

LE MODELE EN QUESTIONS

Anne-Marie Drouin

Derrière la multiplicité des emplois du terme de modèle, peut-on supposer que se cache un concept unique, ou doit-on en rester à un constat d'hétérogénéité ? Cette question a été débattue au cours d'un séminaire dont le texte qui suit se fait l'écho. Sans vouloir aboutir à une définition unique et fermée, cette réflexion tente de trouver des cohérences au milieu des contradictions. L'analyse d'un modèle en biologie illustre un certain nombre des caractères mis à jour dans cette étude.

un choix de réflexion théorique en liaison avec des recherches didactiques

Lorsque la réflexion didactique s'intéresse au concept de modèle, cela naît, entre autres choses, du constat que malgré le rôle important des modèles et de la modélisation dans les sciences expérimentales, l'école prend rarement en compte cette dimension de la démarche scientifique. Cette rareté peut susciter des recherches de type didactique mais elle souligne aussi, et en même temps, la nécessité d'une réflexion théorique qui permette de clarifier ce dont on parle quand on parle de modèle ou de modélisation.

Ainsi, parallèlement aux recherches mises en place dans des classes et dont on verra quelques résultats provisoires dans ce numéro, une réflexion, se situant d'emblée sur un plan théorique, a été menée au cours d'un séminaire où c'est le concept de modèle en tant que tel qui a été examiné.¹

1. MODELE : UN CONCEPT ECLATE

Ce qui frappe tout d'abord lorsqu'on aborde une réflexion sur le concept de modèle, c'est la diversité de ses emplois. Et l'une des questions qui a ouvert le débat sans cesser d'être présente,

(1) Ce séminaire s'est déroulé au cours de l'année 1986-1987 et y participaient les membres de l'équipe de coordination du groupe de recherche en didactique des sciences expérimentales (Esciex, INRP, DP1). Le présent texte n'est pas une traduction fidèle de ce qui y a été dit mais plutôt une sorte de "témoignage intellectuel" d'un "vécu théorique" où la réflexion personnelle, nourrie de la réflexion collective, se développe aussi de façon autonome. Précisons enfin que l'analyse philosophique ici développée ne prétend pas être exhaustive sur le sujet, ni traduire une maîtrise totale de tous les aspects des exemples scientifiques évoqués.

au moins de façon latente, est celle de savoir s'il est utile et pertinent de vouloir unifier les définitions du modèle, même s'il ne s'agissait que de retracer les liens entre divers sens apparemment étrangers l'un à l'autre.

Ce concept est, en effet, souvent employé de manière contradictoire ou abusive au point d'être considéré par certains comme un simple effet de mode.

On a pu se demander par exemple s'il était légitime de parler de modèle à propos de démarches et de discours du passé qui n'employaient pas ce terme, mais plutôt le terme de "loi" ou de "théorie" : une réponse négative à une telle question correspondrait à une tendance un peu restrictive de l'emploi de ce concept. En effet, actuellement, on parle volontiers du modèle Ptoléméen, ou Galiléen en astronomie, ou bien du modèle particulaire ou ondulatoire de la lumière, bien que ces expressions, si l'on se place d'un point de vue historique, soient en fait anachroniques.

A l'opposé, on a pu se demander si le concept de modèle n'est pas simplement ce qui caractérise une certaine conception de la démarche scientifique comme construction de l'esprit, visant à rendre compte des phénomènes, à les prévoir, à les mesurer, en un mot si la science toute entière ne pouvait être considérée comme un modèle : répondre affirmativement à cette question correspondrait à une tendance globalisante où le Grand Tout gomme toutes les différences.

Espérer trouver une définition unique, est sans doute chimérique, mais en rester au constat de l'usage "éclaté" du terme de modèle n'est pas satisfaisant. Le désir de mettre à jour les liens ou des oppositions entre divers usages du concept, du moment qu'il ne s'accompagne pas d'une volonté normative à courte vue, est sans doute un désir très avouable. Tenter de s'orienter dans les usages multiples du concept de modèle n'a pour but que de trouver quelques points d'ancrage où des discours d'horizons ou de disciplines différentes puissent mettre à jour ce qui leur est spécifique, et discerner si derrière un emploi commun de vocabulaire il y a aussi l'emploi d'un concept commun ou voisin.

2. LES RESONANCES DU CONCEPT DE MODELE

En sciences, le concept de modèle a des résonances qui évoquent aussi bien les images et schémas que la théorisation sans figuration, ou la mathématisation. Et l'on peut à juste titre se demander s'il y a lieu de rassembler sous un même concept des "choses" aussi différentes que les maquettes utilisées en astronomie pour comprendre le mouvement des planètes, ou en technologie pour comprendre le fonctionnement d'un objet technique, les analogies hydrauliques qui rendent compte de certaines propriétés du courant électrique, les sché-

l'usage du concept de modèle peut-il être rétrospectif ?

éviter de trop réduire l'emploi du concept, éviter de trop l'étendre

un désir très avouable : repérer des convergences

mas et diagrammes qui mettent en évidence des relations entre divers éléments (par exemple entre des organes en biologie), les modèles particuliers de la matière, les équations mathématiques traduisant les relations entre une population de proies et de prédateurs etc. ?

Devant une telle diversité on ne peut qu'éprouver le besoin d'explorer le concept de modèle. Et si l'on fait l'hypothèse que ce n'est ni le hasard ni l'arbitraire total qui ont fait donner le même nom à des choses si différentes, il n'est pas vain de tenter de trouver un fil d'Ariane dans cette multiplicité.

Dans un article de 1967², Raymond Carpentier n'hésitait pas à faire remonter la réflexion jusqu'au "**modèle à imiter**" (l'enfant modèle, le modèle de vertu, voire le modèle d'écriture ou le modèle d'un peintre), en passant par le "**modèle copie**" (qui est alors un exemplaire, une illustration d'une catégorie, c'est-à-dire un objet qui représente un type), jusqu'au "**modèle catégorie**" (dans le vocabulaire de la confection par exemple, un modèle représente toute une catégorie de vêtements semblables). Et à partir de ces trois sens pris dans la vie courante, mais non exempts de coloration philosophique, était menée une réflexion dans laquelle les caractères épistémologiques du modèle survenaient comme des glissements de sens successifs et des oppositions où le modèle à imiter devenait le **modèle imité**, puis le **modèle représentatif**. Et l'on voyait alors se poser les antiques questions du rapport entre les modèles et les phénomènes qu'ils représentent, - ou, dans la perspective platonicienne, le rapport entre l'Idée et la chose - et de là pouvait se développer une interrogation sur le statut des modèles.

On ne refera pas ici ce cheminement, qui prend le risque de confronter ce qui est dissemblable (la petite fille modèle au modèle mathématique) mais il était nécessaire de rappeler que ce cheminement est possible et qu'il suggère que derrière l'apparent arbitraire peut se cacher du sens.

La réflexion se centrera plutôt ici sur les modèles dans les sciences et plus précisément dans les sciences expérimentales, en renonçant à un tour d'horizon global des diverses sciences³. En effet, même si l'on ne considère que la physique et la biologie, on n'échappe pas pour autant à la multiplicité. Et on trouvera aussi, au détour de la réflexion, ce qu'on pourrait appeler des "concepts amis", ou voisins, dont on pourra parfois se demander s'ils ne seraient pas plus adaptés que mo-

derrière la trivialité
des mots peut se
cacher du sens

une réflexion cen-
trée sur la physi-
que et la biologie

(2) Raymond CARPENTIER, "Les modèles et leur ajustement au réel", *Economies et sociétés*, n1, janvier 1967.

(3) L'article "modèle" de l'*Encyclopaedia Universalis* fait d'ailleurs très bien ce travail qu'il n'est pas besoin de reprendre ici.

dèle, dans certaines situations : ainsi les concepts de "loi", ou de "théorie", ou même de "principe"...

Mais soyons dans un premier temps à l'écoute de quelques résonances du concept de modèle et des questions qui y sont associées.

2.1. Une première résonance : image ou schéma

le concret et l'abstrait

Dire que "modèle" évoque les images et schémas, c'est dire qu'un modèle peut être un objet concret (maquette, modèle réduit), un schéma simplificateur (sous forme d'image concrète, ou de mise en rapport d'éléments divers, sans figuration) ou une métaphore, une analogie (avec ou sans figuration concrète). Autrement dit, cette première résonance est elle-même multiple.

le figuratif et l'opératif

A ce stade, l'un des problèmes est de savoir si le modèle utilise des images ou schémas, ou si le modèle est l'image ou le schéma. Ce qui est en jeu ici est le statut du "figuratif" par rapport à l'opératif : le modèle doit-il être considéré comme un "objet pour penser avec", un schéma directeur, se traduisant souvent - mais non nécessairement - par une image ou un objet concret (ce qui supposerait que visualiser peut constituer une aide à la pensée) ?

l'analogie et ses usages

Ici se pose aussi le problème du statut du modèle comme analogie. Doit-il être considéré comme un simple moyen d'investigation au début d'une recherche, et comme n'ayant qu'une fonction heuristique ? Et doit-on alors dire avec Mario Bonge que les analogies correspondent au "stade juvénile d'une théorie", et que "le rôle de l'analogie et de l'inférence analogique dans les sciences factuelles se situe essentiellement au niveau de la construction de la théorie" ?⁴

Mais le modèle analogique peut être aussi un modèle a posteriori, mis en place pour la pédagogie ou la vulgarisation, et a dans ce cas une fonction de communication (par exemple en biologie, l'explication de la digestion par le modèle de l'usine correspond bien au besoin de se "représenter" les diverses "opérations"). Le modèle analogique a alors à voir avec le plaisir, qui passe ici par le besoin de ne pas s'en tenir à la sécheresse d'une structure abstraite, et en quelque sorte de l'"habiller" ou de lui donner de la "chair". Cet usage du modèle comporte certes le danger de faire croire que l'on a compris, mais ce danger n'est effectif que si l'on prend le modèle pour la réalité, ce qui, comme on le verra ci-dessous, serait un contre-sens.

(4) Mario BONGE, *Philosophie de la physique*, Paris Seuil, 1975, p 158.

le modèle et la
"réalité"

Si l'on prend le modèle dans le sens de "schéma simplificateur", d'autres types de problèmes se posent : pour rendre compte des apparences, le modèle doit en fait s'en écarter au départ. Un modèle doit être efficace et ne pas se perdre dans les détails non signifiants. Il y a donc un choix des éléments pertinents pour construire un modèle. On peut en ce sens considérer la mécanique classique comme un modèle des divers mouvements auxquels peuvent être soumis les corps. On y voit en effet des expériences "idéales" où est mis en scène le principe d'inertie. On a alors une structure dont les éléments sont dissociés des phénomènes perceptibles (on "néglige" les frottements) et solidaires entre eux (c'est la même loi qui pourra expliquer à la fois le mouvement et le repos). Dans ce contexte le problème qui est mis en oeuvre est celui du rapport à la réalité.

2.2. Deuxième résonance : théorie, lois, modèle et réalité

Comme on l'a signalé plus haut, la distinction n'est pas toujours nette entre modèle et théorie ou entre modèle et loi. Mais quel que soit le concept auquel on s'attache, une réflexion sur modèle, loi et théorie ouvre la question du rapport entre les phénomènes de la réalité et ce qui en est dit dans le discours scientifique, entre le "réel" et le "construit".

le modèle prend
ses distances

Par rapport à loi et à théorie il semblerait que modèle marque une grande volonté d'établir une distance entre discours scientifique et réalité. La théorie peut être conçue comme un ensemble (un "cortège" si l'on en croit l'étymologie du terme même de théorie) de lois qui sont ponctuellement explicatives et prévisionnelles, mais conçues souvent comme la traduction sur le plan intellectuel des phénomènes de la nature, alors que la notion de modèle s'avouerait plus volontiers et plus ouvertement comme un artefact, comme une interprétation plausible de la réalité, sans prétendre en être la traduction fidèle.

Pour illustrer ceci, on peut se référer à un texte d'Einstein et Infeld⁵, qui, bien qu'il n'évoque pas le concept de modèle en tant que tel, pourrait en illustrer des caractéristiques essentielles. On y voit en effet le savant face au monde, décrit comme un homme qui chercherait à comprendre le mécanisme d'une montre fermée : *"il voit le cadran et les aiguilles en mouvement, il attend le tic-tac, mais il n'a aucun moyen d'ouvrir le boîtier. S'il est ingénieux, il pourra se former quelque image du mécanisme, [...] mais il ne sera jamais sûr que son image soit la seule capable d'expliquer ses observations"*. Ainsi, si l'on veut appli-

(5) Albert EINSTEIN et Léopold INFELD, *L'évolution des idées en physique*, Lausanne, Payot, 1978, p. 34-35.

quer ces réflexions au concept de modèle, celui-ci se donne sans doute plus immédiatement comme contingent, partiel, comme un parmi d'autres possibles.

Et il arrive même que le modèle soit conçu comme permettant de mettre entre parenthèses ce qui est "à l'intérieur", faisant alors office de "boîte noire", avec une "entrée" et une "sortie", où des éléments quantifiables peuvent être mesurés et analysés. C'est notamment le cas de certains modèles en biologie.

Dans le champ d'une théorie générale, le modèle est parfois le point de vue ponctuel qui permet d'éclairer le réel par une analogie qui éloigne volontairement de la réalité (par exemple le modèle hydraulique pour décrire des phénomènes électriques), en soulignant une homologie de fonction entre deux réalités étrangères l'une à l'autre (un courant électrique conçu comme un courant d'eau). Des analogies de ce type sont parfois nécessaires, comme on le verra ci-après, pour servir de support à une mathématisation permettant la prédictibilité, ce qui ne veut pas dire que toute mathématisation passe par l'analogie.

2.3. Troisième résonance : la mathématisation

La mathématisation, donc, est associée à la formalisation et passe parfois par l'analogie. On peut reprendre un exemple donné par Francis Halbwachs ⁶ : "... au XIXe siècle le modèle ondulatoire de Fresnel est calqué sur la théorie des ondes matérielles, avec une conception mécanique de l'éther comme milieu de propagation : enfin, comme couronnement, le modèle de l'éther de Maxwell, éther rempli de tubes qui tournent sur eux-mêmes et qui sont relayés par des billes de roulement, est un modèle de mécanisme incroyablement grossier, mais qui fournit rigoureusement les équations électromagnétiques de Maxwell !" Un tel exemple laisse supposer que la loi mathématique est polyvalente puisqu'elle peut, grâce à des formules de même structure, rendre compte de réalités différentes.

C'est aussi ce que souligne Georges Canguilhem ⁷ lorsqu'il dit que "dans la physique mathématique, telle qu'elle s'est constituée avec les travaux de Joseph Fourier ⁸, les théories mathématiques sont prises comme objet d'étude d'où surgissent des

analogie et mathématisation

(6) Francis HALBWACHS, "La doctrine énergétiste", in *Histoire des sciences et psychogénèse, Cahiers de la fondation archives Jean Piaget*, n° 4, Genève, avril 1983).

(7) Georges CANGUILHEM, "Modèles et analogies dans la découverte en biologie", *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris Vrin, 1968, p. 312.

(8) Joseph Fourier (1768-1830), un des premiers enseignants de l'Ecole Polytechnique, connu pour des travaux sur la chaleur.

la loi mathématique est polyvalente

analogies sur des terrains expérimentaux a priori sans rapports. Ces analogies apportent la preuve de la polyvalence des théories mathématiques par rapport au réel. Pour reprendre les exemples qui avaient frappé Fourier, la propagation de la chaleur, le mouvement des ondes, la vibration des lames élastiques sont intelligibles au moyen d'équations mathématiquement identiques.

Il faut ajouter que la mathématisation donne au modèle la possibilité de mettre en relation des paramètres, qui, mis en oeuvre dans une expérimentation, susciteront de nouveaux paramètres, amenant ainsi une rectification du modèle. Il y a ainsi un balancement continu entre la formalisation et le retour au concret. Cette formalisation s'opère à travers des lois qui sont les éléments quantifiables et mathématisables du modèle.

2.4. Incidences sur les rapports entre la physique et la biologie

Les trois directions ainsi définies de la notion de modèle se retrouvent-elles à part égale dans les deux disciplines qui nous occupent ici ?

la modélisation en biologie passe-t-elle toujours par la physique ?

On associe volontiers l'idée de modèle mathématique aux divers domaines de la physique. Or la biologie semble moins facilement se prêter à la mathématisation. Il reste que la modélisation en biologie est possible, même si elle pose des problèmes spécifiques vu que le réel dont elle traite est moins facilement simplifiable que celui de la physique. L'analyse de Guy Rumelhard (dans ce numéro) en montre plusieurs exemples. Mais la modélisation en biologie a ceci de particulier qu'elle passe assez souvent, mais non toujours⁹, par des modèles empruntés à la physique, comme si la physique devait servir d'intermédiaire à la mathématisation. On en verra un exemple à la fin de cet article.

(9) En écologie les groupements végétaux ont été assimilés à des "super organismes" (c'est la vision de Clements) ou au moins à des "individus" (c'est la conception de Braun-Blanquet). On trouvera une analyse des analogies, métaphores ou modèles des écosystèmes in : Jean-Marc DROUIN, *La naissance du concept d'écosystème*, Thèse de 3e cycle, Université de Paris I, 1984.

3. MODELE ET EXPERIMENTATION

3.1. Le modèle, objet de substitution

S'interroger sur les modèles en sciences expérimentales ne peut se faire sans que se profile, derrière les mots, l'image de l'expérimentation elle-même. Et par contraste avec la "méthode expérimentale", certains parlent de "méthode des modèles". Ainsi Georges Canguilhem ¹⁰ évoque une "différence de juridiction et de validité entre la méthode des modèles et la méthode classique d'expérimentation". Cette différence est ainsi exprimée : *"L'expérimentation est analytique et procède par variation discriminatoire de conditions déterminantes, toutes choses étant supposées égales d'ailleurs. La méthode du modèle permet de comparer des totalités indécomposables. Or, en biologie, la décomposition est moins une partition qu'une libération de totalités, d'échelle plus petite que la totalité initiale..."*

méthode
expérimentale et
méthode des
modèles

On voit qu'une réflexion sur les modèles induit des réflexions plus générales sur les méthodes scientifiques. Ici par exemple, on pourrait renverser les termes et considérer que ce n'est pas la méthode expérimentale qui est première, mais qu'elle n'est en quelque sorte qu'un cas particulier, et utilisée quand il n'est pas possible de voir de façon naturelle des variables séparées ¹¹. Ce qui caractériserait alors la méthode scientifique serait l'observation de variations concomitantes compatibles avec l'intégrité de l'objet, plutôt que l'expérience elle-même : l'idée de variation serait première par rapport à celle d'expérience, et le poids des sciences expérimentales comme "modèles" - au sens ici de "modèles à suivre" - de toutes les sciences, se verrait quelque peu diminué. On peut se demander si une telle perspective ne serait pas bénéfique à l'ensemble des sciences qui pourraient développer des méthodologies de validation adaptées à leur objet et à leur objectif, en s'émancipant d'un idéal trop prégnant, y compris les sciences "expérimentales" elles-mêmes.

la variation serait
première

Quoi qu'il en soit, il apparaît que le modèle a une fonction particulière par rapport à la connaissance ; il est une "construction de l'esprit" qui permet de mettre en place un ensemble de variables non directement accessibles à l'expérience, pour diverses raisons. Ce modèle est construit en fonction d'une certaine idée qu'on se fait du réel à étudier (liée à des observations, des connaissances antérieures, la formulation de problèmes...). Les éléments à manipuler sont liés en-

le modèle peut
être manipulé

(10) Ibid (7), p. 311.

(11) On trouvera également développé cet aspect du modèle biologique dans l'article de Guy Rumelhard de ce numéro.

tre eux soit par des structures abstraites (modèle planétaire de l'atome) et/ou mathématisées (modèle quantitatif des flux de matière et d'énergie dans un écosystème), soit par des schémas figuratifs ou des objets concrets construits en fonction de leur ressemblance analogique avec l'objet à étudier... Dans tous les cas le modèle constituera un objet de substitution permettant de travailler sur autre chose que le réel, qui pourtant figurera le réel, parce qu'il en reproduira certaines relations pertinentes.

3.2. Le modèle, processus ou produit fini ?

Quand on envisage le modèle du point de vue de la méthode, ce qui est pris en compte est un **processus** de connaissance reposant sur l'**utilisation** d'un modèle. Par contre, si on le distingue non plus de méthode expérimentale, méthode clinique etc., mais de **loi, principe, théorie**, le concept de **modèle** est alors envisagé du point de vue du "produit fini". Le problème qui est soulevé n'est plus celui du processus de connaissance, mais celui du **statut des énoncés**

On peut envisager ici également ce qui distingue **modèle de modélisation**. Là aussi on a une opposition entre produit fini et processus, mais le processus est moins général que dans la méthode des modèles. La modélisation est la démarche de **construction** d'un modèle, ou d'appropriation d'un modèle déjà construit, tandis que la méthode des modèles est centrée sur l'utilisation du modèle, c'est-à-dire sur les diverses fonctions qu'il peut remplir.

Au total, pour résumer ces distinctions entre "méthode des modèles", "modèle" et "modélisation", on pourrait dire que la méthode des modèles est une démarche scientifique qui utilise des modèles au sens où la méthode expérimentale utilise des expérimentations, le modèle est un produit conceptuel jouant comme un substitut de la réalité, et la modélisation est l'ensemble des démarches visant à construire ou s'approprier ce substitut.

4. LE MODELE ET SES RETOMBEES PHILOSOPHIQUES

Si le modèle peut se définir comme substitut du réel, le problème déjà évoqué plus haut du rapport entre modèle et réalité peut faire l'objet de remarques plus précises. Ce rapport peut en effet être envisagé dans deux types de problématiques qu'il convient de distinguer, l'une étant celle de la métaphysique et l'autre celle de l'épistémologie.

En ce qui concerne la **problématique métaphysique**, on a vu que l'intérêt de la notion de modèle est qu'elle "freine" la ten-

dance à confondre ce que dit la science avec la réalité : un modèle se donne ouvertement comme ne pouvant rendre compte de toute la réalité, et l'espoir d'une connaissance totale et définitive apparaît comme un rêve théologique. Les modèles sont en quelque sorte une garantie contre les illusions scientistes et permettent d'abandonner le projet d'une compréhension globale de l'univers.

Mais dans ce cas deux positions sont possibles. L'une consiste à penser que l'on peut considérer qu'il existe un réel "en soi", duquel la connaissance scientifique se rapproche de plus en plus sans jamais l'atteindre complètement ; l'image souvent utilisée est celle de l'asymptote. C'est dans cette perspective qu'Einstein comparait le monde "réel" au mécanisme interne de cette montre qu'on ne peut ouvrir ; on a besoin de supposer que ce mécanisme, à jamais invisible, existe, pour que la recherche d'une vérité objective ait un sens. L'autre considère que la référence à un monde "en soi" est inutile et qu'il est hasardeux de supposer que ce monde puisse forcément être intelligible et rationnel dans toutes ses dimensions. L'ambition de comprendre le monde devient alors encore plus modeste (ou plus lucide ?) et fait jouer l'idée que, selon l'expression de Michel Serres, le réel est certes intelligible, mais intelligible "par plaques".¹²

En ce qui concerne la problématique épistémologique, elle n'est pas sans liens avec la prise de position métaphysique, mais s'en distingue, en ce qu'elle peut faire l'économie d'un choix sur la pertinence d'un réel "en soi". Ce sur quoi elle se centre est l'ensemble des phénomènes tels qu'ils sont accessibles à notre observation ou notre raison. Le modèle peut y être conçu pour une utilisation ponctuelle et provisoire, avec une efficacité qui est fonction d'un problème posé (on pourra par exemple continuer à utiliser le modèle planétaire de l'atome pour rendre compte de ce qui se passe lors d'une réaction chimique). L'histoire des sciences fait apparaître parfois que, sur une même réalité, plusieurs modèles peuvent se succéder par "emboitements" successifs, par exemple la physique newtonienne devenant un cas particulier d'une physique relativiste ; ou au contraire par rejet d'un modèle ancien par un autre plus pertinent, par exemple, la cosmologie de Ptolémée rendue caduque par celle de Galilée : mais là encore, on peut penser que pour certains phénomènes une cosmologie géocentrique reste pertinente, comme pour rendre compte de la succession du jour et de la nuit, ou de la prévision d'une éclipse de Lune... Et il arrive aussi que des modèles opposés puissent se cotoyer

(12) Michel SERRES, "Commencements", une présentation de "La Nouvelle Alliance", *Le Monde*, 4 jan. 1980. La formule exacte de Michel Serres est : "Le réel n'est pas rationnel, il est intelligent. Et rationnel par plaques."

en se complétant après s'être combattus, comme c'est le cas des modèles corpusculaire et ondulatoire de la lumière. Ce qui compte alors n'est plus la fidélité à un hypothétique réel "en soi", mais l'efficacité descriptive, explicative ou prédictive d'un modèle dont la pertinence est validée en se confrontant au réel tel qu'il nous apparaît.

5. LES FONCTIONS DES MODELES

Le rapport du modèle à la réalité peut être de plusieurs sortes :

analogie...

- soit il est analogique : une ressemblance partielle entre deux réalités permet de mieux faire comprendre l'une par son rapprochement avec l'autre qui est alors appelée "modèle" (par exemple le "modèle hydraulique" pour les phénomènes électriques)

... mathématisa-
tion...

- soit le rapprochement entre deux réalités est rendu possible par le recours à un troisième terme qui a une analogie de structure avec deux ou plusieurs autres : c'est le cas des modèles mathématiques qui permettent des rapprochements entre des réalités qui à première vue sont très hétérogènes l'une par rapport à l'autre, comme celles citées plus haut par Canguilhem (la propagation de la chaleur, et la vibration de lames élastiques).

... prédictivité

- soit l'analogie n'est à rechercher ni dans la ressemblance apparente ni dans la structure cachée, mais dans les "effets" ; le but du modèle n'est alors plus d'expliquer, mais de "prévoir", sans se préoccuper de savoir si le modèle est "ressemblant" : pour reprendre l'image de la montre d'Einstein, il s'agirait de reproduire des mouvements identiques sans se préoccuper de savoir si le mécanisme intérieur est le même. On peut parler dans ce cas de "simulation".

Certains modèles semblent donc avoir pour fonction principale d'**expliquer**, d'autres plutôt de **prévoir**, c'est-à-dire d'anticiper par la pensée le déroulement d'un phénomène, à travers la théorie interprétative que constitue le modèle. Toutefois, prévoir et expliquer ne sont pas forcément associés.

Expliquer est une fonction qui peut être liée au besoin didactique ou au moment d'élaboration de la pensée ; l'explication pourra passer par l'analogie, ou par l'analyse des rapports entre les éléments du système qu'est le modèle.

Prévoir est la fonction liée à l'aspect mathématisé ou formel du modèle ; la prévision mettra en rapport le modèle et le réel et cette mise en rapport pourra servir à tester le modèle.

En tant qu'objet de substitution le modèle permet une **maniableté**, qui souvent se traduit par une simple démarche intellectuelle et non une manipulation concrète d'un modèle-maquette ; le modèle est un objet transformable, plus facile à "manier" que la réalité, mais qui pour en rendre compte correctement doit être confronté sans cesse avec elle.

Comprendre, expliquer, prévoir, calculer, manipuler, formuler des analogies, communiquer, rendre pensable ce qui est difficile à cerner, voici donc les fonctions qui se dégagent des divers modèles que l'on peut rencontrer. Toutes ces fonctions ne sont pas forcément présentes à la fois en un même modèle. Et par ailleurs, ces fonctions représentent des **tendances** plutôt que des catégories fermées. Un modèle peut avoir été construit pour une fonction et se révéler utile pour une autre...

6. UNE DEFINITION DE LA DERNIERE CHANCE ?

C'est une des raisons pour lesquelles on ne saurait établir une définition qui satisfasse à tous les cas particuliers de modèles. Pour autant l'hypothèse d'une cohérence cachée ou discrète demeure assez forte pour qu'on ne s'en tienne pas au simple constat de la diversité.

On pourrait, sans illusion, mais dans un désir de synthèse au moins provisoire, tenter une définition de la dernière chance. En effet, si on reprend les caractéristiques du concept de modèle telles qu'elles sont apparues jusqu'à présent, même si elles dévoilent plusieurs types de modèles possibles, on peut retenir quelques traits minima jugés nécessaires pour la pertinence du concept : le modèle est "quelque chose" (objet concret, représentation imagée, système d'équations...) qui se **substitue** au réel trop complexe, ou inaccessible à l'expérience, et qui permet de comprendre ce réel par un intermédiaire plus connu ou plus accessible à la connaissance ; mais ce substitut a parfois pour fonction, non pas d'expliquer un processus, mais d'en calculer les variations, de faire des "prévisions" alors même que le réel étudié garde son statut de "boîte noire".

Cette définition minima doit d'ailleurs être conçue non pas comme une norme absolue, mais plutôt comme un point de repère utile. Mais parce qu'une définition, fût-elle de la dernière chance, est sans doute un peu pauvre, on peut terminer cette réflexion par l'analyse d'un exemple précis de modèle, où l'on tentera de retrouver certaines caractéristiques dégagées au cours de cette réflexion.

7. UN EXEMPLE DE MODELE

Les problèmes posés par l'analogie dans la construction des modèles, et par la mathématisation, pourront être illustrés par l'exemple d'un modèle conçu dans les années trente qui est assez exemplaire à cet égard, et qui de plus met en scène la question du rapport entre modèles physiques et modèles biologiques ; il s'agit de l'analogie du "vase de Tantale" pour ren-

y a-t-il une définition de la dernière chance ?

une analogie physique pour un phénomène biologique

dre compte des variations appelées "oscillations de relaxation" dans les phénomènes de "dynamique des populations".

7.1. Des oscillations d'un genre particulier

Dans les années 1930, l'écologiste soviétique Gause a mené de nombreux travaux d'écologie expérimentale. Il s'agissait pour lui de tester les modèles mathématiques des relations proies/prédateurs établies dans les années précédentes par Lotka et Volterra. Ces modèles mathématiques prédisent des oscillations continues de la population de proies et de celle de prédateurs : les prédateurs faisant diminuer le nombre de proies voient à leur tour leur nombre diminuer puis le faible nombre de prédateurs amène une nouvelle croissance de l'effectif des proies, etc.

Les expériences d'"écologie en boîte de Petri" faites par Gause avec des populations de Protozoaires l'ont amené aux conclusions suivantes, résumées dans un article publié en 1953¹³ :

1) Les oscillations continues, prédites par les équations de Lotka et de Volterra, ne constituent en fait qu'un cas limite lorsque les conditions sont exceptionnellement favorables pour les proies, ou un artefact lorsqu'on réinjecte périodiquement dans le système de nouvelles proies.¹⁴

2) Dans les conditions les plus courantes de l'expérience et en particulier si les prédateurs sont voraces et efficaces, on aboutit à la disparition des proies, puis à celle des prédateurs eux-mêmes.

3) Cependant si on assure un apport d'énergie dans le système, non plus sous forme d'un apport périodique, mais sous

(13) G.F. GAUSE, *Vérifications expérimentales de la théorie mathématique de la lutte pour la vie*, Paris, Hermann, 1935, p. 61, (Act. Scient. et industr. 277).

(14) Gause rappelle (p. 41) que d'après les travaux de Lotka (1923) et Volterra (1926), la destruction d'une espèce (la victime) par l'autre (l'agresseur, le parasite) peut amener des fluctuations périodiques de la population des deux espèces. Cette théorie, dit-il, "est fondée sur certaines hypothèses des plus simples concernant l'action réciproque des agresseurs (N_2) et des victimes (N_1) qui ont été formulées comme une équation différentielle" :

$$d N_1 / dt = b_1 N_1 - k_1 N_1 N_2$$

$$d N_2 / dt = k_2 N_1 N_2 - d_2 N_2$$

$(b_1 N_1$: accroissement géométrique des victimes

$k_1 N_1 N_2$: destruction des victimes par les agresseurs

$k_2 N_1 N_2$: accroissement des agresseurs

$d_2 N_2$: mortalité des agresseurs)

Gause précise que les prémisses de cette équation ne se trouvent être justes que pour les systèmes biologiques très primitifs.

des fluctuations
appelées oscillations
de relaxation

forme d'une immigration, constante et régulière, de nouveaux individus (proies et prédateurs), le niveau des populations subit alors des variations qui ne sont plus conformes au système d'équation de Lotka et de Volterra mais qui sont plus brutales et plus complexes : "il se crée, dit Gause, un type tout-à-fait nouveau de fluctuations dans les associations biologiques, ce que les physiciens nomment des oscillations de relaxation".

7.2. Le vase de Tantale

la description du
vase de Tantale

Pour décrire ces oscillations d'un nouveau type, Gause est amené à utiliser un modèle physique, celui du vase de Tantale qu'il emprunte à Le Corbeiller¹⁵ et il justifie son emprunt de la façon suivante : "L'exemple le plus simple et le plus démonstratif de l'oscillation de la relaxation est présenté par l'oscillation du niveau de l'eau dans le vase de Tantale (le Corbeiller, 1931). Il représente un réservoir dans lequel un courant d'eau tombe sans interruption, analogue à nos immigrations. Lorsque l'eau atteint le niveau H, le siphon commence à fonctionner (l'agresseur s'acclimate) et le réservoir se vide jusqu'au niveau h. Ensuite le processus se répète. Dans ce système d'une auto-oscillation nous avons par conséquent une source d'énergie constante, un seuil critique et une certaine partie spécifique qui fonctionne"¹⁶. A la suite de quoi Gause reproduit (p. 59) le schéma de Le Corbeiller (p. 6 de Le Corbeiller, 1931).

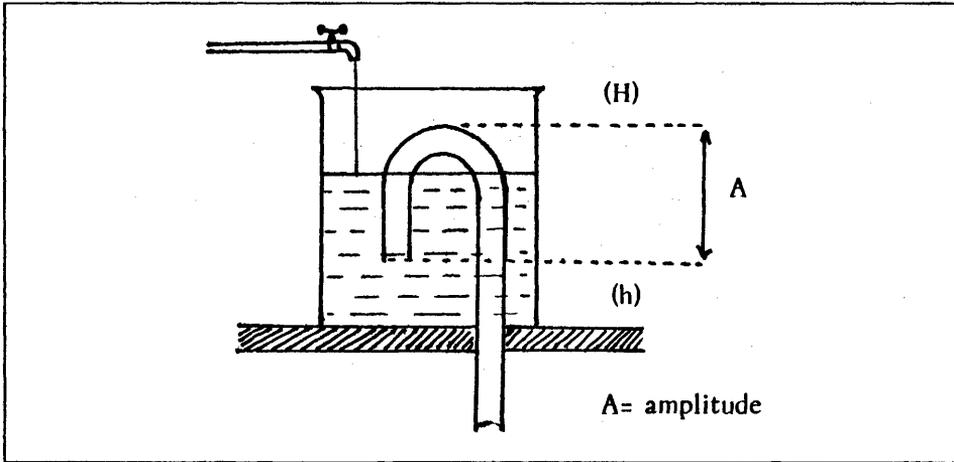
7.3. Les fonctions du modèle

une analogie sans
ressemblance
mais qui se veut
explicative

Bien qu'elle corresponde typiquement au cas où aucune ressemblance n'existe entre l'objet et son modèle, cette analogie veut avoir un rôle explicatif : Gause la qualifie en effet d'"*exemple le plus simple et le plus démonstratif de l'oscillation de relaxation...*". Mais il faut préciser que Gause souligne le caractère instrumental de ce modèle, qui n'est en aucune manière une description vraiment fidèle des fluctuations réelles : "*Revenant à nos associations biologiques, nous pouvons noter que la fluctuation ininterrompue classique, et la fluctuation de relaxation discontinue, ne représentent que deux types extrêmes nettement exprimés, et que dans le milieu complexe des systèmes biologiques véritables, des éléments des deux types peuvent évidemment participer*".

(15) Ph. LE CORBEILLER, *Les systèmes autoentretenus et les oscillations de relaxation*, Paris, Hermann, 1931.

(16) Le vase de Tantale est ainsi décrit par Le Corbeiller ; c'est un "réservoir dans lequel un robinet laisse couler continuellement un filet d'eau : un gros tuyau recourbé débouche à sa partie inférieure. Lorsque l'eau atteint le niveau (H), le siphon s'amorce, le réservoir se vide rapidement jusqu'au niveau (h), et le phénomène recommence." (p.6)



Le modèle est alors doublement distinct du réel qu'il décrit : en tant qu'il est purement analogique et que la réalité d'un vase qui se vide ne peut être confondue avec celle de populations d'animaux ¹⁷ ; et en tant qu'il ne constitue qu'un cas extrême et non la traduction exacte d'un processus observable. Mais ce modèle permet une mathématisation du phénomène, et a une fonction prédictive : en effet, l'équation traduisant l'oscillation du vase de Tantale est plus facilement formulable que celle qui voudrait décrire les fluctuations des populations elles-mêmes, dans la mesure où, pour le vase de Tantale, on a affaire à un phénomène faisant intervenir des paramètres facilement identifiables (diamètre du tuyau de remplissage, dont va dépendre le débit d'entrée, diamètre du siphon, volume du récipient etc.) et des variables facilement calculables (débit d'entrée, temps de remplissage, temps de vidage...).

7.4. Ses traductions graphiques

On peut alors imaginer une courbe théorique du modèle de Tantale. Le Corbeiller lui-même la décrit et la calcule de la façon suivante :

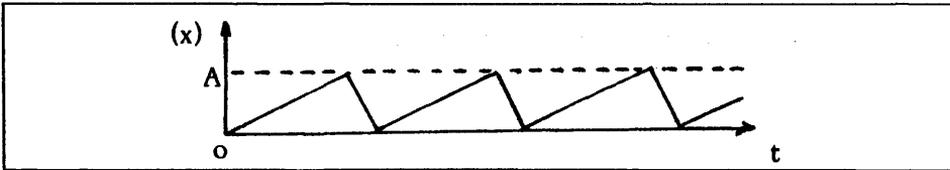
"On voit que les oscillations du niveau de l'eau ont les proprié-

(17) Si l'on prend le texte de Le Corbeiller lui-même on y trouve d'autres analogies, au sein du monde de la physique, mais tout aussi étonnantes : après avoir décrit le phénomène du vase de Tantale, il en fait le prototype des systèmes autoentretenus, et présente le régime oscillatoire d'une lampe à néon comme très voisin du précédent, de même le régime oscillatoire d'un disjoncteur à maximum, dont il donne des traductions mathématiques et graphiques.

la courbe théorique de Le Corbellier

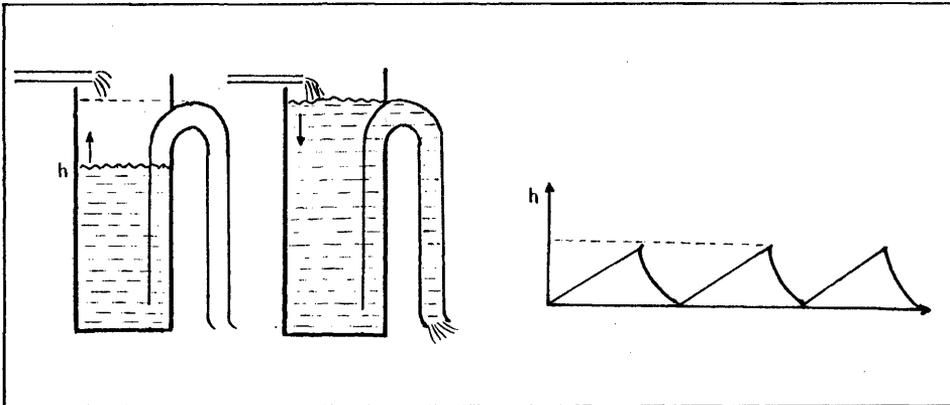
tés suivantes :

- a) leur amplitude $A=H-h$ est bien fixée ;
- b) leur période est entièrement arbitraire, on peut la faire varier à volonté en agissant sur le débit du robinet ;
- c) si V est le volume du réservoir entre les niveaux h et H , et D le débit du robinet, on a approximativement $T=V/D$, quotient de deux grandeurs physiques (pas de racine carrée);
- d) enfin les oscillations conservent indéfiniment la même amplitude. La forme des oscillations en fonction du temps est donnée par la figure (ci-dessous). (p 6)"



une autre courbe incurvée

On trouve dans un ouvrage publié au Québec,¹⁸ d'autres traductions graphiques des phénomènes d'oscillations de relaxation. Le modèle de référence est le "lave-pipette" dont le mécanisme est ainsi décrit : "lorsque le niveau atteint le trop-plein, l'eau envahit le siphon et est drainée hors du réservoir. Lorsque le siphon est vide, la colonne d'eau du tuyau est rompue et l'action du siphon s'interrompt. Le réservoir se remplit alors de nouveau" (p 114). On a le schéma et la courbe ci-dessous :



(18) Michel CABANAC et Mauricio RUSSEK, Régularisation et contrôle en biologie, Les Presses de l'Université Laval, Québec, 1982, diffusion Vuibert, Paris.

Et les auteurs utilisent ce modèle de systèmes caractérisés par une entrée continue et une sortie intermittente pour éclairer en physiologie "*des exemples de périodicité analogues : comportements intermittents contrôlant les entrées, comme la prise de nourriture, d'eau, et le gain de chaleur par le comportement, ou contrôle des sorties comme la défécation, la miction, la thermolyse comportementale*" (p.114).

La différence des courbes de Le Corbeiller et de l'ouvrage canadien tient peut-être au fait que la section du siphon est représentée sur le schéma de Le Corbeiller comme très grosse par rapport à celle d'arrivée d'eau. Mais quoi qu'il en soit, cette courbe qui figure un phénomène physique, celui du vase de Tantale, n'est déjà, pour ce phénomène, que la traduction graphique d'une équation qui est une simplification du phénomène. Si elle devient un modèle pour le calcul de variation d'une population, on voit que cela procède d'une simplification extrême où l'artefact consiste à imaginer un "remplissage" régulier, semblable au débit constant du vase de Tantale, et où les analogies ont un caractère un peu inattendu : ainsi le débit d'eau est l'"analogue à nos immigrations" et le vidage du vase correspond au fait que "*l'agresseur s'acclimate*", c'est-à-dire devient plus efficace, faisant baisser brusquement le nombre de proies.

En résumé, on a bien dans cet exemple diverses fonctions du modèle :

- une analogie, qui n'est fondée sur aucune ressemblance, mais sur une homologie de structure. La fonction est explicative mais non représentative ;
- une mathématisation : la fonction est prédictive ;
- un objet de substitution, avec retour nécessaire au réel ;
- une simplification du phénomène.

Ce modèle est exemplaire puisqu'il met en scène un dialogue entre biologie et physique, entre réel et mathématique, objet technique (le vase lui-même) et théorie. On ne peut craindre de confondre le réel avec le modèle, mais on peut continuer à rêver sur le mystère des homologies de structure, ou à sourire de l'humour des savants.

8. EN CONCLUSION

La réflexion ici menée n'a pas abouti à concevoir une définition unique et définitive du concept de modèle. Ce n'était pas son but.

Mais que le concept de modèle pose problème était révélateur de questions, qui demeurent ouvertes, sur la démarche même des sciences expérimentales. Ainsi la question de l'expérimentation, celle de la formalisation, celle du statut du savoir scientifique et du rapport entre les diverses disciplines, tout cela s'est vu impliqué par la question du modèle. Il est apparu par

la simplification
d'une simplifica-
tion

les diverses fonc-
tions du modèle in-
carnées dans cet
exemple

exemple que le type de rapport qui existe entre le modèle et le réel dont il rend compte fait qu'une même réalité peut avoir plusieurs modèles et un même modèle peut répondre à plusieurs réalités. Le modèle peut servir alors à établir des relations entre divers types de réalités.

On a vu aussi que certains modèles sont en fait des objets, ayant une existence autonome, mais pouvant être utilisés comme modèle (le vase de Tantale). On peut alors considérer qu'un modèle est avant tout quelque chose qui fonctionne comme modèle (ce qui voudrait dire qu'un modèle est peut-être moins un "objet" qu'une fonction particulière attribuée à un objet).

La question du modèle constitue une part importante, sinon centrale, de la réflexion sur la démarche scientifique. On a vu que certains modèles pouvaient avoir des fonctions didactique et explicative efficaces, avec des limites à maîtriser. Et par ailleurs, lorsque des enfants se livrent à la démarche de modélisation il est difficile mais nécessaire d'établir une distinction entre ce qu'on devra continuer à appeler "représentations spontanées", ou "modèles tâtonnants". Peut-être trouvera-t-on aussi des modèles cohérents et efficaces "localement", mais encore assez différents des véritables "modèles scientifiques". Les conditions de possibilité pour maîtriser ces différences font alors l'objet d'une réflexion qui tend à montrer que le modèle est une des entrées possibles pour la didactique des sciences. Les diverses contributions présentes dans ce numéro en témoignent.

Anne-Marie DROUIN
Lycée de Corbeil
Equipe de didactique des sciences expérimentales, Institut National de Recherche Pédagogique

ANNEXE

Si l'on veut mieux cerner le statut de l'analogie rapportée ci-dessus on pourra se référer au texte même de Gause pour voir de façon plus détaillée en quels termes il pose le problème des variations de population ; au chapitre III, il étudie le cas de "Deux espèces dont l'une se nourrit de l'autre". A cette occasion il fait la remarque suivante : *"Actuellement il est admis par tout le monde que les fluctuations périodiques numériques de la population sont dues à ce qu'une espèce en dévore une autre, et sont un facteur puissant qui change la composition de la population et que par là ces fluctuations ont une grande importance évolutive. D'autre part ce n'est que grâce aux travaux théoriques de Lotka et Volterra que surgit devant les biologistes le problème d'une investigation de la nature des fluctuations périodiques elles-mêmes comme un problème tout-à-fait indépendant. Ceci paraît d'autant plus actuel qu'il existe depuis longtemps chez les physiciens des laboratoires spéciaux pour l'étude des fluctuations où l'on poursuit des recherches sur la nature des phénomènes périodiques dans différents domaines de la physique"*.

Dans cette remarque, il est intéressant de noter que Gause évoque d'autres analogies physiques que celle du vase de Tantale : les phénomènes d'oscillation simple ont déjà leur analogue dans la physique. Par ailleurs on a le sentiment que c'est la mathématisation du phénomène qui semble à l'origine de l'analogie physique, et que les limites du modèle mathématique vont susciter le recours à un nouveau modèle.

