à un problème traité. Son but est de rendre compte au mieux de la réalité et de la rendre intelligible. Car un modèle efficient permet de générer des simulations pour le manipuler, et le scientifique peut tester son champ de validité. Il conduit à inférer des prévisions pour le corroborer ou l'infirmer expérimentalement. Schématiquement, un modèle est toujours une réponse à une question. Il comporte un certain nombre d'éléments et un moteur d'inférence qui lie les éléments entre eux (relations internes) et à un environnement (relations externes). Il propose un domaine de validité plus ou moins prégnant (fig. 4).

Figure 4

Métamodélisation d'un modèle.



Utilisations didactiques de la modélisation

Sur le plan éducatif, la modélisation introduit des approches originales. Tout savoir est le résultat d'une élaboration par approximations successives. Il est une réponse à un problème ; il présente donc des limites et un domaine de validité. On peut dès lors envisager la modélisation comme un processus. Celui-ci conduit à une multiplicité de modèles possibles et à une adaptation de ces derniers par rapport à un problème à traiter. Reste que les tentatives réalisées ces dernières années dans l'enseignement n'ont pas toujours été suivies de succès. Analysons-les avant de présenter quelques orientations possibles.

Depuis les années 60, de nombreux scientifiques se proposent d'introduire très tôt — dès l'école primaire — des modèles correspondant aux conceptions scientifiques les plus actuelles. Ce qui est tout à leur honneur, car l'école est souvent très décalée par rapport à l'évolution du savoir. Malheureusement, la plupart des essais effectués, en particulier avec les modèles les plus élaborés (atome, ADN, anticorps), ont entraîné des échecs cuisants. Les observations faites à ce propos montrent que le modèle est soit proposé avec un niveau d'abstraction qui le rend incompréhensible, soit épuré au point qu'il en devient simpliste, c'est-à-dire inopérant pour résoudre les problèmes à la portée des apprenants (fig. 5).

Il faut ajouter qu'il est parfois complètement décalé par rapport aux questions qu'il prétend traiter. Par exemple, des biologistes proposent, pour expliquer les ressemblances des êtres vivants, un plan de fabrication fondé sur l'ADN. Autant dire que l'on utilise ici un marteau-piqueur pour écraser une noisette ! D'autant plus que la noisette en question est indigeste pour l'apprenant, car le médiateur n'a pris en compte ni ses questions ni son cadre de référence. En effet, que signifient pour le jeune élève « acide nucléique », « réactions chimiques intracellulaires », « communication cellulaire », alors qu'il n'a pas encore une connaissance du vivant à un niveau macroscopique et qu'il manque de repères sur les plans dimensionnel et fonctionnel² ?

Aujourd'hui, il est sans doute important d'introduire le modèle d'ADN — nous dirions plutôt les modèles d'ADN — dans l'enseignement. Mais cela suppose une réflexion préalable. Il ne suffit pas de simplifier le message ou de le mettre en bandes dessinées (chose utile par ailleurs), il s'agit surtout de réfléchir à quel type de questions on veut répondre et