Le problème posé par Gause est le suivant : le parasitisme, ou l'agression d'une population par une autre, sont-ils régis par le hasard, ou par un choix sélectif ? Ce problème se complique par le fait que, dit-il (p.44) *"l'adaptation biologique qui s'est élaborée au cours de l'évolution - la faculté de discernement des parasites - altère fortement sous le rapport quantitatif les calculs qu'on peut faire en se fondant sur une simple acceptation de la théorie mathématique de la lutte pour la vie, quant aux collisions accidentelles des comportements d'une population mixte"*.

En effet, le système biologique le plus simple est celui qui est régi par le hasard, lorsqu'il n'y a pas d'adaptation spécifique de la part des agresseurs ; *"Un tel système s'approche le plus de ce qui a lieu lors d'une collision de simples molécules"*, précise-t-il p.45 (on notera au passage l'analogie physique de la collision de molécules...) et il présente ainsi le nouveau type de fluctuations auquel on doit avoir recours pour rendre compte de phénomènes où une population se voit renouvelée régulièrement (p.58-59) : *"Les fluctuations classiques ininterrompues de la population présumée par Lotka et Volterra peuvent être observées dans des associations biologiques très primitives où l'intensité de l'attaque des agresseurs contre les victimes n'est pas grande et où elle est soumise aux lois du hasard. Au cours de l'évolution du système biologique, il se forme des adaptations variées qui augmentent l'intensité d'attaque des victimes par les agresseurs. En fin de compte les fluctuations classiques se conservent seulement dans la zone près de l'origine des*

coordonnées où l'intensité d'attaque est affaiblie. Ultérieurement elles disparaissent et l'agresseur peut, ou bien ne pas s'acclimater, ou s'il s'acclimate, détruire les victimes jusqu'à la fin, et ensuite il s'éteint lui-même.

De cette façon il se crée un type tout-à-fait nouveau de fluctuations dans les associations biologiques, ce que les physiciens nomment des oscillations de relaxation. Ce qu'il y a de caractéristique pour ces oscillations c'est que dans des microcosmes clos (en l'absence d'immigration du dehors des agresseurs et des victimes) elles ne peuvent se produire, et le phénomène cesse (mort totale des victimes non-immunes au cours de la relaxation élémentaire, ou bien extinction des agresseurs) et qu'il faut pour que les oscillations existent, un afflux d'immigration". (Gause signale d'ailleurs qu'il a fait en 1934 des expériences de ce type).

Pour préciser sa pensée, Gause fait appel à un texte de Van der Pol où est décrite l'oscillation de relaxation (Van der Pol B., Proc. inst. Radio Engin. 22, p. 105, 1934).

A propos de ce texte de Van der Pol, Gause dit qu'il souligne que "ce qui est caractéristique pour les oscillations de relaxation c'est le fait que pendant la partie la plus grande de la période, le phénomène a une conduite typique apériodique ou asymptotique (population pure de victimes) et après cela, le système devient soudain instable (les agresseurs ou l'infection bactérienne peuvent s'acclimater) et le désordre passe d'une manière discontinue à une autre valeur et ensuite le même phénomène de décharge se répète de nouveau etc. de sorte qu'une oscillation de relaxation a le caractère d'un phénomène de décharge qui toujours se répète. La période de temps est donnée par un temps de relaxation, d'où le nom du phénomène".

STATUT ET ROLE DES MODELES DANS LE TRAVAIL SCIENTIFIQUE ET DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA BIOLOGIE

Guy Rumelhard

L'usage du mot modèle s'est considérablement développé dans le vocabulaire scientifique et dans l'enseignement. S'agit-il d'une nouvelle méthode scientifique en Biologie ou d'une nouvelle philosophie de la science ? Après avoir analysé plusieurs exemples historiques ou actuels, l'auteur dégager certaines propriétés communes des modèles analogiques et des modèles formalisés et trace les principaux caractères d'une évolution de la modélisation. Il compare ce procédé scientifique à l'expérimentation analytique de type classique, et décrit ensuite trois types de modèles en Biologie. L'auteur dégager enfin les principaux obstacles, les fausses frontières et les limites réelles à l'emploi des modèles pour réduire la complexité. Ces limites apparaissent en étant attentif à la spécificité de l'objet biologique et à la possibilité de la maladie.

évolution des méthodes scientifiques ou effet de mode ?

Les mots modèles, modéliser, modélisation, méthode des modèles, simulation et système sont devenus d'un usage courant dans le vocabulaire des scientifiques et des enseignants en Biologie (et en Géologie). Le mot apparaît par exemple dans le titre d'un livre universitaire sur les membranes cellulaires ¹ ; il apparaît également dans les sujets proposés aux concours de recrutement de l'enseignement : CAPES, agrégation ², traduisant ainsi une préoccupation de méthode scientifique en plus de la maîtrise d'un savoir, et de son exposé pédagogique. Si l'on ajoute le fait que ce mot était d'un usage très rare il y a moins de vingt ans, il apparaît donc, en plus de la question du statut et du rôle des modèles, la nécessité de rendre compte de ce changement récent. S'agit-il d'une évolution de la méthode scientifique, ou d'un effet de mode ? Et dans ce dernier cas, à quoi répond la mode des modèles ?

Toutefois pour suivre cette évolution il faut prendre garde de ne pas se limiter aux apparitions explicites du mot et se demander si l'on ne peut repérer l'origine ou la permanence d'un

(1) Mazliak P. **Les modèles moléculaires de biomembranes**. Paris. Hermann. 1987.

(2) Consulter la collection des Rapports des Concours du Ministère de l'Éducation Nationale.

procédé scientifique sous un vocabulaire différent sans anachronisme.

1. QUELQUES EXEMPLES

En se limitant au domaine de la physiologie animale on peut repérer des procédés utilisés très anciennement et dont on peut reprendre la description rétrospectivement en utilisant le modèle.

1.1. Les expériences d'ablation d'organes

Le fondateur de l'anatomie moderne, Vésale, qui a utilisé les techniques de la vivisection, décrit des expériences d'ablation de rate ou de reins sur les chiens. Mais avant de devenir un geste expérimental la vivisection a relevé de gestes de défense, de rites magiques ou de conduites empiriques, c'est-à-dire de gestes réalisés dans une intention autre que scientifique ou sans préméditation. La conception cartésienne de l'**animal-machine** n'a donc bien évidemment pas créé cette technique de la vivisection qui peut également être considérée comme une suite naturelle des techniques chirurgicales d'excision, mais elle l'a largement **encouragée**. En effet, si le corps est une machine, on doit pouvoir obtenir la connaissance des fonctions de telle ou telle partie, conçue comme pièce, rouage ou ressort, en l'empêchant de fonctionner ou en la détruisant. Le **modèle de la machine guide implicitement** la technique apparemment "spontanée" ou "naturelle" de l'ablation d'organe. On peut dénier toute fonction à cette analogie dans le processus de l'invention scientifique et la réduire à une comparaison didactique dont, il est vrai, l'enseignement use et abuse. Pour le positivisme le progrès résulte essentiellement des "faits" bien observés et interprétés. Pour d'autres auteurs la conception cartésienne était un refus radical de l'**animisme** qui avait, à la Renaissance, "autorisé toutes les analogies : la terre par exemple est un vivant, elle a des entrailles, elle sent, elle engendre; le monde a une âme comme les plantes, comme les animaux, comme l'homme. L'analogie qui fondait la mécanique animale avait **pour effets de réduire le merveilleux, de nier la spontanéité du vivant, de garantir l'ambition d'une domination rationnelle du cours de la vie humaine**".³ Mais cette fonction critique, cette fonction de limitation et de réduction

l'ablation d'organe implique le modèle de la machine

(3) Canguilhem G. "Du singulier et de la singularité en épistémologie biologique" in *Etudes d'Histoire et de Philosophie des Sciences*. Paris Vrin. 1968 - 2ème ed augmentée 1983.

des analogies n'a pas conduit il est vrai à une fonction d'initiative dans le domaine de la recherche.

1.2. La fonction du coeur : utilisation d'une analogie technologique

La recherche méthodique d'analogies entre les machines construites par l'homme et le fonctionnement de l'organisme est un procédé explicitement utilisé par certains auteurs, mais dont l'efficacité inventive est restée faible.

modèle hydrodynamique

La principale découverte due W. Harvey, fut de comparer le coeur à une pompe. Cet auteur a bien apporté un exemple d'explication hydrodynamique globale d'une fonction de la vie qu'il est légitime de nommer rétroactivement modèle mécanique. L'analogie non pas des parties anatomiques mais des fonctions s'est révélée effectivement source de compréhension, d'invention, en un mot de progrès et de développement du savoir. Il est rationnel de construire en schéma ou en maquette ce genre de modèle pour fournir une explication, ou du moins rendre compte globalement d'une fonction d'un appareil tel que le coeur et les vaisseaux.

le cerveau n'est pas analogue à l'ordinateur

Ici la simple dissection suffit à préciser quelque peu l'analogie (valvules, etc...). Mais de nombreux organes observés dans les mêmes conditions n'offrent pas de ressemblance avec des objets techniques fabriqués par l'homme. Le cerveau est dans ce cas. Même observé au microscope après coloration et enregistrement de l'activité électrique, la comparaison du cerveau à un ordinateur reste une simple métaphore, elle n'a pas de valeur heuristique. Plus précisément il faudrait examiner si la création et la simulation sur ordinateurs de réseaux nommés "neuronaux" peut constituer une avancée dans la compréhension du cerveau dans la mesure où le nombre de neurones (10^{12}) et le nombre de synapses (10^{14}) est très largement supérieur au nombre de composants des ordinateurs actuels. Dans la mesure également où le cerveau ne fonctionne pas selon un programme séquentiel linéaire. Dans la mesure enfin où l'ordinateur ne peut actuellement rendre compte des propriétés de polyvalence et de vicariance fonctionnelle du cerveau. Nous reviendrons sur cette discussion, mais ce qui apparaît immédiatement c'est la fausse réversibilité de l'analogie. Renversant immédiatement un procédé de recherche scientifique consistant à chercher des modèles et des simulateurs très sophistiqués dans les ordinateurs, les promoteurs de l'informatique industrielle ont créé les expressions abusives "d'intelligence artificielle", "cerveau artificiel", "machine consciente",... dont la fonction est idéologique. Pourquoi s'opposer à l'envahissement des ordinateurs puisque notre cerveau est lui-même un ordinateur ? Et cette propagande idéologique a deux fins : prévenir ou désarmer l'opposition à l'extension d'un moyen de régulation automatisée des rapports

mais on peut renverser l'analogie à des fins idéologiques

sociaux ; dissimuler la présence de décideurs derrière l'anonymat de la machine.

1.3. La révolution chimique de Lavoisier

la physique fournit
des instruments

A côté des machines construites par l'homme, une autre source de modèles a été constituée par les "lois" de la physique et de la chimie. En fait, très peu de "lois" de la physique ont pu être directement prises comme modèles analogiques de certaines fonctions de l'organisme animal. On a bien cherché dans l'attraction newtonienne un modèle d'explication pour les phénomènes de sécrétion ou de contraction musculaire, mais sans succès ! La physique a surtout fourni à la physiologie des **instruments** d'observation ou d'expérimentation : microscope, baromètre, galvanomètre, stimulateurs, balance, ... plus que des modèles.

la chimie fournit
des analogies et
un modèle de méthode

En chimie c'est Lavoisier qui autorise un nouveau type de comparaison entre certaines fonctions de l'être vivant et certaines lois chimiques. De plus il utilise **une méthode de comparaison globale** que l'on peut nommer rétrospectivement méthode de la **boîte noire**. Il est possible d'avoir accès à une première explication d'une **fonction globale**, et ceci en l'absence de connaissances sur les fonctions élémentaires (le détail des processus métaboliques), et avec très peu de connaissances anatomiques. L'erreur sur le rôle des poumons n'est pas un obstacle à l'explication. La méthode de la **boîte noire** permet de considérer l'organisme comme un système dont il suffit d'examiner "la surface", c'est-à-dire les entrées et les sorties pour accéder à une compréhension globale par delà les structures et les processus élémentaires. La mesure des quantités de gaz et de chaleur fournies par un cobaye placé dans un calorimètre permettent l'**analogie** avec la combustion de carbone (ou d'un corps organique) dans une flamme. L'analogie est explicative, mais ne dit rien sur le lieu exact de cette combustion ni sur ses modalités exactes. L'adjectif "lente" ajouté au mot combustion marque cette limitation en disqualifiant la comparaison au moment où on risque de la pousser trop loin.

1.4. La fonction des mathématiques chez Mendel

On peut s'étonner du fait que Mendel ait pu accéder à une première connaissance des modalités de transmission de l'hérédité en l'absence totale de connaissances sur la forme des gènes, sur leur localisation, leur nature chimique, et la façon dont ils commandent la réalisation des caractères. Ici encore, selon F. Jacob ⁴, la méthode utilisée est celle de la "**boîte**

(4) Jacob F. *La logique du vivant*. Paris Gallimard. 1970.

noire". L'organisme y est considéré comme une boîte fermée contenant quantités de rouages fort complexes. Mais il n'est pas indispensable de les connaître, du moins ce n'est pas une condition préalable. On peut se contenter d'examiner la surface pour en déduire le contenu. Le caractère visible (le phénotype) est l'extrémité de chaînes de réactions qui le relie au gène.

Selon cette méthode d'analyse, le gène se présente comme une entité sans corps, sans épaisseur, sans substance, mais possédant deux propriétés empruntées aux mathématiques : la **discontinuité** et l'**indépendance** sur le plan combinatoire. Ces deux propriétés permettent de faire jouer au calcul des probabilités un rôle opératoire pour expliquer les modalités de transmission. L'**analogie** se fait terme à terme : les gènes (comme les boules de l'urne) sont tirés au sort lors de la formation des gamètes, chaque tirage étant **indépendant** des autres. La "loi" des grands nombres permet alors de prévoir certaines combinaisons explicatives des transmissions de gènes. Mais les probabilités apportent également un **modèle de déterminisme** : le déterminisme statistique.

Ni Lavoisier ni Mendel n'utilisent le terme de boîte noire qui semble ainsi une simple métaphore. Mais antérieurement certains physiologistes avaient posé le même problème de méthode avec une autre image qui a valeur d'**analogie**. En se mettant dans l'attitude de l'enquêteur policier ou de l'espion, comment peut-on espérer savoir ce qui se passe dans une maison sans entrer dedans. Il y a au moins deux méthodes : surveiller et contrôler les entrées et les sorties (fouiller dans les poubelles, disait Fontenelle en 1722, citant le chirurgien Méry), ou bien y introduire des espions, des indicateurs. Cette analogie a acquis la solidité d'un modèle depuis qu'elle a été théorisée sous le terme de **modèle à compartiment** et de **méthode des indicateurs**⁵.

Il y a donc chez Mendel un **modèle de méthode d'analyse globale**, un **modèle de causalité**, un **modèle explicatif** des modalités de transmission des gènes qui ne donne aucun renseignement sur leur localisation, leur nature chimique, leur mode de fonctionnement. Les mathématiques jouent ici deux rôles. Celui d'outil d'analyse, d'**instrument** pour opérer au sens chirurgical du terme des distinctions, pour séparer ce qui est confondu. C'est ici la "loi de **séparation des allèles**" (spalting dans le texte original) traduit de manière regrettable par

(5) Article Physiologie in Encycl. Universalis. 1971
 Sur les modèles à compartiments, cf. aussi :
 Atkins G.L. **Modèles à compartiments multiples pour les systèmes biologiques**. Gauthier Villars (trad 1969). 1973
 Jacques J.A. **Compartmental analysis in Biology and Medicine**. Amsterdam. Elsevier. 1972.

la méthode de la
boîte noire

les probabilités
fournissent aussi
un modèle de dé-
terminisme

les mathématt-
ques sont des ins-
truments et/ou
des modèles for-
malisés

le terme de "ségrégation". Celui de modèle au sens de construction formelle entraînant un **détour** par rapport au réel. Au terme de cette élaboration formelle le calcul des **probabilités** permet de simuler la marche des gènes et de prévoir des conséquences observables. Celles-ci doivent rendre compte des résultats expérimentaux obtenus avec les techniques d'hybridation.

1.5. Claude Bernard et la théorie cellulaire

Claude Bernard est particulièrement attentif au fait que l'organisme constitue une totalité organisée. Toute tentative d'intervention par vivisection risque donc de créer un artéfact. Pour concevoir théoriquement une étude expérimentale analytique de l'organisme grâce à des sections et des ablations il faut plusieurs concepts, l'un qu'il a inventé (le milieu intérieur), l'autre qu'il a importé (la composition cellulaire des êtres vivants), le troisième qu'il a pressenti (la régulation). Pour désigner l'organisme d'un pluricellulaire Claude Bernard et d'autres auteurs utilisent les termes de **société** ou de **république** de cellules. Il ne s'agit pas d'une simple métaphore, mais d'un modèle tout à fait différent du modèle technologique qui permet de comprendre les fonctions organiques par un changement d'échelle, et de concevoir la possibilité d'une étude analytique. **Ce modèle est économique et politique.** La division du travail est la loi de l'organisme comme de la société. Les cellules sont les unités fonctionnelles virtuellement autonomes. L'organisme complexe est constitué de la réunion de ces unités élémentaires, il assure les conditions de leur vie et la coordination de leurs fonctions. Les systèmes circulatoires, respiratoires, nerveux, etc... sont au service des cellules. Il s'agit pour ces auteurs d'une société de type libéral ! Dans un modèle technologique, l'organisme est constitué par l'ajustement strict de pièces élémentaires qu'il est donc discutable de séparer ou de retirer. Avec ce modèle, l'organisme est un ensemble d'individus dont l'action est coordonnée. Il est possible de séparer les organes car on peut concevoir une certaine autonomie aux cellules. Il est concevable de les étudier isolément in vitro. Il est même concevable de les cultiver isolément des cellules. Restera ensuite à étudier les mécanismes permettant de penser l'intégration du fonctionnement.

Bien évidemment ce modèle économique n'est qu'un moment de la pensée scientifique. On a d'ailleurs quelque difficulté à concevoir actuellement qu'il ait eu une utilité autre que métaphorique. En fait s'il n'a pas guidé concrètement des réalisations expérimentales, il les a **rendues possibles** en contribuant à détronner le modèle technologique. L'organisme n'est pas une société même libérale ! Mais le **modèle contribue à nous rendre étrangères** les premières analogies naïves entre l'organisme et la technologie humaine.

le modèle économique et politique de la société

détrône le modèle technologique et ses naïvetés

1.6. Le modèle du langage

Lorsque Sir A. Garrod décrit pour la première fois une maladie du métabolisme due au blocage des réactions chimiques à un stade intermédiaire des processus, il invente en 1909 le terme d'**erreur innée de métabolisme**. On pourrait penser que le terme d'**erreur** utilisé pour des erreurs biochimiques héréditaires n'est qu'une simple **métaphore**, inutile ou même dangereuse. Commettre une erreur implique pour un homme de porter un jugement sur le vrai et le faux. Le scientifique ne fait-il pas la confusion anthropomorphique consistant à prêter aux gènes ou aux enzymes des pensées humaines ? Les enzymes savent ce qu'elles doivent normalement faire, et à certains moments se trompent volontairement ou non. A l'erreur est lié le sentiment d'une faute. Quand on parle d'erreur de la nature, on pense plus volontiers aux monstres. Mais ici il s'agit de maladies ou d'anomalies, et de maladies bien particulières.

le terme d'erreur
semble
métaphorique

Désormais les concepts fondamentaux rendant compte de la chimie des acides aminés, des macromolécules et de leur synthèse sont empruntés à la théorie de l'information. Dans la mesure où les structures spatiales à trois dimensions peuvent se comprendre à partir des structures simplement **linéaires**, et que la synthèse de ces molécules ne nécessite donc que des matrices elles-mêmes linéaires, comme les phrases d'un texte, il est possible d'utiliser les termes de message, de code, de transcription, de traduction, d'ordre, d'erreur,... comme des **analogies solides**. Le négatif de l'ordre, c'est la possibilité d'une interversion, la substitution d'un arrangement à un autre comme le ferait un copiste (ou une dactylo). La théorie de l'information est un modèle pour la chimie des macromolécules. Elle est source de questions, d'interventions, de progrès.

mais la théorie de
l'information four-
nit des analogies
solides

Mais ici encore il est aisé de déceler et de dénoncer l'abus de l'emploi de certaines analogies, leur transformation en analogies didactiques et idéologiques. Le terme de **programme génétique** en est un exemple. Il est actuellement supposé rendre compte de tout, c'est-à-dire à la fois de l'organisation de la "mémoire" génétique (comme les mémoires de l'ordinateur) et des modes de "commande" du réseau des réactions chimiques. Effet en retour de l'industrie informatique, mais aussi d'une vision "centralisatrice" des systèmes de décision. L'introduction dans la recherche scientifique d'un nouveau modèle, celui des **automates probabilistes en réseau** le fera mieux comprendre.

1.7. Vers une biologie théorique

L'existence actuelle ou dans un proche avenir d'une biologie théorique c'est-à-dire mathématisée, comme il existe une physique théorique, peut sembler non pas tant utopique que totalement inadéquate. Qu'on comprenne bien, il existe des domaines de la recherche, par exemple l'étude expérimentale

une formalisation
mathématique,
poursuivie pour
elle-même

des régulations, qui peuvent être mis "en forme mathématique", c'est-à-dire que les relations entre les différents paramètres peuvent être formalisées et décrites avec des équations mathématiques. Mais cette formalisation mathématique ne devient pas un instrument spécifique de la recherche c'est-à-dire que le modèle une fois construit, ne donne pas lieu à un travail théorique d'affinement poursuivi pour lui-même comme si on avait affaire à la réalité.

Ce travail existe en génétique formelle et en génétique des populations, mais il s'agit d'un cas assez particulier puisque l'on ne modélise pas une **fonction physiologique** dans un **organisme entier**, mais la transmission des gènes dans une population.

Cette biologie théorique est peut-être née en 1970 à la suite des travaux de S. Kauffman ⁶. Nous emprunterons à H. Atlan deux exemples : la mise au point et l'utilisation du formalisme de la thermodynamique en réseaux d'une part, les réseaux d'automates probabilistes d'autre part.

- Le métabolisme cellulaire et la thermodynamique en réseaux

le formalisme de
la thermodynamique
en réseaux ?

Une très grande partie des réactions chimiques du métabolisme cellulaire est connu. On peut ainsi **décrire** une suite de réactions chimiques à l'aide d'une suite d'équations. Mais dans l'organisme ces réactions **sont couplées**, c'est-à-dire que le produit final de l'une sert de produit initial dans une autre. On peut alors adresser une **carte métabolique** formant un **réseau**. Il est possible de décrire quantitativement la cinétique chimique de ces réactions considérées isolément in vitro, d'écrire les équations qui en décrivent le déroulement et les résoudre. Mais in vitro le réseau est trop complexe et il devient impossible de répondre à la question pourtant élémentaire : "si l'on change la concentration de tel produit, quel (s) changement (s) va-t-on pouvoir prévoir ?" La synthèse d'une protéine met en jeu trente-deux variables reliées par dix-sept équations, et ceci au prix de plusieurs simplifications. Les ordinateurs actuels ne permettent pas de résoudre ce système d'équations différentielles autrement que point par point.

(6) Kauffman S. "Behavior of randomly constructed genetics nets" in *Towards a theoretical biology*. C.H. Waddington éd. Edinbough Univ. Press. vol 3 p. 18-37. 1970

C'est pour résoudre ce genre de problème qu'a été mis au point, à l'intersection entre plusieurs disciplines, ce qu'on nomme "le formalisme de la thermodynamique en réseaux". Le formalisme utilisé en thermodynamique non équilibre a servi de point de départ car les variables utilisées sont des **variables dynamiques** et non des variables d'état comme en thermodynamique classique ⁷. Ces variables sont :

- un courant,
- une force responsable de ce courant.

Ce type de description est valable pour plusieurs domaines a priori fort différents : en **électricité**, c'est bien connu, on aura le courant et la différence de potentiel, en **mécanique des fluides** le courant de volume et la pression, en **diffusion** le courant de molécules et la différence de potentiel chimique. Mais une réaction chimique pourra aussi être décrite comme composée d'un courant (dans l'espace des réactions) qui sera la vitesse de réaction, et d'une force associée, l'affinité chimique.

Les sciences de l'ingénieur décrivent des réseaux électriques dont les éléments sont les courants et les forces. Ces réseaux sont constitués par des résistances (R), des capacités (C), et des self induction (L). Mais ces réseaux ont une généralité beaucoup plus grande :

- les éléments résistifs sont des éléments où l'énergie se dissipe,
- les éléments capacitifs stockent l'énergie sous forme potentielle,
- les éléments de self induction stockent l'énergie sous forme cinétique.

Ces trois types de relation dite "constitutive" entre le courant et la force peuvent s'exprimer par des équations mathématiques.

Le modèle peut donc ici prendre trois formes :

- un formalisme mathématique,
- ou bien une **forme concrète** qui lui est équivalente : un réseau électrique comprenant des capacités, des résistances et des self induction. Ce réseau peut être **réellement fabriqué** et donner lieu ainsi à des mesures concrètes, ou bien représenté par diverses sortes de graphiques, en particulier les "graphes de liaison".

Les caractéristiques du modèle sont ici différentes. Il ne s'agit pas de modèle analogique. Si l'on parle de **capacité chimique**

le modèle peut prendre la forme
- d'un formalisme mathématique
- d'une réalisation concrète
- d'une représentation graphique

(7) Atlan H. "Les modèles dynamiques en réseaux et les sources de l'information en Biologie" in **Séminaires Interdisciplinaires du Collège de France**, Paris Maloine, 1976

Les cahiers S.T.S. (Science, Technologie Société) n 9-10 contiennent sous le titre "Jeux de réseaux" un grand nombre d'articles sur ce thème. Ed du CNRS Paris-1986.

par exemple, comme on parle de capacité électrique, c'est parce que la fonction partielle est la même. De même on parlera de **différence de potentiel chimique** soit pour la même substance entre deux points ou de part et d'autre d'une membrane, soit entre des substances différentes susceptibles de réagir chimiquement. Pour utiliser le vocabulaire de l'anatomie comparée nous dirons qu'il y a **homologie** de fonctions partielles.

la comparaison maintenue au niveau des homologues est réversible

En ce sens, la comparaison entre les réseaux électriques et chimiques est parfaitement **réversible** si l'on se limite aux fonctions considérées. Si initialement le point de départ de la comparaison réside dans telle ou telle discipline, ceci n'est dû qu'à l'état d'avancement de cette discipline, à un moment donné par rapport aux autres. Il existe une structure commune. Même si on peut donner une représentation concrète du modèle, dans le domaine électrique, il **ne représente pas la chimie**. Le modèle n'est rien d'autre qu'une série d'expressions mathématiques, mais écrites selon un formalisme unifié.

• Les réseaux d'automates probabilistes

Pour rester dans le domaine des réseaux chimiques, à l'intérieur d'une cellule, on peut noter plusieurs complications. En dehors du nombre, ce réseau a une structure variable. En effet des membranes peuvent apparaître, disparaître. De même certains corps chimiques apparaissent ou disparaissent. Ce sont donc des **connexions du réseau** qui varient.

un modèle mixte déterministe et probabiliste

La deuxième question concerne le type de programme qui doit être contenu dans la cellule pour **générer** ce réseau entier et ensuite le "commander", le moduler selon les besoins. La conception d'un programme analogue à ceux des ordinateurs, constitué d'une suite d'algorithmes déterminant chaque étape, se heurte au grand nombre. Ce programme devrait contenir un trop grand nombre d'informations.

Certains auteurs proposent donc de mélanger des procédures déterministes et des procédures probabilistes. On peut affecter à l'existence de connexions ou d'éléments des probabilités différentes. Si l'on ne considère que la présence (probabilité = 1) et l'absence (probabilité = 0), on pourra utiliser l'algèbre de Boole. De tels modèles sont nommés réseaux d'automates probabilistes, et dans le cas particulier réseaux d'automates booléens. Sans entrer dans le détail de tels modèles, de ce que l'on gagne et de ce que l'on perd en les utilisant, on peut noter plusieurs remarques.

- **L'information génétique** n'est pas nécessairement organisée en un **programme linéaire** déterministe comme un ordinateur. H. Atlan fait remarquer que si, dans les années soixante, au moment des principales découvertes de biologie moléculaire, la théorie des automates avait été plus avancée, on parlerait

moins de "programme" et plus certainement de réseaux génétiques d'automates probabilistes.⁸

- La théorie des réseaux d'automates concerne plusieurs domaines de la biologie : construction des réseaux cellulaires au cours de l'embryogénèse, création des réseaux neuronaux et synaptiques, fonctionnement du réseau des anticorps selon la théorie de N. Jerne, etc... Dans toutes ces situations il s'agit de **simuler** des phénomènes biologiques hautement intégrés mais qui mettent en jeu l'interaction de millions d'éléments. L'organisation fonctionnelle des neurones, la dynamique de la réponse des anticorps sont, dans leur phase ultime, très **précises**. Mais on ne conçoit pas qu'elle soit entièrement déterministe, ou du moins d'utilisation du hasard dans la construction d'algorithmes permet de réduire cette complexité considérable. Reste à comprendre comment ce hasard peut **créer de l'ordre**.

- Il apparaît ainsi une recherche sur les différents types d'automates (automates dits "cellulaires", automates booléens, automates à seuils) qui semble **se prendre elle-même pour objet**, en attendant de retourner à l'observation expérimentale. Le temps n'est peut-être pas éloigné où l'on décrira le réseau trophique d'un écosystème non plus comme "pyramide", mais comme "un fractal" sur le modèle de ceux générés par certains automates cellulaires.

2. PROPRIETES DES MODELES ANALOGIQUES ET FORMALISES

2.1. Principales propriétés

Dans les exemples précédents on voit une physiologie animale vivisectionniste qui devient mathématicienne. L'explication des fonctions utilise d'abord la **réduction analogique**. Il s'y ajoute la **déduction formalisée** dans certains cas au moins. Déduction formalisée signifie que les rapports entre certains éléments constitutifs de l'organisme sont établis dans un langage de type mathématique (définitions, axiomes, règles de

la théorie des automates, pour réduire la complexité des millions d'interactions

le modèle analogique suscite l'assimilation

(8) Atlan H. "Création de signification dans des réseaux d'automates" in **Cahiers STS** cités précédemment.

Sur les automates cf. :

Atkins P.W. **Chaleur et désordre**. Paris. Belin. Collection Pour la science (trad 1984) 1987

Dewdney A. "Les automates cellulaires" **Pour la Science** n° 94 Août 1985 p. 11-15, ainsi que beaucoup de "récréations informatiques" du même auteur.

syntaxe,...) permettant de déduire certaines conséquences observables.

Les analogies sont empruntées très librement aux diverses disciplines scientifiques, y compris les autres domaines de la Biologie, ainsi qu'à la technologie humaine. Ces analogies **rendent compte** de certaines **fonctions partielles** de l'organisme, et dans certains cas les **expliquent**. Elles peuvent jouer simplement un rôle critique vis à vis de certaines représentations, ou bien guider l'expérimentation, éventuellement prévoir des conséquences observables.

Les modèles formalisés, qu'ils se présentent sous forme d'une série d'expressions mathématiques ou sous la forme équivalente d'un modèle concret réellement construit ou simplement représenté graphiquement, créent une **distance** par rapport à l'objet biologique à expliquer. L'analogie risque de renforcer la tentation d'une assimilation naïve de l'objet biologique à son analogue. Le formalisme contribue à nous **rendre étranges** et **étrangers** les objets biologiques de l'observation immédiate. Ce sentiment de détour, de construction artificielle peut contribuer à faire observer l'être vivant avec un regard neuf, en détruisant des fausses évidences.

Analogiques ou formels, les modèles ne contribuent à expliquer que des **fonctions** (fonctions globales, fonctions élémentaires partielles). Les modèles ne concernent que rarement les **structures**, ou les **relations structure/fonction** à l'échelle de l'organisme du moins. Au niveau moléculaire le problème se présente différemment, nous y reviendrons. Il faut souligner ce point car tout modèle a tendance à se présenter comme une explication totale, définitive. Dans les exemples précédents, nous avons vu que les analogies se succèdent et se critiquent les unes les autres. Certaines doivent être modifiées ou remplacées quand elles ont perdu leur pouvoir heuristique, comme par exemple "le programme génétique".

Le modèle ne donne pas de lui-même les **limites** de son utilisation. Mais surtout le modèle ne donne pas de lui-même les **critères de validité** de l'analogie ou de la formalisation proposée. Analogies et modèles ne se présentent pas d'eux-mêmes au chercheur. Ils sont choisis en fonction d'un cadre théorique des représentations, des paradigmes d'une époque. Il est aisé de citer des analogies stériles, sources d'erreurs ou d'obstacles à la compréhension, mais il n'est pas aisé de définir des critères permettant de **dire a priori** que l'analogie sera stérile. Il existe des mathématisations inappropriées, et un outillage mathématique sophistiqué n'a jamais réussi à donner une **forme**⁹ à une "doctrine informe", ou à une idéologie. Les ten-

le modèle formalisé crée la distance

le modèle ne donne pas les critères de sa validité

(9) **La mathématisation des doctrines informes.** Actes du colloque d'histoire des Sciences. Paris Hermann. 1972.

Il y a des formalisations inappropriées

tatives de Francis Galton pour mathématiser les relations d'hérédité, à l'époque de Mendel, n'ont pas abouti dans le domaine de l'hérédité. La "loi de l'hérédité ancestrale" a disparu. Par contre grâce à lui les mathématiques statistiques ont progressé. Mais qui aurait pu décider *a priori* que les travaux de Galton seraient stériles ? Quant aux thèses idéologiques auxquelles Galton a donné son appui, elles étaient antérieures à ses travaux et elles lui ont largement survécu.

l'utilisation idéologique des analogies...

Enfin il est bien difficile d'éviter que l'analogie qui a une efficacité heuristique dans le domaine scientifique n'en tire en retour une efficacité idéologique si on l'utilise dans l'autre sens. Du cerveau à l'ordinateur et retour. De la société aux systèmes de régulation biologiques et retour. Ce pouvoir idéologique diminue quand on importe, non pas des modèles analogiques d'un champ dans un autre, mais des structures mathématiques. Ou plus exactement quand on crée une nouvelle classe d'objets scientifiques qui perdent les caractères spécifiques à leur champ d'origine pour ne retenir que les structures communes. Mais ceci est actuellement rare en Biologie.

Les quelques remarques précédentes font comprendre qu'il est difficile de parler d'une **méthode des modèles**. Une méthode c'est-à-dire un ensemble de procédés et de règles pouvant guider *a priori* l'intervention scientifique. De même que pour la "soi-disant méthode expérimentale" décrite et codifiée par certains auteurs, la codification d'une méthode des modèles relève d'un discours *a posteriori*.

Il y a plusieurs modèles d'expérimentation

Mais il existe un autre type de critique plus radicale contre non seulement l'existence d'une méthode des modèles, mais contre la recherche de tout type de modèle pour l'invention et le progrès scientifique. Pour ces auteurs les physiologistes ont toujours recherché occasionnellement d'abord, puis de manière systématique à partir du XIXe siècle, tous les **instruments et appareils** que les sciences physico-chimiques étaient susceptibles de leur fournir pour la détection, l'observation et la mesure des phénomènes. Ce sont alors ces auxiliaires et ces délégués techniques qui fournissent d'eux-mêmes les faits à observer et les hypothèses sur la nature des fonctions physiologiques étudiées. On dit alors, et non par simple métaphore, que l'instrument, le scalpel par exemple, "questionne" l'être vivant. Mais a-t-on déjà entendu un scalpel faire une autocritique ? En refusant le fait que le physiologiste puisse également emprunter aux sciences physico-chimiques des idées ou des hypothèses explicatives sous forme de modèles analogiques ou formalisés, ces auteurs, partisans fervents de "la méthode expérimentale", oublient qu'ils utilisent un **modèle de méthode expérimentale** analytique directement calquée sur le modèle des sciences physiques du XIXe siècle. Et ce procédé a donc son domaine de validité et ses limites d'emploi. Il existe d'**autres modèles** de méthode scientifique y compris dans les sciences physiques contemporaines.

Convenons donc que le concept de message nerveux ne dérive pas directement de l'observation des "trains" de potentiels d'actions circulant dans les nerfs révélés par les outils sophistiqués que l'on connaît. Le concept de codage provient d'ailleurs, même si son importation a été facilitée par le fait que le courant électrique a historiquement d'abord servi au transport de messages et non d'énergie (télégraphie).

2.2. Hésitations sur les définitions

Le terme de modèle mathématique a, en Biologie, un statut très ambigu et variable selon les auteurs. Si on examine les traités concernant la dynamique des populations ou les divers articles qui en parlent, le terme de modèle est uniquement appliqué à la description de **formules mathématiques**. De même, dans le traité de neurophysiologie fonctionnelle de P. Buser et M. Imbert,¹⁰ le terme de modèle mathématique est inapproprié car, dans le cas des mathématiques, il ne s'agit pas d'analogie. Selon lui l'expression est incorrecte et simplement consacrée par l'usage. Il ne s'agit pas ici de trancher la question, mais plutôt de noter que l'on retrouve la même inversion des définitions à l'intérieur des situations où l'on utilise l'analogie comme mode d'explication. Seront alors nommés "modèles" les comparaisons dans les quelles on peut parler non seulement d'analogie, mais plutôt d'**homologie** de fonction. On dira par exemple que la souris constitue un modèle pour l'étude de la génétique humaine, soit au contraire on privilégiera les situations dans lesquelles le **modèle simule** la fonction, mais avec des procédés qui apparaissent de manière évidente comme différents de ceux utilisés par les êtres vivants. Un ensemble de résistances électriques, de diodes, de capacités peut tenter de simuler le fonctionnement d'un réseau de neurones, tout aussi bien qu'un réseau de réactions chimiques, ou les caractéristiques d'une nappe phréatique.

On trouve à l'intérieur même de l'emploi des modèles mathématiques une autre hésitation. Ainsi Antoine Danchin¹¹ précise que son modèle du système nerveux est construit suivant la méthode axiomatique, c'est-à-dire que la définition et l'étude du modèle mathématique sont **soigneusement distingués** de sa signification biologique. Ainsi la rigueur et la cohérence interne du modèle mathématique ne peuvent être affectés par la pensée biologique, tandis que les problèmes posés par la biologie ne peuvent être déformés par la rigidité ou la schématis-

le terme de modèle mathématique est-il inapproprié ?

le modèle mathématique a sa rigueur et sa cohérence propre

(10) Buser P., Imbert M. *Neurophysiologie fonctionnelle*. Paris. Hermann. Tome I, 1975. Tome IV, "La vision", 1987, p. 426-430.

(11) Danchin A. "L'inné et l'acquis : une théorie sélective de l'apprentissage". *La recherche* n° 42, février 1974, p. 184-187

sation grossière du modèle. Ce sont des énoncés particuliers appelés **interprétations** qui permettent de coupler la biologie à la formalisation mathématique. Selon l'auteur cette méthode est **totale**ment opposée à la méthode usuelle qui consiste à exhiber un objet mathématique dont on décrit les propriétés en termes pseudo-biologiques pour ensuite **assimiler**, par un **raisonnement analogique**, le modèle et la réalité expérimentale.

une double incertitude sur les définitions

Restent enfin les situations dans lesquelles les mathématiques jouent un rôle d'instrument, comme le manomètre pour le physiologiste, et non pas le rôle de modèle explicatif.

Cette hésitation dans les définitions montre à quel point il peut être difficile de s'entendre et relève d'une **double incertitude** : incertitude sur le statut épistémologique des modèles, incertitude sur le sens d'une évolution possible des types de modèles utilisés en Biologie :

* **La prise de conscience épistémologique**, relativement récente, du fait que le scientifique "construit son objet d'étude", l'abandon de l'idée qu'il explore un "donné", un "domaine qui préexiste", et "découvre" ainsi la réalité, a certainement conduit à privilégier parmi les caractéristiques des modèles l'aspect construit, l'aspect de représentation, la distance par rapport au réel. Il s'agit vraisemblablement ici d'un effet de balancier. Pour lutter contre le positivisme de la première position on a pris le contre-pied, mais cela ne suffit pas. Après avoir pensé que la science atteignait, grâce à une procédure précise (la méthode expérimentale), les "lois" de la vie qui en constituent la vérité éternelle et universelle, il ne s'agit pas de concevoir le travail du scientifique comme uniquement partiel, fragmentaire, provisoire, et constitué de détours et d'artifices. Il faut une véritable critique du positivisme et on ne l'obtient pas à si peu de frais.

lutter contre le positivisme

* **Quant à l'évolution des types de modèle**, on a longtemps pensé, à la suite de Claude Bernard en particulier, que les mathématiques ne seraient pas utilisables dans l'analyse du vivant. La description de mécanismes d'**autorégulation** internes a également été considérée comme un obstacle à la recherche de modèles mécaniques ou formalisés applicables aux êtres vivants. Les seuls **automates** construits par l'homme ont longtemps été d'un très grand simplisme ou d'une grande naïveté. Sans remonter à Vaucanson, la tortue de A. Ducrocq reste éloignée du comportement d'un être vivant. Cependant on sait désormais, à la suite des travaux de L. von Bertalanffy que la modélisation peut être appliquée à l'étude des organismes parce qu'ils présentent les propriétés générales d'un **système**. L'évolution des types des modèles consiste désormais, depuis l'ère de la Cybernétique et chaque fois que c'est possible, à rechercher des correspondances fonctionnelles au sens fort du terme, au sens mathématique, entre l'objet biologique et le modèle. Dans l'un des exemples précédents la correspondance entre un réseau électrique du type RLC et

rechercher des formalisations

un réseau nerveux tient au fait que l'on peut décrire ces deux situations grâce à des variables dynamiques homologues : un courant et une force. Le modèle ne prouve pas que l'activité des nerfs soit de nature électrique, mais que certaines des fonctions partielles ont une structure formalisables de manière homologue.

3. EXPERIMENTATION ANALYTIQUE DE TYPE CLASSIQUE ET SES LIMITES

Avant de décrire les divers types de modélisation il est utile de revenir sur les caractéristiques de l'expérimentation analytique de type classique. On oppose en effet parfois modélisation et expérimentation faute de préciser exactement le sens de ces termes, laissant ainsi supposer que l'invention ou l'importation d'un modèle se substituerait à la création de variations à l'aide d'artifices techniques. Il est fréquent de réduire l'expérimentation à la mise en oeuvre de techniques de variation et de production de "faits" à observer. Il est fréquent également de réduire la modélisation au statut de propositions théoriques visant seulement à expliquer ou rendre compte des "faits" expérimentaux, sans en guider la recherche. Mais "expérimental" signifie la possibilité de créer des variations déterminées et d'observer des variations consécutives en fonction d'hypothèses théoriques. Les modalités de création de ces variations peuvent être très diverses. Elles sont logtemps restées "analytiques", (on dirait encore "vivisectionnistes" en physiologie animale). Certains modèles peuvent guider une autre façon de faire varier les paramètres. L'utilisation d'un modèle à compartiment permet de désigner, une "boîte noire" que précisément on n'ouvre pas (on n'analyse pas directement), mais dont on va désigner observer et faire varier les entrées et les sorties. Ce modèle guide également la technique des indicateurs. De même dans l'étude de la dynamique des populations le modèle guide les techniques d'observation ou d'intervention sur cette population.

comparer
expérimentation
analytique
et modélisation

L'expérimentation analytique de type classique se propose de créer des variations dans des conditions bien déterminées qui impliquent, sans toujours le rappeler explicitement, plusieurs suppositions concernant l'objet d'étude. En effet le modèle implicite est celui de la Physique "classique" :

- une variation étant créée, toutes les autres variables connues ou non sont supposées indépendantes. On peut donc séparer les effets des différentes variables en fixant toutes les autres. (cf. l'expression "toutes choses égales d'ailleurs"). Autrement dit l'ensemble des variables ne forme pas un système d'éléments interdépendants.
- la variation est supposée ne pas endommager ou détruire l'objet d'étude.

plusieurs suppositions concernant l'objet biologique

- les conditions initiales sont supposées répétables
- l'objet d'étude est supposé totalement contraint par l'extérieur, autrement dit il n'a pas d'autonomie, pas de variation spontanée, pas de mécanisme d'autorégulation interne.

Toutes ces conditions ne sont que rarement remplies en Biologie et la méthode est donc souvent inadéquate. Ces limitations conduisent à la recherche, dans l'étude des objets biologiques, de méthodes adaptées et qui ne soient pas directement importées de la physique.

4. TROIS TYPES DE MODELES

réduire la complexité créée par le grand nombre sans simplifier

En dehors des problèmes classiques de classification il a souvent été utile d'inventer ou d'importer un modèle analogique ou formel dans trois types de situations qui apparaissent a priori comme fort différentes et dans lesquelles la méthode analytique est impuissante :

- quand on ne peut réduire directement la complexité créée par le grand nombre (population animale, réseaux de cellules, "pools" de gènes,...) :

analyser sans séparer les parties

- quand on se heurte à des totalités non directement décomposables sans destruction du phénomène, par exemple quand il est impossible de séparer par vivisection un organe d'un organisme sans modifier considérablement ou tuer l'un et l'autre ;

se représenter le non visible

- quand on doit se constituer une représentation d'une structure fonctionnelle non directement observable (par exemple se constituer une représentation des membranes biologiques qui échappent au pouvoir séparateur des microscopes actuels).

Dans les trois cas on doit rechercher des méthodes substitutives de l'analyse directe pour :

- approcher la complexité créée par le grand nombre, par des procédés d'approximation, faisant souvent intervenir des procédures aléatoires, et qui ne sont pas nécessairement des simplifications,

- analyser sans séparer les parties, sans les isoler,
- se représenter le non directement visible.

On pourrait nommer ces divers types de modélisation des sciences de la complexité, mais il reste à savoir si les divers sens du mot complexité ont quelque chose en commun. Par ailleurs distinguer trois types n'implique pas que l'on doive les séparer. Au niveau moléculaire en particulier, un même modèle tel le modèle allostérique peut être dit modèle au double sens de représentation schématique et de description mathématique. Dans le travail scientifique enfin, méthode analytique et modélisation se combinent de manière étroite.

4.1. Réduire la complexité créée par le grand nombre

On peut distinguer ici deux situations différentes :

- La situation est analysable, mais trop complexe

La situation est analysable c'est-à-dire que l'on peut parfaitement désigner les paramètres qui interviennent, par exemple le nombre de réactions chimiques du métabolisme d'un être vivant, le nombre de gènes entrant dans la détermination d'un caractère phénotypique. Mais le grand nombre crée une situation trop complexe, c'est-à-dire impossible à calculer par exemple avec les machines actuelles.

L'exemple du métabolisme cellulaire a déjà été développé. On peut donc réduire la complexité de la cinétique du métabolisme grâce au langage de la thermodynamique en réseau.

En génétique classique la transmission d'un caractère donné est supposée dépendre de un, deux ou plusieurs couples allèles (A,a). Au prix de certaines hypothèses il est possible de prévoir les cas possibles et de calculer leur probabilité a priori. Il suffit de développer le polynôme $(A+a)^n$. Le calcul à la main devient vite très long. Même avec l'aide d'un ordinateur le calcul devient très difficile lorsque n est grand. Comme dans le cas précédent c'est la multiplication du nombre de situations qui crée la complexité. Les mathématiciens proposent une méthode par approximation qui est ici le calcul à l'aide de la loi de Gauss qui constitue une approximation de la loi binomiale suffisamment correcte quand n est supérieur à 10 et les probabilités de A et a voisines de 0,5. Et approximation ne signifie pas simplification.

- L'analyse fine individuelle est inappropriée

Dans d'autres situations l'analyse fine individuelle est actuellement impossible, et cette difficulté vient se superposer au grand nombre. C'est ainsi le cas de la dynamique des populations animales surtout si leur mode de vie ne permet pas l'observation directe.

Mais le modèle explicatif proposé guide lui-même l'observation dans une autre direction. En intégrant des mécanismes probabilistes aux mécanismes déterministes il rend le suivi individuel des éléments d'une population non seulement inutile mais inadéquat. Le hasard n'est plus ici un instrument d'analyse comme dans le cas précédent, mais un modèle explicatif. Qu'on nous comprenne bien, si les individus d'une population ne sont pas directement visibles (animaux nocturnes, animaux vivant dans un terrier, en milieu aquatique....) il est possible d'imaginer des méthodes d'observation indirectes telles que la capture par piégeage, l'utilisation d'indicateurs, ou bien, en combinant les deux, le marquage d'in-

une approximation n'est pas une simplification

le hasard comme instrument d'analyse et comme modèle de déterminisme

dividus capturés, relâchés et recapturés. Il faut ajouter à ces techniques une théorie de l'échantillonnage précisant dans quelle mesure l'échantillon est supposé représentatif, autrement dit est le modèle de la population entière inaccessible. La complexité viendrait alors du nombre et de l'impossibilité d'observer directement ¹².

Il est inutile de suivre le comportement de chaque individu

Mais la complexité vient surtout d'une autre conception du type de déterminisme qui régit la dynamique de la population. Même si l'on pouvait suivre chaque individu et son évolution on serait face à une multitude d'événements allant dans des sens variés et éventuellement contradictoires. La prise en compte fine de toutes ces fluctuations risque de brouiller l'observation et la compréhension de la dynamique réelle. Certaines régularités dans la dynamique des populations n'apparaissent que si l'on s'occupe de grands nombres. Le comportement des individus devient sans intérêt parce que l'on s'occupe de **grands nombres**. L'introduction du concept de fluctuations aléatoires, le calcul des probabilités permettent alors de réduire cette complexité en adoptant une attitude qui, selon François Jacob ¹³, est identique à celle adoptée en thermodynamique statistique par Gibbs et Boltzmann.

L'utilisation d'automates probabilistes décrite précédemment présente les mêmes propriétés. Ces modèles permettent de réduire la complexité due au très grand nombre et au fait que l'observation n'est pas directement possible. Mais ils introduisent surtout au coeur de l'explication des procédures probabilistes qui interviennent à un certain moment au moins du fonctionnement biologique.

4.2. Analyser sans séparer des totalités non décomposables

Un autre type de difficulté survient quand on aborde la physiologie d'un organisme entier, particulièrement en physiologie animale. Plusieurs suppositions de la méthode expérimentale analytique au sens strict, décrite précédemment, deviennent inadéquates :

- plusieurs variables, éventuellement désignables et connues, sont impossibles à fixer tels les changements au cours du temps, le développement, le vieillissement, la mémoire immu-

(12) Dajoz R. *Dynamique des populations animales*. Masson 1974
 Le Berre JR *Ecologie. Dynamique des populations animales*. Université Paris Sud. Orsay. (polycopié) 1976. p. 119, le paragraphe "Modèles mathématiques appliqués à la dynamique des populations".
 Tubiana M. *La cinétique des proliférations cellulaires*. Paris INSERM 1972.

(13) Jacob F., op. cité note 4.

nologique ;

- ainsi la réversibilité des phénomènes n'est pas réalisable sur le même organisme ;

- les conditions initiales ne sont pas constantes à cause de la variabilité individuelle ou des variations interspécifiques, si l'on compare des animaux d'espèces différentes ;

- l'organisme forme un système, les variables ne sont pas indépendantes les unes des autres, et de plus il intervient des phénomènes de seuil, des facteurs limitants, des variations en retour (feed back), des disparitions, des synthèses ;

- certaines variations sont stressantes ou léthales ;

- un être vivant peut anticiper (après apprentissage) sur les variations à créer ;

- certaines variations sont impossibles à créer pour des raisons techniques, mais aussi pour des raisons morales.

Chaque difficulté peut être considérée comme un obstacle à surmonter et elle nécessite l'invention de moyens ou de procédés appropriés dont certains sont actuellement nommés **modèles**.

La complexité vient ici du fait que l'organisme forme un système. La méthode des modèles doit permettre de **comparer directement des totalités** sans en isoler des parties.

• Modèles à compartiments et méthode des indicateurs

Un premier ensemble de procédés déjà évoqué dans les exemples peut se résumer par des termes de modèle à compartiment et méthode des indicateurs ¹⁴.

- En considérant l'organisme comme boîte noire, ou en délimitant à l'intérieur de celui-ci plusieurs "compartiments", il est possible de définir des "entrées" et des "sorties", de les observer, de les faire varier.

- On peut également utiliser des indicateurs physiques ou chimiques (colorants spécifiques, précurseurs radioactifs...) que l'on introduit dans l'organisme (ou dans la cellule) soit pour observer leur sortie, soit pour observer leur localisation à un moment donné ou à des moments successifs en stoppant et en figeant le phénomène.

les parties de l'organisme forment un système régulé

faire varier les entrées et les sorties

introduire des espions

(14) Chevallier F., op cité note 11.

- Observer des variations respectant l'organisme entier

Pour observer des variations qui respectent l'organisme entier il existe un grand nombre de méthodes dont beaucoup peuvent se ranger sous le terme de **modèle animal** ¹⁵.

- L'observation des animaux sert de substitut à l'observation directe de l'homme à condition de discuter l'analogie.

chercher des substituts de variation

- Mais la comparaison du fonctionnement des diverses espèces animales, autrement dit la physiologie comparée est, depuis Claude Bernard, une source d'observations de variations dans la disposition, les relations, les fonctions des organes. Ici encore la discussion des homologies permet la comparaison.

- L'observation des maladies, ou du moins de certaines d'entre elles, est souvent considérée comme une "expérience" c'est-à-dire une modification qui doit permettre de déduire à partir du fonctionnement dévié le fonctionnement normal. Il faut encore admettre la continuité du normal et du pathologique, autrement dit le fait que la maladie représente une déviation en plus ou en moins (hypo/hyper) par rapport au fonctionnement normal.

- La méthode d'enquête géographique comme recherche de causes s'appuie sur l'observation des variations selon les milieux.

- L'expérimentation sur l'animal enfin n'est pas nécessairement une séparation, une ablation irréversible. On peut greffer un organe, ce qui d'une certaine façon respecte l'organisme entier, etc...

- Considérer l'organisme entier comme un ensemble de sous-systèmes

L'analyse au sens strict de l'organisme entier redevient possible, en contournant les objections précédentes, si on peut le considérer comme un ensemble de sous-systèmes. Trois concepts permettent de concevoir l'existence de ces sous-systèmes et de leurs relations :

grâce à trois concepts : cellule, milieu intérieur, régulation, on peut analyser...

- la **théorie cellulaire** qui désigne les unités fonctionnelles de l'organisme,

- le concept de **milieu intérieur** qui permet de concevoir la solidarité des parties entre elles, qu'il s'agisse d'organes, de groupes de cellules, ou de cellules dispersées, et donc de

(15) A titre d'exemple : "La Souris modèle presque parfait pour l'étude de la génétique humaine". *La Recherche* n° 155, mai 1984.
Roitt I.M. Immunologie. Les modèles animaux spontanés et expérimentaux de maladies autoimmunes. Medsi. 1986.

concevoir la possibilité d'intervenir par l'intermédiaire de ce milieu.

- le concept de **régulation** qui permet de concevoir l'interdépendance des parties qui forment ainsi un tout **intégré**, et donc la possibilité d'intervenir pour modifier ces boucles de régulation.

... la méthode des synthèses

En fonction de ces concepts on peut ainsi **isoler** un organe ou des cellules (cœur isolé et perfusé, nerf isolé, cellules en culture). On peut également, en renversant le mouvement, tenter des **synthèses partielles** en construisant des systèmes simplifiés in vitro. En immunologie par exemple, en utilisant des populations de cellules immunocompétentes obtenues en culture, on peut les rassembler en ajoutant tel ou tel facteur chimique à étudier.

La biochimie analytique permet l'étude in vitro de nombreuses réactions. Mais la biochimie utilise également la **méthode des synthèses** comme procédé d'étude. Ce domaine de la biochimie marque bien les limites de l'étude analytique et sa dépendance étroite avec la modélisation. Les concepts de **compartimentation** et de **canalisation intracellulaire** que nous ne développerons pas ici illustrent bien ce va et vient entre les deux méthodes. Mais la chimie qui n'est pas directement visible implique que l'on s'en fasse une représentation. Et c'est un troisième type de modèle étroitement associé au précédent, ainsi qu'aux techniques analytiques.

4.3. Créer des substituts de représentation

se représenter des structures fonctionnelles dynamiques...

Ce troisième type de situation correspond par exemple à l'analyse des structures non directement visibles (structures cellulaires, intracellulaires, biochimique), à l'étude de leurs fonctions, de leur dynamique. Ou plus exactement, les trois études ne se séparant pas, il s'agit de se représenter des **structures fonctionnelles dynamiques**¹⁶.

Comme pour les autres types d'études, l'expérimentation analytique et les modélisations s'entrecroisent dans le travail du scientifique. Il ne s'agit pas d'étapes ou de méthodes totalement disjointes mises en oeuvre par des personnes différentes.

Pour prendre un exemple précis, dans le cas de l'étude des membranes cellulaires il faut se constituer une **représentation** c'est-à-dire un modèle sous la forme de **schéma** ou de **maquette** pour mettre en cohérence les propriétés de l'objet fournies par des techniques d'étude analytiques **indirectes** et **disjointes** : degré de solubilité des solvants organiques, pro-

(16) Debru C. *L'esprit des protéines*. Paris Hermann 1983. Présentation historique des divers modèles allostériques.

membranaires cellulaires et mesure des surfaces des lipides extraits et étalés en couche monomoléculaire, mesure de tension superficielle, diffraction de rayons X, etc...

La plupart de ces techniques donnent une observation des structures en coupe (coupe réelle, ou coupe optique), et avec un certain **pouvoir séparateur**, faisant ainsi apparaître un vide optique pour les structures de dimensions plus petites. Il faut donc se représenter le **volume** dans l'espace et les structures de dimensions inférieures au pouvoir séparateur utilisé. La plupart de ces techniques donnent également une observation **fixée**, figée à un moment donné. Il faut donc se représenter le mouvement, la dynamique de la structure, son adaptation à certains paramètres. La plupart de ces techniques sont mises en oeuvre sur des éléments isolés, séparés de l'organisme et observés *in vitro*. La chimie *in vitro* fournit des renseignements sur une chimie en solution. Il faut donc prendre en compte et se représenter une **géographie chimique**, impliquant des phénomènes de diffusion, de transport, de compartimentation, de canalisation. C'est ici tout le délicat problème du statut de la biochimie de laboratoire. On peut également créer des biomembranes artificielles qui tentent de **simuler** certaines propriétés des membranes naturelles pour tirer de la comparaison des hypothèses sur la structure dynamique.

D'une manière plus large, et ceci n'est pas particulier à ce type de modèle, nous y reviendrons, les modèles de membrane resteront limités dans leur pouvoir explicatif tant qu'ils ne rendront pas compte du fait que le fonctionnement des membranes ou de telle partie (enzyme, transporteur, récepteur...) est **régulé, sélectif**, et permet donc une bonne adaptation dans certaines limites.

Ici aussi on peut parler de **complexité**. Mais la complexité serait plutôt dans la **multiplicité des techniques** dont la mise en oeuvre est indispensable pour réaliser l'étude, toutes ces techniques étant partielles, disjointes, non concordantes, indirectes, le détournement étant souvent double ou triple.

Bien évidemment la représentation n'est pas un but en soi destiné à satisfaire notre besoin de visible, notre besoin d'image. Elle doit rendre compte des données, et si possible permettre une explication du fonctionnement. Mieux encore elle peut prédire des conséquences, guider les techniques expérimentales et d'une manière plus large relancer le travail scientifique. Mais tout ceci n'est pas spécifique aux modèles et aux relations qu'ils entretiennent avec les propriétés de l'objet biologique. L'insistance sur les modèles conduit en particulier à décrire leur succession et leurs rectifications au cours du temps. Les modèles de membrane cellulaire constituent actuellement un exemple privilégié.

... à partir de l'observation de coupes fixées avec un niveau de détail limité

complexité due à la multiplicité des techniques

5. RELATIONS ENTRE THEORIE ET EXPERIENCE/MODELE ET PROPRIETES DE L'OBJET

la succession des théories et des modèles

Il n'y a pas, sur ce point, de spécificité de la modélisation par rapport à l'expérimentation analytique. Une bonne hypothèse (un bon modèle) n'est pas nécessairement celle qui rend compte immédiatement de toutes les données de l'expérience, ou celle qui conduit rapidement à sa vérification directe. Un décalage, une discordance imprévue sont une source de relance du travail scientifique. Le chercheur doit rectifier l'explication, ou modifier les conditions de l'observation pour ajuster mieux l'un à l'autre. L'intérêt d'une théorie c'est sa possibilité d'**extrapolation**, d'**anticipation**, autrement dit de développement et de progrès du savoir. Les observations nouvelles ne sont pas la seule source de progrès. Par ailleurs les théories successives se remplacent les unes les autres par un jugement critique porté sur les précédentes, mais également par la plus grande ampleur des faits et des données dont elles rendent compte, par la plus grande ampleur des propriétés nouvelles, inaperçues, qu'elles font apparaître. Les modèles se succèdent de la même façon. Les modèles membranaires successifs en sont un bon exemple. Depuis le début du siècle chaque modèle nouveau doit rendre compte à la fois de tous les faits que le modèle antécédent expliquait, des faits qui restaient inexpliqués, des faits nouveaux apportés par de nouvelles techniques. Chaque modèle nouveau fait rebondir le travail, prévoit des conséquences nouvelles ¹⁷.

6. OBSTACLES A LA MODELISATION

Notons encore quelques obstacles possibles à certains types de modèles.

l'assimilation magique ou puérile

On peut décrire, dans certains des exemples précédents, une **tendance naïve** à l'explication par **assimilation** qui risque de faire obstacle à la constitution d'une véritable analogie. Assimiler c'est rapprocher des cas ou des catégories en les **identifiant**. Et cette recherche avide d'assimilation, cette précipitation latente, implicite, reste méconnue tellement elle est spontanée.

Cette naïveté risque d'être **magique** ou **puérile** :

(17) Canguilhem G. "Modèles et analogies dans la découverte en Biologie" in *Etudes d'Histoire et de Philosophie des sciences*. Paris. Vrin 1968 p. 305-318.

- **magique** car on peut la rapprocher des attitudes magiques de simulation, des rites entretenus par des personnages dé-tenteurs de quelque pouvoir sur l'inconnaissable, l'inexplicable, l'occulte,

- **puérite** comme dans le cas de la construction d'automates, réalisés en principe dans une intention heuristique, mais qui le plus souvent ne sont que les simples imitateurs, de simples simulateurs d'effets, quand il ne sont pas réalisés dans une intention de mystification, de charlatanisme, d'illusionisme. Ou bien ces constructions relèvent de la maquette et donc du changement d'échelle.

l'activité technolo-
gique et pragmati-
que source
d'analogies

On peut cependant penser, positivement, qu'il y a une naïveté plus fondamentale qui ne serait pas tant "un retour aux sources", qu'une "puissance de réveiller les sources", selon l'expression de G. Bachelard, sources qui sont ici celles de l'imagination. Il s'agirait de la recherche d'une certaine vision anté-technologique, anté-logique, une vision de la vie antérieure aux instruments créés par l'homme : l'outil, le langage et la représentation.

L'un des points de départ privilégiés de ces analogies est constitué par les observations tirées de l'activité **technologique et pragmatique** humaine qui structure ainsi la perception de l'observateur.

Ainsi la comparaison entre machine et organisme, impliquée dans plusieurs exemples précédents, demeure encore au niveau scientifique et pédagogique un mode d'explication, que les machines soient des machines mécaniques simples (levier, pompes), des machines cybernétiques ou des machines comprenant des ordinateurs.

Les limites et les obstacles sont ici nombreux. En assimilant des figures concrètes, des formes, des objets et leur usage, ou bien seulement un vocabulaire, il est difficile de résister à la tentation :

l'utilisation des vé-
gétaux, la fabrica-
tion du pain et du
vin source d'obs-
tacles

- de comparer des objets entiers, des totalités et non des parties d'objets,

- de valoriser l'un des termes de la comparaison qui sert de point de départ et donc inévitablement de référence pour expliquer l'autre. On risque donc de réduire l'inconnu au connu qui est valorisé, qui devient le modèle à imiter au lieu de rechercher les structures ou les fonctions qui sont communes.

- de se représenter de manière concrète l'objet biologique à expliquer à partir du modèle-objet qui initie la comparaison.

Une conception métaphysique de la totalité de l'objet biologique, de son caractère insécable, constitue un obstacle à l'analyse. Cette conception dérive également de l'activité pragmatique de l'homme dans deux domaines au moins :

- l'utilisation des végétaux dans l'alimentation humaine ou dans la pharmacopée conduit à valoriser les qualités de syn-

thèse d'un produit, qualités autrefois nommées "essence" ou "vertu". Cette attitude magique s'oppose à l'analyse par séparation des constituants et recherche de l'action de produits purs.

- les techniques millénaires de la fabrication du pain et du vin ont fomenté des images mythiques qui ont constitué des obstacles à l'analyse de la fermentation par exemple.

Ces deux types de techniques et beaucoup d'autres conduisent au fait que toute tentative d'explication analytique se trouve d'abord inconsciemment **censurée** de manière **obsessionnelle**, l'assimilation globale, l'identification étant au contraire immédiatement valorisée.

De plus ces conceptions, qui pourraient ne désigner qu'un obstacle temporaire à surmonter, se convertissent aisément en refus, en **interdit dogmatique**, en frontière absolue du travail scientifique. Cette conception métaphysique de la totalité, cette conception romantique de l'organisme peuvent donc soutenir une sorte de paresse intellectuelle.

Cette recherche d'assimilation par identification d'un terme à l'autre fait aussi obstacle au fait, développé précédemment, que l'une des conditions favorables à la découverte scientifique réside dans le **décalage** entre les résultats de l'observation et la construction du modèle, dans la discordance imprévue entre l'explication et la description.

Le singulier et l'extraordinaire : il existe une tendance qui fait obstacle à toute analogie. Elle consiste en la recherche de la singularité, du singulier, du rare, de la variété inattendue non pas dans un esprit scientifique, comme obstacle à réduire, mais dans un **esprit de curiosité**, lié au goût de surprendre, à la recherche de l'anecdotique, du bizarre. Cette attitude se convertit aisément en occultisme.

Ce type d'obstacle n'est pas spécifique de la modélisation. Il se situe en face de tout travail scientifique. Il rend cependant plus spécifiquement difficile la recherche d'analogies. En effet le singulier est incomparable, inclassable, **sans analogue**. Il faut distinguer clairement cette situation de celles que l'on peut nommer "extra-ordinaires". Il s'agit alors de cas qui s'éloignent de la moyenne, qui s'éloignent du modèle, qui sont hors module, sans être toutefois incomparables. Ainsi un géant ou un nain reste un homme. Il est comparable même comme **exception à la règle**. Comme souvent, ces obstacles à la science peuvent se convertir en **limites absolues**, infranchissables, sinon en interdit, mais ce n'est pas inéluctable. Pour ne citer qu'un exemple, Darwin a donné un statut scientifique aux petites variations observés dans les populations animales, variations qui ont longtemps été considérées comme des **irrégularités**, des **anomalies** d'un loi de la nature constituée par le type animal, ou bien comme des singularités.

l'assimilation
s'oppose à la
création d'une
distance

le singulier est sans
analogie

7. PENSER SANS MODELES

Derrière l'usage actuel très extensif du mot modèle on peut donc soupçonner qu'il y a autre chose que la simple désignation d'une méthode qui finalement n'est ni très nouvelle, ni la nouvelle panacée. Si son utilité est réelle, elle est limitée et sa validité est toujours à discuter. Il faut donc peut-être y voir l'expression d'une **nouvelle philosophie des sciences**, une philosophie de l'imparfait, de l'approché, du substitué, du fragmentaire, du partiel, du provisoire.

Il peut s'agir d'une **réaction contre le positivisme exacerbé de la fin du XIXe siècle et du début du XXe siècle** qui pensait pouvoir connaître les lois universelles de la nature grâce à l'expérimentation analytique utilisant les nombreux instruments importés des autres sciences.

une réaction
contre le positivisme

Cette relativisation pourrait se **convertir en dévalorisation** du travail scientifique qui laisserait donc échapper le réel et ne serait que mauvaise copie, imitation, double par rapport au modèle parfait inimitable, inatteignable.

Mais **convertie en principe**, cette position signerait le retour du positivisme. La méthode de la boîte noire par exemple est une bonne méthode si elle n'est qu'un temps de l'étude. Importée en psychologie animale et surtout humaine par les behavioristes elles pose que la connaissance de la boîte (le cerveau) est inutile pour agir de manière efficace. On ne laisse plus "échapper" le réel, on refuse de l'atteindre, ou on postule qu'il n'existe pas.

Nous venons de dénoncer les **fausses frontières** assignées à l'utilisation des modèles. Nous avons par contre souligné les **limites réelles** de leur valeur explicative. Ainsi les modèles expliquent souvent une fonction globale, en laissant échapper les fonctions élémentaires, ou bien ils concernent certaines fonctions élémentaires, mais ne modélisent pas la totalité de l'organisme. Les modèles ne concernent que peu les relations structure/fonction. Par ailleurs plusieurs aspects du fonctionnement biologique ne trouvent actuellement aucun modèle : le fonctionnement cérébral, l'embryogénèse, l'évolution des êtres vivants... Mais à côté de ces limites il faut surtout souligner avec Claude Bernard la nécessité d'inventer des explications **sans aller chercher des modèles** dans d'autres sciences chaque fois que c'est possible. Le concept de milieu intérieur est un bon exemple de ce type d'invention, en effet il n'existe pas dans la technologie humaine de façon de mettre en relation des éléments éloignés et de faire circuler entre eux des matériaux et des informations, qui soit comparable à ce procédé. Pour inventer cette idée il a fallu, disait Claude Bernard,

limites réelles et
fausses frontières
dans l'emploi des
modèles

"se jeter à travers champs", penser sans aide, sans appuis, on oserait dire sans béquilles. Penser la Biologie pour elle-même, de manière neuve, à la fois au niveau des concepts, des techniques, des méthodes, en tenant compte de la spécificité des objets biologiques. C'est une sorte de philosophie de l'audace, de l'aventure intellectuelle.

être attentif à la spécificité de la biologie...

...c'est penser son rapport à la médecine

Mais il y a plus, en effet, dans la connaissance de la vie, certains phénomènes la tiennent à distance de tout modèle physique, chimique ou mathématique. *"Il a été impossible de constituer une science du vivant sans que soit prise en compte, comme essentielle à son objet, la possibilité de la maladie, de la mort, de la monstruosité, de l'anomalie et de l'erreur"*.¹⁸ . Aucun de ces phénomènes n'existe dans le domaine physico-chimique, sauf à parler de manière métaphorique. De nombreux savants ont tenté de réduire ces phénomènes en assimilant par exemple le pathologique à une variation du normal, effaçant par là-même la spécificité de l'objet biologique. L'élucidation de plus en plus fine des mécanismes physiques et moléculaires des cellules et des organismes fait appel aux modèles chaque fois que c'est possible. Mais cette élucidation ne saurait oublier la question lancinante de son rapport à la médecine. A moins de concevoir l'apparition d'une médecine sans aucune autonomie, sans aucune marge de manoeuvre, réduite à l'application d'un savoir tiré des mécanismes physico-chimiques, autrement dit de concevoir la possibilité d'un monde sans maladie et d'une médecine sans malades.

Guy RUMELHARD
Lycée Condorcet
Equipe de didactique des sciences
expérimentales, Institut National de
Recherche Pédagogique

(18) Foucault M. "La vie : l'expérience et la science". in *Revue de Métaphysique et de Morale* n°1, 1985, pp. 3-14.

MODELISER A L'ECOLE ELEMENTAIRE ?

un pari : la modélisation comme aide didactique

Le fait que les enfants de l'école élémentaire soient capables d'établir des relations, qualitatives ou quantitatives, entre des grandeurs repérables ou mesurables, a déjà souvent été exploré en didactique des sciences. Mais il est certains problèmes réputés impossibles à traiter à l'école élémentaire, parce qu'ils n'offrent pas de situations expérimentales susceptibles de fournir un matériau manipulable. On peut alors faire le pari que l'une des démarches essentielles de la science, la modélisation, non seulement n'est pas définitivement inaccessible aux jeunes enfants, mais qu'elle pourrait constituer une aide à l'interprétation de certains phénomènes.

modélisation et expérimentation ne sont pas en concurrence

Par exemple des phénomènes physiques ou chimiques tels que l'évaporation, la dissolution, l'échauffement d'un conducteur parcouru par un courant, le refroidissement d'un corps chaud, l'inégalité des jours et des nuits, ou la représentation du fonctionnement d'un objet technique tel que la diode ou le transistor, tout cela, qui pourrait paraître trop complexe pour de jeunes enfants, trouve dans la modélisation un moyen de ne pas rester muet devant un phénomène, ni de s'en tenir à des représentations spontanées. La modélisation suppose en effet de ne pas hésiter à fournir à l'enfant des aides, des supports qui suscitent sa réflexion et son imagination, dans le cadre de règles de construction admises comme une convention, convention qui peut aller jusqu'à faire correspondre plusieurs modèles à une réalité. Précisons que la construction de modèles n'est pas un objectif en soi, mais qu'elle a pour but d'amener les enfants à prendre conscience que la connaissance se construit, est évolutive, et que les modèles ainsi élaborés permettent prévision et explication.

L'expérimentation et la modélisation ne sont pas à considérer comme rivales mais comme complémentaires, la première étant utile comme test d'une hypothèse, la seconde comme clé d'interprétation.

C'est dans cet esprit que des professeurs d'Ecole Normale ont tenté d'introduire explicitement la modélisation dans certaines séquences de classes à l'école élémentaire. On trouvera dans les pages qui suivent plusieurs contributions, analysant l'approche des enfants face aux problèmes suscités par la modélisation.

des exemples de ce qui est possible à l'école élémentaire

Celle-ci apparaît dans des séquences de montage en électronique (Jean-Loup Canal), dans des exercices portant sur des circuits électriques (Liliane Sarrazin, Jean-Claude Genzling), sur la construction d'un modèle particulière expliquant les changements d'état de la matière (Jean-Claude Genzling), et sur la confrontation de plusieurs modèles en astronomie pour expliquer des observations sur l'évolution des ombres au cours d'une année (Marie-Anne Pierrard).

La présentation et l'analyse des séquences de classe qui suivent, ne veulent pas tenir lieu de réflexion épistémologique sur la notion de modèle, ni de type représentatif et universalisable d'une didactique des modèles en sciences expérimentales. Elles sont des exemples de ce qu'il est possible de faire, et soulignent le gain de sens que la modélisation apporte, sans cacher les faiblesses de certaines approches, ou leur caractère provisoire.

QUELQUES CONCLUSIONS PROVISOIRES

Au vu de ces diverses tentatives et des résultats qu'elles ont donnés, il semble que de jeunes enfants sont capables d'avoir une activité de modélisation. En d'autres termes, ils sont capables de construire des systèmes d'explication ayant une cohérence interne et pouvant rendre compte de phénomènes.

des modèles aux fonctions diverses

Dans les séquences de classe et les analyses présentées ici, on rencontre en effet des modèles analogiques (le mime, ou l'objet technique jouant le rôle de substitut d'un autre objet technique), des modèles prédictifs (modèles particuliers, modèles cosmologiques), et même des modèles ayant un support matériel (maquette). Autrement dit, mis à part le modèle mathématique, les différentes fonctions des modèles ont pu être développées, chaque modèle pouvant avoir plusieurs fonctions. Ainsi dans les séquences portant sur l'électronique on a des modèles analogiques ayant une fonction explicative, et la confrontation du modèle à la réalité, lorsque celle-ci ne correspond pas à la prévision, suscite la création d'un modèle ; le modèle particulier a lui aussi une fonction explicative et fait apparaître assez clairement le statut de "construction de l'esprit" caractérisant la modélisation ; enfin les modèles en astronomie, outre leur fonction explicative, ont une fonction prédictive et la confrontation des divers modèles fait apparaître le lien entre un modèle et un type de problème posé.

prendre conscience que les modèles ne sont pas le réel

On voit comment le modèle est confronté au réel et comment on peut éventuellement passer d'un modèle à un autre (en électricité, en astronomie). On voit comment les modèles apparaissent bien aux yeux des enfants comme une construction de l'esprit, ne devant pas se confondre avec la réalité décrite, mais pour autant non arbitraire, puisque l'échec d'une prédiction oblige à passer à un nouveau modèle : au total il est clair que

c'est l'expérience qui oblige la raison à s'incliner devant ses résultats.

les modèles des enfants ne sont pas les modèles du savoir savant

Certes les modèles obtenus sont loin encore des modèles du "savoir savant": Ce à quoi aboutissent les enfants pourrait être considéré comme des "morceaux" de modèles scientifiques (le système cosmologique par exemple, où la terre tourne sur elle-même en un jour n'est qu'une parcelle du système complet, faisant intervenir des mesures et d'autres mouvements plus complexes), ou comme des étapes inachevées d'un processus intellectuel plus performant (le modèle particulaire par exemple fait intervenir des particules encore assez grossières dans leur définition).

mais ils sont autre chose que des représentations

Mais il faut cependant se garder de croire qu'il y a peu de différence entre certains modèles et ce qu'on appelait naguère "représentations". Il ne s'agit pas en fait d'un simple changement de nom : c'est un point de vue différent qui est ici à l'oeuvre. En considérant les représentations comme des "modèles spontanés", on tend à leur donner une fonction non plus simplement révélatrice d'une vision du monde, mais une fonction véritablement opératoire. Un modèle spontané, s'il est perçu comme modèle, devient un outil pour prévoir un certain état du réel, et est d'emblée susceptible d'être modifié ou remplacé par un autre modèle plus performant. On voit d'ailleurs qu'il ne s'agit nullement ici d'attendre que le modèle surgisse totalement spontanément de l'esprit des enfants. Les aides et suggestions sont nombreuses, mais elles répondent à chaque fois à une difficulté que les enfants ne pouvaient pas surmonter seuls. Elles répondent donc à un besoin et ne sont pas purement et simplement imposées. Mais, malgré ces aides diverses, les modèles obtenus sont encore bien distants des modèles de la science.

un outil pour prévoir, et qui peut être modifié

De fait si l'on prend le modèle comme "produit fini", les modèles auxquels parviennent les jeunes enfants sont encore des ébauches. Mais si l'on se penche non plus sur le point fini mais sur le processus même de modélisation, on peut constater que les enfants sont capables d'une réelle prise en compte des phénomènes et d'une interprétation constructive. Car dans ces activités de modélisation ils prennent conscience que la construction d'un modèle est bien une activité de l'esprit, mais qu'elle doit suivre certaines règles de cohérence interne et de non contradiction avec les phénomènes observés.

porter l'accent sur le processus même de la modélisation

C'est pourquoi on peut dire qu'ils participent à l'une des activités primordiales de la science et qu'ils se préparent à mieux comprendre en quoi elle est un jeu libre de l'esprit tout en étant une soumission à l'expérience, à comprendre aussi en quoi elle n'est ni arbitraire, ni réplique exacte du réel.

LES MODELES PARTICULAIRES

Jean-Claude Genzling

Lors de l'étude de transformations physiques, des élèves de Cours Moyen sont invités à se livrer à une activité de modélisation : construire un modèle, l'utiliser pour l'interprétation de phénomènes physiques observés par ailleurs, le modifier, l'utiliser pour prévoir. Une telle activité est susceptible de jouer un rôle central dans la construction des connaissances et des méthodes scientifiques.

La recherche "Compétences méthodologiques en sciences expérimentales" conduite à l'Institut National de Recherche Pédagogique nous a offert un cadre favorable pour étudier la construction et l'utilisation de modèles par les élèves de l'école élémentaire. D'autres équipes de l'I.N.R.P. nous ont précédés dans cette voie.

Ainsi Rose Marescot a établi que les élèves d'un Cours Moyen peuvent expliquer à l'aide d'un modèle moléculaire (proposé par le maître) la formation de gaz carbonique pendant la combustion du fusain¹. Marcel Paulin rapporte des expériences identiques². Bernadette Bornancin dans un article récent examine les fonctions du modèle dans l'enseignement de la Biologie³. Nous allons exposer ci-dessous nos premières observations et conclusions en nous limitant aux conditions de productions et aux fonctions de modèles particuliers construits lors de l'étude de quelques transformations physiques. Précisons préalablement ce que signifie pour nous les expressions : "modèle particulaire" et "interpréter une transformation physique".

Nous appelons modèle particulaire un ensemble de propositions à caractère hypothétique permettant d'interpréter (ou expliquer) des phénomènes tels que l'évaporation de l'eau, la dissolution du sucre dans l'eau, la solidification de l'eau... Tout modèle particulaire comporte une hypothèse d'existence de

modèle, ensemble de propositions à caractère hypothétique

- (1) Rose MARESCOT. "Les combustions, de la bougie au camping gaz". Document interne INRP. 1975.
- (2) Marcel PAULIN. "Pourquoi "ça fond?" Dissolution et molécules". B.T. n844. 1977.
- (3) Bernadette BORNANCIN. "Quelques activités de modélisation à l'école élémentaire". Dans : "Modèles et simulation". Actes des IXèmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique. Chamonix. 1987.

permettant d'interpréter des phénomènes

particules de matière. Nous verrons plus loin que les particules conçues par les enfants ne sont pas les particules des physiciens. Pour être opératoire le modèle doit aussi comporter des hypothèses qui fixent quelques-unes des propriétés de ces particules ; il peut s'agir de propriétés intrinsèques (leur forme, leur caractère incassable...) ou encore de propriétés relationnelles (leur disposition dans l'espace, l'attraction ou la non attraction entre deux particules proches ou éloignées...). La nature de ces hypothèses est liée au problème à résoudre : ainsi l'agitation particulaire est généralement évoquée par les élèves lors de l'étude de l'évaporation d'un liquide.

Les modèles ainsi construits ou en partie proposés par le maître ont ici une **fonction précise** : interpréter une transformation physique. Deux cas peuvent se présenter : décrire (à partir du modèle) un mécanisme rendant compte de la production du phénomène ou encore décrire la matière **avant et après** transformation sans se préoccuper de la manière dont on passe d'un état à l'autre. Nous avons envisagé les deux cas dans des classes différentes.

1. L'ETUDE PHENOMENOLOGIQUE EST UNE PREMIERE ETAPE DE LA MODELISATION

Interpréter une transformation de la matière

La fonction première d'un modèle particulaire est d'interpréter une transformation de la matière.

Il faut d'abord étudier le phénomène

1.1. Cette transformation doit être clairement établie

Citons deux exemples.

- L'évaporation de l'eau

Des élèves de Cours Moyen pèsent (à la même heure), pendant quelques jours, plusieurs récipients différents contenant au départ la même quantité d'eau. Ils représentent ensuite les variations de masse de l'eau contenue dans chacun des récipients sur papier millimétré.

L'examen des courbes obtenues montre que :

- la masse de l'eau contenue dans les différents récipients diminue peu à peu (évaporation),
- la vitesse d'évaporation n'est pas la même dans les six cas ; elle peut dépendre de la température du liquide.

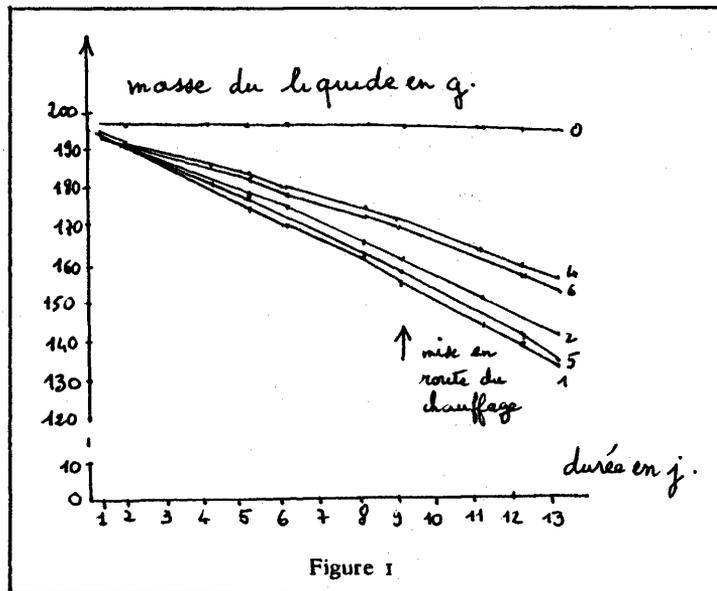


Figure 1

• La solidification de l'eau

On peut demander à des élèves de Cours Moyen de prévoir ce qui change et ce qui ne change pas lorsque l'eau se transforme en glace. Dans la classe où nous avons posé cette question, les deux tiers des enfants ont exprimé :

- la conservation de la substance

Sophie : "l'eau reste pareille parce que si on mettait le glaçon à fondre ça donnerait de l'eau."

Mathias : "l'eau est toujours de l'eau, mais gelée."

La conviction de Sophie paraît fondée sur l'observation de la transformation inverse.

- la non conservation de la masse

Elle devient plus lourde ou moins lourde.

Mathias : "à mon avis la glace est plus légère car la glace flotte sur l'eau."

Par contre la variation de volume est mal connue (moins du quart des élèves répondent dans ce sens).

La surprise des enfants est grande lorsque l'expérience met en évidence la **conservation de la masse** et l'augmentation de volume.

1.2. La substance se conserve-t-elle lors de ses transformations ?

Pour saisir la conservation de la substance lors des transformations (physiques), les enfants disposent de peu d'éléments sur le plan expérimental : conservation de la masse (solidifi-

les élèves savent
que la substance
se conserve

l'état gazeux est
difficile à conce-
voir

cation) mais variation du volume, observation de la transformation inverse... Au Cours Moyen, la conservation appartient généralement au domaine de la croyance, de la conviction, ou même de l'évidence.

Nous avons déjà cité ci-dessus les propos de Sophie et de Mathias (solidification de l'eau). Le cas de l'évaporation est plus délicat : la vapeur d'eau est souvent décrite comme un ensemble de gouttelettes invisibles à l'œil nu (vapeur d'eau et buée sont indifférenciées).

Il y a ici incompréhension de l'état gazeux.

1.3. En fait ce sont les transformations qui font problème

Les enfants ne disposent pas toujours de représentations spontanées efficaces (c'est à dire construites en dehors de tout apprentissage scolaire) leur permettant d'interpréter les transformations observées. Il y a cependant des cas plus frustrants que d'autres. Ainsi la solidification de l'eau reste complètement inexplicable : inversement les élèves sont moins désarmés pour rendre compte de l'évaporation (ou de la dissolution...) Citons quelques-unes des représentations "expliquant" l'évaporation (elles sont souvent obtenues après une discussion collective portant sur les représentations d'un élève).

Cyril : *"La chaleur transforme l'eau en petites boules qui s'envolent et quand il fait plus froid, les petites boules explosent et tombent par terre."*

Claire : *"Grâce à la chaleur le liquide se transforme petit à petit en petites gouttes invisibles à l'œil tellement légères qu'elles s'envolent."*

Malka : *"Je pense que le liquide est formé de plusieurs petits éléments, partant petit à petit en vapeur."*

Nous sommes bien en présence de modèles non particuliers. Pour interpréter l'évaporation, les enfants supposent que le liquide s'envole par petites gouttes, par petites bulles, par petites boules, par petits éléments...

Les petites gouttes... s'envolent parce qu'elles sont légères. Elles sont aussi très petites, ce qui les rend invisibles. Ces petites gouttes (liquides) apparaissent souvent comme les constituants de la vapeur. Les élèves peuvent concevoir des modèles analogues pour interpréter la dissolution (le modèle des cristaux transparents semble assez fréquent). Remarquons simplement que les enfants n'imaginent pas spontanément la notion de particules ; les gouttes, les boules, les éléments conservent évidemment les propriétés du liquide : elles peuvent être de volume variable, elles peuvent être partagées (les gouttes peuvent exploser)...

Nous reviendrons plus loin sur ce point.

les modèles spon-
tanés ne sont pas
des modèles parti-
culaires

2. LA CONSTRUCTION DES MODELES

Deux cas extrêmes peuvent se présenter : ou bien le maître construit un modèle explicatif à partir des idées des élèves, ou bien il propose lui-même une partie des hypothèses fondant le modèle.

2.1. Le maître construit un modèle explicatif à partir des idées spontanées ou provoquées des élèves

Cette démarche paraît adaptée à des transformations telles que l'évaporation ou la dissolution ⁴.

- Les hypothèses fondant le modèle

le maître prend en compte les représentations spontanées des élèves

Pour rendre compte de l'évaporation, certains enfants supposent que l'eau "s'envole" sous la forme de petites bulles, de petites gouttes, de petits éléments, de minuscules particules... Ces représentations contiennent l'idée que la matière peut être fractionnée en petits éléments. Elle est à mettre en relation avec la consommation de boissons gazeuses.

Elève : *"Les bulles, quand on prend une bouteille de coca, quand on secoue, toutes les petites bulles montent, et quand on ouvre, elles s'envolent."*

Les bulles ne préexistent pas dans le liquide ; elles se forment généralement sous l'action de la chaleur

Elève : ... *"à cause du chauffage, la classe est un peu chaude, alors ça (l'eau) se transforme en bulles."*

L'eau n'est pas un **ensemble de bulles** ; celles-ci ne peuvent pas être assimilées à des particules. D'autres élèves expriment une **hypothèse portant sur la composition de l'eau** : elle est formée de petites gouttes, de petits éléments, de minuscules particules.

Citons un extrait d'un entretien.

Le maître : *"Pourquoi nous parlons de gouttes, d'éléments...?"*

Un élève : *"D'abord on voulait savoir de quoi est formée la vapeur."*

Le maître : *"La vapeur seulement ?"*

Un élève : *"Non, l'eau..."*

Claire : *"On voulait savoir de quoi est formée l'eau."*

Le maître : *"Dis-le, Claire !"*

(4) Jean-Claude GENZLING, Daniel RIBER. "La modélisation à l'école élémentaire". Document interne INRP. 1988.

Claire : "L'eau est formée de petites, de minuscules particules."

l'eau est formée de minuscules particules ; elles ont les mêmes propriétés que l'eau

La phrase de Claire peut être considérée comme la première hypothèse fondant un modèle particulaire.

Les enfants sont capables de considérer un liquide comme un ensemble de microéléments, mais ils **attribuent spontanément à ces éléments les propriétés macroscopiques du liquide** ⁵.

Un élève : "*Elles (les particules) n'ont pas forcément la même taille.*"

Un élève : "*C'est comme si c'était un puzzle, il n'y a pas de pièces qui sont pareilles.*"

Un élève : "*Moi je pense qu'il y en a de plus grosses que d'autres, car il y a des jours, le liquide a diminué plus que d'autres.*"

L'analogie entre eau et puzzle, et particules et pièces du puzzle est frappante. Les variations de la vitesse d'évaporation sont reliées par les élèves à la grosseur des particules qui s'envolent et non pas à leur nombre. Les élèves ne disposent d'aucun indice qui leur permettrait de penser que les particules sont identiques et que leurs caractéristiques restent invariables au cours d'une transformation physique.

La notion de particule (au sens du physicien) demande un changement de point de vue, **une rupture avec les représentations spontanées.**

Elle doit donc faire l'objet d'un apprentissage.

Nous ne pensons pas que cette difficulté soit un obstacle suffisant rendant la construction et l'utilisation de modèles particuliers impossibles. Au contraire de telles constructions devraient peu à peu permettre l'acquisition de la méthode (la modélisation) et de la notion de particules.

la particule conçue par les élèves est différente de celle du physicien

La phrase (P1) de Claire fonde l'existence des particules ; il faut encore leur attribuer quelques propriétés.

Le maître : "*Qu'est-ce qu'elles font ces particules ?*"

Un élève : "*Elles montent (à la surface du liquide).*"

Un élève : "*Elles s'envolent...*"

Un élève : "*Elles sont mouvementées.*" (en mouvement)

Un élève : "*Elles se déplacent..., elles ont agitées...*"

Le maître : ... "On peut penser qu'elles sont agitées tout le temps."

Cette phrase (P2) sera la deuxième hypothèse.

L'examen attentif des courbes de la figure 1 met en évidence une légère augmentation de la vitesse d'évaporation lors de l'établissement du chauffage dans la salle de classe.