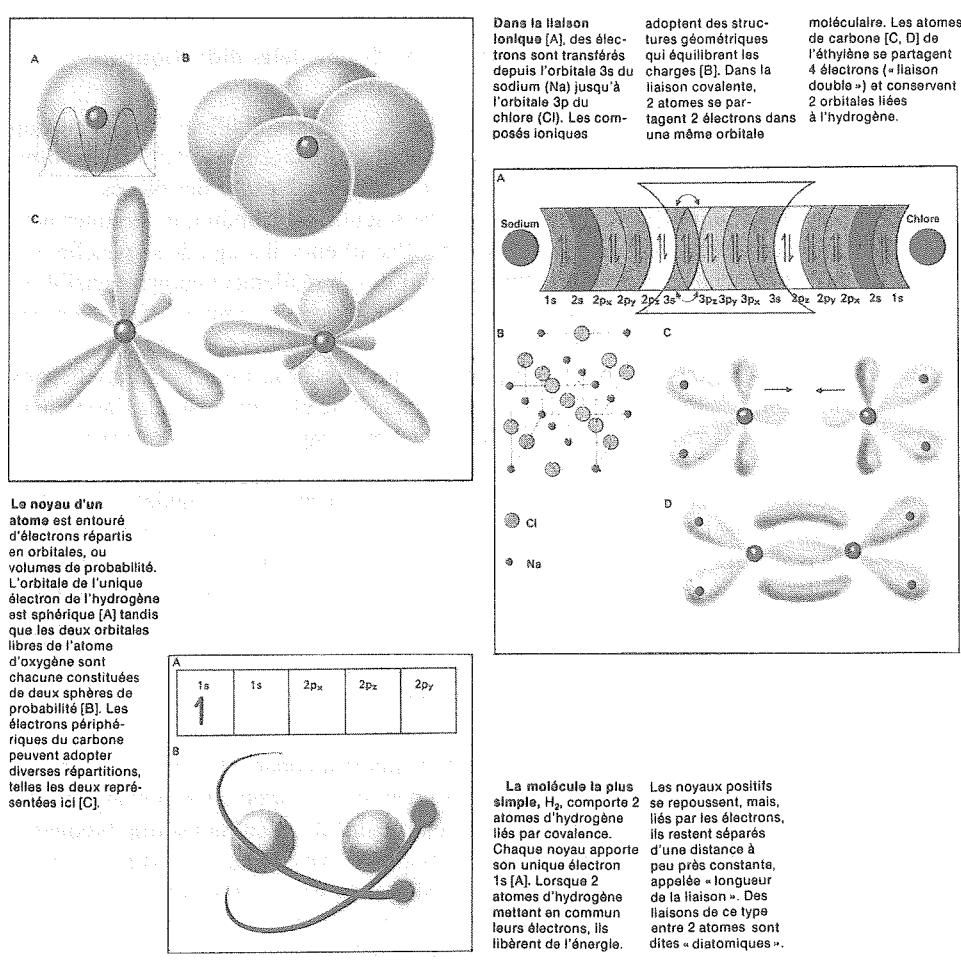


Figure 5

Inadaptation d'un modèle atomique dans un livre de vulgarisation pour enfants âgés de douze à quatorze ans.

quels modèles sont compréhensibles pour l'élève (fig. 6). Il n'est en fait pas évident que ce soit le modèle d'ADN en structure hélicoïdale, segmenté en nucléotides, qui soit le plus pertinent ; une étude en cours à ce sujet montre déjà tout un ensemble de difficultés.

Pour résumer, on peut dire que, le plus souvent, les modèles didactiques utilisés dans la pédagogie habituelle sont mal adaptés, et cela sur plusieurs plans. Tout d'abord, au niveau des apprenants, ils sont fréquemment soit illisibles, soit incompréhensibles de par la structure, le symbolisme ou le graphisme qui leur sont associés. Ils correspondent à des outils trop performants par rapport aux questions que les élèves se posent ou aux problèmes que l'on souhaite voir résoudre. Ensuite, parce qu'ils sont décalés par rapport au savoir scientifique qu'ils prétendent faire acquérir, car leur présentation dogmatique leur ôte toute valeur instrumentale, d'autant plus que les images utilisées masquent le message à transmettre, seules les propriétés apparentes étant le plus souvent retenues. Enfin, ils ne sont pas opératoires, car ils n'introduisent pas l'idée de modélisation. Ils figent le savoir sur une image arrêtée au lieu d'induire un processus de production de savoir en réponse à des questions.

Conditions d'élaboration des modèles didactiques

Il nous faut donc aujourd'hui sortir de cette impasse, ressentie d'ailleurs par beaucoup d'enseignants et de vulgarisateurs, trop conscients de l'insuffisance des explications limitées qu'ils fournissent et de l'effet de scepticisme produit dans l'esprit des élèves.

L'introduction d'un modèle dans une démarche scientifique conduit, en premier lieu, à réfléchir sur le contenu du message à transmettre. Par ailleurs, il s'agit de se pencher sur les formes que le modèle peut prendre, afin que celui-ci soit réellement compréhensible et opératoire dans un processus de modélisation. Cela oblige à tenir compte des conceptions que possèdent les apprenants.

Un modèle pour l'enseignement ou pour la vulgarisation, que nous appellerons «modèle didactique», correspond à l'instrument de pensée le plus adéquat que l'apprenant pourra produire et/ou faire fonctionner dans le but de rendre signifiant un phénomène et de produire des prévisions.

Nos recherches ont ainsi tenté de décortiquer les mécanismes de la modélisation chez les apprenants. Elles ont produit des modèles didactiques qui sont des approximations suffisantes de la réalité, opératoires par rapport à un champ de problèmes. Dans la pratique, elles ont montré que, pour permettre à l'élève de modéliser, il était souhaitable de lui fournir des ébauches de modèles ainsi que des situations éducatives pour les rendre opératoires.

Ébauches de modèles didactiques

Pour produire un modèle didactique, il semble difficilement concevable de faire l'économie d'une étude épistémologique ; il est en effet important de fournir à l'apprenant un système qui ne crée ni ne renforce une conception trop prégnante ou du moins trop bloquante pour lui. Ainsi, à propos du courant électrique, l'analogie hydraulique consistant à considérer un écoulement d'eau à partir d'un réservoir supérieur vers un réservoir inférieur, en assimilant les différences de hauteur aux différences de potentiel, induit l'idée d'une pile «réservoir de courant» laissant s'écouler ce courant à débit constant.

Cette analogie ne tient pas compte de la nécessité d'avoir un circuit fermé en régime permanent. De plus, elle présente le potentiel comme une fonction de points, le potentiel de gravité étant fonction uniquement de l'endroit où on le mesure, alors que le potentiel en