(5) J. PIAGET, B. INHELDER. **De la conservation à l'atomisme. Le développement des quantités physiques chez l'enfant.** Neuchâtel. Delachaux et Niestlé. 1968.

Le maître : ... "La chaleur, qu'est-ce qu'elle a bien pu faire ?"
Pierre : "Les agiter encore plus."

Cette idée, formulée ainsi : "si on chauffe l'eau, les particules s'agitent davantage" sera la troisième hypothèse (P3).

- Les phrases précédentes ne sont que des hypothèses

Il est important que les phrases précédentes (P1, P2 et P3) gardent dans l'esprit des enfants un caractère hypothétique. Elles définissent une représentation de la réalité et non pas la réalité elle-même.

Le maître : ... "Est-ce que ce sont vraiment des indications sur le liquide ?"

Pierre : "Non, ce sont des soupçons."

Un élève : "Des explications possibles."

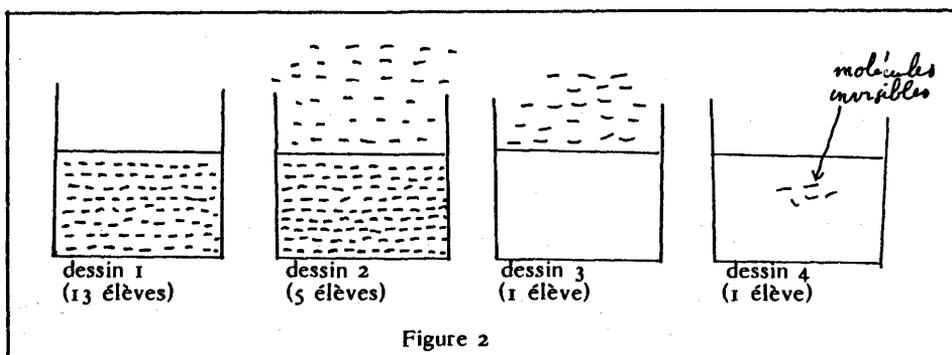
Le maître : ... "Comment on pourrait transformer par exemple la première phrase pour dire qu'on est pas sûr de ce qu'on dit ?"

Camille : "Un liquide est peut-être formé de minuscules particules."

- Représenter les hypothèses dans un langage graphique sera une aide importante pour les élèves.

Dans un souci de clarté, pour lever les doutes ou les ambiguïtés éventuelles, on peut demander aux élèves de traduire les hypothèses dans un langage graphique convenable et de soumettre les dessins (ou les schémas) les plus représentatifs à la discussion du groupe de classe.

Voici à titre d'exemple la reconstitution des représentations de P1 (figure 2).



Les élèves représentent tous les modèles, soit par des points, soit par des petits traits : à l'évidence ils n'attribuent aucune forme particulière aux molécules.

Quant à la représentation de P2, la plupart des enfants la représentent par le schéma ci-dessous (figure 3).

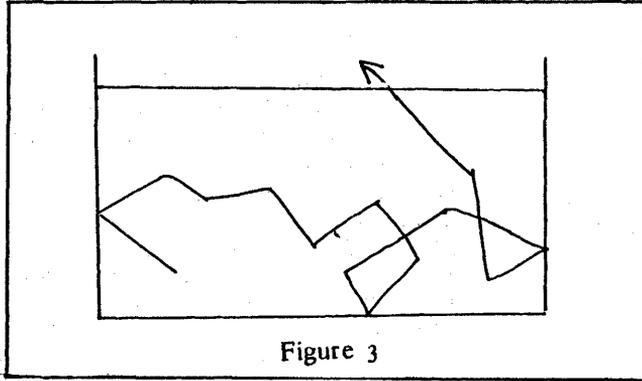


Figure 3

En fait ils font l'analogie avec une balle qui rebondit sur les parois (du gymnase) ou contre une autre balle.

En ce qui concerne P3, on obtient les représentations suivantes (figure 4).

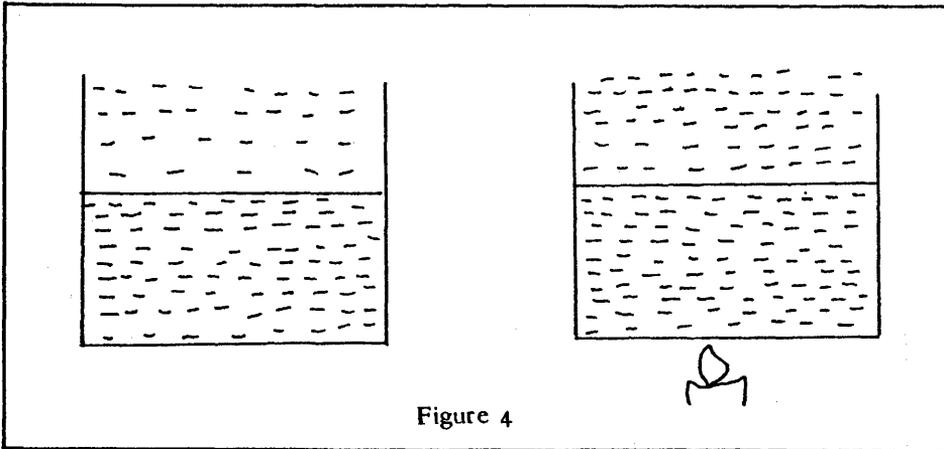


Figure 4

Mais d'autres élèves lient l'agitation moléculaire à la longueur du trajet.

Camille : "Quand il y a la flamme, les molécules sont plus agitées, donc elles sortent, mais elles ont aussi beaucoup plus de chemin."

Les dessins produits par ces élèves sont du type suivant (figure 5) :

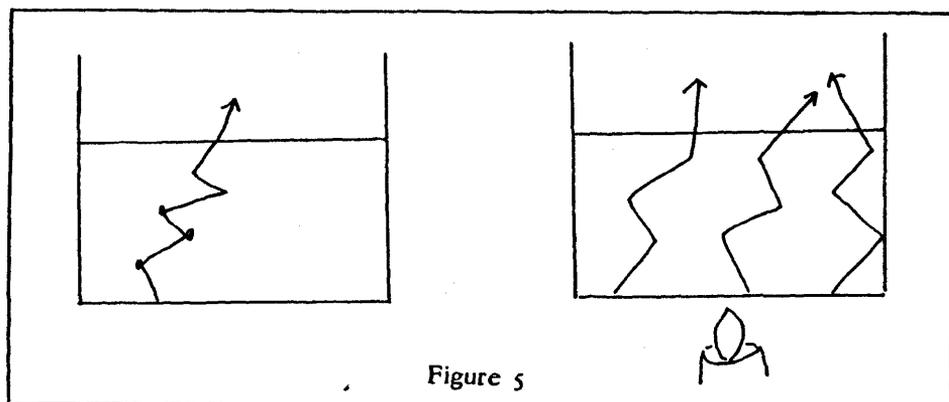


Figure 5

La phase de traduction des hypothèses en dessins ou schémas demande à chacun de s'interroger sur les relations spatiales, temporelles... qui relient les objets représentés.

La phase de lecture collective, quant à elle, peut permettre aux élèves de prendre conscience d'interprétations différentes.

Ces phases sont utiles aussi pour le maître : elles lui permettent de pointer les représentations enfantines, de connaître les difficultés rencontrées par les enfants (en particulier sur le plan opératoire) et les modes de raisonnement dont ils sont spontanément capables. Les images sont prégnantes ; on peut penser qu'elles peuvent se substituer aux phrases et servir de support à la pensée.

- Interprétation (explication) du phénomène d'évaporation à l'aide du modèle précédent

Le modèle paraît opératoire pour la plupart des élèves ; citons simplement l'interprétation de l'une d'entre eux.

Claire : "La quantité d'eau diminue parce que les particules en remuant se cognent, rebondissent et sortent de l'eau. Quand on les chauffe, elles remuent plus, se cognent plus, rebondissent plus et sortent plus."

2.2. Le maître propose aux élèves une partie des hypothèses fondant le modèle

Les élèves devront s'approprier ces hypothèses pour interpréter (ou expliquer) un phénomène ou un aspect d'un phénomène. Elles peuvent être complétées par des hypothèses imaginées par les enfants. On peut mettre cette démarche en oeuvre à l'école élémentaire lorsque les enfants ne disposent apparemment d'aucune représentation opératoire leur permettant de résoudre le problème auquel ils sont confrontés (interprétation d'un phénomène physique par exemple).

Nous avons rencontré ce cas au Cours Moyen lors de l'étude

en l'absence de représentations spontanées, le maître propose un modèle

de la solidification de l'eau ⁶. Une démarche analogue a été utilisée au Collège en classe de quatrième ⁷

• Hypothèses fondant le modèle

Il s'agit d'interpréter la solidification de l'eau, le maître ne peut appuyer la construction d'un modèle explicatif sur aucun modèle "spontané". Il va donc provoquer cette construction en proposant aux élèves une première hypothèse à vrai dire fondamentale.

Le maître : "Pour comprendre ce qui se passe lorsque l'eau se transforme en glace, on pourrait imaginer que l'eau est formée de minuscules grains d'eau".

Après avoir précisé le sens de "minuscules", il poursuit :

"On va supposer que ces grains ont tous la forme de billes".

Il invite ensuite les élèves à rechercher quelles pourraient être les autres caractéristiques de ces grains.

Voici les propriétés proposées par le groupe classe après discussion :

- ils ont tous la même forme,
- ils ont tous le même volume ; ce volume ne change pas,
- ils ont tous la même masse,
- ils sont incassables et indéformables (comme les billes),
- les grains d'eau se déplacent les uns par rapport aux autres.

On remarquera que les enfants sont invités à assimiler les grains d'eau à des billes (raisonnement par analogie).

Contrairement à l'évaporation qui peut suggérer que l'eau "s'envole par petites parties", la solidification n'induit aucune représentation de ce type et l'hypothèse décrivant l'eau comme un ensemble de grains n'est pas acceptée d'emblée par tous les enfants.

Un élève : "Quand on rentre dans l'eau, on ne voit rien."

Certains enfants pensent aussi qu'il y a des bulles d'air parmi les grains d'eau, ce qui oblige le maître à préciser son hypothèse initiale (l'eau est uniquement formée de minuscules grains...).

D'autres élèves enfin sont préoccupés par les grains eux-mêmes.

Un élève : "Et dans ces grains, qu'est-ce qu'il y a ?"

Un élève : "Il peut y avoir des bulles d'air encore plus petites que les grains d'eau dans les grains d'eau."

un raisonnement
par analogie est
souvent nécessaire

(6) Jean-Claude GENZLING, Daniel RIBER. "La modélisation à l'école élémentaire (partie II)." Document interne INRP-DP1. 1988.

(7) OTexte de Noten se reportera à l'article de Alain CHOMAT, Claudine LARCHER, et Martine MEHEUT dans ce numéro d'Aster.

- On peut représenter l'eau à l'aide des hypothèses précédentes

La figure 6 donne une telle schématisation. Pour dessiner des grains tous identiques, les enfants utilisent soit un compas, soit un normographe, soit encore un gabarit.

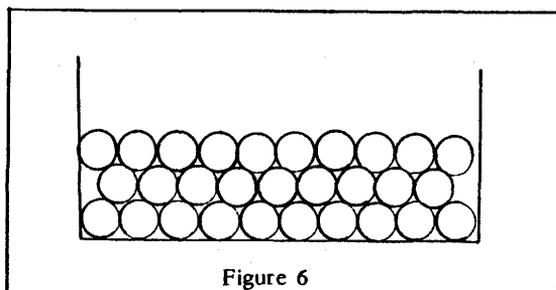


Figure 6

Le maître : "Qu'y a-t-il dans les espaces entre les grains ?"

Julien : "Des petites bulles d'air."

Arthur : "Si on imagine que l'eau est uniquement formée de minuscules grains d'eau, cela n'est pas possible."

Un autre élève : "Il ne peut rien y avoir."

- Interprétation de la solidification de l'eau

Les enfants disposent des phrases établies au cours de l'étude du phénomène.

Lorsqu'on solidifie de l'eau :

- on obtient encore de l'eau ;
- la masse de l'eau reste pareille ;
- le volume augmente ;
- la température de l'eau diminue.

Ils disposent aussi des phrases constituant le modèle. Ils doivent exécuter la tâche suivante : "représente la glace obtenue par refroidissement de l'eau contenue dans une boîte".

Avant de répondre, Julien provoque un court entretien ; en voici l'extrait le plus significatif :

Julien : ... "Quand on a transformé de l'eau en glace, on a vu que la glace avait plus de volume et là on vient de voir que les grains restaient pareils ; il y a forcément autre chose que les grains."

Un autre élève : "Je ne suis pas d'accord !"

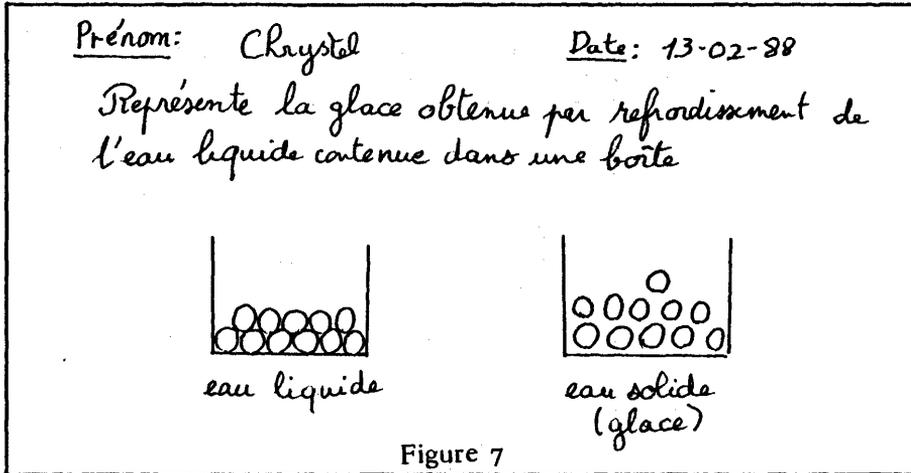
Le maître : "Pourquoi tu n'es pas d'accord ?"

L'élève : "Parce que l'on a dit que l'eau est formée uniquement de minuscules grains d'eau, il y a seulement des grains, donc il n'y a rien d'autre avec (les grains)."

Le maître : "Oui, il faut donc imaginer quelque chose à propos de ces grains ; on sait qu'ils ne peuvent pas augmenter de volume, donc il faut imaginer autre chose..."

Résultats de l'exercice :

La figure 7 reproduit le travail d'un élève.



Près de 50% des élèves utilisent correctement le modèle : ils écartent les grains tous en conservant leur nombre. 25% des élèves répondent en écartant les grains, mais ne conservent pas leur nombre (cela est surprenant dans la mesure où ces enfants savent que la masse de l'eau se conserve au cours de la solidification).

Le reste des élèves, soit ne répond pas, soit dessine un nombre quelconque de grains non écartés.

Nous considérons ces résultats comme encourageants, car ils établissent que la démarche suivie (il convient cependant de rester prudent) n'est pas inadaptée aux capacités opératoires des élèves du Cours Moyen. La suite de ce travail nous renforcera dans notre conviction.

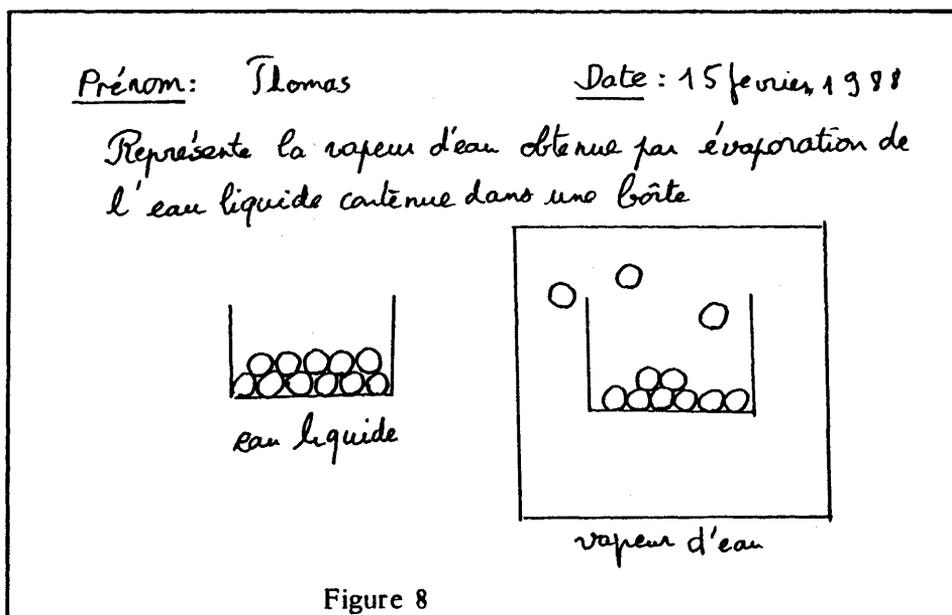
Une discussion collective clôt l'exercice : on vérifie si le dessin de Christel (dessin correct) est en accord avec les deux groupes de phrases marquées au tableau. Certains élèves prennent conscience alors seulement de la nécessité de conserver le nombre de particules. Un élève s'aperçoit que : "les grains ne se déplacent pas dans la glace gelée."

Cette phrase devient : "les grains d'eau se déplacent seulement dans l'eau liquide."

- Le même modèle permet d'interpréter l'évaporation

Le maître demande aux élèves de représenter la vapeur d'eau obtenue lorsque l'eau contenue dans un récipient s'évapore en tenant compte du modèle et de ce qu'on sait de l'évaporation. Aucun entretien ne précède l'exercice.

Près de 70% d'élèves utilisent cette fois-ci le modèle correctement. La figure 8 montre le dessin produit par un élève appartenant à ce groupe.



20% des élèves "éparpillent" les grains d'eau en ne conservant pas leur nombre (dans deux cas ils dessinent 12 grains au lieu de 11...).

Les autres ne répondent pas.

le même modèle permet d'interpréter la solidification et l'évaporation

Le même modèle permet d'interpréter deux phénomènes très différents. Il établit la conservation de la substance : les mêmes grains d'eau constituent la vapeur d'eau (ou mieux l'eau vapeur), l'eau liquide et l'eau solide ; il permet aussi de prévoir que la vapeur d'eau a la même masse que l'eau liquide qui s'est évaporée.

Le maître : "Quelle serait la masse de l'eau vapeur ?"

Les élèves : "11 fois m." (m désigne la masse d'un grain d'eau).

Malheureusement la vérification expérimentale de la conservation de la masse au cours de l'évaporation est difficile. Aucun enfant ne met d'ailleurs ce résultat en doute.

- Le modèle possède un fort pouvoir structurant

un tableau de comparaison

On peut récapituler, dans un tableau de comparaison, les hypothèses supposées vraies pour l'eau et les hypothèses que les enfants imaginent pour interpréter les états gazeux et les états solides de l'eau.

Ces dernières sont obtenues, soit en conservant les hypothèses se rapportant à l'eau liquide, soit en transformant ces mêmes hypothèses.

La figure 9 représente cette récapitulation.

Prenom: Julien

Date: 15/02/88

L'EAU

E A U LIQUIDE	E A U SOLIDE (glace)	VAPEUR D' E A U
formés de grains d'eau	même chose	même chose
nombre de grains : n	idem	idem
max d'un grain m	idem	idem
forme d'un grain: bille	idem	idem
les grains sont incassables	idem	idem
les grains sont indéformables	idem	idem
chaque grain garde le même volume	idem	idem
distance entre deux grains: d_2	d_2 est plus grand que d_1	d_3 est plus grand que d_2
les grains peuvent se déplacer	Les grains ne se déplacent pas	il se redéplacent
les grains s'attirent.	Les grains s'attirent plus +	Les grains ne s'attirent plus

Figure 9

On remarquera une nouvelle hypothèse (ligne 10 du tableau) qui a été établie avec les élèves au cours d'un entretien préalable.

2.3. Conclusions

Les deux démarches explicitées en 2.1. et 2.2. sont très différentes.

La première donne une grande place aux modèles spontanés des élèves. Le modèle n'est pas imposé d'emblée. La notion de particule émerge, chargée d'un ensemble de représentations qu'il est difficile de faire évoluer : les particules des enfants ne peuvent pas être assimilées aux particules du physicien et l'hypothèse de leur identité n'est pas proposée spontanément.

deux démarches,
deux modèles

Mais le modèle tel qu'il est permet d'interpréter le phénomène pour lequel il a été construit.

La seconde propose aux élèves un ensemble d'hypothèses qui a priori cernent mieux la notion de particule (elles sont identiques dès le départ). Cette caractéristique est importante car elle permet d'expliquer la conservation de la substance et la conservation de la quantité de substance (mal perçue dans le 1er cas).

A ce point de vue cette démarche paraît préférable, mais soulignons que la notion de particule construite ici est aussi chargée de représentation : citons Emmanuel qui explique ainsi le caractère "solide" de la glace.

Emmanuel : *"A mon avis les grains durcissent, à cause du froid, ils deviennent durs."*

Les grains d'eau ont conservé implicitement une propriété de l'eau liquide. Ce sont encore des particules piagétienne, c'est-à-dire comme les conçoivent les enfants, au moment où ils commencent à formuler des idées sur la structure de la matière et sa conservation à travers ses changements d'état.

3. UN MODELE PERMET DE RAISONNER ET DE PREVOIR

La construction d'un modèle et ses premières utilisations sont en général liées à sa fonction explicative.

C'est cependant son caractère prévisionnel qui apparaît comme fondamental aux yeux du scientifique. Ainsi les modèles mathématiques (nos anciennes lois) permettent de prévoir une situation. Cette mise en relation met en oeuvre un raisonnement déductif.

un modèle permet de raisonner

Les modèles qualitatifs qu'on peut construire au Cours Moyen (et au Collège) présentent le même intérêt. Les pédagogues trouvent là des situations favorables où l'enfant peut manier des outils mathématiques (relation de proportionnalité...) ou logiques (implication...) et construire, et exercer ses facultés de raisonnement (raisonnement hypothético-déductif).

Ajoutons qu'une activité de modélisation menée jusqu'à son terme trouve sa conclusion dans une activité d'expérimentation ayant pour but la vérification de la relation prévue.

Reprenons à titre d'exemple le cas de l'évaporation (cas exposé dans le paragraphe 2.1.)

3.1. Un remodelage important du modèle

Les élèves se représentent les particules d'eau comme des micro-objets (microgouttes) qui ont des formes, des tailles..., différentes. L'hypothèse que les particules d'eau pourraient

être strictement identiques (et incassables) ne s'est jamais imposée à eux. De ce fait une même quantité d'eau peut contenir un nombre variable de particules.

Cette idée, en prise directe avec les représentations enfantines, rend les conclusions de tout raisonnement déductif aléatoires. Cette hypothèse (identité des particules) est donc **proposée par le maître**. Elle est bien acceptée par les élèves dont beaucoup commençaient à prendre conscience des inconvénients de la proposition inverse : le même raisonnement pouvait mener à des conclusions contradictoires selon qu'on pensait que les particules étaient "grosses" ou "petites"...

La phrase (P1) est reformulée ainsi : **l'eau est formée de minuscules particules toutes identiques**. Comme elles subissent de multiples chocs, il aurait fallu supposer qu'elles soient incassables.

... s'il est suffisamment précisé.

3.2. La vitesse d'évaporation dépend de la température

Cette relation a été entrevue par les élèves lors de l'interprétation des courbes de la figure 1.

Peut-on l'établir à l'aide du modèle ?

- Il faut fixer les variables autres que la température

Citons un extrait de la séquence de classe :

Le maître : "Certains avaient pensé que la quantité d'eau qui disparaît peut dépendre de la température du liquide."

Un élève : "Je ne suis pas tout à fait d'accord parce que les récipients n'étaient pas pareils ; ils n'avaient pas la même ouverture." [...]

Le maître : "Vous avez dit qu'il ne faut pas parler en même temps de la température et de l'ouverture du récipient. Ce que je propose, c'est de prendre comme référence les deux récipients qui sont représentés au tableau. Ils ont identiques et ils contiennent la même quantité d'eau (figure 10).

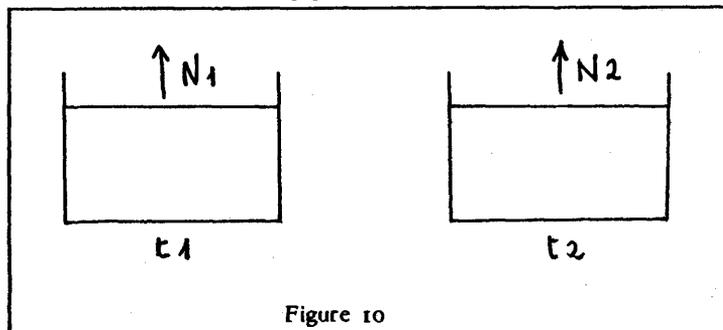


Figure 10

Il y a N_1 particules qui sortent du récipient 1 et N_2 particules qui sortent du récipient 2 (pendant le même temps)."

Un élève : "Mais la température de l'eau est peut-être différente."

Le maître : "Les deux récipients sont dans la même salle, au même endroit, il y a seulement une chose qui change, c'est la température : on va supposer que $t_1 > t_2$."

- Utiliser le modèle pour établir la relation entre la vitesse d'évaporation et la température

Le maître guide le raisonnement des enfants. Sachant que $t_1 > t_2$, ils doivent successivement comparer (en justifiant leur choix) N_1 à N_2 et Q_1 à Q_2 (Q = quantité d'eau qui disparaît).

16 élèves sur 22 justifient l'implication $t_1 > t_2 \Rightarrow N_1 > N_2$ à l'aide de la phrase (P3).

Céline : "Je propose N_1 plus grand que N_2 ."

Le maître : "Pourquoi ?"

Céline : "Parce que la température du récipient 1 est plus élevée, les particules sont plus agitées..."

Par contre six élèves seulement sont capables de justifier l'implication $N_1 > N_2 \Rightarrow Q_1 > Q_2$.

Elle est pourtant la simple traduction à l'aide de lettres d'une phrase déjà écrite au tableau, établie en début de séance. Elle s'énonce ainsi : plus le nombre de particules qui sortent est grand, plus la quantité d'eau qui disparaît est grande. Elle n'est vraie que si on suppose les particules identiques.

et d'établir des relations entre grandeurs

Nous pointons là probablement une grande difficulté : les élèves ne sont à l'aise ni avec les notations, ni avec la signification des lettres, car on ne raisonne plus **directement sur le réel**, mais à l'aide de lettres **signifiant certains aspects de ce réel** (dans les mêmes conditions les enfants sont capables de raisonner à l'aide de nombres...)

Cette activité de représentation n'est pas maîtrisée d'emblée. L'apprentissage du raisonnement déductif nécessite que cet obstacle soit surmonté. On ne peut évidemment prétendre atteindre un tel objectif en un seul exercice.

4. CONCLUSIONS

Les activités de modélisation à l'école élémentaire sont possibles : nous pensons aussi qu'elles sont souhaitables.

Sans sous-estimer les obstacles que doivent surmonter les élèves pour construire ou s'approprier et utiliser un modèle particulaire, soulignons les apports de ces activités de modélisation sur le plan de la pensée et de la méthode.

Elles permettent :

- d'interpréter une transformation physique en mettant en évidence la conservation de la substance et de la quantité de matière,
- de mieux construire certains concepts : par exemple le concept de gaz, de solide...,
- d'organiser ou structurer les connaissances concernant la matière : relier l'état gazeux et l'état solide à l'état liquide en mettant l'accent sur ce qui se conserve (ou ne se conserve pas) lors du passage d'un état à l'autre,
- de prévoir de nouvelles relations entre grandeurs (à vérifier expérimentalement ; c'est cet aspect qui présente le plus de difficultés (apprentissage du raisonnement déductif).

Nous pensons que, dans ce domaine-là, il convient de se fixer des objectifs modestes.

Cette liste, sans être exhaustive (simulation d'un phénomène, par exemple) montre que l'enjeu est considérable : la modélisation joue un rôle central dans la construction et l'organisation des connaissances et de la méthode expérimentale.

Jean-Claude GENZLING
Ecole Normale, Colmar

DE L'INTERRUPTEUR AU RELAIS ELECTRONIQUE, DU RELAIS ELECTROMAGNETIQUE AU TRANSISTOR

Jean-Loup Canal

Dans le domaine de la didactique des sciences, on peut avancer l'hypothèse que l'introduction de la modélisation peut constituer une aide à la construction des connaissances. Il ne s'agit pas de prétendre à la rigueur et à l'efficacité de certains modèles scientifiques, mais de montrer les effets de la modélisation dans l'appropriation des connaissances. Notre hypothèse s'appuie sur le fait que l'une des fonctions du modèle, la fonction explicative, passe par l'analogie. On trouvera ici des exemples où, pour comprendre le rôle du relais électromagnétique, l'interrupteur mécanique servira de modèle, puis le relais lui-même sera un modèle du transistor. Dans ces situations, la notion de modèle est utilisée au sens limité d'outil pour la pensée, réduisant la complexité du réel. On pourra constater comment les élèves d'un cours moyen deuxième année ont pu, par cette aide, intégrer les premiers principes du transistor utilisé en commutation.

une approche en termes de systèmes à l'école élémentaire

Les récents programmes et instructions de l'Ecole élémentaire offrent, dans le domaine des Sciences et Techniques, un certain nombre d'objets ou de phénomènes d'étude nouveaux que les physiciens et technologues ont l'habitude d'aborder, à un autre niveau, par une approche modélisante : la structure de la matière, l'astronomie, la transmission de signaux électriques. Au cours moyen, (les deux dernières années du cycle élémentaire), l'enseignement comprend en particulier l'étude du transistor (utilisé uniquement en commutation) dans le cadre d'une approche de l'électronique, et du relais électromagnétique au sein de l'étude d'électromécanismes. Il nous est apparu que ces deux objets techniques, ces deux systèmes, pouvaient être étudiés par leur fonction d'interface entre deux systèmes, l'un de commande (électrique), l'autre de puissance (ou d'action), comme l'interrupteur à commande mécanique. Dans le cadre d'une pédagogie d'éveil, les élèves d'une classe de CM2¹, face à diverses situations, vont appréhender les fonctions de ces deux outils et avoir d'eux-mêmes recours aux analogies interrupteur-relais puis relais-transistor.

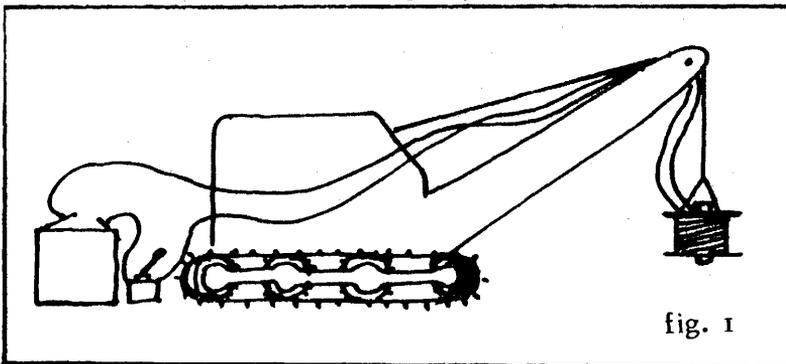
(1) Classe de Michel Prat.

1. L'APPROCHE DU RELAIS ELECTRO-MAGNETIQUE

1.1. L'électro-aimant

Avant d'étudier l'objet technique relais, le maître fait le choix d'analyser d'abord, avec les enfants, la création d'une interaction électromagnétique par le passage d'un courant électrique autour d'un matériau-noyau en fer. Cette étude évitera chez les enfants un obstacle au niveau du rôle de la bobine du relais.

• Présentation d'une grue-jouet



Le maître présente une grue-jouet (figure 1) dont le crochet est absent et remplacé par un électro-aimant. Il fait successivement une série de manipulations sans commentaire :

- le bas de l'électro-aimant touche une pièce de fer (une clef) : cela ne produit aucun effet
- ostensiblement il ferme un interrupteur et renouvelle le contact précédent : la clef reste "accrochée" à l'électro-aimant. Etonnement des enfants.
- il ouvre l'interrupteur : la clef tombe.

E - Ça aimante !!

E - D'habitude un aimant ça aimante tout le temps !

E - C'est un aimant qui fonctionne à l'électricité !

E - En ouvrant, l'aimant se coupe ?

M - Est-ce un aimant ici ?

E - Non, un aimant ça fonctionne tout le temps.

M - Oui, et ici comment pourrait-on appeler ce dispositif ?

E - Un électro-aimant !

M - Comment as-tu trouvé ce nom ? Qui t'en a parlé ?

E - Mon père, et à la télé.

• Fabrication de l'électro-aimant

Ensuite les enfants recherchent les composants de cet électro-aimant et en fabriquent un par groupe (figures 2 et 3). Ils ma-

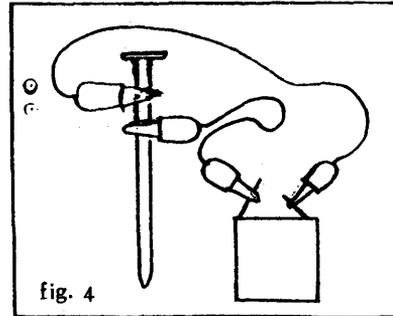
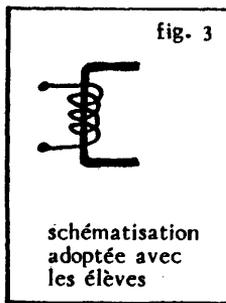
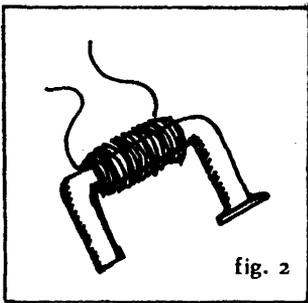
le problème est lancé à partir d'une situation,

que les enfants
analysent

nipulent et déjà des questions apparaissent :

- s'il faut amener le courant au clou (c'est pour eux évident), pourquoi le bobinage est-il en fil conducteur émaillé ? Ils essayent même de construire un aimant en amenant directement le courant à un clou ! (figure 4)

- la nature du matériau à l'intérieur ne fait guère de doute : ce doit être un matériau conducteur. On retrouve un résultat identique sur la nature de ce qui est attiré : c'est un matériau conducteur. Ayant déjà constaté, avec un circuit pile-DEL-eau², que l'eau était conductrice, ils sont fortement déçus en constatant que l'eau n'est pas attirée par l'électro-aimant qu'ils ont fabriqué !



- **Remarque 1** : On aurait pu leur montrer que la faculté d'aimantation de leur électro-aimant dépendait uniquement de la seule bobine : il suffisait de l'approcher d'une boussole. Ils auraient pu rechercher les positions des pôles de la bobine et constater l'inversion de ses pôles par inversion du sens du courant.

- **Remarque 2** : un dispositif intéressant renforce le rapprochement de l'aimant avec la bobine traversée par un courant : une bobine associée à une pile est posée sur un flotteur. L'ensemble s'oriente dans le champ magnétique terrestre. C'est une boussole électrique.

- **Remarque 3** : le rôle du fer doux canalisant les lignes de champ magnétique apparaît en réalisant, avec de la limaille de fer, le spectre magnétique de la bobine seule et de la bobine avec son noyau.

(2) DEL : Diode électro-luminescente

1.2. Elaboration du relais avec une sortie (position travail)

une nouvelle situation-problème...

A partir d'une situation proposée par le maître, et avec des phases tâtonnantes, les élèves vont élaborer avec l'aide du maître un modèle de relais, rapidement concrétisé par une maquette, support matériel du raisonnement. Ils transféreront à cette occasion les acquis sur l'électro-aimant et leurs connaissances du rôle d'un interrupteur.

- On propose aux enfants la situation suivante

Un supermarché a des issues de secours que la clientèle ne doit emprunter qu'en cas de danger. Le gérant décide d'installer une surveillance.

Un premier circuit électrique est constitué de : pile, ampoule, interrupteur ; ce dernier se ferme à l'ouverture de la porte. L'ampoule est dans un local, devant un gardien.

... est décrite aux enfants

Pour des raisons de sécurité, il n'est pas autorisé de mettre un interrupteur parcouru par du 220 volts sur une porte. Donc le circuit contenant l'interrupteur devra être traversé par du 4,5 volts (problème identique à celui de la sonnette électrique de la porte d'entrée alimentée en 24,5 volts).

Il y a aussi un deuxième circuit contenant une alimentation suffisante pour alimenter une sirène, un interrupteur. Quand le gardien voit l'ampoule témoin s'allumer, il doit fermer le circuit contenant la sirène.

On pose alors la question : "Schématise et construis les deux circuits" (réponse figure 5).

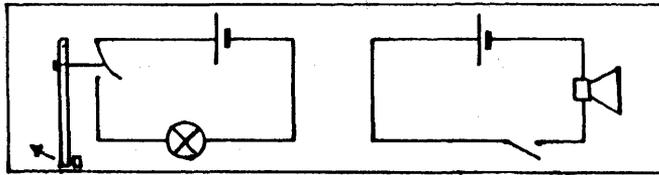


fig. 5

Puis on modifie la situation : le gérant souhaiterait que le gardien travaille à d'autres tâches. Il voudrait donc automatiser le déclenchement de la sirène. Nouvelle question : "Quel montage pourrais-tu lui proposer ?" (réponse figure 6)

le maître a son modèle en tête

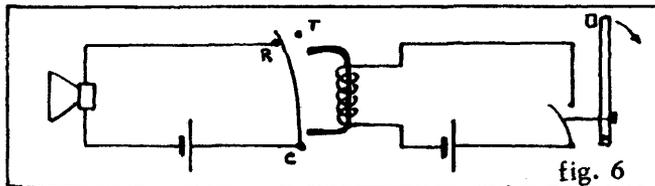


fig. 6

E - On se met par deux ou par trois ?

M - Par trois. Mais avant, qui pourrait me dire rapidement le principe ?

les enfants progressent par tâtonnement en groupes

E - Il y a la porte...

M - Oui et alors... ? Que se passe t-il quand je l'ouvre ?

E - Une ampoule s'allume.

M - Alors, qu'est ce que c'est, la porte ?

E - Une issue de secours !

M - C'est vrai. Mais pour le montage électrique ?

E - Un interrupteur.

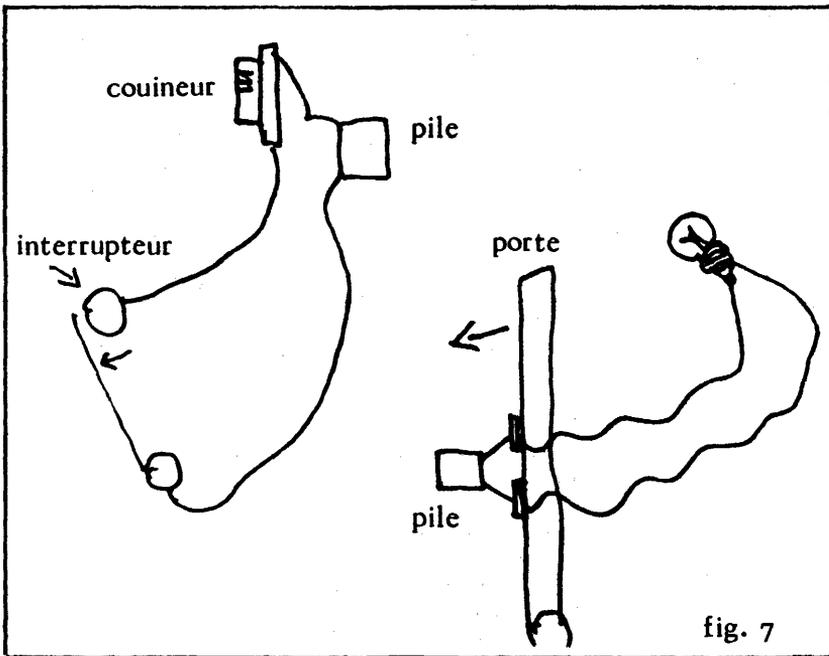
M - Oui, et ensuite ?

E - Alors le monsieur il appuie sur un bouton qui fait marcher la sirène !

M - Bon allez essayer de me dessiner tout ça.

Pour la première situation les enfants, par groupes de trois tentent de représenter le système. Certains dessinent des prises électriques. Le maître précise que le courant de 220 volts est interdit sur les portes : quand il pleut il y aurait des risques. Il leur demande d'utiliser une pile dans la partie correspondante à la porte.

Le dessin de la figure 7 propose un dispositif qui fermerait le circuit de l'ampoule à l'ouverture de la porte ; mais la porte dès l'ouverture buterait sur la pile.



la situation se complique.

M - Je vous ai dit que sur la porte il fallait une faible alimentation pour des raisons de sécurité. La sirène, elle, marche avec du 220 volts.

E - Il faut que ça déclenche quelque chose qui ferme l'alarme.

M - C'est bien ! C'est ce que vous allez faire.

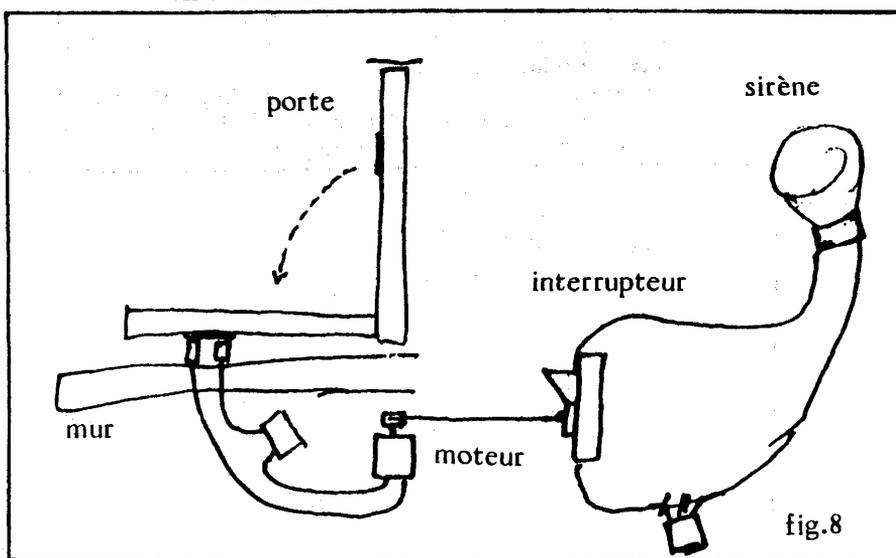
Il écrit au tableau : **"L'ouverture de la porte déclenche un dispositif qui ferme le circuit de l'alarme".**

E - Il faut faire tout en un !

E - L'ampoule ne sert plus à rien.

La réponse à la proposition d'automatisation est l'objet de nombreux tâtonnements. L'un des groupes propose d'utiliser un moteur (figure 8). Les enfants ont repris leur dispositif, celui de la figure 7, en l'améliorant : à l'ouverture de la porte, une plaque métallique fixée à la porte met en communication électrique deux plots fixés sur le mur ; c'est l'interrupteur commandé par l'ouverture de la porte. La pile du circuit d'utilisation avait été oubliée. Le moteur en tournant tire sur une ficelle qui ferme l'interrupteur. Il y a des problèmes pour refaire marcher le circuit...

et les enfants font de nouvelles propositions



Comme les enfants piétinent, le maître les aide un peu.

M - Vous n'avez jamais vu bouger quelque chose quand le courant passe ?

E - Le moteur !

M - Oui et encore ?

E - Il y a le truc avec le fer dedans et ça bouge.

M - Oui, mais comment ça s'appelait ?

E - Un électro-aimant !

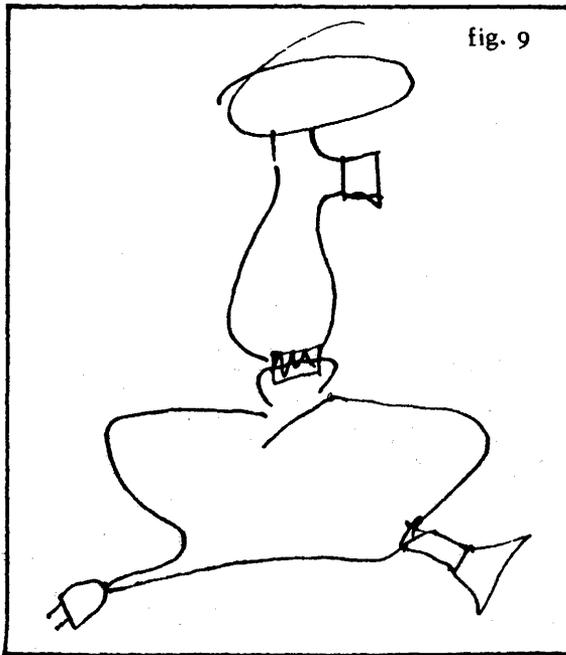
E - Ça aimante le fer (!)

E - Ça peut attirer un bout de fer.

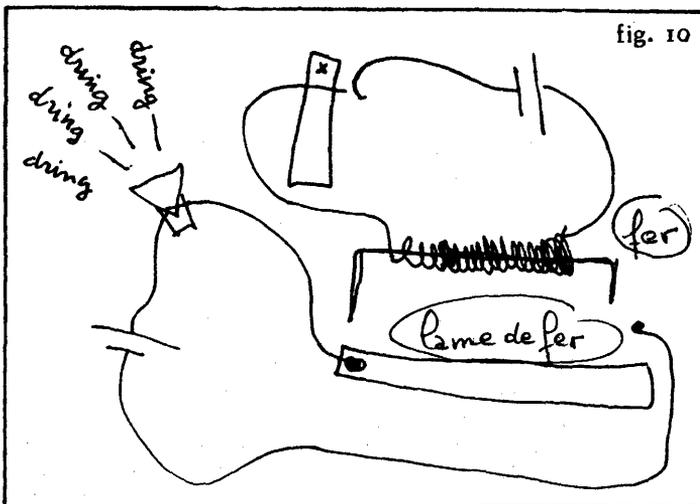
M - Bon maintenant, vous vous débrouillez. Vous pouvez reprendre la fiche que nous avons faite.

Immédiatement le groupe des trois garçons construit un schéma satisfaisant (figure 9) : la porte et son interrupteur n'y sont pas et sont symbolisés par un vague rond. L'alimentation du circuit de la sirène est représentée par une prise.

le maître intervient pour aider



Les autres groupes ont fait des plans corrects avec pour certains une aide légère du maître (figure 10).



Ils conçoivent très bien les deux montages mais ils ont du mal sur le plan technologique à fabriquer l'interrupteur : dans un groupe ils mettent un clou qu'ils voudraient voir tourner au-

la solution commence à apparaître

tour d'une extrémité ; dans un autre ils tiennent à la main une lame de fer mise à leur disposition et ils sont ravis de la voir s'infléchir quand elle est attirée par l'électro-aimant. Ils ne savent pas comment fixer la lame. Le maître leur montre un montage déjà réalisé (figure 11 : il manque la pointe "R" correspondant à la borne "Repos").

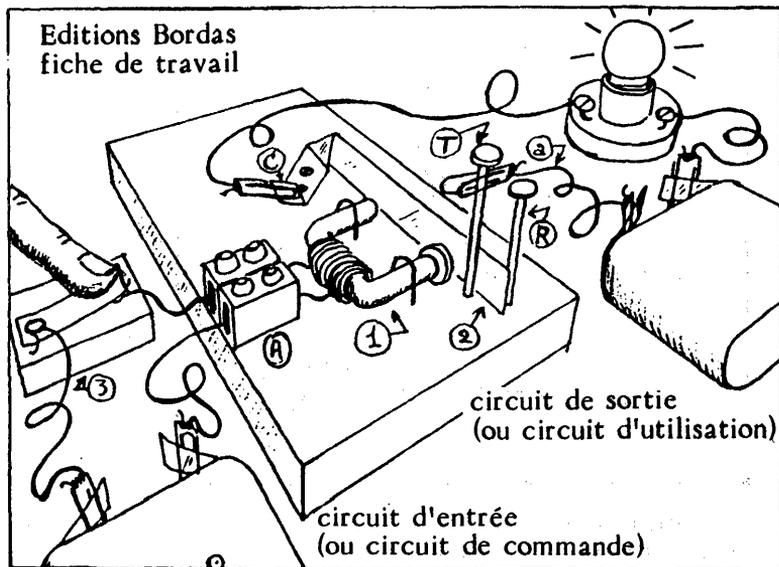


fig. 11

A la fin de la séance, les maquettes de relais sont montées ; elles fonctionnent à peu près correctement : parfois la lame touche la planchette et se bloque, ou bien l'électro-aimant est un peu loin de la lame et ne la déplace pas, la lame touche le clou en fer quand l'électro-aimant travaille et à la coupure elle reste "collée". Pour un groupe le relais marche en position verticale.

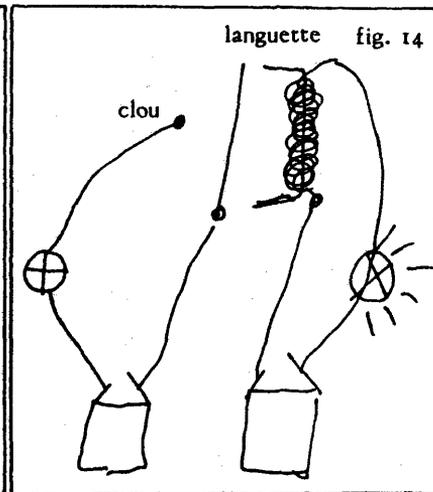
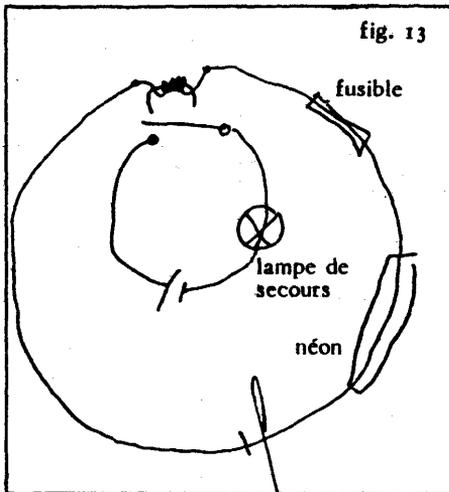
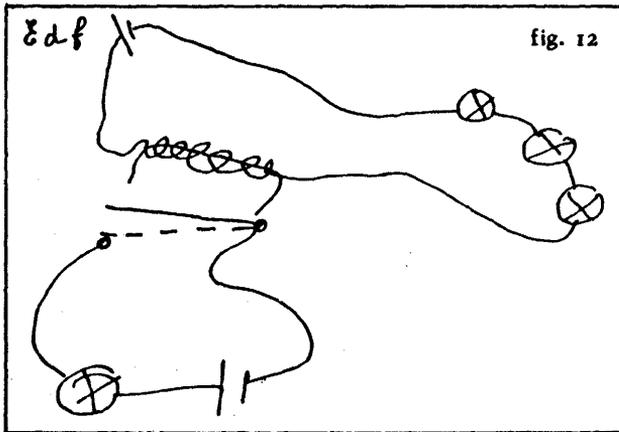
Un groupe s'est trompé : ils ont mis en série le relais et le couneur. Leur schéma était juste...

1.3. Découverte de la position "Repos"

Pour compléter la maquette des enfants et pouvoir la qualifier de modélisation par rapport à l'objet réel que l'on rencontrera peu après, le maître propose une nouvelle situation au cours d'une séance relativement courte : il appuie sur le disjoncteur (le tableau électrique est dans la classe). Une enseigne lumineuse au dessus de la porte, "issue de secours", s'allume immédiatement. Les élèves sont conviés à reproduire le schéma électrique. Deux groupes pensent immédiatement à utiliser le relais ; l'un d'eux propose le schéma de la figure 12. Tous les groupes ont fini en une demi-heure (figures 13 et 14).

la classe a réussi : les maquettes sont construites

un élément de plus dans le problème



Les ampoules en série représentant l'éclairage de la classe poseront un problème au cours de la réalisation.

A ce stade-là, le dispositif se caractérise par :

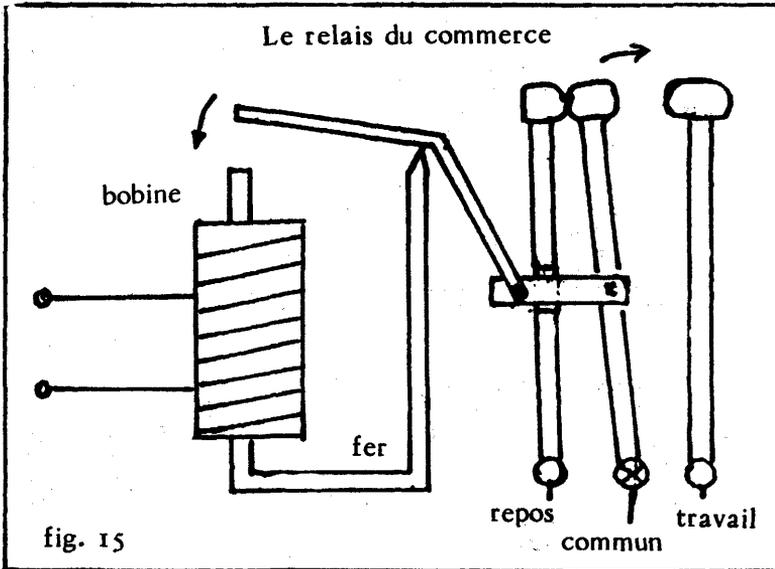
- deux bornes d'entrée pour l'alimentation de la bobine,
- deux bornes à choisir parmi trois pour l'interrupteur du circuit de sortie.

L'ensemble est bien défini, on peut lui attribuer un nom : le relais.

1.4. Le relais du commerce

Les enfants ont constaté des dysfonctionnements sur leurs relais. Ils observent un relais vendu dans le commerce qui a le "mérite" d'avoir un capot transparent. Ils repèrent facilement les deux bornes du circuit d'entrée. Ils réalisent les montages précédents, mais en tâtonnant. S'ils distinguent bien les trois "languettes" métalliques qui permettent les deux positions en sortie, ils ont du mal à comprendre le principe technologique de ce relais : "l'électro-aimant repousse au lieu d'attirer". Le maître dessine le plan de ce relais qu'ils reprennent sur leur cahier (figure 15). Ils auraient pu construire un modèle en carton, maquette animée, inspirée du dessin du maître.

la découverte de l'objet réel



1.5. Conclusion sur ces séances

En un peu moins de six heures, traces écrites et deux évaluations comprises, les enfants ont étudié le relais électromagnétique. Ils l'ont bien assimilé à un interrupteur commandé électriquement, interrupteur ayant deux possibilités de branchement, l'une quand la bobine est alimentée, la position "travail", l'autre quand la bobine n'est pas alimentée, "la position repos".

Chez trois ou quatre enfants, le principe du double circuit ne semble pas totalement acquis. Pour les aider, nous aurions pu monter le système d'alarme de la porte de secours en utilisant deux alimentations d'énergie électrique totalement différentes, une pile de 4,5 volts dans le circuit de commande par exemple, et une batterie de voiture de 12 volts dans le circuit commandé.

Remarque : le schéma codifié du relais électromagnétique n'a pas été employé : nous l'avons jugé trop abstrait et risquant de créer de nouveaux obstacles à ce niveau de la progression.

1.6. Compléments possibles

Arrivé à ce stade de l'étude, le maître a choisi de poursuivre vers l'analyse du transistor plutôt que de chercher à faire fonctionner sans faille le modèle construit par les enfants. D'autres situations auraient permis ce transfert. Elles peuvent aussi servir de situation de départ en lieu et place de celle utilisée. C'est pourquoi il est intéressant de proposer les trois compléments suivants à des enseignants de l'école élémentaire, compléments possibles avec des enfants du collège. Si le

l'ensemble du système a été étudié

d'autres situations possibles...

premier conserve au relais sa fonction de commutation, les deux derniers présentent une nouvelle utilisation du relais et permettent de découvrir qu'un même objet technique peut avoir plusieurs fonctions.

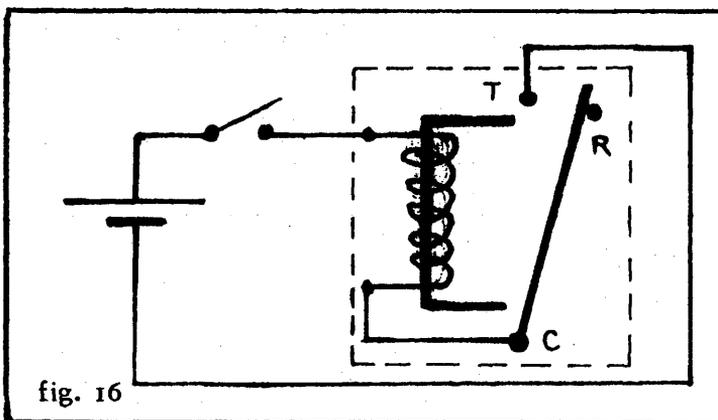
- Pilotage d'un moteur électrique

Comment inverser le sens de rotation d'un moteur à courant continu ? Pour une commande manuelle, un interrupteur quadripolaire suffit. Un relais à doubles contacts permettrait une commande électrique mais avec un inconvénient majeur : le moteur tournerait dans un sens ou dans l'autre mais ne serait jamais au repos. L'emploi de deux relais simples lève cet obstacle. Ce montage est utilisé dans le pilotage des moteurs électriques avec un ordinateur (on trouvera des schémas de ces montages dans toute bonne littérature).

... utilisables
comme transfert...

- Dispositif de la figure 16

Ce montage dessiné au tableau, il faut déterminer ce qui se passe. Son interprétation ne pose en général aucun problème : on n'utilise plus la fonction de communication du relais mais sa fonction de vibreur.



- Commande d'arrêt de l'autobus

Posons le problème : dans l'autobus urbain, le voyageur demande au conducteur de stopper au prochain arrêt en appuyant sur un bouton poussoir. Un signal lumineux s'allume et reste allumé quand le bouton poussoir est relâché. Les autres voyageurs et le conducteur sont ainsi prévenus : un nouvel appui sur le bouton poussoir est sans effet. Le montage de la figure 17 est une solution parmi d'autres. C'est la même source d'énergie qui transmet l'appel et qui alimente le signal lumineux. Un relais à double contact peut dissocier l'unique circuit précédent en deux circuits, l'un pour mémoriser l'appel, l'autre pour alimenter le signal lumineux (figure 18). Le

... ou en formation
de maîtres

relais a donc ici une fonction mémoire.

Remarque : une solution électronique peut être proposée à des élèves du collège. Ils verront ainsi qu'une même fonction peut être remplie par des objets différents. Un bref courant dans la gâchette du thyristor (TILS 106) ferme le circuit principal (figure 19)

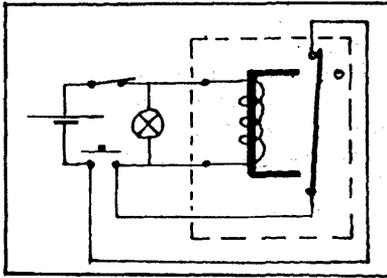


fig. 17

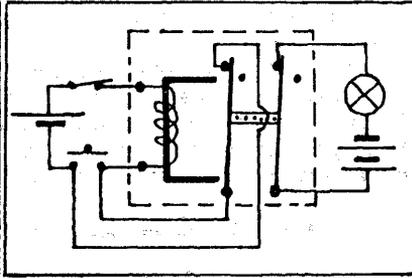


fig. 18

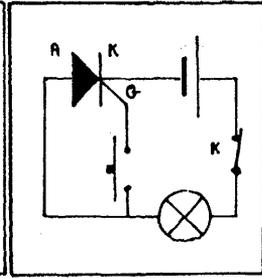


fig. 19

2. LE TRANSISTOR, UN RELAIS ?

Poursuivant la logique de sa progression, le maître va introduire l'étude du transistor en l'utilisant dans des conditions où il est saturé : il fonctionne donc uniquement en commutation. Par ailleurs, respectant le modèle qu'il s'est fixé du transistor comme interface entre deux systèmes, le maître n'abordera avec les enfants que la fonction d'usage de cet objet technique ("à quoi sert-il ?"), laissant de côté la fonction organique ("comment est-il fait ?"), sans intérêt à ce niveau d'enseignement.

L'approche par situation-problème de l'utilisation du transistor va conduire les enfants à l'analogie avec le relais étudié précédemment, tout en reconnaissant la différence fondamentale entre eux au niveau de l'intensité du courant électrique dans le circuit de commande.

Ces séances seront l'occasion d'introduire des notions comme celles de capteur et d'actionneur (ou effecteur) que l'on retrouvera par la suite lors du pilotage par ordinateurs.

2.1. Un détecteur d'inondation

Le maître présente le problème sous la forme d'une histoire fictive à propos de laquelle les enfants ne sont pas dupes...

M - Le tuyau de la machine à laver s'est débranché et l'eau a coulé une partie de la nuit !

E - C'est une blague !

un nouvel objet
en continuité
avec le précédent

on repart sur un problème

M - J'en ai assez et je ne veux plus que cela recommence. Cet après-midi (c'est samedi matin), quand nous ferons un nouveau lavage avec la machine, je dirai à mon fils de se mettre devant et quand il verra l'eau couler par terre il faudra qu'il appuie sur un bouton d'alarme. Nous, à l'étage, nous entendrons et viendrons tout de suite ! Qui me fabrique ce circuit d'alarme ?

Un élève dessine rapidement un schéma au tableau : pile, couineur, interrupteur, pile.

E - Votre fils ne voudra pas rester !

M - C'est vrai... Vous ne pourriez pas m'aider ?

Brouhaha d'acquiescements, avec des réflexions comme "l'eau c'est un interrupteur, c'est conducteur".

- Recherches en groupes : propositions, premières expérimentations

Tous les groupes ont des propositions à faire :

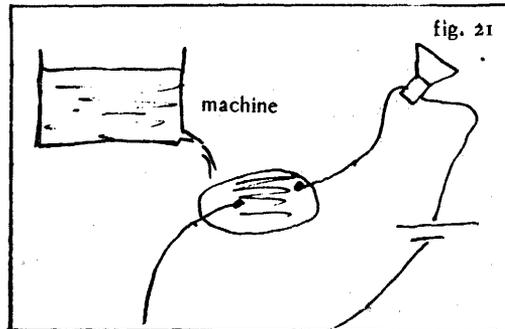
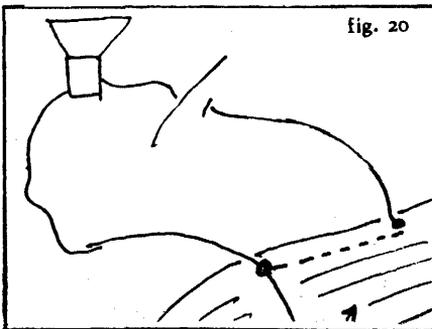
1 - mettre un bouchon sur la lamelle de l'interrupteur tenu à l'envers ; quand l'eau monte, le bouchon monte aussi et entraîne l'interrupteur qu'il ferme (un groupe),

2 - le courant d'eau repousse l'interrupteur et le ferme (figure 21) (un groupe),

3 - l'eau est conductrice et le circuit se ferme avec un montage simple : pile couineur (figure 20) (trois groupes),

4 - l'eau est conductrice et ferme un circuit de commande d'un relais.

et les enfants cherchent par groupes



Le maître demande aux deux premiers groupes d'améliorer leur dispositif, il veut qu'il se déclenche à la première flaque d'eau. Ces deux groupes adoptent la proposition numéro 3. Les couineurs distribués ne sont pas des buzzers piézoélectriques qui, trop sensibles, siffleraient légèrement avec l'eau. Les enfants sont surpris de ne pas avoir un résultat positif :

E - L'eau gêne le courant !

E - Ça le ralentit.

E - Il faudrait deux piles.

Avec deux et trois piles, les essais ne donnent aucun résultat. Le montage avec le relais n'a pas plus de succès.

• Analyse des résultats

Le groupe ayant travaillé sur le relais présente son expérience. La classe discute sur les causes de l'échec et les rapproche des résultats obtenus par les autres groupes : le maître leur fait prendre conscience que le courant passe un peu dans l'eau, mais qu'il est gêné. Si le relais ne se déclenche pas, c'est que le courant est trop faible dans la bobine pour attirer la languette en fer. Il faudrait donc quelque chose de plus sensible qui fermerait le circuit d'utilisation. Il faudrait qu'un courant faible dans le circuit de commande puisse fermer le circuit de l'alarme.

M - Je vais vous donner ce quelque chose qui, peut-être, permettra de faire ce que nous voudrions. (Il montre le transistor BD 135 monté sur son support)

E - C'est un transistor !

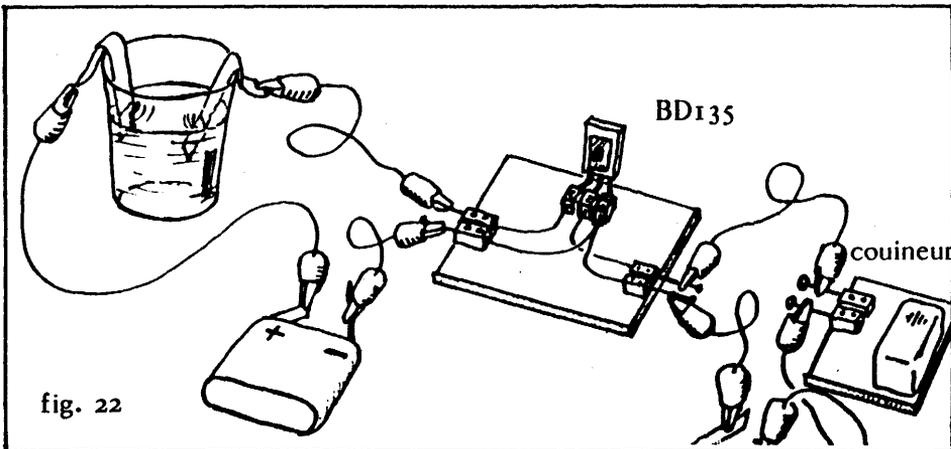
M - Comment le sais-tu ?

E - J'ai une boîte électronique à la maison.

Le maître reprend le dessin qui était au tableau avec le relais. Il efface le relais, dessine le transistor avec ses entrées et sorties. Il insiste sur la polarisation du transistor et sur l'obligation de bien positionner les deux piles des deux circuits. Les enfants montent sans problème ce montage (figure 22).

on propose, puis on analyse les diverses solutions

Introduction par le maître du transistor.



2.2. Le corps est conducteur

Le maître leur demande de remonter rapidement le montage précédent mais en plaçant en sortie un couineur piézoélectri-

que. Deux groupes le font sonner avant d'avoir introduit les deux languettes métalliques dans l'eau (un enfant tenait une languette métallique dans chaque main) ! Ils sont bien sûr très étonnés ; l'un continue sans s'y attarder, l'autre plus accroccheur voudrait comprendre :

- *on fait de l'électricité ?*

aux propriétés
étonnantes

- *on est conducteur ? Le courant passe dans mon corps ? (avec de l'inquiétude dans la voix).*

L'observation est renvoyée aux autres groupes. Ils réalisent une chaîne de vingt personnes : le courant d'entrée qui les traverse toutes déclenche la sirène du circuit de sortie ! Le maître en profite pour leur parler des dangers de l'électricité du secteur.

Au milieu de la chaîne, une des élèves a la main tendue. Sa voisine "pianote" sur la paume ; la sirène reproduit très fidèlement le rythme de l'enfant et elle le reproduit instantanément, ce que ne manque pas de relever quelques enfants : "*le courant va très vite !*"

Remarque 1 : Tous les montages avec transistor proposés ici sont réalisés en séparant au maximum les deux circuits : en particulier chacun possède sa pile. Sur les montages professionnels, il est fait l'économie d'une alimentation moyennant bien sûr quelques transformations. A l'école élémentaire, ce type de montage serait prématuré.

que l'on peut explorer
diversement

Remarque 2 : Nous n'avons pas proposé le schéma théorique du transistor. Nous n'étudions pas son principe de fonctionnement : comment justifier les noms de "base", "collecteur" et "émetteur" ?

2.4. Utilisation de la fonction amplificatrice du transistor

Dans le cas du détecteur d'inondation, les enfants ont constaté une variation du son produit par le buzzer suivant que les deux pièces métalliques sont plus ou moins proches. Ils relient ce phénomène à la résistance de l'eau. Mais, a priori, aucun ne s'étonne de ces variations : un interrupteur est soit ouvert soit fermé mais il ne peut être plus ou moins fermé ! Donc, dans certains domaines d'utilisation, le transistor transmet, en l'amplifiant, une faible modulation d'entrée dans le circuit de sortie.

ou même poursuivre
plus loin

Cette approche, à la limite des programmes, devra rester très simple et courte, mais pourquoi priver les enfants d'une première écoute, aussi rustique soit-elle, sûrement dans une langue étrangère, sur un "poste-radio" rudimentaire (une bobine de seize spires, une diode à pointe, un transistor AC 127) construit de leurs propres mains ?

* Un signal radio, invisible, issu de l'antenne de l'émetteur, se propage dans l'air (et dans le vide : communication radio avec les cosmonautes sur la lune), et à travers les murs de briques et de pierres.

- * Ce signal est arrêté par des écrans métalliques.
- * Ce signal radio se transforme, dans l'antenne du récepteur, en signal électrique qui, à son tour, se transforme en signal sonore dans l'écouteur.
- * Si le signal électrique est trop faible, on peut l'amplifier avec un transistor et une source d'énergie électrique supplémentaire. Dans ce dernier cas, c'est la fonction d'amplification du transistor qui est utilisée.

3. LES CARACTERISTIQUES DE CETTE DEMARCHE DE MODELISATION

En proposant aux enfants cette progression et la résolution de ces situations-problèmes, le maître a cherché à induire chez eux une démarche de modélisation où l'on peut reconnaître deux dimensions. La première consiste en un raisonnement par analogies et différences : face à divers objets ou phénomènes, en dépassant le simple aspect descriptif, les enfants ont reconnu les caractéristiques de la situation qui leur permettaient de transférer leurs acquis, mais la mise en évidence de conditions d'utilisation différentes implique une différence entre les solutions aux problèmes. La seconde dimension est celle qui fait partir du concret pour mener peu à peu à l'abstrait : l'aspect de plus en plus complexe (et miniaturisé) des objets techniques n'autorise plus d'interrogations simples sur le comment de la fonction, que l'on aborde alors par une étude simplifiée, une maquette par exemple.

Une telle démarche est bien modélisante, que l'on conçoive les modèles scientifiques comme des structures emboîtées ou comme l'évolution d'une représentation par complexifications successives.

3.1. Analogies et différences

Dans "Gödel, Escher et Bach" ³, Douglas Hofstadter définit deux capacités qui, d'après lui, caractérisent l'intelligence :

- * trouver des similitudes entre des situations malgré les différences qui peuvent les séparer ;
- * établir des distinctions entre des situations malgré les similitudes qui les rapprochent

Mais comparer, rapprocher des modèles et chercher leurs limites sont aussi des éléments de la démarche scientifique. A

(3) Douglas HOFSTADTER. *Gödel, Escher et Bach*. InterEditions. 1985, p. 30

une progression
qui conduit les en-
fants à modéliser

par recherches
d'analogies

ce double titre, nous nous devons de développer ces capacités. Le domaine étudié ici s'y prête bien.

- Ressemblances entre relais et transistor

* Les deux peuvent servir d'interrupteur à commande électrique ; dans chaque cas, il y a un circuit d'entrée et un circuit de sortie.

* Dans les deux cas, on doit respecter les limites d'utilisation données par le fabriquant.

- Différences

* Un transistor est polarisé, le relais ne l'est pas.

* Le relais se déclenche avec un petit bruit, le transistor reste silencieux ; dans le premier des pièces bougent, dans le deuxième tout reste immobile : les principes de fonctionnement sont totalement différents.

* Un relais dispose de la position "repos", le transistor non.

* Le courant dans le circuit d'entrée du transistor est faible et même très faible. Le relais exige dans son circuit d'entrée un courant minimum nettement supérieur.

* Le relais a ses deux circuits électriques totalement indépendants. Aussi il peut avoir des alimentations totalement différentes dans chacun d'eux (en respectant tout de même les normes de fabricant). Il n'en est pas de même avec le transistor qui a une borne du circuit d'entrée commune avec le circuit de sortie.

* Le transistor a des effets surprenants, non conformes avec ce que l'on est en droit d'attendre d'un interrupteur : dans certains domaines de fonctionnement (cas du détecteur d'inondation quand on écarte plus ou moins les plaques métalliques d'entrée) une faible variation du courant du circuit d'entrée provoque une variation proportionnellement plus importante dans le circuit de sortie.

et de différences

3.2. D'un modèle à l'autre, du concret à l'abstrait

C'est le schéma suivant qui a été exploité :

"interrupteur" → modèle du "relais"

"relais" → modèle du "transistor"

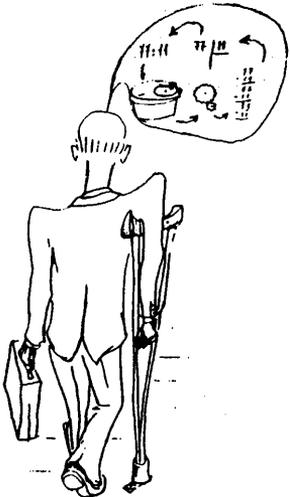
Dans chaque cas, le rôle du modèle (analogie, représentation, métaphore, similitude, symbole, correspondance ?) fut le même : celui d'être un facilitateur, une passerelle du connu vers l'inconnu. Et pourtant, pour un profane, les rapprochements de ces trois objets ne sont pas évidents ! Mais les enfants les ont utilisés, exploités et délimités sans peine.

Plus l'enfant est jeune, plus il a besoin d'un modèle concret proche de son propre environnement. Peu à peu, il pourra s'en éloigner et prendre un modèle de plus en plus abstrait. C'est ce qui s'est produit ici : les élèves sont passés de l'interrupteur



mais aussi du
concret vers l'abs-
trait

une démarche né-
cessaire pour l'ap-
prentissage
scientifique



LE MODELE :
Une aide à la construction personnelle
des connaissances

simple à l'interrupteur à commande électrique, puis à un ensemble regroupant l'interrupteur à commande électrique avec cinq bornes permettant de le relier avec l'extérieur suivant des modalités définies par la situation.

La maquette du relais les conduit au relais du commerce, objet plus abstrait car compact et beaucoup moins transparent dans son fonctionnement que ne l'était la maquette. Présenté ex abrupto, le relais du commerce aurait été incompréhensible.

Vient enfin le passage au transistor : la transition est apparemment brutale. Mais elle n'a posé aucune difficulté : les enfants avaient pris l'habitude de concevoir un élément électrique à plusieurs bornes reliant deux circuits, l'un servant de circuit de commande à l'autre. A ce niveau, le transistor est hermétique, silencieux, incompréhensible dans son fonctionnement. Mais ils ont assimilé sans aucun problème sa fonction de commutation.

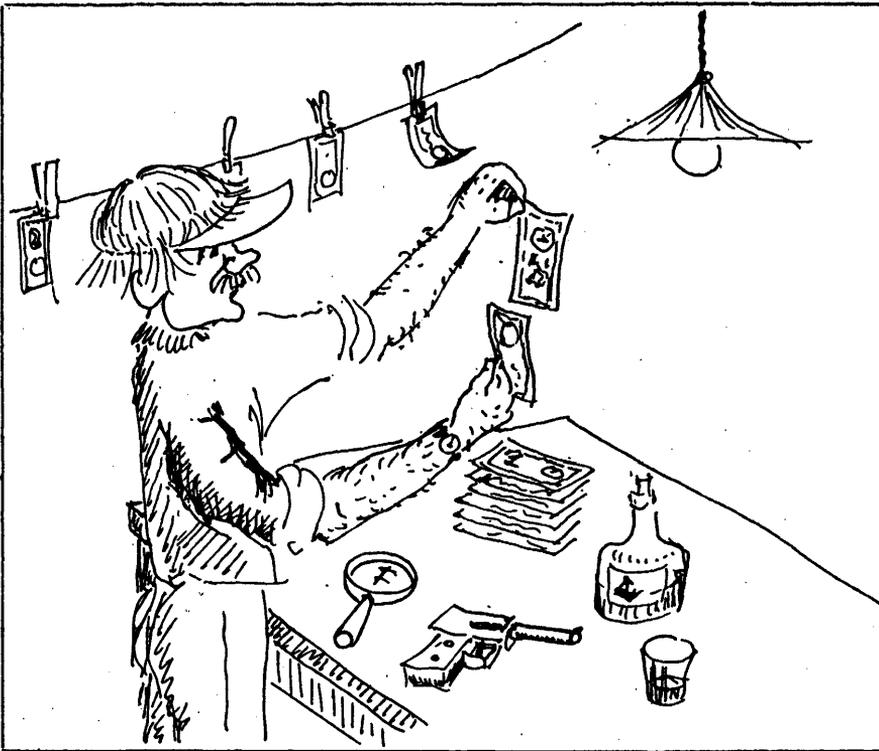
En poursuivant dans le champ des connaissances, il viendra un moment où ils devront se contenter de la théorie même comme modèle, aucune représentation concrète ou rapprochement n'étant possible. A qui cherchait un modèle mécanique des ondes électromagnétiques de la théorie de Maxwell, Richard Feynman répondait : "Je ne puis vraiment pas vous donner une idée, même approximative, de ce que sont les ondes en réalité. Donc si vous éprouvez quelque difficulté à vous les représenter, ne vous en inquiétez pas : cela n'a rien d'anormal".⁴

Cette abstraction exige une maturité intellectuelle. Posons le postulat suivant : un des facteurs de cette maturité serait la pratique d'un nombre, plus ou moins grand suivant les individus, d'exercices progressifs suivis au rythme de compréhension des enfants.

Jean-Loup CANAL
Ecole Normale, Rodez

(4) cité dans "La lumière et l'électromagnétisme", Série HPP, Tome 4, Montréal Québec, Editions IRP, p. 120.

Dessins : Jean-Loup Canal



En sciences, le modèle est toujours un peu faux par rapport
à la réalité. Ici, seul le modèle est vrai ...

MODELISATION ET ASTRONOMIE

Marie-Anne Pierrard

L'astronomie est un domaine privilégié pour la modélisation. A quel type de modèles les enfants de l'école élémentaire peuvent-ils parvenir ? Une série d'activités dans des classes de Cours Moyen, dont nous présentons ici quelques éléments d'analyse, est l'occasion d'évaluer en quoi et jusqu'à quel point les enfants sont parvenus à modéliser.

Nous allons décrire une situation qui a servi de point de départ à une activité dans une classe de Cours Moyen, et analyser cette situation pour savoir si sa compréhension nécessite l'utilisation de modèles, et quelles sont les caractéristiques de ces modèles.

Puis nous présenterons trois exemples d'utilisations différentes de modèles par des élèves au cours d'activités de classe.

1. SITUATION DE DEPART

Il s'agit d'un relevé, sur un plan horizontal, de l'ombre d'une vis verticale, au cours d'une journée : les élèves ont fait eux-mêmes le relevé, en pointant l'extrémité de l'ombre toutes les demi-heures ; la feuille horizontale a toujours été placée de la même façon, son orientation ayant été repérée avec une boussole.

2. ANALYSE DE LA SITUATION

2.1. Description de l'activité en classe

Les objectifs de l'activité en classe étaient les suivants :

- faire des constatations à partir des relevés ;
- les interpréter et confronter ces interprétations à une manipulation sur maquette ;
- comprendre qu'un même phénomène peut avoir des interprétations différentes.

L'une des interprétations, dans l'esprit de l'enseignant, et à partir du "savoir savant", est considérée comme plus performante que les autres et peut s'exprimer ainsi : le Soleil se déplace apparemment dans le ciel, d'Est en Ouest, au cours d'une journée ; il culmine au Sud, où il passe vers midi ; ce

une observation
peut avoir des in-
terprétations diffé-
rentes...

déplacement apparent est dû à la rotation de la Terre sur elle-même, d'Ouest en Est, en un jour.

La trace écrite ¹, élaborée à mesure que l'activité se déroulait, rend bien compte des différentes étapes.

On a d'abord un inventaire des constatations faites sur les modifications de l'ombre, puis une recherche d'explications possibles. Les élèves en proposent quatre :

proposées par les
élèves

- 1) le Soleil se déplace d'Est en Ouest
- 2) la Terre tourne sur elle-même
- 3) la Terre tourne autour du Soleil
- 4) la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil.

Pour tester ces explications, l'utilisation d'une maquette (balle, épingle, lampe) intervient.

La conclusion est la suivante : toutes les hypothèses sont vérifiées, il n'est pas possible de trancher. C'est pourquoi le besoin s'est fait sentir de faire appel à la "science des savants" : les modifications de l'ombre sont dues à la rotation de la Terre sur elle-même, autour de l'axe des pôles, d'Ouest en Est, en un jour.

2.2. A-t-on affaire à des modèles ?

Pour le savoir, il apparaît nécessaire d'analyser l'activité en adoptant un point de vue de scientifique. Les constatations sur la modifications de l'ombre étant faites, le problème à résoudre est le suivant : pourquoi l'ombre subit-elle ces modifications au cours de la journée ? Il s'agit de chercher une explication à ce phénomène observé.

ces explications
sont des hypo-
thèses que les
élèves testent en
utilisant une ma-
quette

Les quatre propositions faites par les élèves sont des explications possibles, qui relèvent de deux catégories différentes :

- a) la feuille est immobile (et son support, la Terre, aussi), le soleil se déplace dans le ciel, de l'Est vers l'Ouest, en culminant au Sud en milieu de journée. Si on admet connue la sphéricité de la Terre, ce mouvement du Soleil par rapport à la feuille, c'est-à-dire par rapport à l'horizon du lieu, peut être un mouvement de révolution du Soleil autour de la Terre, en un jour.
- b) le Soleil est immobile et la Terre se déplace. Différents mouvements de la Terre sont possibles :
 - . rotation autour de l'axe des pôles en un jour,
 - . révolution autour du Soleil en un jour,
 - . combinaisons des deux mouvements précédents.

(1) Marie-Anne PIERRARD. Document interne INRP, 1986.

29/09/86
Landrine

Relevé d'ombres

ombre

1. Constatations sur la modification de l'ombre
 - sur la longueur
 - l'ombre est la plus courte en milieu de journée.
 - sur sa direction elle est plus longue le matin et le soir.
 - sur sa direction
 - elle se déplace d'ouest en est
 - elle passe au nord en milieu de journée.
2. Pourquoi ces modifications d'ombres? (hypothèses)
 - la Terre tourne sur elle-même et le Soleil est immobile?
 - le Soleil se déplace au cours d'une journée? d'est en ouest?
 - la Terre tourne autour du Soleil?
 - la Terre tourne sur elle-même et autour du soleil? Soleil

Soleil

3 Expériences.

1. Le soleil se déplace-t-il d'est en ouest au cours d'une journée?

A l'aide d'une ampoule, nous avons vérifié que le soleil se déplace bien d'est en ouest et culmine au sud en milieu de journées.

Terre

2. La terre tourne-t-elle sur elle-même?

En remplaçant la Terre, nous nous sommes aperçus que la rotation de la terre d'ouest en est peut expliquer les modifications de l'ombre.

Terre

Terre Soleil

3. La terre tourne-t-elle autour du soleil?

La révolution de la Terre autour du Soleil en un jour, peut expliquer les modifications de l'ombre.

4 Conclusion:

Nos expériences ne nous permettent pas de choisir entre les différentes hypothèses.

Ce que disent les scientifiques

Les modifications d'ombres au cours de la journée sont dues à la rotation de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles, d'ouest en est, en un jour.



Quel est le statut de ces explications possibles ?

Dans un premier temps, ce sont des hypothèses qui demandent à être vérifiées. La vérification en "grandeur nature" de ces hypothèses est impossible. Il faut opérer un changement d'échelle et les tester, non sur les objets réels, mais sur des substituts (schémas, maquettes,...). On remplace le système des objets réels : feuille-Soleil ou Terre-Soleil par un système de substitution : une maquette balle/lampe.

Ici apparaît une des caractéristiques des modèles en sciences : objets de substitution utilisés pour tester des hypothèses.

Si le modèle est un substitut du réel, la manipulation, par les élèves, de la lampe et de la balle peut être considérée comme une aide à la modélisation.

Quelles différences y-a-t-il entre le système des objets réels Terre-Soleil et la maquette balle-lampe ? De toute évidence, il y a un changement d'échelle. De plus, nous qui sommes "posés" sur Terre, pouvons grâce à la maquette nous décentrer, et observer plus facilement le système de l'extérieur. Enfin, nous avons choisi de ne retenir que quelques caractéristiques de ce système : les relations topologiques entre ses deux éléments, et le fait que le Soleil est une source de lumière.

Quelles conclusions peut-on tirer de la vérification de ces hypothèses ? Une manipulation de la maquette permet de vérifier que, pour tous les cas évoqués plus haut, on retrouve bien des modifications de l'ombre analogues à celles du relevé. A-t-on pour autant le droit d'en conclure que ces hypothèses sont validées ? Une conclusion tirée de l'étude d'un système balle-lampe peut-elle être étendue au système Terre-Soleil ?

La question mérite d'être posée. En effet, quand on veut savoir si la vitesse d'évaporation de l'eau dépend de la température, on expérimente avec de l'eau, et pas avec un sac de billes ! Sur quelle opération mentale s'appuie-t-on pour appliquer la conclusion au système Terre-Soleil ? Nous avons fait fonctionner une analogie (réductrice) pour passer du système Terre-Soleil au système balle-lampe, et nous la faisons fonctionner en sens inverse, de façon réversible, pour étendre des propriétés du système balle-lampe au système Terre-Soleil.

La prise de conscience de l'écart entre les deux systèmes, celui des objets réels et celui de la maquette, permet de renforcer l'idée selon laquelle le modèle-maquette n'est pas la réalité, mais est seulement un objet de substitution, donc de prendre acte de la différence maquette-réalité.

Dans la classe, l'analogie entre modèle et réalité a bien fonctionné dans les deux sens, pour concevoir et admettre l'utilisation de la maquette d'une part, pour étendre les conclusions tirées de l'observation de la maquette au système Terre-Soleil d'autre part.

l'analogie maquette-système des objets Terre-Soleil fonctionne dans les deux sens

la maquette avec ses mouvements possibles, substitut du réel, est un modèle

les descriptions du système Terre-Soleil, contradictoires, sont elles aussi des modèles

Les choses sont sans ambiguïté quand on décrit le système balle-lampe. Quand on décrit le système Terre-Soleil, décrit-on la réalité, ou en propose-t-on un modèle ? Cette fois, il n'y a plus de changement d'échelle, les relations topologiques et métriques sont respectées, mais on fait toujours abstraction de nombreuses autres caractéristiques du système (par exemple l'existence des forces d'attraction gravitationnelle). C'est légitime et courant en sciences : on sélectionne toujours quelques propriétés d'un système. Dans l'exemple de l'évaporation de l'eau déjà cité, on ne prend pas en compte la viscosité de l'eau, sa conductivité électrique...

Un indice cependant nous permet de dire que, même si les relations géométriques sont respectées, nous avons affaire à un modèle, c'est-à-dire à un substitut de la réalité. En effet, toutes les hypothèses ont été validées, et elle sont contradictoires. Nous rencontrons là une autre caractéristique des modèles en sciences : des modèles différents peuvent expliquer un même phénomène.

La conclusion donnée par les élèves (on ne peut pas choisir) tend à conférer aux quatre explications le statut de modèle.

Trois caractéristiques des modèles en science apparaissent ainsi dans l'activité de classe :

- ce sont des substituts du réel ;
- il y a analogie (réversible) entre le modèle et la réalité ;
- différents modèles peuvent expliquer un même phénomène.

En revanche, les aspects concernant le domaine de validité et la modification du modèle n'apparaissent pas ici.

Il semblerait bien que, dans cette activité de classe, on ait affaire à des modèles. Pourtant, deux éléments importants pourraient susciter des objections à une telle affirmation.

Il n'y a modèle que s'il y a prise de conscience qu'il s'agit de modèle

La première objection consisterait à considérer qu'on ne peut affirmer qu'il y a des modèles que si on pense que les élèves savent qu'il s'agit de modèles. En d'autres termes, l'activité de modélisation suppose la construction et/ou l'utilisation de modèles avec la prise de conscience qu'il s'agit de modèles.

La seconde objection reposerait sur le fait qu'il a été fait référence aux connaissances véhiculées par la science pour choisir le "bon" modèle. Les élèves se sont alors retrouvés (avec satisfaction d'ailleurs) dans une situation qu'ils connaissent. Quand on a des hypothèses contradictoires, l'expérience permet de trancher.

Ici, ce n'était pas possible à partir des moyens expérimentaux et d'observation dont ils disposaient, mais les scientifiques, avec d'autres moyens dont les élèves n'ont pas eu connaissance, ont pu trancher. Les élèves retrouvent alors le schéma

expérimental, mais à travers les données de la science officielle.

2.3. Modèles ou représentations ?

Les explications que donnent les élèves sont-elles des modèles, ou simplement des représentations qu'ils mobilisent devant telle ou telle situation ?

Il est intéressant de comparer les explications données par les élèves d'une autre classe de CM dans une situation différente mais voisine. La question qu'ils se posent est de savoir comment expliquer la succession des jours et des nuits. Les enfants donnent plusieurs explications²:

- *la Terre tourne sur elle-même. Quand elle va vers le Soleil, il l'éclaire. Quand elle se tourne vers la Lune, la nuit, elle l'éclaire un tout petit peu.*
- *la Terre est immobile, le Soleil tourne autour de la Terre.*
- *le Soleil est immobile, la Terre tourne autour du Soleil.*
- *le Soleil est immobile, la Terre tourne sur elle-même.*
- *le Soleil est immobile, la Terre tourne autour du Soleil et sur elle-même.*

On retrouve bien les mêmes explications. Ce constat n'apporte pas de réponse définitive à la question de savoir s'il s'agit vraiment de modélisation. Pourtant de telles explications semblent avoir un statut de représentation plutôt que de modèle.

Une question demeure néanmoins : ces représentations pourraient-elles fonctionner comme des modèles, et comment ? Pour pouvoir répondre, il faudrait repérer des opérations mentales liées à l'activité de modélisation, comme par exemple la mise en relation réciproque de ces représentations et des phénomènes observés, ou comme l'utilisation de ces représentations pour prévoir un autre phénomène.

Dans l'activité de la classe, la mise en relation représentation/phénomène observé intervient largement, et dans la suite de l'activité, les élèves ont utilisé l'explication retenue par la science pour expliquer et prévoir le déplacement des étoiles autour de l'étoile polaire au cours d'une nuit.³

Ils ont donc utilisé l'explication comme un modèle, pour faire une prévision que l'on peut confronter à l'observation, ou aux indications données par un document (planiciel par exemple).

Des interviews d'élèves peuvent donner des indications venant compléter les observations qui ont été faites en classe. Ces interviews ont été faites avant et après l'activité de la classe (le

ces modèles sont peut-être seulement des représentations...

mais ces représentations peuvent fonctionner comme des modèles si on les met en relation avec les phénomènes observés, ou si on les utilise pour faire des prévisions

(2) Jean-Claude GENZLING. "La modélisation à l'école élémentaire". Document interne INRP, 1988.

(3) Marie-Anne PIERRARD. Document interne INRP, 1986.

relevé d'ombre a eu lieu avant la première interview). Elles portent sur six élèves.

Les questions ne sont pas normalisées. Les premières consistent à faire relater aux élèves la façon dont ils ont procédé pour faire le relevé, ceci pour vérifier qu'ils savent bien de quoi il s'agit. Un des relevés faits en classe est sous les yeux. On leur demande ensuite pourquoi l'ombre varie au cours de la journée. S'ils ne le font pas d'eux-mêmes, on essaie de leur faire préciser la position du Soleil au moment où telle ou telle ombre a été obtenue. Puis on prend le cas de la Lune et on leur demande de prévoir soit son déplacement, soit ce que devient l'ombre d'une vis éclairée par la Lune, au cours de la journée ou de la nuit.

Ces mêmes questions sont posées au cours de la deuxième interview. Il s'y ajoute une question sur le déplacement des étoiles.