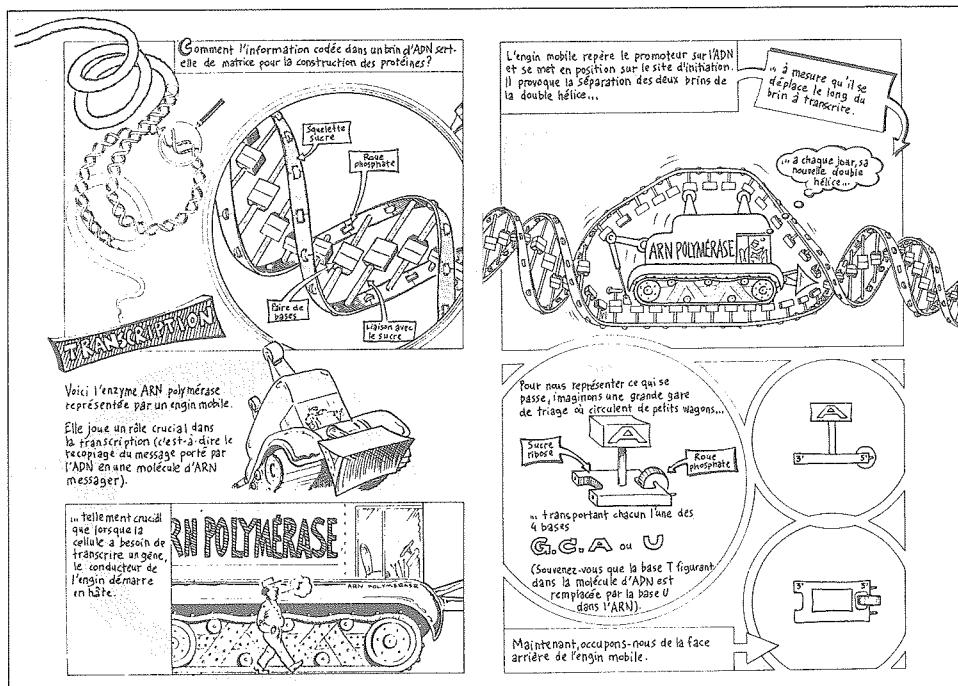


Figure 6

Exemples de modèles inadaptés pour la vulgarisation de l'ADN.

un point d'un circuit électrique, et même la différence de potentiel aux bornes d'un élément d'un circuit, sont fonction de l'ensemble des éléments de ce circuit. Cela se matérialise par le fait qu'un élève, placé devant le montage représenté sur le schéma, pourra affirmer que, lorsque la résistance change de valeur et que l'on connaît le sens du courant, l'intensité lumineuse de l'ampoule varie quand la résistance est placée avant l'ampoule et reste la même si cette résistance est placée après. Enfin, ce modèle renforce la tendance au raisonnement séquentiel. A la place, deux autres modèles tout aussi compréhensibles par les apprenants et plus adéquats par rapport au message visé peuvent être proposés (De Closets) (fig. 7). Le second correspond aussi à une analogie hydraulique, mais présentée horizontalement et en circuit fermé. Le premier, plus simple, utilise une chaîne de vélo ; l'objet frottant sur la chaîne provoque un ralentissement global du mouvement de tous les maillons. Ce modèle fait aussi passer l'idée que le circuit électrique n'est que la « courroie de transmission » de l'énergie.

De ce fait, nos travaux ont produit des modèles beaucoup plus imagés, mais directement utilisables. Leurs caractéristiques aident l'apprenant à avancer de quelques pas, en lui fournissant un support sur lequel il peut s'appuyer pour regrouper un ensemble de savoirs partiels. Ils constituent donc des sortes de paliers donnant lieu à une « pause intégratrice », avant que le concept ne continue de s'affiner.

Dans la pratique, les modèles pourront être représentés par une analogie matérialisée à l'aide d'un schéma plus ou moins dynamique. Ainsi il sera possible, dans un premier temps, de comparer l'intestin grêle à un filtre, si ce qui nous intéresse concerne l'assimilation des aliments. Si l'objectif est de fournir un premier niveau de formulation pour l'élément chimique, dans lequel on veut mettre en évidence son invariance et son réarrangement

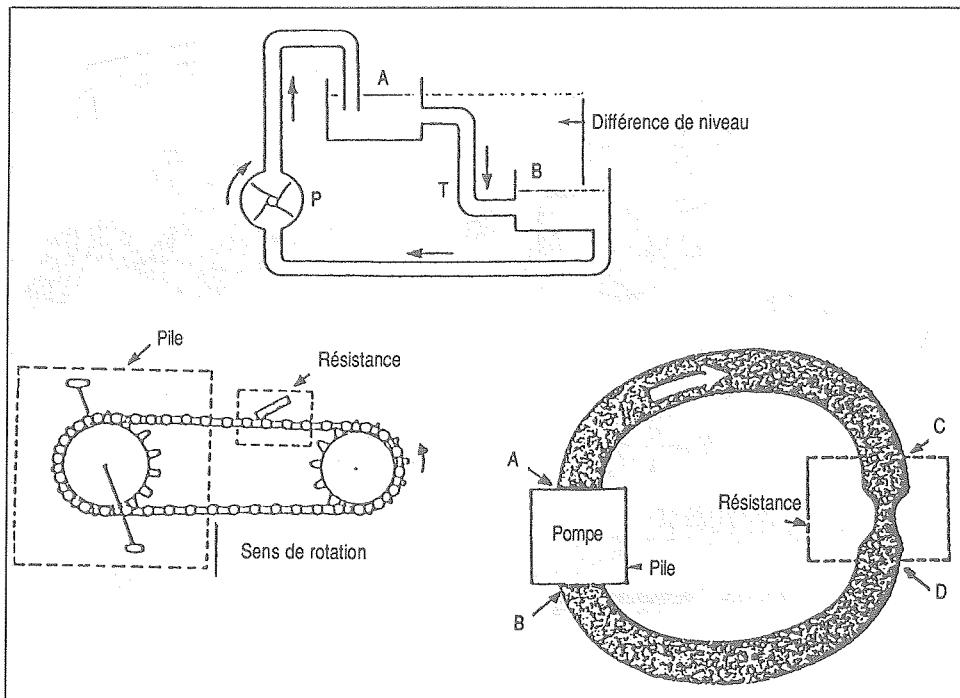


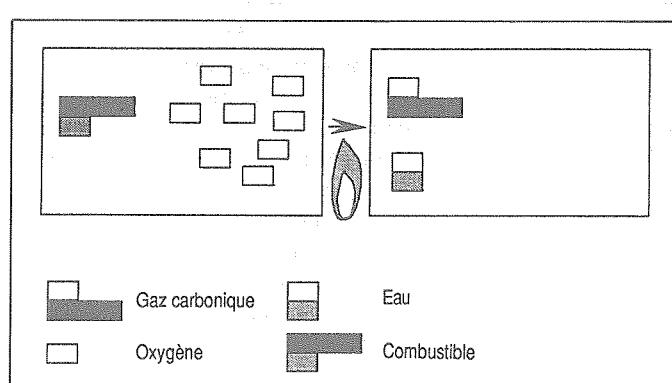
Figure 7

Modèles didactiques pour l'électrocinétique scolaire
(De Closet, 1983).

Il est possible de proposer des modèles didactiques pour expliquer les phénomènes d'électrocinétique. Ces modèles peuvent être basés sur des éléments simples comme des batteries et des résistances ou sur des systèmes plus complexes impliquant des pompes et des différences de niveau.

Figure 8

Un modèle pour expliquer la combustion de la cire avec les briques LEGO (Furer et Weber, 1989).



possible dans l'espace lors d'une réaction chimique, la structure proposée pourra être celle illustrée par la figure 8. Ensuite seulement, il sera pertinent d'utiliser des modèles plus élaborés, comme une formule ou une équation chimique.

Modèles didactiques et modèles actuels

Cette hypothèse de travail conduit à la production de modèles didactiques spécifiques détaillés du savoir scientifique actuel, même si celui-ci constitue l'objectif que l'on doit atteindre à long terme. Cette idée ne sera pas aisée à faire admettre dans certains milieux

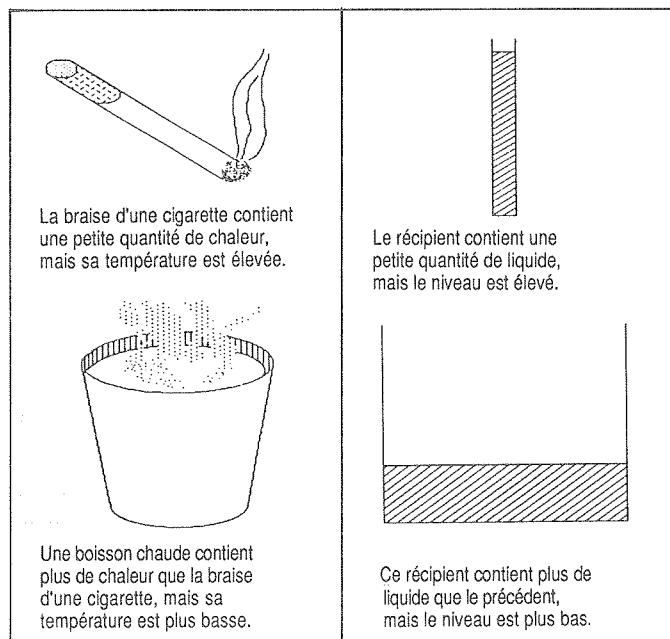
scientifiques autorisés³. Ces derniers, au nom de la modernité, auront du mal à envisager que l'on puisse ne pas enseigner les savoirs les plus actuels. Malheureusement, l'observation quotidienne montre que cette pratique habituelle a pour conséquence de conduire à des énoncés inaccessibles, produisant même des effets contraires à ceux attendus, puisqu'ils contribuent à mythifier la science.

Pour préciser cette proposition, prenons la distinction entre les concepts de chaleur et de température. Dans la vie courante, nous utilisons indifféremment les mots « chaleur » et « température ». Nous parlons par exemple de grande chaleur les jours où les températures sont très élevées, et de grand froid les jours où elles sont très basses. Nous en venons alors à penser que la présence d'une grande quantité de chaleur s'accompagne obligatoirement d'une température élevée, et qu'une petite quantité de chaleur ne permet pas d'obtenir une telle température. Mais est-ce vraiment toujours le cas ? Non, bien sûr ! Par exemple lorsque nous allumons une allumette, la température de la flamme est très élevée. Mais la quantité de chaleur libérée lors de la combustion de l'allumette est faible. En effet, elle ne suffit même pas à chauffer quelques décilitres d'eau froide ! Nous entrevoyons, à l'aide de cet exemple, que température élevée n'est pas synonyme de grande quantité de chaleur, et qu'une température très élevée peut même être associée à une petite quantité de chaleur ! Voici maintenant un exemple où une très grande quantité de chaleur ne conduit pas à une température très élevée : l'eau des lacs, des mers et des océans reçoit en été une énorme quantité de chaleur et se réchauffe. Mais malgré cet apport important de chaleur, la température de l'eau s'élève peu et reste assez basse. Température basse n'est donc pas synonyme de petite quantité de chaleur. C'est à partir de cela que l'on peut essayer de concevoir un modèle didactique.