De l'examen de ces interviews, il ressort qu'avant l'activité en classe, un seul des six élèves met en relation une explication faisant intervenir le système Terre-Soleil et les observations faites sur l'ombre. Les autres ne font pas référence au système Terre-Soleil, ou, s'ils le font, ne reviennent pas aux observations. Après l'activité en classe, on observe cette mise en relation chez tous les élèves interrogés dans le cas du relevé d'ombre, seulement chez quelques-uns pour les questions se rapportant à la Lune et aux étoiles.

Nous ne pouvons à ce moment de notre travail tirer de conclusions définitives. Tout au plus avons-nous pu repérer quelques caractéristiques d'une activité de modélisation, liées au contenu scientifique, à la démarche suivie en classe, et au mode de raisonnement que les élèves peuvent mettre en oeuvre.

3. REMODELAGE D'UN MODELE

Nous avons cité cette possibilité de modification comme une des caractéristiques d'un modèle. Nous allons l'examiner sur deux exemples pris dans deux classes de Cours Moyen.

3.1. Activité sur les fuseaux horaires

Pour expliquer les fuseaux horaires ⁴, les élèves ont fabriqué une maquette en carton sur laquelle la Terre est représentée en projection sur un disque centré sur le pôle Nord : le disque, fixé sur une feuille, peut tourner autour de son centre. Le Soleil est représenté par des rayons sur la feuille. La maquette

(4) Jean-Loup CANAL. "Les modèles". Document interne INRP, 1987.

la confrontation d'un modèle à de nouvelles observations peut conduire à le modifier

utilisée est différente de la précédente, mais reprend ses caractéristiques essentielles : Soleil immobile et Terre en rotation sur elle-même. Une observation approfondie de cette maquette conduit à affirmer l'égalité des jours et des nuits. Or une observation de son propre vécu ou une écoute aux informations des heures de lever et coucher du Soleil infirme ce résultat. Le modèle est-il faux ? Ou doit-on le modifier ? La prise en compte de ces observations conduit à modifier le modèle précédent en y ajoutant, pour construire un nouveau modèle, deux propriétés : la Terre gravite autour du Soleil ; son axe garde la même direction et est incliné par rapport au plan de la trajectoire terrestre.

Provisoirement, la maquette, "fausse", a permis de donner une bonne explication des fuseaux horaires. Une utilisation plus poussée a montré ses limites, soulevé un nouveau problème et conduit à envisager un modèle plus complexe.

3.2. La succession jour-nuit

Dans une autre classe, les élèves ont travaillé sur la succession jour-nuit, et ont donné et testé des explications différentes à l'aide d'une maquette (lampe torche et ballon). L'observation d'un nouveau phénomène, les résultats de l'expérience de Foucault⁵ va les amener à éliminer certaines explications, comme le montre l'extrait suivant⁶:

elle peut aussi conduire à le rejeter pour en retenir un autre

Maitre : *On a pour un même problème quatre explications possibles [...] Je vais vous donner une information... Il y a longtemps, à peu près au 19ème siècle, un physicien nommé Foucault a réalisé une expérience et le résultat de l'expérience dit clairement que la terre tourne autour d'un axe... Qu'est-ce que tu veux dire, Camille ?*

Camille: *Alors je dis, s'il a réussi à le prouver, on peut éliminer l'explication 1.*

Elève : *Et la deux aussi !*

Maitre : *Explique-toi, Camille !*

Camille : *Moi je dis que l'explication 1 doit être éliminée, parce qu'il est marqué que la terre est immobile ; si elle est immobile, elle ne peut pas tourner ! [...]*

(5) FOUCAULT (1819-1869) a utilisé la propriété d'un pendule pesant d'avoir un plan d'oscillation d'orientation constante pour mettre en évidence la rotation de la Terre sur elle-même. Pour ce faire il a utilisé un pendule de grande longueur. Au bout de quelques heures, l'écart entre le plan d'oscillation du pendule et sa position initiale par rapport au lieu de l'expérience, donc à la Terre, est appréciable. Il a par ailleurs établi la loi donnant le déplacement d'un plan de référence lié à la Terre par rapport au plan d'oscillation du pendule en fonction du temps et de la latitude du lieu.

(6) Marie-Anne PIERRARD. Document interne INRP, 1986.

Cyril : *L'explication 2 n'est pas possible non plus parce que ce n'est pas marqué que la terre tourne autour d'un axe.*

Maitre : *Qu'est ce qu'on dit dans la 2 ?*

Elève : *On dit que la terre tourne autour du soleil*

Maitre : *Autour du soleil et non pas sur elle-même, autour d'un axe [...]*

Karine : *L'explication 3 est possible parce qu'elle dit que la terre tourne autour d'un axe. [...]*

Claire-Marie : *La 4 est également possible parce que c'est comme pour la 3, la terre tourne autour d'un axe.*

Maitre : *Conclusion ?*

Karine : *Les explications 3 et 4 sont toujours possibles.*

Les élèves s'intéressent ensuite à l'inégalité jour-nuit. La constatation de cette inégalité ne va pas les conduire à trancher entre ces deux explications. En effet, aucune ne convient. On peut pourtant en retenir une (rotation), à condition de la modifier un peu, en particulier en faisant intervenir une inclinaison (fixe ou variable au cours de l'année) de l'axe de la Terre par rapport à la ligne Terre-Soleil.

L'activité ici n'est donc pas seulement de validation d'explication, mais d'ajustement, de modification pour assurer la cohérence entre l'observation et le modèle.

4. UNE AUTRE DEMARCHE DE MODELISATION ?

4.1. Analyse de la situation de départ

Les élèves, qui avaient travaillé sur un relevé d'ombre fait au cours d'une journée quelques mois auparavant, disposent de relevés d'ombre faits à des dates différentes. Des constatations peuvent être faites, mettant en évidence points communs et différences.

Des démarches différentes peuvent être adoptées :

- on peut faire appel au modèle expliquant le relevé au cours d'une journée, puis le modifier, le compléter pour l'adapter à la nouvelle situation. Il s'agirait alors, comme au paragraphe précédent, de remodeler un modèle ;
- on peut donner des explications possibles, sans faire référence au modèle retenu lors de l'activité précédente sur le relevé d'ombre. Plusieurs explications peuvent être testées. On suivrait alors la même démarche que pour la première activité.

4.2. Démarche suivie en classe ⁷

Les élèves ont comparé les relevés faits à plusieurs mois d'intervalle, ils ont fait apparaître les points communs (en milieu de journée, les ombres sont vers le Nord ; au cours de la journée, elles se déplacent d'Ouest en Est), et les différences (les relevés sont courbés dans deux sens différents ; à la même heure, l'ombre n'a ni la même longueur, ni la même direction ; le 10 juillet, les ombres sont plus courtes que celle du 27 février, quelle que soit l'heure).

Ils se sont ensuite attachés aux positions du Soleil, déduites des relevés d'ombre, et sont arrivés aux résultats suivants.

	10 JUILLET	27 FEVRIER	22 SEPTEMBRE
Le soleil se lève plutôt vers :			
- EST			X
- NORD-EST	X		
- SUD-EST		X	
Le soleil se couche plutôt vers :			
- OUEST			X
- NORD-OUEST	X		
- SUD-OUEST		X	

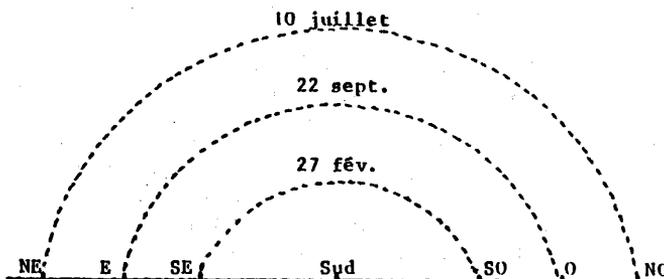


tableau et schéma de la course du Soleil

(bien sûr, comme la ligne d'horizon est centrée sur le Sud, l'Est se trouve vers la gauche et l'Ouest vers la droite).

la modification d'un modèle pour l'adapter à de nouvelles observations n'est pas la seule voie suivie par les élèves dans les activités de modélisation

Ils n'ont pas donné d'explication a priori, mais ont recherché des explications à partir de la manipulation de maquette : ils cherchaient à obtenir une ombre plus ou moins grande vers le Nord, et des positions différentes du Soleil (de la lampe) à son lever et à son coucher.

Deux explications ont ainsi été trouvées, et reconnues valides :

- laisser la lampe immobile et basculer la balle.
- laisser la lampe immobile, monter et descendre la balle.

Ces mouvements correspondent aux mouvements annuels, il s'y ajoute le mouvement de rotation de la balle sur elle-même assimilable à la rotation de la Terre en un jour.

Il y a eu référence, à partir d'un document, aux connaissances reconnues par la science, et utilisation de la maquette pour vérifier l'explication.

4.3. Y a-t-il eu modélisation ?

Nous nous trouvons ici dans un cas différent des précédents : il n'y a pas remodelage d'un modèle (il n'a pas été utilisé pour tenter d'expliquer la situation), il n'y a pas de propositions de modèles-hypothèses à tester, mais construction d'une explication à partir d'une maquette.

Ils peuvent ignorer le modèle existant et en construire d'autres à partir de la manipulation d'une maquette

Ici apparaît un autre aspect de ce que pourrait être une activité de modélisation en classe : l'utilisation d'objets (substituts de la réalité) pour trouver une explication à un phénomène.

Au cours des activités en classe évoquées précédemment, les élèves ont bien sûr acquis des connaissances sur les mouvements diurne et annuel de la Terre. Pour les construire, ils ont été confrontés à une multiplicité d'explications cohérentes possibles, à une remise en cause d'une connaissance préalable entraînant une modification, un remodelage de cette connaissance, ils ont travaillé sur des maquettes substituts du réel soit pour contrôler une explication, soit pour en trouver une. On retrouve tous ces aspects dans les modèles. De plus, l'observation de classe et l'analyse des interviews ont permis de relever des raisonnements portés sur les connaissances ou explications fournies par les élèves, indispensables à une véritable activité de modélisation, qui paraît ainsi possible pour des enfants de cet âge, et qui est un des moyens pour construire un savoir scientifique.

Marie-Anne PIERRARD
Ecole Normale, Blois

CIRCUITS ET MODELISATION

Liliane Sarrazin
Jean-Claude Genzling

Les deux modèles présentés ci-dessous diffèrent non seulement par leur nature, mais aussi par leur champ de validité : ils n'ont pas été construits pour résoudre le même problème. Ils montrent bien la diversité des modèles qu'on peut construire et utiliser dans un domaine donné. Ils remplissent cependant les mêmes fonctions : interpréter des faits expérimentaux et si possible en prévoir d'autres. Ils illustrent la même méthode et c'est cette méthode (la modélisation) que devront peu à peu maîtriser nos élèves.

Les programmes au Cours Élémentaire préconisent la construction du concept de circuit électrique avec son cortège de notions ou de concepts associés : concept de conducteur ou d'isolant, notion d'interrupteur, de court-circuit...

Les définitions successives du concept sont les solutions à une chaîne de problèmes qu'on résout en classe pour répondre à des besoins précis et les élèves acquièrent ainsi la capacité de réaliser des montages de plus en plus complexes (montage série et montage parallèle de deux ampoules...).

Si les activités en classe focalisent les enfants vers la réalisation de circuits, nul ne peut les empêcher de s'interroger sur la cause des phénomènes observés ; ils savent bien que la lumière émise par l'ampoule ou la rotation du moteur sont les manifestations du courant électrique. Ce courant, quelle est sa nature ? Pourquoi chauffe-t-il la pile ou encore un fil métallique très fin ? Aucune expérience ne pourra répondre à ces questions.

On peut penser que les enfants par un raisonnement analogique suggéré par le mot courant assimilent le courant électrique à la circulation d'une substance qu'on peut appeler électricité. On connaît bien la **représentation à deux courants** qui se rencontrent dans l'ampoule ou encore la représentation à un courant. Cette dernière n'est pas plus acceptable pour le scientifique que la première car ce **courant s'épuise dans l'ampoule** et seule une partie de ce courant revient éventuellement vers la pile (la pile se vide de son électricité). Les enfants ne peuvent guère imaginer que l'intensité du courant est la même en tous les points du circuit. Ces représentations peuvent prendre le statut de modèle quand elles tentent d'être prédictives. Elles se heurtent alors à des contradictions lorsqu'une résistance ou une LED (diode électroluminescente) sont introduites dans un circuit électrique. Les activités décrites ci-dessous montrent comment on peut ame-

les représentations
des élèves fonctionnent
comme
des modèles

ner les élèves à construire de nouveaux modèles permettant d'interpréter correctement plusieurs montages électriques. Dans un premier exemple (Limoges), c'est l'intervention du mime analogue qui a permis aux enfants de comprendre le rôle de la tension (formation d'une "chaîne" en se tenant par les épaules), et dans un second exemple (Colmar) la construction d'un modèle particulière a permis d'interpréter l'échauffement d'un fil par un courant électrique.

1. CONSTRUCTION DU SENS DU COURANT ELECTRIQUE

1.1. Quelles sont les représentations des élèves ?

elles ne sont guère remises en cause au C.E.

Du Cours Préparatoire au Cours Moyen coexistent dans une classe deux types de représentations : la représentation à un courant, courant qui s'épuise dans l'ampoule, le moteur... et dont une partie revient éventuellement vers la piste et la représentation à deux courants qui sera présentée plus longuement ci-dessous. Ajoutons que ces représentations sont rarement modifiées par les activités en électricité au CE.¹

- la représentation à deux courants antagonistes

Si on interroge des élèves de CM1 sur la manière dont le courant se propage dans un circuit électrique fermé, on obtient pratiquement toujours la représentation suivante : (figure 1 et 2) : deux courants partent simultanément des bornes + et - de la pile et se "choquent" dans l'ampoule ou le moteur. Ce "choc" permet à l'ampoule de briller ou au moteur de tourner.

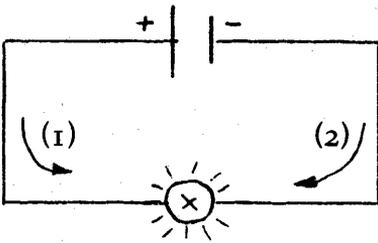


fig. 1

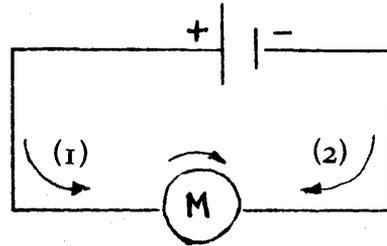


fig. 2

(1) Liliane SARRAZIN. "Activités de modélisation en électricité". Documents internes INRP, 1987 et 1988.
Jean-Loup CANAL. "Construction du sens de déplacement du courant". Document interne INRP, 1988.

Ce modèle des deux courants" leur permet d'expliquer également le phénomène du court-circuit (figure 3) :

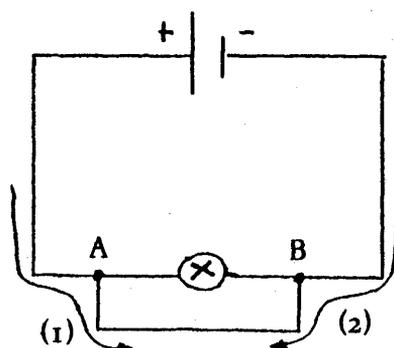
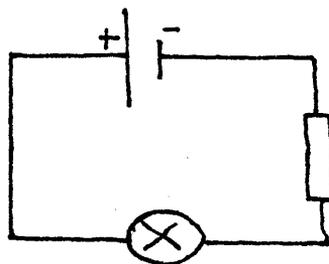
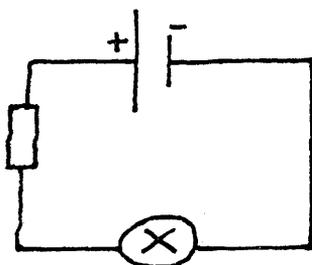


fig. 3

Si on court-circuite avec un fil les bornes de l'ampoule, elle s'éteint car les deux courants sont passés par le chemin le plus facile et se "choquent" dans ce fil qui chauffe.

- le courant "s'épuise" en traversant une résistance

Nous avons demandé aux élèves (deux mois après l'étude de circuits contenant une ampoule et une résistance) de prévoir l'éclat de l'ampoule dans les deux circuits représentés ci-dessous.



Les élèves disposent du questionnaire ci-dessous :

L'éclat de l'ampoule sera :

- le même en (1) et (2)
- plus fort en (1)
- plus fort en (2)

Résultats :

Neuf élèves seulement sur vingt deux estiment que l'éclat de l'ampoule sera identique dans les deux circuits !

Par contre, tous les autres enfants pensent que l'éclat de l'ampoule sera plus fort dans le schéma (2)

L'expérience avait, cependant, été réalisée et expliquée.

Interprétation :

Voici les explications des enfants du deuxième groupe. Le courant part très fort du pôle + de la pile, il s'affaiblit en passant

l'intensité du courant n'est pas la même avant et après la résistance

dans la résistance ; donc l'ampoule du schéma (1) brillera moins fort que dans le schéma (2) : le courant rejoint ensuite le pôle - de la pile, il se recharge et repart par la borne + !!... Il semble que les élèves utilisent la représentation à un courant. Ce courant s'affaiblit dans la résistance ; ils ne peuvent pas admettre que l'intensité du courant est identique dans toutes les portions du circuit.

1.2. Comment les élèves abandonnent-ils leur modèle de deux courants antagonistes ?

La diode que nous utilisons est un petit composant qui a l'aspect d'un parallépipède noir avec un anneau argenté proche d'une borne. (figure 4).

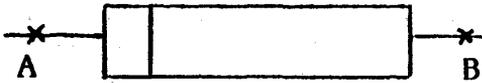
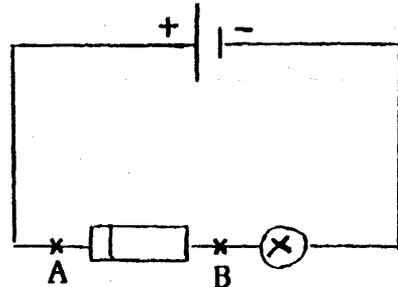
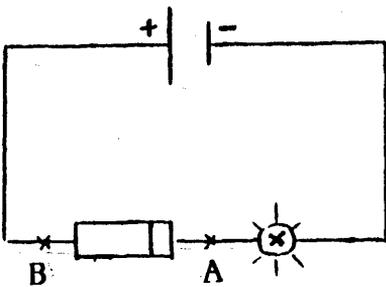


fig. 4

La diode est un semi conducteur qui ne laisse passer le courant que dans le sens de B vers A ; elle se comporte comme un interrupteur et ne laisse pas passer le courant dans le sens de A vers B.

• expériences avec les élèves

Les élèves réalisent les deux montages suivants (figures 5 et 6).



Les enfants constatent que l'ampoule s'allume si la bague est vers le - de la pile (ce savoir faire n'est, du reste, pas vraiment intégré par tous, nous allons le voir par la suite).

• interprétation de ces expériences

Si on demande ensuite aux enfants d'expliquer ce qui se passe pour le courant électrique, ils disent que quand le courant arrive par le côté de la diode, il peut passer ; que, par contre, quand il arrive par le petit côté, il ne peut pas passer (figure 7).

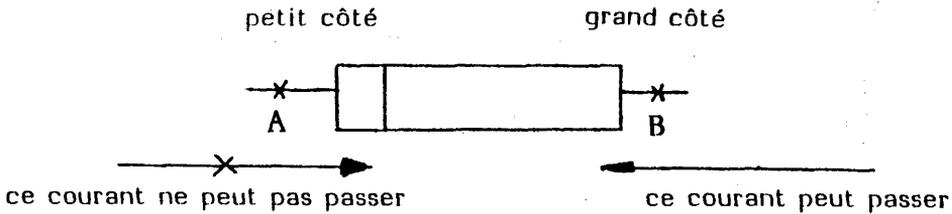


fig. 7

Mais ils n'abandonnent pas, pour autant, leur représentations à deux courants ! En effet, pour eux, dans ce montage, l'ampoule s'allume car il y a "choc" entre le courant (1) qui arrive par le grand côté de la diode et le courant (2) qui n'a pas eu à traverser la diode (figure 8).

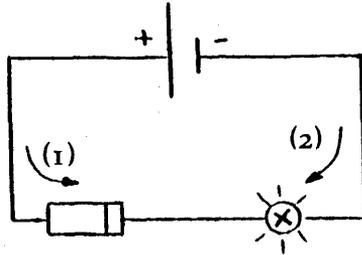


fig. 8

Ils estiment, par contre, dans le montage du schéma figure 9 que l'ampoule ne s'allume pas car le courant (2) arrive à l'ampoule mais qu'il manque le courant (1) qui a arrêté par le petit côté de la diode.

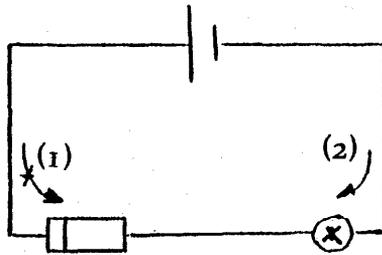


fig. 9

Les enfants n'ont donc pas abandonné leur représentation des deux courants : ils pensent et, ces expériences ne les détrompent pas, que les deux courants sont indispensables pour que l'ampoule s'allume.

• réflexion sur un schéma avec deux diodes en série

Nous proposons maintenant aux enfants de **réfléchir sur le schéma** suivant figure 10 et leur demandons qu'ils anticipent, sans faire le montage et disent si l'ampoule va s'allumer et pourquoi.

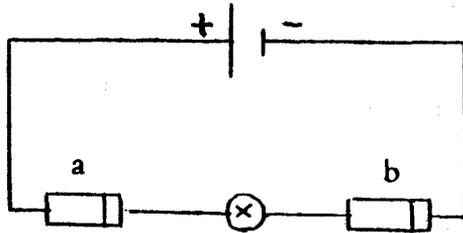


fig. 10

Certains enfants estiment que l'ampoule va s'allumer car les deux bagues de chaque diode sont reliées au - de la pile : ils réinvestissent là un savoir-faire sommairement acquis lors de la séquence précédente. Cependant, pour les autres enfants, l'ampoule ne va pas s'allumer : ils pensent qu'il n'y aura pas le choc des deux courants : le courant (1) qui arrive par le grand bout de la diode (a) pourra passer mais le courant (2) qui arrive par le petit bout de la diode (b) ne pourra pas passer (figure 11).

l'utilisation judicieuse de diodes remet en cause la représentation à deux courants

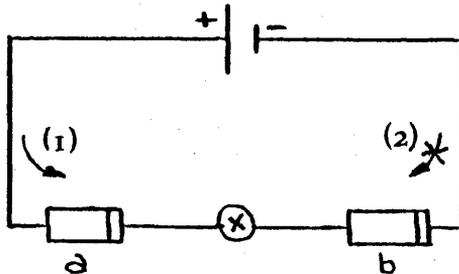


fig. 11

Ils estiment, donc que puisqu'il n'y aura pas choc entre les deux courants, l'ampoule ne pourra pas s'allumer.

• réfutation de ces deux courants

Les élèves réalisent le montage : **l'ampoule s'allume**. Leur représentation à deux courants ne fonctionne plus ! Il faut l'a-

bandonner et adopter une "représentation" avec un seul courant électrique.

1.3. Le courant "s'épuise" : quel modèle peut-on introduire pour faire comprendre la notion de tension de la pile ?

Ainsi, les enfants paraissent avoir évacué la représentation des courants antagonistes.

Ils comparent le courant électrique à un courant d'eau qui "coule à sens unique et peut pousser une porte" (analogie avec la diode).

Cependant, dès qu'une expérience nouvelle, faisant appel à la notion de cycle, leur est présentée, ils sont désarmés.

En fait, même les adultes réagissent ainsi et, seuls ceux qui font appel aux notions de tension électrique et de structure particulière de l'électricité répondent correctement.

- un modèle de courant continu

On propose aux élèves un mime analogique : ils vont former une chaîne fermée. Chacun se tient bien droit, a **les bras bien tendus** et les mains sur les épaules du voisin placé devant lui. Le maître, qui appartient aussi à la chaîne, sera la pile tandis qu'un élève du cercle représentera l'ampoule.

Si les maître pousse les épaules de l'élève placé devant lui, celui-ci s'incline et de ce fait pousse les épaules de son voisin de devant et ainsi de suite : on voit le mouvement se transmettre à tous les élèves qui sont **solidaires** grâce à leurs bras tendus et revenir au maître qui, à nouveau, poussera les épaules de l'élève devant lui...

Impérativement, chaque élève doit rester rigide et **garder toujours les bras bien tendus**.

- comment notre modèle se comporte t-il avec une résistance ?

Supposons qu'un élève de la ronde représente une **résistance**. On décide que cet enfant ne **pourra pas bouger aussi amplement que les autres enfants**. Dans ce cas, tous ses voisins de derrière (qui ont, n'oublions pas, les bras bien tendus) ne pourront pas non plus se pencher amplement et, de même évidemment, ceux qui sont devant. Les élèves réalisent qu'ils se pencheront tous avec la même amplitude imposée par l'"élève résistance". Ils en déduisent que, dans un circuit avec une résistance, le courant est affaibli de façon identique dans toutes les portions du circuit.

une représentation analogique du modèle à un courant

ce modèle permet de comprendre le rôle de différents composants

- cas d'un interrupteur

Supposons, maintenant, qu'un élève de la ronde représente un interrupteur. Lorsque ses bras sont tendus et tiennent les épaules du voisin, le circuit est fermé et le mouvement d'oscillation peut se propager comme précédemment.

Si par contre, l'élève baisse les bras **tout en restant vertical**, le circuit est ouvert et aucun élève ne peut se pencher en avant. Les enfants saisissent vite, que dans ce cas, **il n'y a aucun courant dans le circuit lorsque l'interrupteur est ouvert.**

- circuit avec diode

Un élève va maintenant représenter une LED. Il se comporte de la manière suivante.

Soit, il se place dans le sens de la ronde et il peut alors se pencher vers l'avant lorsqu'il est poussé, soit il fait un demi-tour sur lui-même ; dans ce dernier cas, il ne peut pas se pencher lorsque son voisin le pousse par les épaules.

Cet élève représentera donc une diode dans le sens passant lorsqu'il sera placé dans le sens de la ronde et une diode dans le sens bloquant lorsqu'il fera face à son voisin qui lui pousse les épaules.

Les enfants concluent que dans ce dernier cas, aucun d'entre eux ne peut se pencher en avant et qu'il n'y a de courant dans aucune partie du circuit.

- circuit avec des diodes

Avec un tel modèle, les élèves n'ont plus aucune difficulté pour admettre que le courant passe lorsque les deux diodes sont dans le sens passant et qu'il n'y a pas de courant dans les autres cas.

- conclusion

Il serait hâtif de conclure précipitamment et sans le recul du temps que tous les élèves ont, ainsi, assimilé la notion de tension, donc d'action à distance de la pile.

Cependant les résultats du test effectué quelque temps après nos "rondes" nous laissent quelque espoir.

En effet, d'après ces tests, **19 élèves sur 22** estiment que le courant est identique dans toutes les portions d'un circuit comportant une résistance et **20 élèves** pensent qu'il n'y a pas de courant si le circuit est ouvert.

Nous sommes conscients que notre modèle ne peut pas expliquer tous les phénomènes électriques mais il fait saisir aux enfants la notion de propagation du courant, de cycle fermé et de tension électrique. Ce modèle, peut-être moins abstrait que le modèle hydraulique, nous paraît satisfaisant pour expliquer les expériences d'électricité à l'école élémentaire.

Autrement dit, le mime analogique qui a été mis en oeuvre a

le mérite d'être d'une nature assez différente de la réalité qu'il modélise. Ainsi, le risque que les enfants assimilent le modèle à la réalité est moindre. Et par contre, ce modèle permet des prévisions sur les divers circuits, prévisions qui s'avèrent assez correctes. On a donc bien ici un des usages de la modélisation, associée, dans une dynamique de confrontation au réel, à la nécessité de passer d'un modèle à un autre lorsque le premier ne permet plus de prévisions correctes.

2. INTERPRETATION DE L'ECHAUFFEMENT D'UN CONDUCTEUR A L'AIDE D'UN MODELE PARTICULAIRE

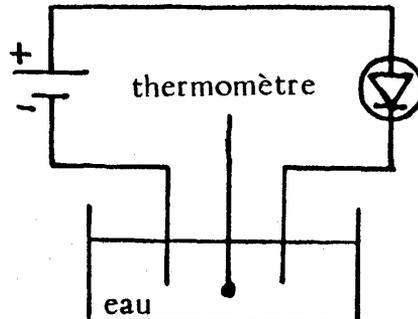
un modèle pour interpréter

l'échauffement d'un conducteur

L'utilisation d'un modèle particulière en électricité ne peut être tentée que si les enfants ont construit et utilisé de tels modèles dans d'autres domaines (par exemple les transformations de la matière...). Ce fut le cas de la classe dans laquelle nous avons mené la séquence que nous décrivons ci-dessous². Généralement on utilise un modèle (proposé par le maître ou construit par la classe) pour interpréter un phénomène ; il s'agit ici "d'expliquer" pourquoi un filament parcouru par un courant s'échauffe. Tout d'abord ce fait doit être clairement établi.

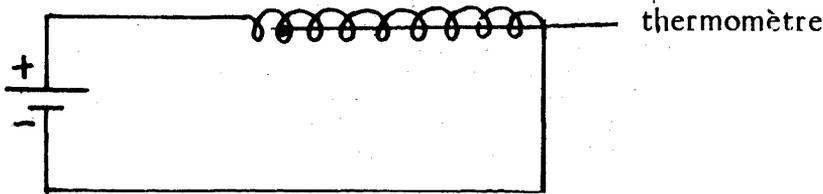
2.1. Comment montrer qu'un conducteur s'échauffe lorsqu'il est traversé par un courant électrique ?

Après une courte discussion portant sur le sens des mots conducteur et s'échauffer, les enfants réfléchissent à des expériences permettant de répondre à cette question ; deux montages retiennent essentiellement l'attention du groupe classe, celui de Jérôme



(2) Jean-Claude GENZLING, Daniel RIBER. "La modélisation à l'école élémentaire". Document interne INRP, 1988.

et celui de Caroline



la première étape de la modélisation est l'établissement du phénomène

Le montage proposé par Jérôme a déjà été réalisé par l'ensemble des enfants pour montrer que l'eau conduit (faiblement) le courant.

Très vite le montage de Caroline a la préférence des enfants et du maître car avec le fil "ça chauffera plus vite, ou le fil est un bon conducteur" (par opposition à l'eau qui est un mauvais conducteur).

2.2. Recherche d'une explication du phénomène observé

un problème à résoudre

Le problème qu'il faut résoudre est formulé ainsi :
Pourquoi le conducteur s'échauffe-t-il lorsqu'il est traversé par un courant électrique ?

Maître : *Quels sont les mots importants dans cette question à votre avis ?*

Elève : *Conducteur, s'échauffe, courant électrique.*

Le maître les souligne.

Maître : *Peut-on faire une relation entre conducteur, courant électrique et échauffement ? Un conducteur, qu'est-ce c'est pour vous un conducteur ?*

Elève : *Une chose qui laisse passer le courant.*

Maître : *Une chose ? est-ce qu'on peut être plus précis sur la chose ?*

Elève : *Un métal.*

Elèves : *Ça peut être un métal, ce n'est pas forcément un métal, les bons conducteurs ce sont les métaux.*

Maître : *Comment pourrait être fait un conducteur ? On va prendre un métal puisque vous parlez de métal.*

la question clé

Les élèves ne répondent pas. Le maître débloque la situation en leur rappelant qu'ils ont déjà répondu à une question identique portant sur l'eau (lors de l'étude de l'évaporation).

Maître : *Est-ce qu'on n'a pas déjà réfléchi une fois à une question qui ressemble à celle-là en fait ? Je vous ai déjà posé la question "comment était fait autre chose ?", non ?*

Elève : *L'eau.*

Maître : *Un liquide par exemple ; qu'est-ce qu'on a dit des liquides ?*

Elève : *Il y avait des molécules.*

Elève : *Il est constitué de plusieurs molécules.*

Elève : *Il peut être aussi constitué de plusieurs molécules de cuivre.*

Cyril : *Oui, de molécules de fer et de molécules de cuivre.*

Jérôme : *Le fer ne circule pas à mon avis.*

Maître : *Oui, comme dit Jérôme, il y a un petit problème en plus, il y a quelque chose qui pourrait peut-être...*

Jérôme : *Circuler... Mais moi je ne pense pas qu'il circule.*

Maître : *Comment pourrait être un métal ?*

Elève : *Peut-être que le courant se déplace aussi avec des molécules et elles se poussent peut-être.*

Elève : *Des molécules qui se poussent dans le métal ?*

Maître : *Vous vous raccrochez tous à cette idée de molécules dans un métal...*

Jérôme : *Je pense que c'est peut-être de petites brindilles de fer.*

Maître : *C'est pas des brindilles, c'est autre chose... Vous ne pouvez pas le savoir, il y a d'autres particules, elles ne s'appellent pas des molécules, mais ce sont comme les molécules des particules identiques, qui ont une autre propriété... Claire, qu'est-ce que tu voudrais qu'elles aient comme propriétés, ces particules ?*

Claire : *Qu'elles puissent rouler*

Maître : *Rouler ? disons...*

Elève : *Se déplacer.*

Maître : *Se déplacer... On pourrait imaginer qu'il y a dans un métal des particules qui peuvent se déplacer ; ces particules on les appelle pas des molécules, on les appelle des électrons.*

Le maître inscrit au tableau :

la première hypo-
thèse

"On suppose que dans un métal (bon conducteur) il y a des particules identiques appelées électrons qui peuvent se déplacer.

Maître : *Est-ce que vous pensez que toutes les particules se déplacent ?*

Elève : *Toutes, non je ne pense pas, certaines, car si c'était toutes...*

Elève : *C'est pas le fer qui se déplace.*

Maître : *Ce serait tout le bout de métal qui se déplace, c'est vrai ! C'est pourquoi il y a aussi d'autres particules...*

Cyril : *Qui restent sur place !*

Elève : *Qui restent immobiles*

Maître : *Ce ne sont pas les mêmes (que les électrons), elles n'ont pas le même nom ; on les appelle ions. [...]*

Maître : *Qu'est-ce qu'elles ont comme propriétés par rapport aux électrons ?*

Elève : *Elles ne peuvent pas se déplacer.*

Le maître complète alors la phrase précédente :
"et d'autres particules appelées ions qui sont immobiles."

La phrase précédente est l'hypothèse de base fondant le modèle (elle est notée P1). Il aurait été préférable de désigner les particules mobiles par l'expression "grains d'électricité". Il va de soi que les particules que pensent concevoir les enfants ne sont pas les particules du physicien (Jérôme parle de petites brindilles de fer !) L'existence d'un courant (détecté par une ampoule)... est évidemment lié à la présence d'une pile dans le circuit (supposé fermé).

le rôle de la pile

Maître : *Quel pourrait être maintenant le rôle de la pile en supposant que le métal est formé des particules appelées électrons et d'autres particules appelées ions ?*

Camille : *Elle fait avancer les électrons.*

Maître : *Tu penses qu'elle fait avancer les électrons ?*

Camille : *Se déplacer plutôt.*

Maître : *Tout le monde est d'accord pour penser que c'est uniquement un déplacement d'électrons ?*

Elève : *Parce que là, dans la phrase, on dit que les ions sont immobiles.*

Maître : *Oui, on a supposé que les ions étaient immobiles... Ce qu'on vient de dire du courant est intéressant. On pourrait l'écrire à l'aide d'une phrase ; on pourrait commencer par : la pile... Qu'est-ce qu'elle fait, la pile ?*

la deuxième hypothèse

Après discussion, le groupe classe s'accorde sur la phrase suivante :

La pile pourrait provoquer le déplacement des électrons.

Maître : *Oui... Et on ajoute encore quoi ? Se déplacer n'était pas suffisant pour Malka.*

Elève : *Dans un seul sens.*

Maître : *Qu'est-ce qu'on pourrait préciser si on voulait... Si on voulait provoquer le déplacement dans l'autre sens, qu'est-ce qu'il suffirait de faire ?*

Elève : *Inverser la pile.*

Maître : *Donc ce sens dépend de quoi ?*

Pierre-Henri : *Ce sens dépend du sens de la pile.*

Le maître complète ainsi l'hypothèse écrite au tableau :
La pile pourrait provoquer le déplacement des électrons dans un seul sens.

Cette phrase est notée P2.

2.3. Représentations graphiques des deux hypothèses précédentes

Pour comprendre ou pour donner du sens, les enfants s'appuient sur leurs représentations. Une même hypothèse peut ainsi être interprétée différemment par les élèves d'une même classe. Dans un souci de clarté, pour lever les doutes ou les ambiguïtés éventuelles, on peut demander aux élèves de traduire les hypothèses (ou propositions supposées vraies) dans un langage graphique convenable et de soumettre des dessins (ou schémas) les plus représentatifs à la discussion du groupe classe.

Maître : *On pourrait faire comme pour les liquides ; on a mieux compris les phrases qu'on avait imaginées en faisant un schéma pour chacune d'elles.*

Le maître demande aux enfants d'illustrer chacune des phrases précédentes par un schéma.

- Représentation de la phrase 1

Claire-Marie propose de représenter un morceau de métal agrandi. Céline quant à elle représente le déplacement d'un électron par une flèche.

Maître : *Tu parles d'électrons qui se déplacent représentés par cette flèche-là...*

Jérôme : *Non, je ne vois pas pourquoi ils se déplaceraient... Il n'y a pas de courant qui passe.*

Claire-Marie : *Mais si, il (l'électron) se déplace.*

Maître : *Mais attends, relis voir la phrase 1*

Claire-Marie relit cette phrase.

Claire-Marie : *Ils peuvent se déplacer.*

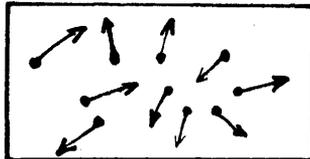
Maître : *Est-ce qu'on a dit qu'ils ne se déplaceraient pas ?*

Jérôme : *Oui..., peut-être... Il y en a peut-être qui ne se déplacent pas avant qu'il y ait une pile*

Maître : *On ne sait pas, mais quel est le changement quand on ajoute une pile ?*
 Elève : *Avec la pile ils vont tous dans le même sens.*
 Maître : *Oui, ils ont tendance à aller tous dans le même sens, tandis que là...*
 Elève : *Ils peuvent aller dans tous les sens.*
 Maître : *Céline, vas-y, continue ; est-ce que comme ça on a l'impression qu'ils vont dans tous les sens ?*
 Céline : *Oui.*
 Claire : *Je mettrais plusieurs électrons avec des flèches dans différents sens.*

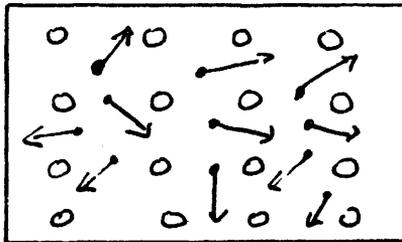
Le maître illustre l'idée de Claire.

l'agitation "thermique" des électrons



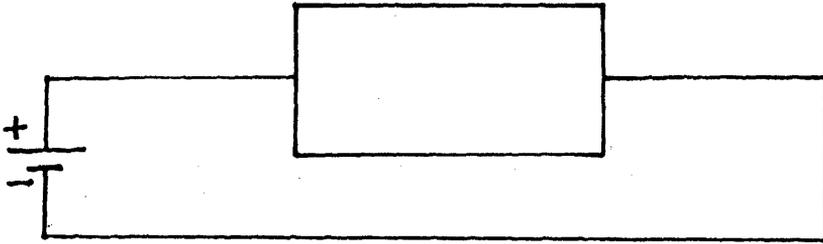
Maître : *Qu'est-ce qu'il manque encore sur ce schéma ?*
 Elève : *Les ions*
 Maître : *Comment on va différencier les ions ?*
 Elève : *Avec une autre couleur.*
 Elève : *Avec un rond.*

La phrase P1 est représentée ainsi :



• Représentation de la phrase 2

Le maître dessine au tableau le schéma suivant :



Maître : *Qu'est-ce qui est important pour la deuxième phrase ?*

Elève : *La pile.*

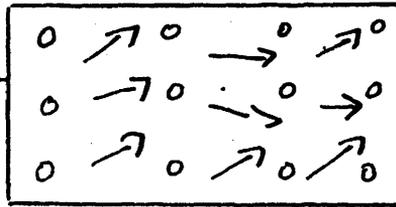
Maître : *Quoi encore ?*

Elève : *Le bout de métal.*

Maître : *On va imaginer un circuit et là un bout de métal grandi comme si on mettait une loupe dessus...*

Lorsqu'il y a une pile, tous les électrons se déplacent dans le même sens (phrase P2) Après discussion le schéma précédent est complété de la façon suivante :

le courant est un déplacement d'électrons dans le même sens



On remarquera que fort logiquement les élèves supposent que les électrons (ou mieux les grains d'électricité) se déplacent dans le sens conventionnel du courant. Cela ne paraît pas gênant ici.

Nous avons d'ailleurs vérifié que les élèves de CM ne peuvent pas différencier sens conventionnel du courant et sens réel. Il faudra évidemment remodeler ce modèle plus tard (au collège) lorsque les élèves découvriront l'existence de grains d'électricité négative. C'est à ce moment-là qu'on pourra introduire le terme électron.

ce modèle devra être remodelé plus tard

2.4. Interprétation de l'échauffement d'un filament parcouru par un courant

Maître : ... A quoi est dû cet échauffement ? Tu as une idée, Camille ?

Camille : Je trouve que c'est logique parce que quand on court, en hiver on court pour se réchauffer et ça nous réchauffe et là les molécules...

Maître : On ne parle pas de molécules.

Camille : Les électrons, ils se déplacent, alors ça fait aussi une espèce de chaleur.

Jérôme : Quand ils déplacent, à mon avis, ils se frottent contre les ions qui ne se déplacent pas et ça peut provoquer une chaleur.

Maître : Est-ce que c'est vrai que quand on frotte, il y a de la chaleur qui se dégage ? Est-ce que vous avez des idées de choses auxquelles vous pensez lorsqu'il y a des frottements, comme dit Jérôme, entre les électrons et les ions et qu'il y a un échauffement ?

Malka : La pierre dans le briquet.

des raisonnements par analogie

Un raisonnement par analogie mène à l'idée suivante : le dégagement de chaleur dans le conducteur est dû aux frottements des particules qui se déplacent contre les particules immobiles.

Cette explication tire son origine de leurs représentations en relation avec la production de chaleur (corrélation, frottement, échauffement). Toute autre explication paraît hors de leur portée.

2.5. Pour conclure

Le modèle ci-dessus rend évidemment compte du sens du courant ; il permet également de comprendre pourquoi un courant peut être plus ou moins intense : on peut par exemple rechercher les facteurs qui sont en relation avec l'intensité :

- nombre de particules susceptibles de se déplacer (il dépend de la nature de la substance...)
- vitesse de particules (elle dépend de la pile, mais aussi de la résistance que rencontrent ces particules au cours de leur déplacement...).

Il a cependant ses **limites** car la phrase 2 ne dit rien des actions à distance (on imaginerait plutôt une action de proche en proche) et dans ces conditions on ne peut pas comprendre pourquoi l'intensité d'un courant est constante dans tout le circuit (pour résoudre ce problème, le modèle hydraulique paraît mieux adapté).

Les cas limites sont intéressants car, pour répondre au problème posé, le modèle doit généralement être modifié. C'est le cas ici. L'étude des interactions électrostatiques (hors pro-

les limites du modèle

un modèle n'est qu'une représentation hypothétique de la réalité

gramme au C.M.) permet un remodelage considérable du modèle précédent (notion d'action à distance, existence de charges de signe opposé...). Le champ d'application du modèle s'élargit alors : ainsi l'étude de la conduction pourrait être étendue aux solutions et éventuellement aux semi-conducteurs. La mise en évidence du caractère **évolutif** des modèles (ce ne sont pas des produits finis !) permet de mieux saisir leur nature : ce sont des représentations hypothétiques de la réalité et non pas la réalité elle-même.

3. CONCLUSION

Le texte ci-dessus relate la construction de deux modèles très différents qui répondent chacun à une classe de problèmes précis. Nous n'ajouterons rien ici aux conclusions partielles développées dans le corps du texte même.

On peut se demander quel est l'intérêt de telles activités à l'école élémentaire. On pourrait arguer que le modèle particulier n'est qu'une pâle approche de ceux qui sont **exposés** à partir de la classe de 6ème, de même le modèle mime peut apparaître bien naïf au physicien. Il n'est évidemment pas question pour nous de pratiquer dès l'école élémentaire des activités qui trouvent leur place au collège.

Leur intérêt est ailleurs. En nous restreignant au cas de l'électricité et indépendamment de l'intérêt de la méthode, on peut dire qu'elles jouent un rôle essentiel qu'on peut énoncer ainsi : faire évoluer les représentations des élèves concernant le courant électrique (celles en relation avec le sens du courant, son intensité, la constance de l'intensité en tous les points d'un circuit simple, etc...)

Nous avons pu vérifier que l'enseignement délivré à partir du collège avait peu de prise sur ces représentations et que faute de **modèles adaptés**, elles sont encore présentes chez bien des adultes. La constructions et l'utilisation de tels modèles permet dès l'école élémentaire d'élaborer un ensemble de notions cohérentes et de comprendre la fonction, dans un circuit simple, de certains composants (citons le cas du résistor qui protège une LED...) Nous considérons que cela constitue un grand progrès.

Liliane SARRAZIN
Ecole Normale, Limoges

Jean-Claude GENZLING
Ecole Normale, Colmar

GESTION D'ACTIVITES DE MODELISATION EN CLASSE

Gérard Lemeignan
Annick Weil-Barais

Deux modalités de gestion de la formation des connaissances des élèves dans un cadre scolaire sont envisagées : une démarche de type construction des connaissances et une démarche de type appropriation des connaissances. L'analyse des décalages existant entre les conceptions premières des élèves et les conceptualisations auxquelles ils devraient parvenir, à l'issue de l'enseignement, conduit à préconiser une forme "mixte" de gestion.