Pour mieux comprendre la différence qu'il y a entre chaleur et température, nous pouvons nous aider d'une analogie : considérons un récipient cylindrique contenant un liquide. Dessinons-le schématiquement. Le niveau du liquide représentera la température et la quantité de liquide matérialisera la chaleur. La taille du récipient, ou plus précisément sa section, correspond alors à une capacité thermique (fig. 9).

Figure 9

Analogie
chaleur-liquide.



Que se passe-t-il si l'on trempe la cigarette dans le verre d'eau chaude ? Elle s'éteint, bien entendu ! Mais la quantité de chaleur cédée par la braise est-elle plus grande, égale ou plus petite que celle gagnée par l'eau ? Et que peut-on dire de la température de la braise au cours de cette opération ? Varie-t-elle plus, de la même manière ou moins que celle de l'eau ? L'analogie proposée précédemment va nous aider à trouver les bonnes réponses. Tremper la cigarette dans l'eau chaude revient à établir une communication entre les deux récipients en ouvrant le robinet (fig. 10).

La quantité de liquide qui sort du petit récipient est alors égale à celle qui pénètre dans le grand : la quantité de chaleur cédée par la braise est donc égale à celle reçue par l'eau chaude. En revanche, on voit que le niveau varie plus dans le petit récipient que dans le grand : la température de la braise varie par conséquent plus que celle de l'eau.

Situation thermique :

On trempe une cigarette allumée dans un verre d'eau.

La braise ne perd pas plus de chaleur que l'eau n'en gagne.

La température de la braise varie plus que celle de l'eau.

Analogie hydraulique :

En ouvrant le robinet, on met en communication les deux récipients.

La quantité de liquide qui quitte le petit vase est égale à celle qui pénètre dans le grand.

Le niveau du liquide varie plus dans le petit récipient que dans le grand.

Cette analogie permet de comprendre qu'un objet ayant une température élevée peut contenir moins de chaleur qu'un objet ayant une température basse, et attire l'attention sur la notion de capacité thermique. Elle illustre le fait que le transfert de chaleur ne s'effectue pas forcément de l'objet qui contient le plus de chaleur vers celui qui en contient le moins, mais que ce sont les températures qui déterminent le sens de l'échange. Il s'agit d'un modèle dans lequel la chaleur est conçue comme un fluide et ne fait pas référence à l'agitation moléculaire. Il faut rappeler que c'est avec une représentation de ce type que Carnot a pu établir ses principes de thermodynamique. De nombreux essais ont montré qu'elle est suffisamment opérante pour tout ce qui concerne la calorimétrie classique.

Certes, ce modèle n'est pas encore parfait ; les élèves confondent fréquemment les quantités d'eau utilisées analogiquement et celles faisant partie de l'énoncé du problème de calorimétrie qu'ils tentent de résoudre ; mais il permet aux apprenants de faire quelques pas, à condition que l'on ait réfléchi à la manière de l'introduire.

En effet, l'introduction d'une ébauche de modèle ne peut pas se faire directement ; cela nécessite que les élèves aient déjà une certaine expérience des questions liées aux échanges de chaleur et qu'ils ressentent le besoin de les expliquer, le modèle pouvant d'ailleurs être un moyen de favoriser cette intégration. Il semble ensuite nécessaire que les apprenants aient la possibilité d'interagir avec lui, en proposant une analyse de situations diverses, comme le chauffage d'une pièce par une masse d'eau, l'élévation de la température d'un liquide quand on trempe une pointe d'allumette enflammée, etc. Le code à retenir sera donc le suivant :

chaleur = quantité d'encre ou quantité de liquide

température = coloration ou niveau

On retrouve, à ce niveau, le même statut heuristique que celui que nous avons évoqué pour la confrontation. Il suppose donc que le modèle ne soit pas « parachuté », mais qu'il puisse être discuté. Ainsi, l'élève s'habituerà à faire fonctionner ce modèle (fig. 11), il prendra conscience de ses champs d'application et de validité ; mais il pourra aussi continuellement le rectifier, par interaction, en y intégrant les conséquences des expériences nouvellement réalisées.

Figure 10

Analogie
chaleur-liquide (suite).

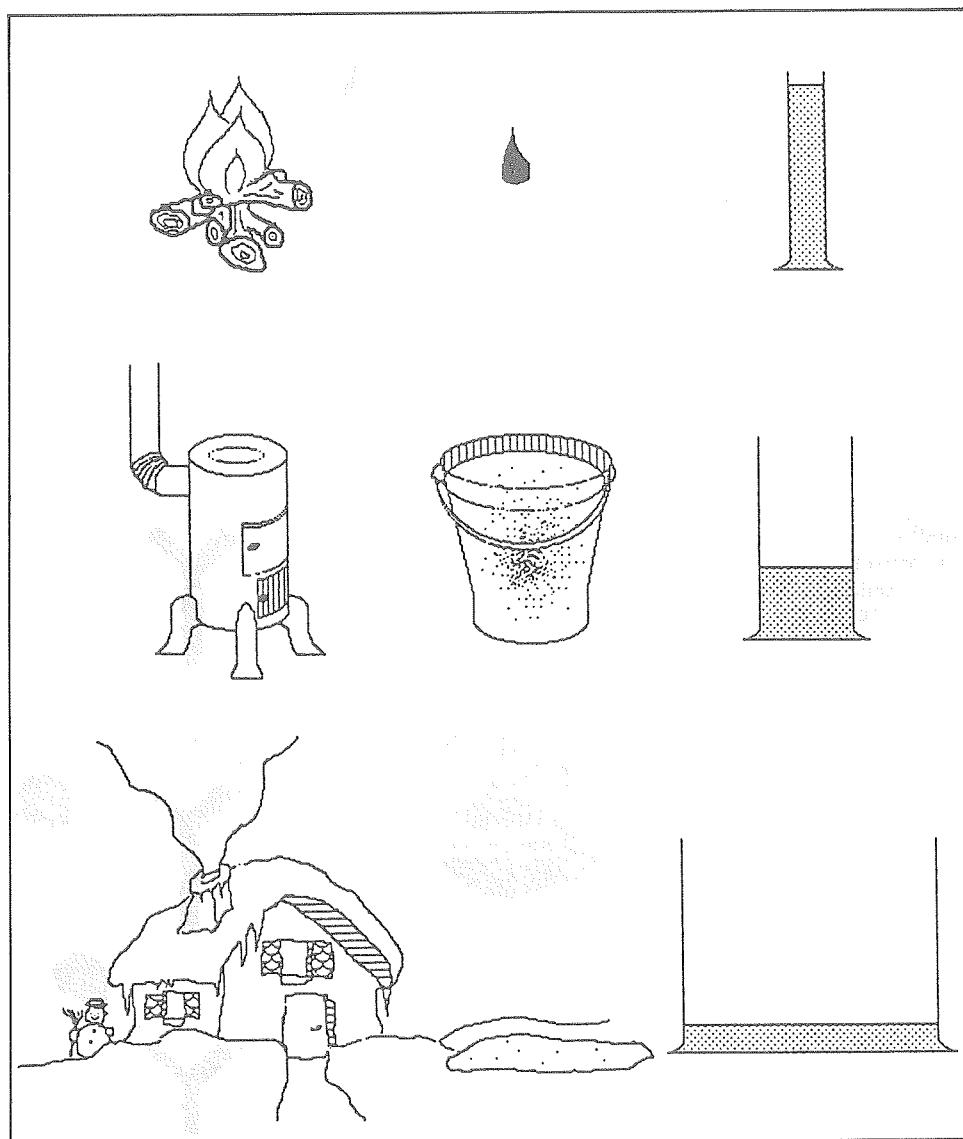
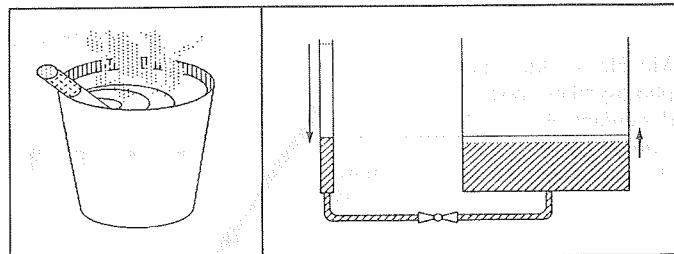


Figure 11

Modèles analogiques sur la chaleur (Vuilleumier, 1986).

Figure 12

Modèle en « kit » sur la photosynthèse pour des enfants âgés de dix à douze ans (Perrot, 1991).

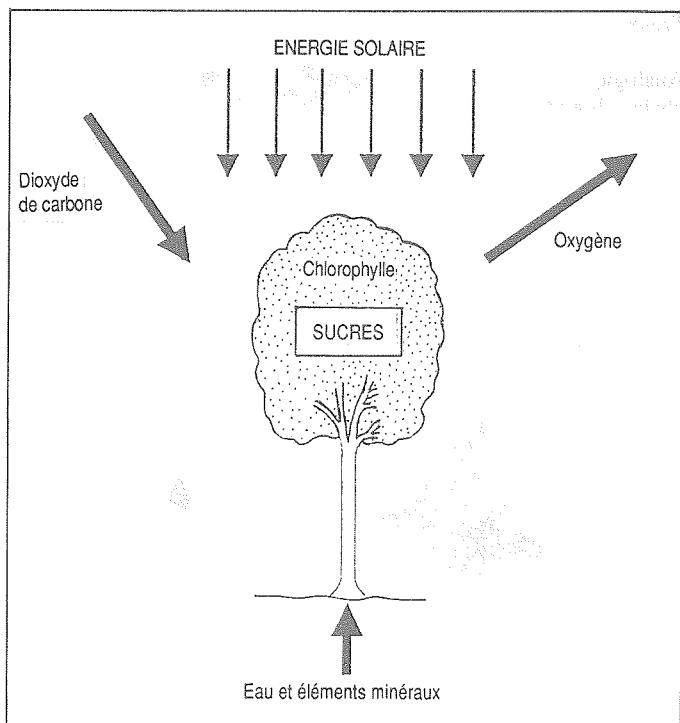


Figure 13

Modèle
« à compartiments »
sur les anticorps
(Lintz, 1991).