La description d'une séquence d'enseignement concernant l'introduction en classe de seconde de la grandeur "quantité de mouvement" fournit des indications sur les modalités pratiques d'une telle démarche. Celle-ci semble favorable au développement des compétences des élèves quant à la modélisation des situations physiques. Sans modifier les contenus d'enseignement, il semble possible d'amener davantage d'élèves à maîtriser les démarches et les contenus physiques, à condition d'organiser une gestion conséquente des activités en classe.

les élèves ont tendance à traiter les situations en fonction de leurs conceptions premières

L'enseignement scientifique a pour ambition de développer chez les élèves des représentations du monde plus opérantes que celles qu'ils ont pu construire dans leur vie quotidienne. Or les travaux qui ont été conduits ces dix dernières années en didactique des sciences, ont mis en évidence les difficultés qu'ont les élèves à s'approprier ces représentations. En particulier, dans le domaine qui nous occupe, celui de l'enseignement de la mécanique, les modèles enseignés acquièrent assez peu pour les élèves de statut opératoire. Même après plusieurs années d'étude (Viennot, 1979 ; Mc Dermott, 1984), les élèves ont tendance à traiter de manière préférentielle les situations mécaniques en fonction de leurs conceptions premières et non pas en fonction des modèles physiques enseignés. L'hypothèse a été plusieurs fois avancée (Driver & Erikson, 1983 ; Champagne & al., 1985 ; Gil, 1985) que cet état de fait était la conséquence d'un enseignement essentiellement expositif au cours duquel les élèves ont peu l'occasion de confronter leurs représentations premières aux représentations scientifiques et d'exercer suffisamment ces dernières afin qu'elles acquièrent un statut fonctionnel.

Comme alternative aux formes expositives d'enseignement, une approche constructiviste des conditions d'apprentissage semble faire l'adhésion des chercheurs en didactique (Giordan

la traduction dans les pratiques pédagogiques d'un point de vue constructiviste de la formation des connaissances est problématique

& De Vecchi, 1987). Cette approche repose sur une idée largement développée par Piaget selon laquelle les connaissances des individus résultent d'un processus de construction personnelle. La formation des connaissances est conçue comme étant sous la dépendance de l'augmentation des capacités à construire (Saada-Robert & Ackerman-Valladao, 1985). Si l'on admet volontiers un point de vue constructiviste de la formation des connaissances, sa traduction dans un contexte pédagogique s'avère problématique. Comment faire pour que les élèves parviennent à construire en grande partie par eux-mêmes des conceptualisations que la communauté scientifique a mis des siècles à établir ? La construction par les élèves d'un modèle scientifique est-elle possible ? Quelles aides doit-on leur apporter ? Comment gérer au niveau d'un groupe (la classe) des constructions conceptuelles qui opèrent au niveau individuel ?

L'examen de ces questions à propos d'un domaine particulier, celui de l'enseignement de la mécanique en classe de seconde, nous a conduit à spécifier ce qui pouvait raisonnablement relever d'une démarche de construction personnelle et d'une démarche d'exposition-appropriation des connaissances. Nous allons caractériser de manière générale ce qui distingue ces deux démarches. Puis nous les spécifierons à propos d'une séquence d'enseignement relative à la quantité de mouvement ayant fait l'objet d'une expérimentation en classe de seconde (Lemeignan & Weil-Barais, 1987).

1. DEMARCHES DE CONSTRUCTION ET D'APPROPRIATION DE CONNAISSANCES

1.1. Démarche de type construction

Si l'on suit la description piagétienne des processus de construction des connaissances, toute construction résulte d'interactions que le sujet a avec le milieu. Rappelons que dans une telle conception, il est fait appel à un certain nombre de mécanismes psychologiques permettant de comprendre qu'à l'occasion de ces interactions le sujet s'approprie des éléments de l'extérieur (l'assimilation) et se modifie lui-même (l'accommodation). Les perturbations externes et les conflits internes exerceraient un rôle moteur dans le développement intellectuel. L'hypothèse que nous faisons est qu'il est possible d'influer sur ces mécanismes et donc de gérer, dans certaines limites qui restent à préciser, les processus de construction des connaissances scientifiques. Le type de gestion que nous développons repose sur un choix de dispositifs, de situations expérimentales et de questions afférentes susceptibles d'in-
duire chez les élèves la construction d'un certain nombre d'in-

hypothèse : il est possible de gérer les processus de construction des connaissances scientifiques

variants. La détermination des situations et des questions est ainsi reliée aux invariants relatifs au domaine de connaissance. C'est la raison pour laquelle la gestion d'une telle démarche s'appuie à la fois sur une analyse épistémologique du domaine et sur une analyse du fonctionnement intellectuel des physiciens et des élèves.

1.2. Démarche de type exposition-appropriation

Par opposition à la démarche précédente où ce sont les élèves qui élaborent leurs connaissances à l'occasion de la résolution de problèmes, la connaissance est présentée aux élèves, dans une démarche de type exposition-appropriation, sous une forme telle qu'ils soient à même de se l'approprier (les critères d'appropriation étant bien entendu à spécifier).

La gestion d'une telle démarche repose sur un choix judicieux de formes d'exposition de la connaissance, en fonction des caractéristiques des élèves, de leurs acquis antérieurs et des critères d'appropriation fixés. Dans la séquence d'enseignement que nous avons expérimentée, les informations fournies aux élèves ont ainsi essentiellement porté sur les procédures de lecture des situations (sélection des événements, découpage temporel, choix des grandeurs physiques descriptives des systèmes) et ceci sous forme de questions auxquelles le professeur lui-même apporte des réponses. Il s'agit là de mettre l'accent sur les invariants opératoires en jeu dans les processus de modélisation des situations physiques. De telles informations s'avèrent davantage accessibles aux élèves que des énoncés généraux desquels il est possible, mais difficile, de déduire de tels invariants. Par exemple, l'énoncé de la loi de conservation de la quantité de mouvement : $\Sigma \vec{P} = \Sigma \vec{P}'$ "contient" le découpage temporel des événements, le bilan des quantités de mouvement avant et après l'interaction, les propriétés d'additivité et de conservation de la grandeur. Mais il nous semble tout à fait illusoire que les élèves puissent inférer d'eux-mêmes de tels invariants à partir d'une relation générale qui suppose par ailleurs une maîtrise de signifiants mathématiques que les élèves n'ont pas toujours en classe de seconde. Aussi, l'appropriation d'un énoncé général du type de celui que nous venons d'évoquer ne peut-il survenir, de notre point de vue, qu'en fin de parcours d'un apprentissage qui débute par d'autres voies.

1.3. Démarche "mixte" de type construction-appropriation

S'agissant de modèles physiques où il semble a priori illusoire d'envisager une approche uniquement constructiviste, il nous a semblé qu'il était possible de jouer à la fois sur la construction et l'appropriation des connaissances.

choisir les contenus et les formes d'exposition des connaissances

faire pratiquer les invariants opératoires avant de les formuler

construire et s'approprier des connaissances

L'originalité et l'intérêt majeur de l'approche que nous tentons de définir pour l'enseignement des modèles physiques réside dans le fait que nous proposons d'emblée aux élèves de s'engager dans une démarche active de construction des connaissances, à l'occasion de la résolution de problèmes expérimentaux. Ce n'est que lorsque les élèves se sont engagés dans cette voie qu'on leur propose une démarche d'appropriation. Une telle pratique est en rupture complète avec celle qui a cours à l'heure actuelle dans l'enseignement de la physique où les élèves doivent d'abord recevoir et apprendre des énoncés généraux que bien souvent ils sont incapables de s'approprier, et ensuite seulement, utiliser ces énoncés pour résoudre des problèmes alors qu'ils sont en grande partie dans l'incapacité de le faire.

Les résultats obtenus à l'occasion d'une évaluation conduite en classe (Lemeignan & Weil-Barais, 1987) nous encouragent à poursuivre les recherches, en vue de spécifier, pour d'autres contenus de connaissances, les modalités de gestion de démarches de type construction et de type exposition-appropriation de connaissances, celles-ci étant conçues en alternance et complémentaires l'une de l'autre.

2. LES FINALITES DE L'ENSEIGNEMENT : PASSER D'UNE REPRESENTATION A UNE AUTRE. LA MODELISATION SCIENTIFIQUE

Pour saisir la nécessité d'une gestion pédagogique de la formation des connaissances physiques chez les élèves faisant appel à la fois à des processus de construction et d'appropriation, il convient d'examiner la nature des objets de connaissance enseignés et l'écart qui existe entre les conceptualisations premières des élèves et les conceptualisations scientifiques. C'est ce que nous faisons brièvement dans cette seconde partie.

passer d'une représentation en terme d'objets (propriétés, fonctions) à une représentation en terme de systèmes (états, transformations)

Analyser une situation en terme de quantité de mouvement implique la mise en oeuvre d'un ensemble d'activités de modélisation et la maîtrise d'un certain nombre d'invariants.

Tout d'abord les élèves doivent passer d'une représentation des objets en jeu dans les expériences (les objets sont généralement définis par leurs propriétés et leurs fonctions), des manipulations qu'ils font (pousser, lancer, lâcher...) et des événements perçus (les objets roulent, se déplacent, se heurtent, se séparent, explosent...) à une représentation des objets traduits en terme de systèmes dont les états sont décrits par des valeurs de grandeurs physiques.

En ce qui concerne la quantité de mouvement, cette description implique :

- **une sélection des événements.** Il s'agit de bien distinguer d'une part la préparation de chaque système dans un certain état de vitesse et d'autre part l'interaction entre systèmes :

- **un découpage temporel.** Les situations analysées comportent nécessairement plusieurs objets dont l'état de mouvement varie au cours du temps sous l'effet de diverses interactions - force. En l'absence d'information sur la force interactive, variable au cours du temps, il est impossible de préciser l'état du système pendant l'interaction. Les moments à considérer sont donc l'"avant" de l'interaction et l'"après" de l'interaction sur laquelle on s'interroge, ce qui n'est pas sans poser problème puisque l'attention des individus est davantage attirée par les transformations (le "pendant") que par les états ("avant" et "après"). (S'adapter c'est réagir aux changements et il n'est pas "naturel" de s'intéresser à des états) :

- **une hiérarchisation des interactions.** Certaines ont un effet important sur le changement de vitesse des objets, d'autres ont un effet relativement négligeable par rapport aux effets précédents, d'autres prises globalement sont sans effet. Cette étude des interactions débouche sur une décision quant à la possibilité ou non d'utiliser le principe de conservation. L'utilisation de la grandeur quantité de mouvement suppose également la maîtrise d'un certain nombre de signifiés (les propriétés de la grandeur) et de signifiants (les formalismes mathématiques utilisés pour exprimer la grandeur et pour faire des calculs).

Nous évoquons brièvement les propriétés de la quantité de mouvement afin de mettre en évidence la multiplicité des invariants à considérer :

- la grandeur est **mesurable** par le produit d'une masse par une vitesse. (L'unité de quantité de mouvement s'exprime en kg.m.s^{-1}) :

- la grandeur décrit l'état des systèmes par rapport à un référentiel :

- la quantité de mouvement d'un système composé de plusieurs objets s'obtient par **sommation** de la quantité caractérisant chacun des sous-systèmes :

- la quantité de mouvement **transférable** en tout ou en partie à un autre système lors d'une interaction. Il s'agit d'un transfert immatériel :

- transférable d'un système (1) à un autre (2), la quantité de mouvement du système (1 et 2) est **constante**, à condition que les interactions qu'il subit soient sans effet sur le mouvement ou n'aient que des effets négligeables en première approximation (ceci constitue un principe) :

- la quantité de mouvement est une grandeur **vectorielle**.

les opérations impliquées dans la constitution d'une représentation physique faisant appel à la grandeur "quantité de mouvement"

les propriétés de la quantité de mouvement qui fondent le concept

Les symbolismes mathématiques auxquels il est fait appel traduisent cet ensemble de propriétés.

Comme toute grandeur mesurable, la quantité de mouvement est désignée par un symbole littéral (P), ce qui l'instaure en tant que variable. Si les objets en interaction se déplacent dans une seule direction, la grandeur peut s'exprimer algébriquement par \vec{P} ; si plusieurs directions sont en jeu, la grandeur s'exprime vectoriellement par \vec{P} .

Le transfert de P d'un sous-système à un autre sous-système s'exprime par les variations de \vec{P} de chaque sous-système. Dans le cas de deux sous-systèmes : $\Delta \vec{P}_1 = -\Delta \vec{P}_2$, la conservation s'exprime par une égalité des quantités de mouvement avant et après l'interaction : $\Sigma \vec{P} = \Sigma \vec{P}'$.

Ces deux expressions symboliques traduisent la formulation d'une même propriété fondamentale, l'une sous forme "dynamique" (le transfert), l'autre sous forme "statique" (quelque chose est inchangé pour le système global).

Tous ces éléments que nous avons rappelés (les opérations de modélisation, les signifiés et les signifiants) font qu'au bout du compte, "apprendre" la quantité de mouvement pour un élève de seconde n'est pas une mince affaire et on ne s'étonnera guère que les élèves éprouvent quelques difficultés au cours de cet enseignement, tel qu'il est pratiqué à l'heure actuelle. Et il en est de même si l'on y regarde de près pour toutes les grandeurs physiques. Les enseignants peuvent avoir l'illusion que les choses sont simples car elles s'expriment simplement (une relation générale). Mais comme on l'a montré, cette relation générale "cache" des opérations et des invariants complexes dont la formation chez les élèves nécessite d'être gérée progressivement.

On mesurera le chemin à parcourir par les élèves de seconde, en évoquant les lectures premières qu'ils font de situations qu'ultérieurement dans l'enseignement ils seront invités à traiter en terme de quantité de mouvement. Nous considérerons en premier lieu la situation suivante : les élèves disposent de deux wagons miniatures qu'ils peuvent déplacer sur des rails rectilignes posés sur un support horizontal. Un des wagons lancé, ayant ainsi une certaine vitesse, heurte un second wagon immobile et s'accôle à celui-ci (du fait de la présence de petits aimants aux extrémités des wagons). Après l'accrochage, les wagons se déplacent ensemble à une certaine vitesse. On demande aux élèves de prévoir la vitesse "après accrochage" par rapport à la vitesse "avant accrochage" et de justifier leurs prédictions. La situation décrite linguistiquement peut être symbolisée graphiquement de la manière suivante (nous adoptons ici le même symbolisme que celui adopté pour l'enseignement) :

les symbolismes mathématiques

toute relation générale "cache" des opérations et des invariants complexes qu'il est nécessaire de gérer dans l'enseignement

l'évaluation du chemin à parcourir par les élèves passe par une étude de leurs représentations premières...

... qui se présentent comme un mélange de descriptions phénoménologiques et d'appel à des propriétés et des fonctions des objets.



Voici à titre d'illustration les explications fournies par deux élèves vus ensemble en entretien avant enseignement. (Dans le discours des élèves, le bleu désigne le wagon lancé et le noir le wagon immobile).

Corinne : "S'il est lancé très fort, il va pousser celui-là... Il y a de la vitesse qui se perd, le frottement sur les rails, il y a déjà ça et il y a surtout le wagon noir qui se met en travers de son chemin et qui l'empêche de continuer à aller vite, donc il n'a plus la même vitesse ; il le freine"

Carlos : "Le bleu il va être ralenti en poussant le noir... Le bleu ira plus rapidement tout seul qu'avec l'autre wagon. L'autre il n'a pas de vitesse donc il faut le pousser... Quand le wagon bleu arrive il va à une certaine vitesse, il choque le wagon noir, il perd de la vitesse parce que le noir le repousse d'une certaine manière. Il lui reste un peu de vitesse pour continuer à mettre le noir en avant, c'est tout".

la représentation du physicien consiste en un bilan des quantités de mouvement des systèmes avant et après leur interaction

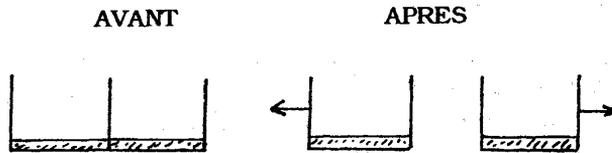
La représentation proposée au cours de l'enseignement est d'une toute autre nature. On fera un bilan des quantités de mouvement avant et après le choc. On examinera les conditions expérimentales d'utilisation du principe de conservation, ce qui amènera à considérer deux courtes périodes "juste avant le choc" et "juste après le choc", considérant que l'effet des interactions wagons/rails sur un long parcours ne sont pas négligeables face à l'interaction choc. On établira ainsi que : $m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v'$. De la relation ainsi établie on déduira l'expression de la valeur de v' .

un moteur pour faire prendre conscience aux élèves du caractère non opératoire des conceptions spontanées : la contradiction entre les prévisions et les constats expérimentaux

Comparativement aux représentations premières des élèves qui se présentent comme un mélange de descriptions phénoménologiques et d'appel à des propriétés et à des fonctions des objets, la démarche physique consiste à ne retenir que les états qui peuvent être décrits à l'aide de grandeurs physiques reliées entre elles par une relation générale utilisée à titre de pré-supposé dans l'analyse. Une telle démarche conduit à une prévision des événements plus précise que celle à laquelle parviennent les élèves avant enseignement. Dans la situation précédente la prévision des élèves est certes compatible avec les événements observés, et, dans ce cas, ceux-ci peuvent être insensibles au gain en précision qu'apporte l'analyse physique

une situation privilégiée pour cette prise de conscience : l'éclatement

par rapport à leurs conceptions premières. Mais dans d'autres cas, il peut exister une contradiction entre les prévisions et les événements et ceci constitue, nous semble-t-il, des situations tout à fait favorables pour faire prendre conscience aux élèves du caractère opératoire des modèles physiques. Une telle contradiction se rencontre par exemple très fréquemment dans une situation que nous avons également utilisée dans l'enseignement. Il s'agit d'une situation dite d'éclatement : les wagons initialement immobiles se repoussent (les rôles des aimants étant opposés) et se déplacent dans des sens opposés lorsqu'on les lâche.



Dans cette situation, les élèves centrent leur interprétation sur l'interaction entre les wagons, comme par exemple cette élève :

Sandrine : "C'est comme un ressort. Il y a une certaine force entre les aimants, ça va partir des deux côtés et puis ça va être la même parce que... les aimants ça va envoyer autant de force des deux côtés alors la vitesse va être la même" (dans le cas où les masses des deux wagons sont égales).

Une telle interprétation conduit cette élève à penser que lorsque la masse d'un wagon augmente et que l'autre reste constante, seule la vitesse du wagon diminue, l'autre vitesse restant constante (ce qui est erroné) : "si il a le même poids ce sera la même vitesse", prévoit Sandrine.

La gestion des changements de représentations que les élèves sont amenés à opérer dans le cadre de l'enseignement de la physique fait l'objet de la troisième partie.

3. GESTION DES ACTIVITES DE MODELISATION

Dans un premier temps, un certain nombre d'activités ont été conduites au moyen d'objets manipulables sur table. Elles ont permis d'élaborer en grande partie le modèle. Dans un deuxième temps, la résolution de problèmes papier-crayon a

permis de constituer le champ expérimental (situations et questions afférentes) explorable par le modèle.

3.1. Elaboration du modèle

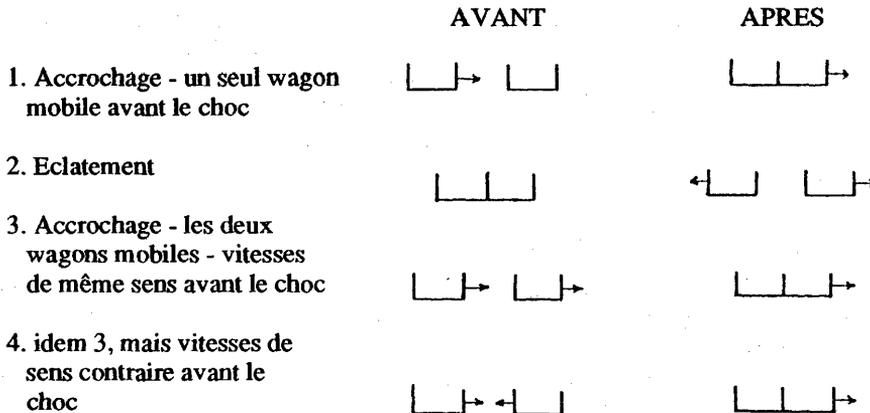
mettre en oeuvre des opérations particulières pour construire une représentation des situations

Dans cette phase, il s'agit de construire une représentation des objets et des événements faisant appel à des opérations particulières (sélection des événements, découpage temporel, hiérarchisation des interactions). Cette représentation implique d'introduire une grandeur nouvelle (la quantité de mouvement) qui sera définie peu à peu par un ensemble de propriétés et de relations entre grandeurs.

des objets et des situations familières

Les situations expérimentales proposées aux élèves comportent les wagons miniatures déjà évoqués. Munis de petits aimants ils peuvent s'attirer ou se repousser sensiblement lorsqu'ils sont à faible distance l'un de l'autre (environ 1 cm). Quatre situations sont envisagées dans un premier temps.

Figure 1 : Les situations expérimentales dans la phase d'élaboration du modèle



Les activités de modélisation, dans cette phase d'élaboration, se sont étalées sur trois séances de cours et trois séances de travaux pratiques, soit une durée totale de 7 h 30. Nous donnons ci-dessous le détail des activités, séance par séance, en séparant ce qui relève d'une construction personnelle des élèves et ce qui relève d'une démarche d'appropriation d'informations fournies par le professeur. Les productions des élèves (considérées ici comme des indicateurs des connaissances que les élèves construisent) et les informations données sont d'a-

bord présentées sous une forme synthétique : elles sont suivies de quelques commentaires.

Première activité : Prédications et justifications (cours 1 heure)

CONSTRUCTION PERSONNELLE

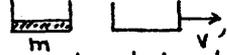
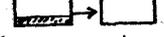
Explicitation de dépendances variationnelles :

- situation 1 : poussée et obstacle
- situation 2 : force
- situation 4 : mise en oeuvre implicite d'une compensation masse-vitesse

APPROPRIATION

Description des objets à l'aide des grandeurs masse et vitesse.

Description graphique

des objets 
 des grandeurs 
 des événements 

Découpage temporel "avant"/"après"

Questionnaire : dépendance variationnelle des grandeurs prises deux à deux ("toutes choses égales par ailleurs") sur les situations 1, 2 et 4.

• Les justifications fournies par les élèves

les questions portent uniquement sur les vitesses

Elles reposent majoritairement sur trois idées : poussée, obstacle dans le cas d'un accrochage, force dans le cas d'un éclatement.

les prédictions sont l'occasion d'explicitation des représentations premières des élèves

1) **Poussée** : c'est le mot le plus fréquemment utilisé mais apparaissent aussi "élan, impulsion, énergie, force". Peu importe d'ailleurs ; seules sont à retenir les propriétés attribuées à "ces grandeurs" : la poussée que possède le wagon mobile augmente avec sa masse et sa vitesse, sans que soit proposée une relation entre "poussée" et un groupement de type mv (ainsi v augmente si m_1 augmente ou si v_1 augmente). Cette poussée peut être donnée en partie au wagon immobile, la "partie" donnée ne dépendant que des caractéristiques du wagon possédant la poussée : les caractéristiques du wagon immobile n'interviennent pas.

2) **Obstacle** : Le wagon immobile est conçu comme un obstacle par rapport au wagon mobile. Le rôle de cet obstacle est d'autant plus important que sa masse est grande (ainsi v diminue si m_2 augmente).

Notons que les justifications fournies par les élèves concer-

nent, à chaque fois, exclusivement les wagons dont on fait varier les caractéristiques ; les élèves auraient pu envisager que cette "partie de poussée" donnée par le wagon mobile dépende des caractéristiques de l'autre wagon. Inversement il leur était possible d'imaginer que l'importance du rôle d'"obstacle" du wagon immobile dépende des caractéristiques de l'autre wagon. Ils ne le font pas. Ils semblent n'envisager les wagons que sous l'angle de la fonction - propriété bien différenciée qu'ils leur attribuent - pour l'un "d'avoir et de donner une poussée", pour l'autre "d'être un obstacle". La rencontre des deux wagons ne semble pas mélanger ces fonctions. Il leur faudra établir la relation fonctionnelle entre les masses et les vitesses des deux wagons pour reconnaître que la rencontre entre les wagons se traduit par un mélange complexe de ces grandeurs et que la "fonction" des wagons est insuffisante pour expliquer cette rencontre.

3) **Force** : C'est une traduction de l'interaction entre les wagons au repos avant éclatement. Selon les élèves, les aimants étant identiques et inchangés, les forces réciproques d'un aimant sur l'autre sont égales et inchangées quand les masses des wagons varient. A force égale, la vitesse varie en sens inverse de la masse. Si m_1 augmente et m_2 reste constant, alors v_1 diminue et v_2 reste constante (ce qui n'est pas conforme aux constats).

Deuxième activité : Constats (T.P. I heure 30)

CONSTRUCTION PERSONNELLE

Réalisation des expériences

Séparation des événements
(le lancer et le choc)

Comparaison prédictions-constats

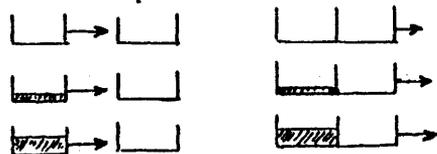
- refus et/ou acceptation des événements
- mise en commun des constats
- cohérence prédiction-constat

Consignation symbolique écrite des sens de variation constatés (co-variation et contre-variation)

APPROPRIATION

Tableau de sens de variation à compléter.

Par exemple :



Si m_1 augmente, v_1 augmente.

• Remarques sur la séparation des événements

Au début des constats, la plupart des élèves réalisent le lancer du wagon mobile par un mouvement vif du poignet et à bonne distance du wagon immobile. De ce fait, les élèves en infèrent que v' diminue lorsque m_1 augmente et ceci par l'intermédiaire de v_1 qui, déclarent-ils, diminue quand m_1 augmente. (Ceci traduit la difficulté du lancement d'un objet lourd à une vitesse aussi grande que celle d'un objet plus léger). Pour remédier au mélange entre les caractéristiques du lancer et celles du choc, nous proposons aux élèves de lancer le wagon mobile sur une assez grande distance (environ 1 m) par un geste régulier d'accompagnement du bras en ne lâchant le wagon qu'à une faible distance du wagon immobile (environ 1 cm). Le wagon mobile est ainsi préparé dans un état de vitesse bien défini, choisi au gré de chacun ; c'est cet état qui sera à prendre en compte dans l'analyse ultérieure.

donner du sens à des opérations mentales en les associant à des gestes particuliers

Troisième activité : Recherches de relations fonctionnelles sur les situations 1 et 2 (un T.P. et un cours, soit 2 heures 30)

la recherche des relations fonctionnelles prend d'abord appui sur une étude des sens de variation

les élèves confrontent les hypothèses aux résultats expérimentaux

CONSTRUCTION PERSONNELLE	APPROPRIATION
Hypothèse des formes relationnelles entre masse et vitesse, à partir des sens de variation	(Guidages)
Recherche d'informations sur la mesure de v'	Logiciel de calcul (v') disponible à la demande
- méthode de recherche	
- obtention de mesures et construction de tableaux	
- comparaison entre tableau de sens de variation et tableau de mesures	(Guidages)
Confrontation entre hypothèses de formes relationnelles et mesures	
Rejet ou acceptation d'une hypothèse	
Recherche de formes relationnelles à partir de mesures	Proposition d'une démarche générale (structuration)

• Les guidages

faire construire les connaissances à partir des savoirs et savoir-faire des élèves

De manière générale, les guidages consistent à suggérer aux élèves des procédures proches de ce qu'ils savent faire et orientées vers les procédures "savantes". La connaissance des procédures disponibles chez les élèves implique des pratiques pédagogiques qui laissent une large place à l'expression des élèves et à l'analyse des propositions de ceux-ci. Dans la recherche de relations fonctionnelles menée par les élèves, les guidages utilisés sont divers. Ils peuvent intervenir ponctuellement pour :

inciter

- inciter certains élèves à prendre en considération les sens de variation observés et, partant de là, à formuler des hypothèses,

rappeler ou indiquer des procédures

- rappeler ou indiquer des procédures. Certains élèves ont besoin en effet que leur soit indiqué comment mettre en correspondance le tableau de sens de variation et le tableau de mesures, comment lire un tableau de mesures pour tester que celui-ci vérifie bien une relation donnée.

apporter des informations

- apporter des informations. Certains élèves ne savent pas traduire des constats de co-variation ou de contra-variation en relations mathématiques.

Par exemple :

v_1 augmente et v' augmente : hypothèse possible : $v' = av_1 + b$
 m_2 augmente et v' diminue : hypothèse possible : $v' = \frac{c}{m_2} + d$
 (hypothèses les plus simples)

accompagner

- accompagner la démarche des élèves en vue de les orienter dans la découverte de la solution. Par exemple dans la situation 1, certains élèves remarquent que lorsque les masses des wagons sont égales, $v' = 1/2 v_1$. Le professeur demande alors d'examiner ce qu'il en est lorsque $m_1 \neq m_2$: les élèves trouvent des coefficients différents, inférieurs à 1. Le professeur oriente alors l'activité des élèves sur la recherche de la forme du coefficient. Un élève suggère le rapport de masse m_1/m_2 : hypothèse rejetée. Un autre élève fait alors remarquer que dans le rapport des masses, il faut prendre d'une part m_1 et d'autre part $m_1 + m_2$ car, dit-il, " v' entraîne m_1 et m_2 donc il faut prendre m_1+m_2 avec v' ". Cela débouche alors sur une proposition qui se trouve vérifiée par les mesures :

$$v' = \frac{m_1}{m_1+m_2} \cdot v_1$$

après avoir essayé deux possibilités :

$$v' = \frac{m_1}{m_1+m_2} \cdot v_1 \quad \text{ou} \quad v' = \frac{m_2}{m_1+m_2} \cdot v_1$$

Dans d'autres groupes, ce regroupement des masses doit être

induit par une lecture de l'"avant" et de l'"après" le choc (avant les wagons sont séparés, après ils sont ensemble et ne forment plus qu'un seul mobile) qui dans le cas de l'élève évoqué précédemment se fait spontanément. Certains élèves ont également besoin que leur attention soit attirée sur la dimension des grandeurs qui conditionne l'homogénéité de la relation. Cela conduit à rejeter des propositions du genre :

$$v' = \frac{v_1}{m_2} \cdot v_1$$

• Démarche générale de recherche de relation

Par exemple, les étapes de recherche, dans le cas de la situation 1 (les wagons s'accrochent, un seul mobile avant) sont les suivantes :

proposer et structurer

- Recherche d'une relation simple (la plus économique) affine entre la vitesse "après" (v') et chacune des grandeurs décrivant les wagons (v_1 , m_1 , m_2). Cette recherche aboutit à retenir uniquement $v' = k v_1$ $0 < k < 1$.

- Recherche de la structure du coefficient k .

L'examen du tableau de sens de variation montrant que k dépend de m_1 et de m_2 , on propose aux élèves de poser à titre d'hypothèse, les autres hypothèses plus simples ayant été rejetées, que les grandeurs m_1 et m_2 interviennent, toujours au premier degré, de la manière suivante :

$$\frac{am_1 + bm_2}{cm_1 + dm_2} \quad (\text{rapport de combinaison linéaire pour raison d'économie et d'homogénéité})$$

L'interdépendance des grandeurs ayant été exprimée, les lettres a , b , c et d représentent des coefficients numériques.

- Recherches des coefficients numériques a , b , c et d . Une démarche de recherche de ces coefficients est proposée aux élèves. Elle s'appuie sur l'examen des cas extrêmes

$$(\text{si } m_1 \rightarrow \infty, v' \rightarrow v_1 ; \text{ si } m_2 \rightarrow \infty, v' \rightarrow 0)$$

et d'un cas particulier

$$(\text{si } m_1 = m_2, v' = 1/2)$$

qui envoie explicitement aux sens de variation observés ou prolongés mentalement.

Remarquons que tous ces cas ont été évoqués auparavant par les élèves dès leurs prédictions et leurs justifications des sens de variation. (Par exemple, l'idée d'"obstacle" attribuée au wagon immobile : "plus m_2 est grand, plus l'obstacle est important et plus v' est petit" ; "plus m_2 est petit, plus l'obstacle est petit, plus v_1 continue à la même vitesse v_1 ").

Signalons que l'examen de ces cas nécessite un apport d'informations de la part du professeur :

apporter des informations

1) Mise en relation, des événements observés ou prolongés mentalement, traduits à l'aide des grandeurs m et v , et de la valeur du rapport $\frac{am_1 + bm_2}{cm_1 + dm_2}$ correspondant à chaque événement :

2) Passage de m_2 très grand (en soi) à m_2 beaucoup plus grand que m_1 (grand par rapport à) :

3) Passage de "tend vers" (\rightarrow) à "égal à" ($=$) à proximité de la valeur 0.

Le professeur propose aux élèves un tableau à double entrée du type suivant :

CONSTRUCTION PERSONNELLE	APPROPRIATION
<p>Recherche de relations par analogie et différence (mêmes grandeurs physiques, mais valeurs différentes $v_2 = 0, V_2 \neq 0$)</p>	

c'est la coordination d'un certain nombre de connaissances qui fait problème, plus que la maîtrise de chacune d'elle

Soulignons que la démarche systématique qui est proposée aux élèves n'est pas disponible au départ, bien qu'elle s'appuie sur une succession de procédures accessibles, chacune prise isolément, à la plupart d'entre eux. C'est la coordination d'un certain nombre de connaissances qui fait problème, plus que la maîtrise de chacune d'elles.

Quatrième activité : réinvestissement de la recherche de relation sur les situations 3 et 4 (T.P. 1 heure 30)

	Evénements	Rapport k	Conclusion
m_2 augmente et devient $m_2 \gg m_1$	$v' \rightarrow 0$	$k \rightarrow \frac{b}{d}$	$b = 0$
m_1 augmente et devient $m_1 \gg m_2$	$v' \rightarrow v_1$	$k \rightarrow \frac{a}{c}$	$a = c$
$m_1 = m_2$	$v' = \frac{1}{2}v_1$	$k = \frac{a}{a+d} = \frac{1}{2}$	$a = b = c$
	d'où $v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$		

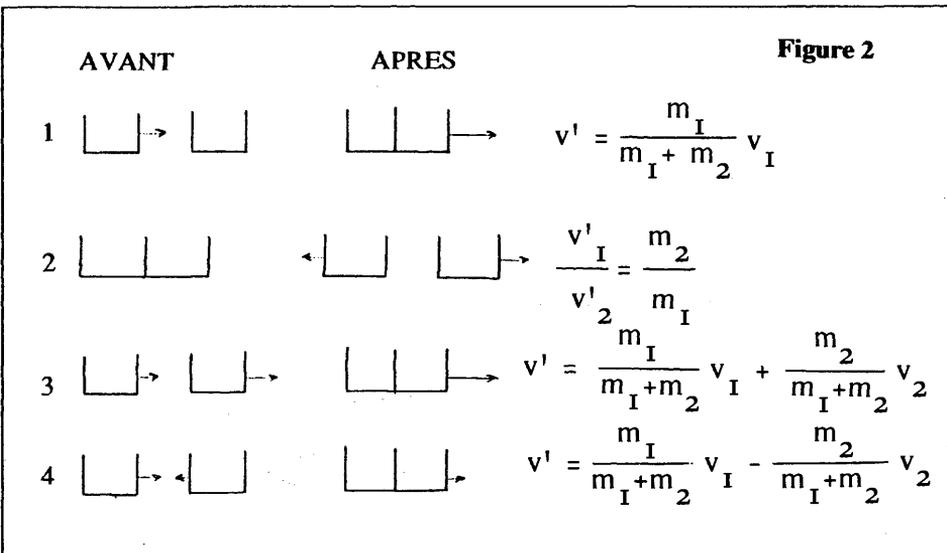
Cinquième activité : exploitation des relations fonctionnelles (cours 1 heure)

CONSTRUCTION PERSONNELLE	APPROPRIATION
	Reformulation des relations obtenues (la vitesse prise comme grandeur algébrique)
	<u>Constitution de deux classes d'événements</u> : accrochage éclatement
	Description de chaque wagon : <u>le groupement \overline{mv}</u>
	Description de chaque wagon de l'avant à l'après : <u>transfert de \overline{mv}</u>
	Description de l'ensemble des wagons <u>conservation de \overline{mv}</u>

• Passage de l'arithmétique à l'algèbre

constitution de classes d'événements :

A l'issue de la séance de réinvestissement de la démarche de recherche de relations fonctionnelles, les élèves sont parvenus à exprimer les relations fonctionnelles entre les grandeurs masse et vitesse pour les quatre situations expérimentales envisagées au début de la séquence d'enseignement. Elles s'expriment ainsi



le passage de l'arithmétique à l'algèbre

La situation 1 a été considérée comme un cas particulier des situations 3 et 4. C'est le cas où la vitesse v_2 est nulle. Les situations 3 et 4 se différencient par le sens de déplacement du wagon 2 ou encore par le sens de sa vitesse. Les situations 1, 3 et 4 sont similaires d'un point de vue événementiel : avant le choc les wagons se déplacent séparément, après le choc ils se déplacent ensemble. Si l'on considère le caractère algébrique de la vitesse ces trois situations peuvent s'exprimer par une seule relation :

$$\bar{v}' = \frac{m_1}{m_1+m_2} \bar{v}_1 + \frac{m_2}{m_1+m_2} \bar{v}_2$$

Ce faisant on constitue une classe d'événements, apparemment disparates au début de l'apprentissage : la classe des **accrochages**.

La constitution de cette classe d'événements ne se justifie qu'en prenant appui sur un changement de symbolisme mathématique, lequel traduit le passage de la vitesse envisagée arithmétiquement (ce que font spontanément les élèves en début d'apprentissage) à la grandeur vitesse considérée comme algébrique.

Introduire les propriétés des grandeurs au moment où l'analyse des situations expérimentales l'exige

Il est à noter que les propriétés des grandeurs, retenues dans la description des situations, sont celles, nécessaires et suffisantes pour répondre aux questions que les élèves sont en train de traiter (prévoir la vitesse de mobiles en translation rectiligne dans une seule direction). Le caractère vectoriel de la vitesse n'interviendra que plus tard, lors de questions envisagées à propos de mobiles se déplaçant dans tout le plan.

• Propriétés de \bar{P} et description des objets

La recherche des propriétés s'est effectuée à partir d'un questionnement, mené par le professeur, portant sur les descriptions qui peuvent être faites des objets et de leur évolution. Ce questionnement est conduit à partir de l'examen des deux relations finalement retenues au terme de la constitution des classes d'événements.

recherche des propriétés de P à partir de l'étude des relations rendant compte des classes d'événements

Les descriptions proposées par l'enseignant sont relatives :

- aux wagons pris séparément :

$$\begin{aligned} m_1 \bar{v}' + m_2 \bar{v}' &= m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2 \\ m_1 \bar{v}_1' &= - m_2 \bar{v}_2' \end{aligned}$$

Une telle description permet de mettre en évidence le groupement mv , ce qui est traduit par le professeur par *les wagons possèdent du "mv"*.

- à l'évolution de chaque wagon entre l'avant et l'après :

$$\Delta m \bar{v}_1 = - \Delta m \bar{v}_2$$

Ceci permet de mettre en évidence que ce qui est "perdu" par l'un est "gagné" par l'autre wagon et ainsi d'établir le transfert de mv.

- à l'ensemble des wagons, avant et après le choc :

$$\Sigma \overline{mv} = \Sigma mv'$$

Ceci permet de mettre en évidence la constance de "mv".

Les propriétés du groupement " \overline{mv} " étant ainsi établies à partir de questionnements portant sur la description des systèmes, ce groupement est institué comme une nouvelle grandeur. Des informations sont alors données concernant l'unité de la grandeur et le symbole littéral " \overline{P} " utilisé pour la désigner. La proposition d'une relation générale exprimant la loi de conservation est également avancée et proposée comme principe à utiliser pour analyser d'autres situations.

Instauration du principe de conservation in fine

3.2. Utilisation du modèle

Sixième activité : résolution de problèmes papier-crayon (5 heures)

La grandeur quantité de mouvement étant fondée par un ensemble de propriétés, les élèves sont amenés à traiter un ensemble de situations et de questions afférentes. Celles-ci se présentent, pour la plupart, sous forme d'énoncés de problèmes. La progression de ces problèmes répond à deux exigences :

utilisation du modèle et extension du champ expérimental exploré par le modèle

1. Entraînement des élèves à mener les opérations intellectuelles en jeu dans une démarche de modélisation (constitution d'une représentation de la situation, étude des conditions expérimentales d'utilisation d'un principe...).
2. Constitution du champ expérimental exploré par le modèle.

Rappelons que dans la phase de construction du modèle, le champ expérimental est limité aux déplacements horizontaux, dans une même direction, de deux objets sur lesquels s'exercent des frottements faibles. Dans la phase d'utilisation du modèle, il est étendu aux déplacements d'un grand nombre d'objets, dans des directions différentes ; les déplacements ne sont pas nécessairement horizontaux ; les frottements peuvent être très faibles ou au contraire très importants. Sont également envisagés des "chocs" élastiques avec ou sans contact. Toutes sortes d'objets peuvent être en cause (macroscopiques ou microscopiques), des solides, des liquides ou des gaz. Les situations peuvent également varier selon la complexité événementielle de l'"avant", du "pendant" et de l'"après" interaction. Au total les élèves ont analysé seize situations soit collectivement soit individuellement (travail à la maison).

CONCLUSION

Nous venons de voir à propos de la séquence d'enseignement décrite précédemment que la gestion de la progression des élèves a reposé en grande partie sur une succession de situations-problèmes. La conception de ces situations s'est appuyée sur des analyses relatives au domaine de connaissance (les concepts, les activités de modélisation...) et aux élèves (leurs connaissances premières, leur fonctionnement...). Il en a été de même pour la conception des aides didactiques (informations, questionnements, guidages, logiciel...) qui ont permis aux élèves de construire et de s'appropriier le modèle proposé. Ces aides didactiques ont eu pour visée de conduire les élèves à développer des connaissances à partir de ce qu'ils connaissent ou pratiquent déjà, ce que nous appelons les "précurseurs développementaux". La mise au point de ces aides a reposé ainsi sur une connaissance du fonctionnement des élèves face aux situations problèmes, lesquelles ont été retenues à l'issue d'une première analyse du domaine de connaissance et des objectifs de formation envisageables en première année de lycée.

des propositions
qui portent sur le
mode de gestion
de la formation
des connaissances auprès des
élèves

Nous soulignerons que la mise au point d'un tel enseignement a nécessité la mise au point de dispositifs de recherches par une équipe pluridisciplinaire (professeur, didacticien, psychologue).

L'étude de faisabilité concernant cet enseignement (Lemeignan & Weil-Barais, 1987) montre qu'il est possible, sans abaisser les objectifs de formation, de conduire une majorité d'élèves à mieux maîtriser les conceptualisations et les démarches scientifiques, à condition d'opérer une gestion conséquente des activités de modélisation proposées dans le cadre de l'enseignement de la physique. La gestion que nous préconisons s'appuie à la fois sur une démarche de construction et sur une démarche d'appropriation de connaissances. Cette démarche "mixte" semble favoriser le développement d'attitudes actives de la part des élèves. Elle permet par ailleurs de limiter à une durée raisonnable le temps qu'il est possible de consacrer à un même thème d'enseignement.

Bien que les propositions que nous formulons pour l'enseignement de la mécanique en classe de seconde soient largement en rupture avec les pratiques actuelles (consistant bien souvent en la réalisation par le professeur d'un nombre très limité d'expériences sur une table ou sur un banc à coussin d'air), ces propositions portent essentiellement sur le mode de gestion de la formation des connaissances. En aucun cas nous n'avons été amenés à envisager de modifications quant au

contenu de l'enseignement. Celui-ci garde, selon nous, toute sa valeur formatrice, à condition bien entendu qu'il se présente aux élèves sous une forme assimilable, ce que nous sommes parvenus en grande partie à réaliser.

Gérard LEMEIGNAN
 Annick WEIL-BARAIS
 Laboratoire Interuniversitaire de
 Recherche sur l'Enseignement des
 Sciences Physiques et de la Technologie,
 Université Paris VII

BIBLIOGRAPHIE

CHAMPAGNE A.B., GUNSTONE R.F., KLOPFER L.E. 1985. "Instructional consequences of students' knowledge about physical phenomena", in WEST L.H.T. & PINES A.L. (Eds), *Cognitive structure and conceptual change*, New York, Academic Press.

DRIVER R., ERIKSON G. 1983. "Theories-in-action : some theoretical issues in the study of students' conceptual frame-works in science". *Studies in Science Education*, 10, 37-60.

DRIVER R., OLDFHAM V. 1986. "A constructivist approach to curriculum development in science". *Studies in Science Education*, 13,

GIORDAN A. & DE VECCHI G. 1987. *Les origines du savoir ; des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*, Delachaux et Niestlé.

GIL PERES D. 1985. "Science learning as a conceptual and methodological change". *European Journal of Science Education*, 7, 3, 231-236.

GILBERT J., WATTS M. 1983. "Concepts, misconceptions and alternative conceptions : changing perspectives in science education". *Studies in Science Education*, 10, 61-98.

Mc DERMOTT L.C. 1984. "Critical review of research in the domain of mechanics", in DELACOTE G. & TIBERGHEN A. (Eds). *Research in physics education : proceedings of the first international workshop*, C.N.R.S., Paris.

LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A., 1987. "Construction inductive d'un modèle en mécanique et résolution de problèmes". In : COLOMB J. & RICHARD J.F. (Eds), *Résolution de problèmes en mathématique et physique*, I.N.R.P., Collection Rapports de Recherche, 12, 145-1987.

LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A., 1987. "Apprentissage de la modélisation à propos de l'enseignement de la mécanique au lycée", in : J.L. MARTINAND (Ed). **Enseignement et apprentissage de la modélisation**, Action concertée Recherche en Education et en Formation, Rapport de fin de contrat, LIRESPT, Université Paris 7 et CNRS (UA 663), 77-155.

LEMEIGNAN G., & WEIL-BARAIS A. 1988. "Etude de quelques activités de modélisation", in G. VERGNAUD, G. BROUSSEAU & M. HULIN (Eds). **Didactique et acquisition des connaissances scientifiques**, La Pensée Sauvage, 229-244.

SAADA-ROBERT M. & ACKERMAN-VALLADAO E., 1985. "Le développement cognitif et la psychologie génétique : Piaget" in : J. MATHIEU & R. THOMAS, **Manuel de Psychologie**, Vigot, 223-248.