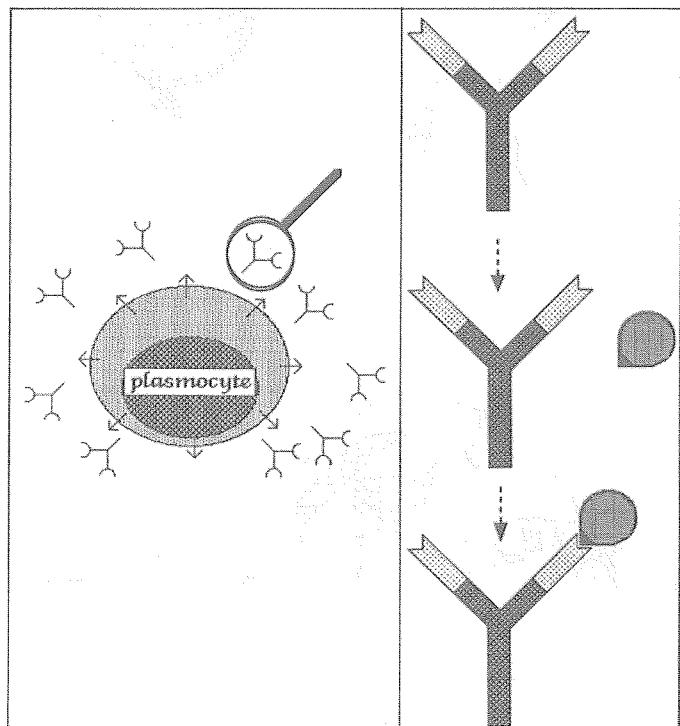
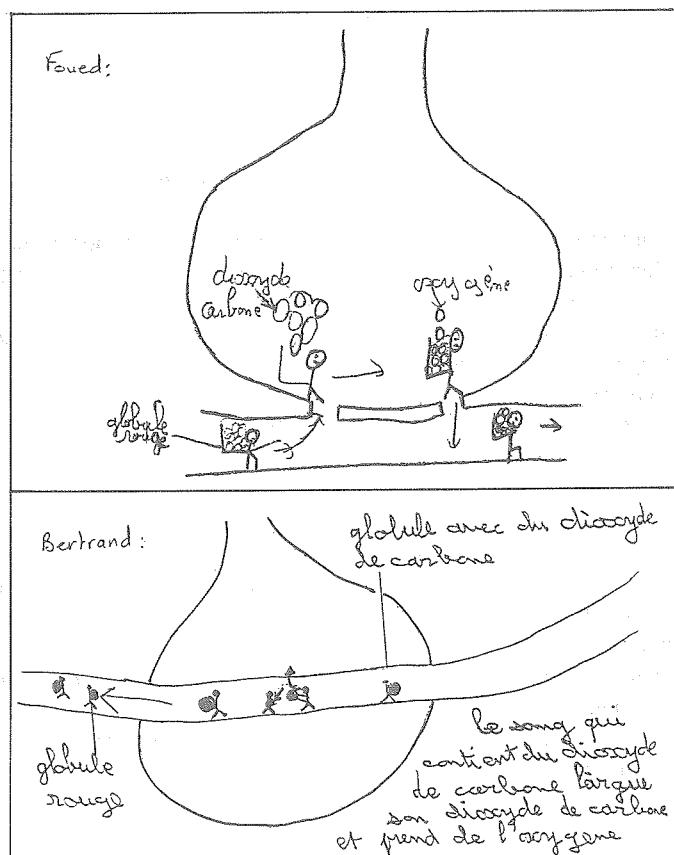


Figure 14

Premiers modèles élaborés par des enfants de huit ans sur le rôle des globules rouges.



La pratique de la modélisation

Quant aux pratiques d'enseignement ou de communication, nous savons qu'il n'y a ni de «voie royale» ni de recette infaillible en la matière. Sans doute ne faut-il pas poser le problème en termes d'opposition entre modèles spontanés et modèles scientifiques. On ne peut passer d'emblée de l'un à l'autre, car ce sont souvent deux conceptions du monde qui s'opposent, avec chacune leur cohérence. Il semble souhaitable d'envisager plutôt un processus de transformation et d'étudier les conditions afférentes.

Dès lors, il semble nécessaire d'imaginer et de tester des modèles didactiques qui soient des sortes de «grappins» que le professeur ou le vulgarisateur peuvent fournir pour aider l'élève, l'étudiant ou encore le lecteur. Il s'agit sans doute même de mettre en place des procédures originales et d'envisager des modèles en «kits», à «compartiments» (ou modèles emboîtés), qui permettent à l'apprenant de se situer dans les dimensions du problème et dans les questions traitées (fig. 12 et fig. 13).

On doit également chercher des situations pour faire fonctionner ces modèles et définir leurs apports et leurs limites. On peut même envisager des contextes pour amener les apprenants à «jongler» entre plusieurs modèles et mettre en évidence leurs adéquations respectives au problème. Il faut former le projet de créer un environnement didactique pour faire fabriquer des modèles par les apprenants, et leur faire comparer leurs efficacités respectives en les confrontant à d'autres et à la réalité (fig. 14).

Sur chacun de ces points, les médiateurs, trop conditionnés par les modèles conventionnels, doivent fournir un grand effort pour adapter leur point de vue, ce qui n'est possible que par une formation adéquate.

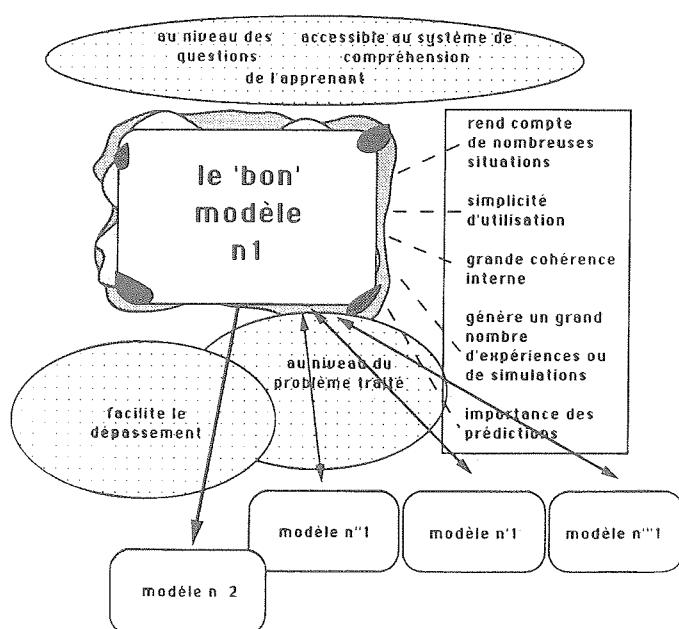
Optimiser les modèles

Pour conclure, il faut insister à nouveau sur l'importance d'une pratique des modèles dans l'enseignement et la vulgarisation des sciences. Elle reflète bien certaines des conditions les plus actuelles de l'investigation scientifique et industrielle. Il est nécessaire de ne pas attendre cinquante ans avant de la faire passer dans l'enseignement ou la vulgarisation. Cependant, cette introduction ne peut être immédiate ; il y a là un travail d'invention, dont l'éducation, mais aussi la vulgarisation, ont grandement besoin. C'est d'abord un travail d'adéquation, car le choix du (des) modèle(s) doit faire face à un dilemme : le modèle doit être assez complexe pour rendre au mieux le phénomène et relativement simple pour être traité par l'apprenant. C'est également un travail d'explicitation, car le scientifique traditionnel risque de ne pas y reconnaître sa science.

A ce niveau, le modèle d'apprentissage allostérique paraît être un outil pour rechercher le « bon » modèle didactique. Il explicite en premier les qualités épistémologiques et didactiques attendues, ainsi que toutes les contraintes, qu'elles soient au niveau des élèves ou au niveau du nombre traité. Ensuite, il souhaite surtout promouvoir l'idée qu'il n'y a pas de modèle intrinsèque, celui-ci pouvant être multiple afin de mettre en avant les différentes facettes d'un problème à étudier. Enfin, il suscite l'idée que tout modèle doit être « optimisé » en fonction de différents paramètres divergents. Comme tout modèle, il a bien sûr ses limites (fig. 15). ■

Figure 15

Caractéristiques allostériques d'un modèle didactique.



Notes

1. A condition que cet enseignement ou cette vulgarisation sachent mettre les apprenants à l'abri d'un «doute systématique».
2. Les élèves introduisent fréquemment des cellules dans les virus ou les atomes, les cellules sont également confondues avec les organes, etc.
3. Pourtant, les tenants de l'orthodoxie scientifique la pratiquent incidemment et de façon non réfléchie dans de nombreux domaines. Enseigne-t-on directement la relativité, même restreinte ? Ne continue-t-on pas à apprendre la physique newtonienne ? Le cas contraire ne serait-il pas considéré comme une hérésie, cette physique étant largement utile quand on aborde les questions classiques ? De même, ne prend-on pas encore comme référence le «rayon lumineux» en optique, alors que, depuis plus de cent cinquante ans, Fresnel a introduit le modèle ondulatoire ? Plusieurs manuels utilisent d'ailleurs implicitement ces deux approches contradictoires, qui alternent suivant les points traités, en particulier à propos de l'émission de lumière et de son passage à travers une fente ; tantôt ce passage se fait directement, tantôt il provoque des interférences... et cela à dix pages d'intervalle, sans qu'une phrase soit écrite sur cette contradiction manifeste. En biologie, a-t-on abandonné la génétique mendélienne, alors que l'on sait aujourd'hui que les caractères peuvent être liés entre eux et que les résultats obtenus peuvent provenir d'une interaction entre les gènes ?

Références

- DE CLOSET, J. 1983. Le raisonnement séquentiel en électrocinétique. Thèse de troisième cycle, Paris, Université de Paris VII.
- FURER, N. et WEBER, B. 1989. *Approche du monde de la chimie*. Éd. LEP (Loisirs et pédagogie).
- GIORDAN, A. 1989. An allosteric learning model, dans R. Mayer (dir. publ.), *Actes IUBS-CBE, 1988*, révisé lors de la réunion de Moscou, Actes IUBS-CBE.
- GIORDAN, A. et DE VECCHI, G. 1987. *Les origines du savoir scientifique*. Neuchâtel, Delachaux.
- . 1989. *L'enseignement scientifique : comment faire pour que «ça marche»?* Paris, Z'Éditions. (Coll. «Guides pratiques».)
- GIORDAN, A. et MARTINAND, J.-L. (dir. publ.). 1987. *Modèles et simulation*. Actes des 9^e journées internationales sur l'éducation scientifique, Chamonix.
- . 1988. *Signes et discours*. Paris, Z'Éditions. (Coll. «Investigations».)
- LINTZ, M. 1989. *Didacticiel sur l'immunité destiné à des élèves infirmières*. (Document LDES.)
- PERROT, J. 1991. Photosynthèse, *Mensuel de la Salamandre*, n° 80.
- VUILLEUMIER, B. 1986. Recherche FNRS n° 1540082, document interne LDES.