VIENNOT L. 1979. "Spontaneous reasoning in elementary dynamics". **European Journal of Science Education**, 1, 205-221.

MODELE PARTICULAIRE ET ACTIVITES DE MODELISATION EN CLASSE DE QUATRIEME

Alain Chomat,
Claudine Larcher,
Martine Méheut

Quelles activités de modélisation les élèves de quatrième peuvent-ils réaliser ? Dans le contexte de l'introduction d'un modèle particulière de la matière, nous présentons une séquence d'enseignement qui permet aux élèves de pratiquer des activités de modélisation : construire, faire évoluer, appliquer un modèle. L'élaboration progressive d'un modèle est rendue possible par l'introduction d'un axiome imposant certaines permanences sur lesquelles on s'appuie pour systématiser les points de vue de l'explication de différents phénomènes. La démarche pédagogique mise en oeuvre comporte des activités de production : de représentations iconiques, de lecture de ces représentations, de discussion sur la pertinence de ces représentations pour rendre compte des phénomènes de référence.

I - INTRODUCTION

importance de la modélisation dans l'activité du physicien

Les démarches de construction et d'utilisation de modèles ayant une place importante dans l'activité du physicien, il semble utile de développer très tôt chez les enfants une attitude de modélisation et de faire acquérir les démarches intellectuelles mises en jeu dans la modélisation ; dans de nombreux pays des modèles particuliers sont introduits dès les premières années d'enseignement : citons les curricula danois (Ask Nature), écossais (Science for the 70's), anglais (Revised Nuffield Chemistry), polonais (Introduction Course) et israélien (Structure de la matière) mis en place entre 1975 et 1978, et l'actuel programme français.

aptitude des enfants à se servir d'un modèle

Les évaluations globales des curricula cités ci-dessus comportent des aspects contradictoires : *"Les enfants de toute capacité ont peu de succès dans l'interprétation d'expériences en terme de théorie particulière"* (Jeffrey, 1978) ou *"La théorie cinétique moléculaire leur semble très naturelle et ils s'en servent comme d'un outil pour résoudre tout nouveau problème qu'on leur pose"* (Staszal, 1979). Ces désaccords peuvent sans doute être attribués à la diversité non seulement des champs de référence expérimentaux des modèles utilisés et des fonctions du modèle mais aussi des démarches pédagogiques plus ou moins inductives ou dogmatiques ; en effet si le programme français affiche une démarche dogmatique, plusieurs cursus

ont par contre opté pour une stratégie inductive ; ils s'appuient sur les travaux de Piaget (1968) qui concluent à la construction de schémas atomistiques par les sujets au stade formel parallèlement à l'affirmation de la conservation de la matière. Ainsi pour le Scottish Integrated Course "les élèves font des expériences à partir desquelles ils arriveront à la conclusion que la matière est particulaire" (Mee, 1971).

Il nous a paru intéressant d'étudier dans quelle mesure un enseignement sur la structure de la matière pouvait permettre le développement de démarches de modélisation.

La séquence d'enseignement que nous présentons ici a été élaborée dans le cadre d'une recherche INRP-DP1 menée de 1985 à 1987 et a concerné 14 classes de quatrième de collège.

Cette recherche s'est déroulée en deux phases :

- **La phase exploratoire** a comporté une réflexion sur quelques aspects épistémologiques des modèles, une analyse des ouvrages scolaires français comme illustration d'une démarche dogmatique de présentation d'un modèle particulaire ; elle a aussi comporté l'analyse de travaux antérieurs portant sur la description par les élèves de quelques transformations physiques de la matière soit avant enseignement, soit après enseignement, soit encore au cours de démarches mises en oeuvre pour induire la construction d'un modèle ce qui nous a permis d'étudier la faisabilité d'une démarche inductive. Enfin, nos propres constats à partir d'entretiens individuels et de questionnaires exploratoires nous ont conduits à renoncer à envisager la construction empirique d'un modèle particulaire par les élèves et à choisir une stratégie, un champ de référence, un modèle et une démarche pédagogique originaux.

- **La phase de mise en oeuvre** a comporté une évaluation par questionnaires avant enseignement des connaissances des élèves dans le champ de référence choisi, la mise en oeuvre de la séquence d'enseignement présentée ci-après ainsi que l'analyse des productions de classe (fiches), l'évaluation par questionnaires après enseignement de l'appropriation par les élèves du modèle élaboré au cours de la séquence d'enseignement.

dogmatisme ou
redécouverte

connaissances
préalables des
phénomènes de
référence

2. ELABORATION DE LA SEQUENCE D'ENSEIGNEMENT

2.1. Stratégie

L'analyse des représentations spontanées des élèves met en évidence que si certaines situations sont favorables à l'expression d'une représentation en termes de "particules", ces particules ne sont en fait souvent que des petits morceaux auxquels sont attribués toutes les propriétés du tout. Il ne s'a-

particules ou petits morceaux ?

git pas là d'un changement de point de vue, il n'y a pas modélisation. Les essais d'établissement de conflit cognitif (Nussbaum et Novick, 1982) et les questionnaires exploratoires que nous avons effectués montrent que les élèves disposent d'explications ponctuelles qui les satisfont, qu'ils attribuent aux particules une variabilité de propriétés tout à fait contraire à la fonction prévisionnelle d'un modèle (Halbwachs, 1973, O'Neil, 1972) : pour pouvoir prévoir, il faut que les propriétés ne soient pas soumises à des variations incontrôlées.

axiome d'invariance comme genre du modèle

Nous avons donc décidé de poser le problème d'une représentation unifiée de différents phénomènes et d'introduire de façon axiomatique l'insécabilité et l'indéformabilité des particules comme germe d'un modèle à construire. L'invariance des propriétés des particules doit conduire les élèves à introduire une variabilité des relations entre particules (distances, organisation) pour rendre compte des variations observées et à construire des relations sémantiques liant les deux types de description. L'induction porte sur l'enrichissement du modèle et non pas sur l'introduction d'un modèle.

L'ensemble des situations de référence a été organisé de telle sorte que leur succession permette une mise à l'épreuve et un enrichissement progressif de la syntaxe du modèle par la construction de relations sémantiques entre descriptions empiriques et descriptions mettant en jeu les particules.

2.2. Modèle et champ de référence

un champ de référence limité

L'étude des manuels nous a montré que le champ de référence envisagé par les programmes français était trop large : si un modèle particulaire peut effectivement rendre compte de l'ensemble des phénomènes proposés, ce modèle qui inclut différents types de particules, sécables et non sécables, les notions d'énergie et d'interaction, n'est pas accessible actuellement aux élèves de quatrième. Le modèle proposé et les représentations qui en sont données ne jouent pas alors un rôle explicatif. *"Le modèle qui donne à voir ne donne à voir qu'à l'initié qui connaît le support conceptuel qui justifie ce modèle"* (G. Bachelard, 1979). Par ailleurs, nous pourrions signaler la difficulté pour les élèves de l'acquisition simultanée de deux types de description pour des phénomènes qui leur étaient jusque là inconnus (phénomènes d'oxydoréduction par exemple). Nous avons cherché à répondre à ces difficultés en limitant le champ de référence aux différents états de la matière et à quelques transformations physiques (expansion, dilatation, compression), situations déjà rencontrées par les élèves.

Le choix de ce champ de référence a priori familier aux élèves a l'avantage de ne mettre en jeu que des particules ayant toutes la propriété d'insécabilité. Le modèle que l'on cherche à faire construire par les élèves est alors défini de la façon suivante par sa syntaxe :

- particules insécables qui gardent les mêmes dimensions, la

même masse ;

- ces particules peuvent être plus ou moins distantes les unes des autres ;

- elles peuvent être plus ou moins agitées de mouvements désordonnés ;

- elles peuvent être plus ou moins libres de se déplacer les unes par rapport aux autres ;

- leur organisation spatiale peut être ordonnée ou désordonnée.

un modèle assez simple

C'est l'ensemble de ces propriétés des particules énoncées sans référence à une description phénoménologique particulière, que nous appelons la syntaxe du modèle.

Cette transposition didactique fait surtout apparaître des termes qualitatifs ; de plus les notions d'interaction et d'énergie - sous-jacentes aux notions d'agitation et de liberté de mouvement des particules - n'émergent pas.

2.3. Méthode pédagogique

Pour chacune des situations de référence, une description empirique est exprimée par les élèves, les termes retenus, sur lesquels peut porter la modélisation, sont clairement répertoriés par le professeur. Les élèves sont alors invités à proposer une représentation iconique des particules pour rendre compte des termes retenus en assurant la compatibilité de chaque représentation avec la syntaxe déjà établie. la lecture de ces représentations permet de faire exprimer les relations sémantiques.

activités des élèves

Pour cela quelques représentations choisies par le professeur comme propositions convenables ou comme représentatives d'erreurs typiques sont soumises à discussion : il s'agit pour les élèves de juger si ces représentations respectent la syntaxe déjà établie ou s'il est nécessaire de modifier la syntaxe du modèle pour qu'il puisse rendre compte à la fois de cette nouvelle situation et des situations déjà traitées. Il s'agit aussi de déterminer si ces représentations traduisent effectivement les termes à modéliser ; il faut pour cela exprimer **comment** sont traduits les différents phénomènes observés.

C'est le travail de production et de discussion de représentations qui permet d'élaborer le modèle en s'appuyant sur son caractère figuratif. Les aspects signifiants ou non signifiants des symboles peuvent aussi être discutés.

rôle du professeur

Après ces phases de production et de discussion, le professeur rassemble et éventuellement reformule les différentes propositions des élèves. Cette étape de normalisation comporte une part de généralisation de ce qui a été proposé dans un cas. Dans certaines étapes, la reformulation a été accompagnée d'informations supplémentaires, soit pour se rapprocher d'un modèle normatif, soit parce que la nouvelle formulation nous paraissait intéressante à discuter dans la suite des étapes.

3. LES ACTIVITES DE MODELISATION AU COURS DE LA SEQUENCE D'ENSEIGNEMENT

La séquence d'enseignement se réfère à la compression d'un gaz, l'air comme mélange de gaz, la diffusion gazeuse, l'état solide, la sublimation, l'état liquide.

La succession de ces situations de référence a été choisie pour permettre un enrichissement progressif du modèle.

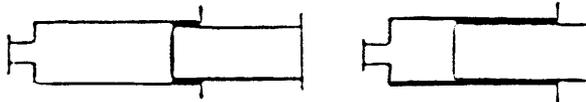
Pour chaque étape de la séquence de classe nous mettrons en évidence les différentes phases de travail : description phénoménologique, production de représentations iconiques, discussion des représentations ; nous précisons le rôle du professeur et le rôle des élèves ainsi que l'aspect prépondérant de l'activité de modélisation que cette étape doit permettre, enfin nous donnerons les résultats de l'analyse des productions de classe (fiches de travail des élèves présentées en encadré).

construction progressive du modèle

3.1 A propos de la compression d'un gaz

- Description phénoménologique

Le phénomène de référence est la compression d'un gaz coloré enfermé dans une seringue. Elle est réalisée par le professeur qui, de plus, schématise au tableau la position du piston à deux moments.



Situation 1

Situation 2

Les élèves doivent indiquer par écrit et individuellement "ce qui a changé, ce qui n'a pas changé, pour la seringue, pour le gaz". La forme de la question a pour but de conduire à une description en termes de changement de l'état de l'échantillon de gaz enfermé dans la seringue.

Les résultats :

La compression du gaz est décrite par plus d'un tiers des élèves en termes d'invariance de la quantité de gaz (36%), par d'autres en termes d'invariance de la masse (12%) ; la couleur (25%) et la nature du gaz (10%) sont des invariants évoqués.

Le changement est décrit par une très forte proportion des élèves (60%) en termes de passage à un état de "tassement". Les autres variations évoquées sont principalement celles du volume du gaz (38%) et de sa couleur (39%).

invariance de la quantité

"tassement" plutôt que "pression"

Pour décrire ce phénomène, les élèves utilisent donc des grandeurs physiques telles que masse et volume et des descripteurs qualitatifs tels que la couleur, le "tassement". On peut remarquer que la pression a été peu évoquée, malgré l'étude qui en est faite en classe de sixième. Ceci nous semble pouvoir être attribué à deux éléments de la situation didactique : d'une part la manipulation a été effectuée par l'enseignant, ce qui a supprimé toute perception directe par les élèves, des actions mécaniques, d'autre part, la question était posée en termes de description d'états d'un échantillon de gaz, ce qui a pu éliminer certains éléments de description événementiels.

Parmi les éléments de description proposés par les élèves lors d'une discussion générale, certains sont repris par le professeur et transcrits au tableau. Ils constituent, après complètement, les termes à modéliser :

les termes à modéliser

- dans les deux situations
 - le même gaz
 - la même quantité de gaz
- dans la situation 2
 - le volume du gaz est plus petit que dans la situation 1
 - le gaz est tassé
 - le gaz peut encore se tasser

(notons que ce dernier terme a été ajouté à la description des élèves).

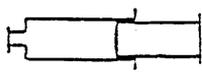
• Productions d'une représentation iconique

F21

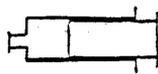
• On peut se représenter un gaz comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

• Représentez le gaz dans les situations 1 et 2 pour rendre compte de ce qui a été constaté



Situation 1



Situation 2

La tâche proposée est relativement complexe puisqu'il s'agit de produire une représentation iconique de deux états pour

rendre compte de la description phénoménologique, tout en respectant la proposition axiomatique du modèle particulaire. Le rapport des surfaces des cases imposées pour ces représentations traduit le rapport des volumes disponibles pour le gaz dans la seringue. la traduction de "le volume du gaz est plus petit après qu'avant", dans laquelle le terme volume, mal différencié du terme quantité, pourrait être cause de difficultés, n'est donc pas à la charge de l'élève. la fiche doit être remplie individuellement (le document 1 donne quelques exemples de réponses d'élèves).

Les résultats :

L'analyse des fiches des élèves donne les résultats suivants :

Une seule forme pour toutes les particules	86%
Même forme et même taille dans les deux cases	84%
Même nombre de particules dans les deux cases	23%
Particules non jointives dans la première case	84%
Particules non jointives dans la deuxième case	57%
Particules plus serrées dans la deuxième case	84%

les élèves respectent la syntaxe du modèle

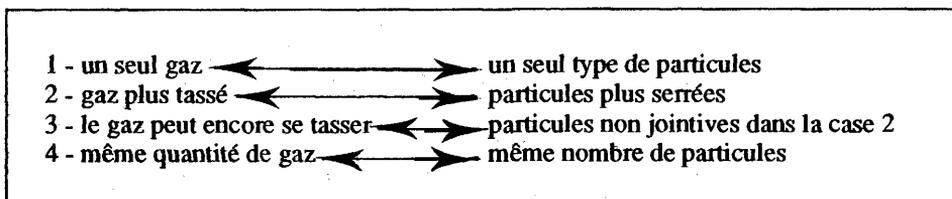
On constate que la syntaxe imposée (les particules ne se déforment pas, gardent les mêmes dimensions) a été respectée par un pourcentage important d'élèves, mais ceux-ci ne se limitent pas à un respect stérile ; à partir du "germe du modèle" dont ils disposent, une forte majorité d'élèves introduit, par le dessin, de nouvelles propriétés syntaxiques :

- les distances entre particules sont non nulles (4% seulement des élèves ont découpé l'espace de représentation en tranches ou en quadrillage - 9% ont dessiné des particules jointives dans la case 1) ;

- les distances entre particules sont modifiables (une minorité de 16% des élèves n'imagine pas cette possibilité).

les relations sémantiques

Les représentations proposées sont alors cohérentes avec les relations sémantiques suivantes :



1.1

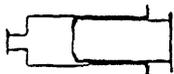
On peut se représenter un gaz comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

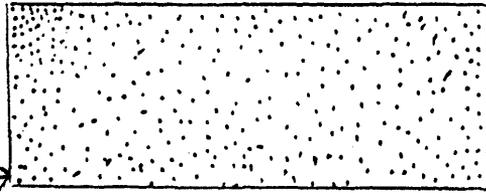
Représentez le gaz dans les situations 1 et 2 pour rendre compte de ce qui a été constaté



Situation 1



Situation 2



c'est la même

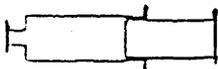


1.2

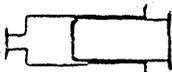
On peut se représenter un gaz comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

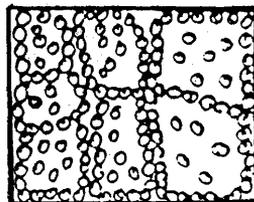
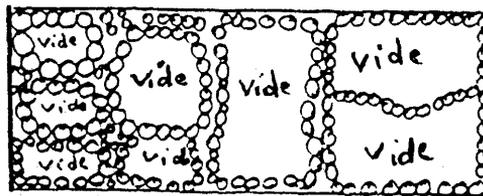
Représentez le gaz dans les situations 1 et 2 pour rendre compte de ce qui a été constaté



Situation 1



Situation 2

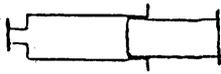


F.1

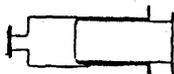
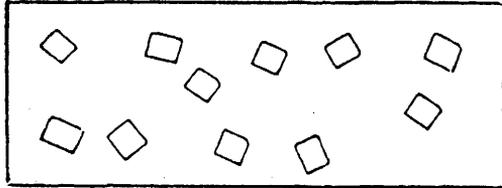
On peut se représenter un gaz comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

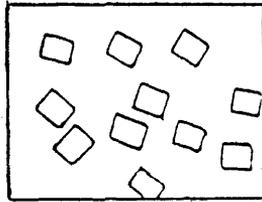
Représentez le gaz dans les situations 1 et 2 pour rendre compte de ce qui a été constaté



Situation 1



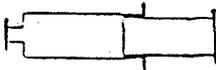
Situation 2



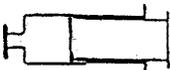
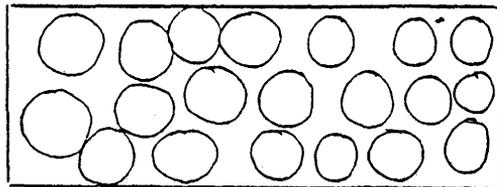
On peut se représenter un gaz comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

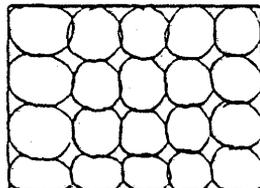
Représentez le gaz dans les situations 1 et 2 pour rendre compte de ce qui a été constaté



Situation 1



Situation 2



Pour l'expérience avec la seringue, 5 constatations concernant le gaz ont été faites.
 Les représentations A, B, C proposées vous paraissent-elles rendre compte correctement de chaque constatation ?
 Répondez en mettant une croix dans la colonne CORRECTE ou INCORRECTE et précisez les raisons de votre jugement.

CONSTATATIONS	Représentation A		Représentation B		Représentation C	
	situation 1		situation 1		situation 1	
	correcte	incorrecte	correcte	incorrecte	correcte	incorrecte
On a toujours le même gaz dans les deux situations	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
La quantité de gaz n'a pas changé d'une situation à l'autre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Le gaz occupe tout le volume dans chaque situation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Le gaz est plus tassé dans la situation 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Le gaz peut encore se tasser dans la situation 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		RAISONS		RAISONS		RAISONS
		Les particules ont toujours la même forme.		La particule est toujours la même forme.		Les particules ont toujours la même forme.
		Le nombre de particules n'a pas changé dans la situation 1 et 2.		Le nombre de particules n'a pas changé dans la situation 1 et 2.		Il y a plus de particules dans la situation 2 que dans la situation 1.
		Les particules bougent à chaque moment elles occupent un espace.		Elles occupent tout le volume car il n'y a aucun espace vide.		idem (que pour A)
		Les particules se sont rapprochées.		Les particules se sont rapprochées.		idem
		il y a un espace entre les particules, elles peuvent donc encore se tasser.		les particules ne touchent l'une, il n'y a plus d'espace vide.		idem (que pour A)

Pour l'expérience avec la seringue, 5 constatations concernant le gaz ont été faites.
 Les représentations A, B, C proposées vous paraissent-elles rendre compte correctement de chaque constatation ?
 Répondez en mettant une croix dans la colonne CORRECTE ou INCORRECTE et précisez les raisons de votre jugement.

CONSTATATIONS	Représentation A		Représentation B		Représentation C	
	situation 1		situation 1		situation 1	
	correcte	incorrecte	correcte	incorrecte	correcte	incorrecte
On a toujours le même gaz dans les deux situations	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
La quantité de gaz n'a pas changé d'une situation à l'autre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Le gaz occupe tout le volume dans chaque situation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Le gaz est plus tassé dans la situation 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Le gaz peut encore se tasser dans la situation 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		RAISONS		RAISONS		RAISONS
		idem. qu'il y a toujours les mêmes symboles		idem		idem
		parce que dans la situation 2 il y a plus de particules		dans la situation 2 il y en a moins		il y a autant de particules
		parce que il n'y a aucun espace		idem		il y a trop d'espace entre chaque particule.
		parce que les amolts ont été même trop serrés		ils sont exactement pareils que la situation 1		On les voit plus serrés
		il est déjà trop serré		On voit encore, il y a assez de place pour qu'il se tasse.		il y a assez d'espace pour qu'il se tasse.

Au cours de cette phase apparaît le problème de la séparation entre espace et matière. Ce problème semble avoir été résolu sans difficulté par certains élèves, à travers l'explication de l'état de plus ou moins grande compression du gaz.

séparation espace et matière

- "J'ai laissé des espaces parce que c'est pas comprimé à fond"
- "Le gaz est plus tassé dans la situation 2, oui"
- "Oui bien plus, il y a moins d'espace entre".

On trouve cependant certains réticences, qui se traduisent par des propositions de choix de formes pour les particules.

- "Si on fait des triangles, on pourra plus les encastrent que des ronds"
- "Si on fait des carrés, on pourra bien les tasser, les serrer au maximum"

ou par des discussions sur la signification de l'espace laissé libre :

mais le vide, c'est quoi ?

- "Mais on sait parce que c'est le blanc, c'est ça !"
- "C'est du vide, il n'y a pas d'air"
- "Quand il n'y a pas d'air, il n'y a pas forcément le vide"
- "Là où il n'y a pas de gaz, alors c'est quoi ?"
- "Il y en a toujours, du gaz"
- "Mais non, regarde là entre, il n'y a pas de gaz"
- "Alors, il y a quoi, là entre ?"

Les résultats :

Relation sémantique	Etablie par
1. un seul gaz ↔ un seul type de particules	49% d'élèves
2. gaz plus tassé ↔ particules plus serrées	38% d'élèves
3. le gaz peut encore se tasser ↔ particules non jointives dans la case 2	46% d'élèves
4. même quantité de gaz ↔ même nombre de particules	50% d'élèves

Exemples d'établissement de la relation sémantique 1

- "Les particules sont les mêmes, c'est le même gaz"
- "Les particules sont pareilles dans les deux situations"
- "Ce sont les mêmes particules"

les relations sémantiques proposées par les élèves

Exemples d'établissement de la relation sémantique 2

- "Il y a le même nombre de particules dans un endroit plus petit"
- "Oui, car les particules sont moins espacées"
- "Il y a moins d'espace entre les particules"
- "Les vides sont moins importants"

Exemples d'établissement de la relation sémantique 3

- "Car il y a de l'espace entre les particules"

- "Il peut encore se tasser, il reste du vide entre les particules"
- "parce que les particules ne se touchent pas"

Exemple d'établissement de la relation sémantique 4

- "Oui, c'est correct, il y a autant de particules dans la deuxième que dans la première"
- "Le nombre de particules est le même dans les deux situations"
- "Incorrect, car il y a plus de particules en 1 et moins en 2"

La sémantique utilisée implicitement dans les dessins produits paraît donc pouvoir être explicitée par environ la moitié des élèves après discussion.

Par ailleurs, les professeurs suscitent des discussions sur le caractère signifiant du nombre et de la forme des particules représentées, et sur la signification des espaces interparticulaires : ce dernier point visant la construction de la relation :

espace entre particules \longleftrightarrow vide

comme conséquence des relations :

ensemble de particules \longleftrightarrow matière

compressibilité \longleftrightarrow distances non nulles

Après ces différentes phases de travail (description phénoménologique, production d'une représentation, explicitation des relations sémantiques), le professeur énonce des propositions qui devront par la suite être considérées comme vraies pour tous les gaz. Le germe initial est maintenant enrichi par les relations sémantiques suivantes :

- le nombre des particules représentées est caractéristique de la quantité de gaz considérée,
- l'espace entre les particules est vide,
- un seul type de particules pour un seul gaz,
- les distances entre particules sont grandes dans les gaz par rapport à la taille des particules.

Cette étape comporte une généralisation de ce qui a été proposé à partir d'une seule situation de référence et un apport supplémentaire : distances grandes dans les gaz par rapport à la taille des particules.

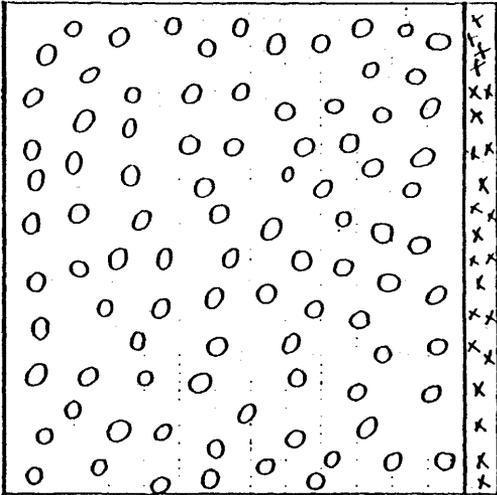
3.2. A propos de l'air comme mélange de gaz

• Production d'une représentation

Le référent est un échantillon d'air. Sa composition est rappelée par les élèves avec l'aide du professeur.

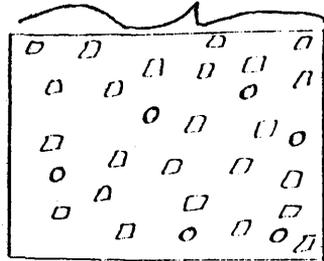
Il s'agit de représenter de l'air en ne considérant que ses deux constituants essentiels, l'oxygène et l'azote, et leurs proportions respectives (le document 3 donne quelques exemples de ces représentations).

Représentation de l'air



O = azote
x = oxygène

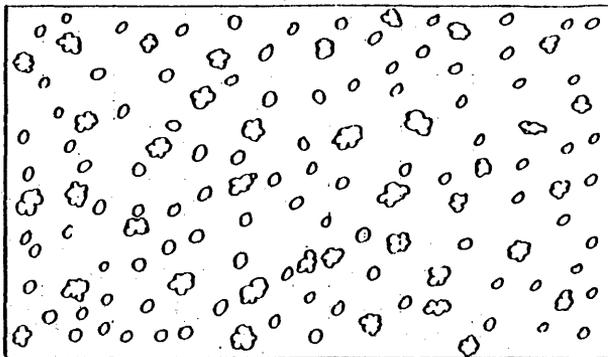
représentation de l'air



0,1mp {
 O = OXYGÈNE = $\frac{1}{5} = 20\%$
 □ = AZOTE = $\frac{4}{5} = 80\% = 4x \text{ plus d'oxygène}$
 6 particules d'Oxygène
 6 x 4 = 24 particules d'Azote.

représentation de l'air sachant que c'est essentiellement un mélange d'oxygène et d'azote

le 21.01.86



{
 ○ oxygène
 □ azote

Une très forte majorité d'élèves (80%) traduit correctement l'existence de deux gaz en les représentant par des particules différant par leur forme, leur taille ou leur couleur, mais un élève sur deux seulement (48%) traduit les proportions de chacun des constituants.

- Critique des représentations

de nouvelles relations sémantiques

Trois représentations proposées par les élèves sont reproduites au tableau ; leur pertinence est discutée. Cela aboutit à l'établissement de nouvelles relations sémantiques :

plusieurs gaz	←—————→	particules différentes (légende nécessaire)
gaz mélangés	←—————→	particules différentes bien réparties
proportions des constituants de l'air	←—————→	proportions des différents types de particules

3.3 A propos d'une diffusion gazeuse

- Production d'une représentation

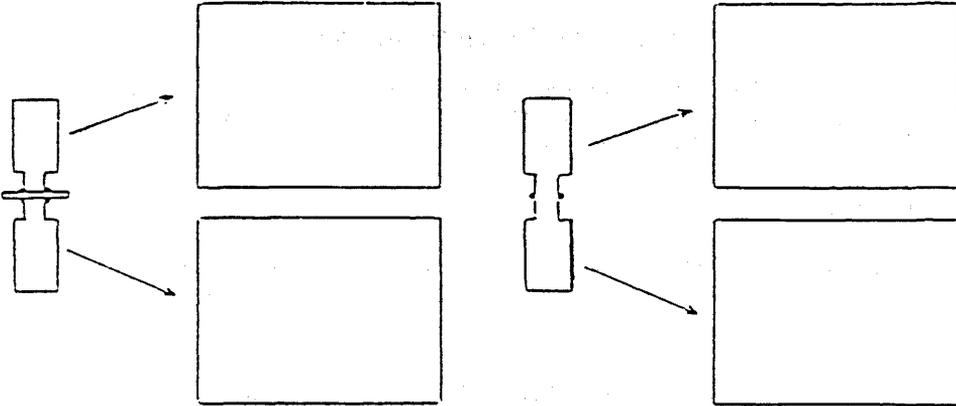
évolution du modèle

C'est à la fois une phase d'utilisation du modèle mais aussi d'évolution. La situation de référence est une diffusion d'un gaz coloré dans l'air. Ces gaz ayant été modélisés précédemment, il s'agit non seulement de représenter des états (avec l'aspect de conservation) mais aussi d'**interpréter comment** la diffusion a pu se faire. La question change. Le modèle va être enrichi, son caractère explicatif va s'affirmer.

Le professeur présente deux flacons, ouverture contre ouverture, séparés par une plaque de verre, l'un contenant un gaz coloré (dioxyde d'azote dont le nom n'est pas prononcé afin d'éviter, dans les représentations une confusion avec l'oxygène de l'air). La plaque est enlevée. Les élèves observent le mélange de l'air et du gaz coloré.

La fiche de travail proposée est à remplir individuellement (le document 4 donne quelques exemples de réponses d'élèves).

- Représentez les gaz des flacons. Précisez ce qui est représenté dans chaque cadre.



- Quelle propriété doivent avoir les particules pour rendre compte de ce qui s'est passé ? _____
- _____
- _____

• Les résultats

Les réponses des élèves sont fort satisfaisantes quant à l'utilisation du modèle. 83% d'entre eux représentent correctement le mélange des gaz, en conservant le nombre de particules de chacun des constituants. La réponse majoritaire (40%) à cette question est que les particules ont la possibilité de se mélanger.

Un élève sur quatre (23%) parle de déplacement, de mobilité des particules, pour "expliquer" ¹ le mélange :

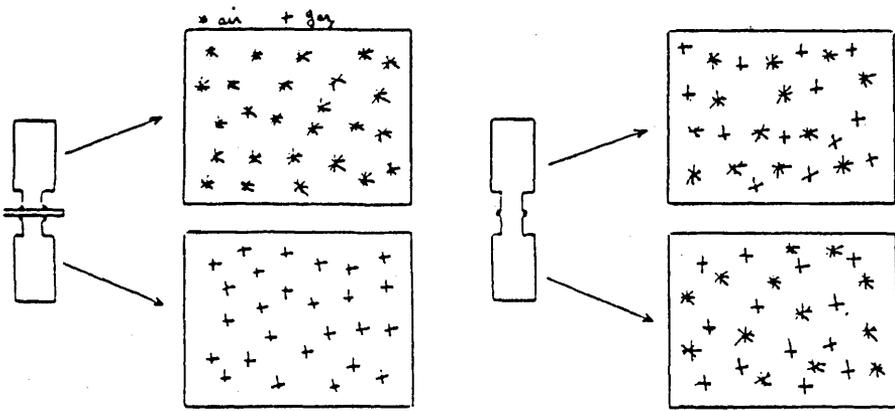
- "Les particules doivent avoir la propriété de pouvoir se mélanger, donc de se déplacer"
- "Les particules doivent être mobiles entre elles, elles doivent pouvoir être mélangées à d'autres particules"
- "Les particules se répartissent également dans les deux bouteilles donc elles bougent"
- "Les particules peuvent se déplacer n'importe où"
- "Les particules doivent pouvoir monter ou descendre pour se mélanger aux autres"
- "Elles sont mobiles, elles vont dans les deux sens".

les particules sont
mobiles

(1) Si la mobilité des particules est une propriété nécessaire pour expliquer la diffusion, elle n'est pas suffisante : l'agitation brownienne des particules de gaz et le critère d'entropie sont en fait également nécessaires pour que ce processus puisse avoir lieu.

• Représentez les gaz des flacons. Précisez ce qui est représenté dans chaque cadre.

F2

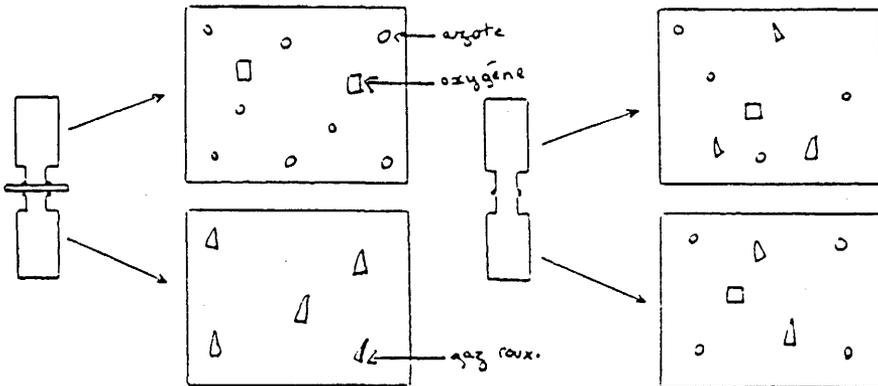


• Quelle propriété doivent avoir les particules pour rendre compte de ce qui s'est passé ?

Le gaz en haut doit être lourd et le bas, léger donc elles se mélangent.

• Représentez les gaz des flacons. Précisez ce qui est représenté dans chaque cadre.

F3



• Quelle propriété doivent avoir les particules pour rendre compte de ce qui s'est passé ?

Les particules se déplacent et se mélangent

• Représentez les gaz des flacons. Précisez ce qui est représenté dans chaque cadre. F3

air

CO₂ - carbone

Quelle propriété doivent avoir les particules pour rendre compte de ce qui s'est passé ?

C'est que les particules peuvent se déplacer
monter, descendre etc.

• Représentez les gaz des flacons. Précisez ce qui est représenté dans chaque cadre. F3

O₂ oxygène

N₂ azote

CO₂ gaz carbone

O₂ = oxygène
O = azote
| = gaz carbone

Quelle propriété doivent avoir les particules pour rendre compte de ce qui s'est passé ?

Les particules ont profitées de l'espace en plus pour l'ensemble
(c'est pour les deux gaz). Elles ont la propriété de se déplacer.

Des représentations des élèves de la classe, choisies par le professeur, sont reproduites au tableau et discutées comme dans le cas de l'air.

Au cours de ces phases relatives à la modélisation d'un gaz sont apparus et ont été discutés des aspects fondamentaux d'un modèle particulaire de la matière : distinction entre espace et matière, existence du vide, mobilité des particules. Le caractère aléatoire de l'agitation n'est pas apparu : seuls les aspects "moyens" ont été exprimés par certains élèves : mouvement d'ensemble des particules vers le haut ou vers le bas. C'est le professeur qui a affirmé le caractère désordonné du mouvement des particules dans un gaz, et qui a reformulé en termes de liberté des particules à se déplacer les unes par rapport aux autres.

3.4. A PROPOS DE L'ETAT SOLIDE

• Production d'une représentation

C'est une phase d'évolution du modèle du fait que le champ de référence s'élargit à l'état solide.

le champ de référence s'élargit, le modèle évolue

Nous avons déjà souligné qu'une lecture phénoménologique était un préalable nécessaire à l'élaboration d'un modèle. Ainsi les élèves sont amenées à s'exprimer sur les propriétés des solides qu'ils connaissent. Après discussion, le professeur retient et module un certain nombre de propositions relatives à la compressibilité, l'expansibilité, la fluidité, propriétés déjà retenues pour l'état gazeux.

La tâche proposée aux élèves est dans ce cas de discuter la validité des propositions qui ont été énoncées pour modéliser l'état gazeux et de proposer d'éventuelles modifications pour que le modèle puisse rendre compte aussi des propriétés de la matière à l'état solide. Cette fiche est remplie individuellement après discussion en petits groupes (le document 5 donne quelques exemples de réponses d'élèves).

F4

Comme pour les gaz, on peut se représenter un solide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles, et ayant les propriétés suivantes :

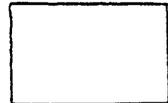
- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des solides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un solide)

Articles qui conviennent aussi pour les solides _____

Articles qu'il faudrait modifier _____

Propositions de modifications _____



F1

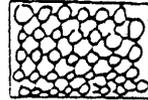
Comme pour les gaz, on peut se représenter un solide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles, et ayant les propriétés suivantes :

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des solides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un solide)

Articles qui conviennent aussi pour les solides 2

Articles qu'il faudrait modifier 3 4 5 6



Propositions de modifications

7. Il faudrait supprimer le mot gaz et mettre le mot solide à la place.
3. L'espace n'est pas vide entre les particules car même les solides seraient fluides
4. La distance n'est pas grande autrement les solides seraient plus compressibles
5. Elles ne sont pas agitées car les solides seraient fluides comme dans l'article 3.
6. elles sont attachées car autrement les différentes raies écrites ci-dessus seraient fausses

F1

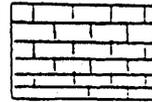
Comme pour les gaz, on peut se représenter un solide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles, et ayant les propriétés suivantes :

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des solides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un solide)

Articles qui conviennent aussi pour les solides 2 7

Articles qu'il faudrait modifier 3 4 5 6



Propositions de modifications

3. Il n'y a pas d'espace entre les particules
4. Il n'y a pas de distance
5. Si il n'y a pas de distance entre elle, elles ne peuvent pas bouger donc elle ne sont pas mobile
6. elles sont liées car il n'y a pas de distance

F 2

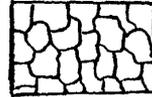
Comme pour les gaz, on peut se représenter un solide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles, et ayant les propriétés suivantes :

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des solides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un solide)

Articles qui conviennent aussi pour les solides 2, 7.

Articles qu'il faudrait modifier : 3, 4, 6-5



Propositions de modifications 3: Il n'y a pas d'espace vide entre les particules pour un solide. 4: si il n'y a pas d'espace entre les particules, il ne peut pas être grand (l'espace). 6: Si il n'y a pas de vide, elles ne peuvent être détachées, libres, elles sont donc liées. 5: si elles sont liées entre elles, elles ne peuvent être agitées.

F 1

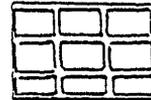
Comme pour les gaz, on peut se représenter un solide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles, et ayant les propriétés suivantes :

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des solides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un solide)

Articles qui conviennent aussi pour les solides 2, 7

Articles qu'il faudrait modifier 4, 5, 6



Propositions de modifications 4: d'il n'y a pas d'espace entre les particules, elles ne peuvent être grandes. 5: les particules ne sont pas agitées. 6: Les particules sont liées entre elles, car elles ne bougent pas, elles ne sont pas agitées.

les élèves ont maintenant une certaine pratique des activités de modélisation

Pour traiter ce problème, les élèves ont à leur disposition le même axiome que précédemment et six autres propositions validées pour le gaz au cours des séances précédentes :

- le nombre de particules représentées est caractéristique de la quantité de matière considérée,
- l'espace entre les particules est vide,
- les distances entre particules sont grandes, par rapport à la taille des particules,
- les particules sont fortement agitées de mouvements désordonnés,
- les particules ne sont pas liées, elles sont libres les unes par rapport aux autres,
- un gaz pur est représenté par une seule espèce de particules, un mélange par plusieurs espèces de particules.

Ils ont aussi une certaine pratique de production de représentations symboliques et de leur validation par vérification de leur compatibilité avec les termes de la description phénoménologique.

• Les résultats :

Sur les représentations proposées pour un solide, on constate :

particules toutes identiques	75%	} 74%
particules peu séparées	40%	
particules collées ou imbriquées	34%	
particules très éloignées	15%	

Notons que la proportion de "particules imbriquées" a pour conséquence une diminution du taux de "particules identiques" par rapport à ce qu'on obtient dans le cas d'un gaz.

Des représentations proposées par les élèves de la classe, choisies par le professeur, sont reproduites au tableau et discutées.

Les modifications proposées par les élèves sont :

PROPOSITION ENONCEE DANS LE CAS D'UN GAZ	MODIFICATION PROPOSEE DANS LE CAS DES SOLIDES
Les distances entre particules sont grandes	Les distances entre particules sont très petites 50% nulles 17%
L'espace entre les particules est vide	Pas de vide, pas d'espace 16%
Les particules sont agitées de mouvements désordonnés	Les particules sont immobiles 52% Les particules sont peu agitées 12%
Les particules ne sont pas liées, sont libres les unes par rapport aux autres	Les particules sont liées 38% ou pas liées Les particules sont collées pas entièrement collées 7%

Exemples de modifications proposées par les élèves :

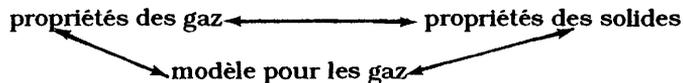
- "La compressibilité n'étant pas très grande, les particules sont donc peu espacées"
- "elles ne peuvent pas aller où elles veulent car il n'y a pas d'espace entre elles"
- "comme les solides se déforment très faiblement, il ne doit pas y avoir beaucoup de vide"
- "il n'y a pas de vide puisque les particules sont liées"
- "il y a très peu de vide, ça fait comme si elles étaient collées"
- "si elles étaient agitées, on ne pourrait pas tenir le bol dans les mains"
- "elles n'ont plus de mouvement désordonné puisqu'elles se touchent"
- "elles ne bougent pas"
- "puisque il n'y a pas d'espace, elles ne peuvent pas bouger"
- "elles ne peuvent pas être agitées car elles sont prises dans le solide"
- "les particules s'attirent mutuellement et forment un tout"
- "les particules ne sont pas libres les unes par rapport aux autres, elles s'attirent"
- "elles ne peuvent pas se déplacer car elles sont liées les unes aux autres"
- "elles ne bougent pas donc elles ne sont pas libres mais collées".

distances, mouvement, indépendance des particules

La moitié environ des élèves (52%) construit un modèle statique pour les solides. Peu nombreux (12%) sont ceux qui maintiennent une certaine agitation. Ils sont également 50% à dire que dans un solide, les particules sont un peu espacées, l'argument principal (16%) étant la faible compressibilité des solides, mais nombreux sont ceux qui proposent des particules en contact. Enfin, 45% supposent l'existence de liens entre les particules.

La démarche complexe que les élèves doivent mettre en oeuvre lors de l'extension du champ de référence nécessite de gérer à la fois trois types de relations :

démarche d'adaptation d'un modèle les gaz à un modèle pour les solides et pour les gaz



pour évoluer vers un modèle pour les solides et les gaz.

Les propositions énoncées pour traduire les propriétés des solides sont principalement formulées par les élèves, soit en introduisant des adjectifs antinomiques - particules agitées/immobiles - distances grandes/nulles - soit en utilisant le même vocabulaire que celui qui a été proposé pour les gaz : l'enrichissement consiste en l'introduction d'une variabi-

l'enrichissement
du modèle
consiste en l'introduction
d'une variabilité

lité (particules peu agitées, peu liées, pas libres alors qu'elles étaient jusque là agitées, libres, pas liées).

On peut remarquer une différence d'appropriation entre les propositions formulées en termes de mouvement (64%) ou en termes de libertés des particules les unes par rapport aux autres (38%) ; pourtant ces propositions sont dépendantes l'une de l'autre dans la relation sémantique que l'on pourrait établir :

pas d'expansibilité	}	les particules ne se déplacent pas les unes par rapport aux autres elles ne sont pas libres de se déplacer elles ont liées
pas de fluidité		

Les élèves ont plus de mal à s'exprimer en termes de "liens" entre particules. Il est vrai que la notion d'interaction à distance ne leur est pas familière : quelques élèves ont cependant évoqué à ce propos les interactions entre aimants.

Rappelons que le mouvement des particules a bien été introduit pour les gaz par une partie des élèves mais que l'aspect agitation désordonnée et la reformulation de cette possibilité de mouvement en termes de liberté des particules les unes par rapport aux autres ont été ajoutés par les professeurs.

Par ailleurs, on constate une proportion importante d'élèves (39%) qui fournissent une représentation d'un solide dans lequel les particules sont rangées régulièrement alors qu'aucun des termes de la description macroscopique retenue n'imposait cette propriété ; les argumentations recueillies ne permettent pas de déterminer la raison de ce choix qui peut n'être que pragmatique pour représenter des particules bien serrées les unes contre les autres à l'intérieur d'une case aux contours rectilignes. Il y a eu par la suite normalisation de cette propriété pour les solides cristallins.

on dispose maintenant
d'un modèle commun aux gaz
et aux solides

Dans cette étape d'évolution du modèle, les élèves ont juxtaposé aux propositions énoncées pour les gaz des propositions formulées pour les solides dans des termes semblables : cette syntaxe commune pourra constituer un modèle commun aux gaz et aux solides.

3.5 A propos d'une sublimation

La situation physique de référence proposée est ici la sublimation de cristaux d'iode dans un ballon fermé. La manipulation est observée par les élèves qui peuvent constater la formation d'un nuage violet.

La description phénoménologique est formalisée en termes de :

- deux états d'une même matière
- conservation de la quantité de matière
- l'espace occupé est beaucoup plus grand à l'état gazeux qu'à l'état solide.

L'air nécessairement enfermé dans le ballon n'est pas mentionné.

• Production de représentation

le rapport des surfaces traduit le rapport des volumes solide-gaz

L'aspect "différence de volume occupé dans les deux états" est ici pris en charge a priori sur la fiche proposée individuellement aux élèves (fiche 5) : le rapport des surfaces des deux cases d'espace représentatif, traduit le rapport des volumes occupés par les solides au début de l'expérience et par le gaz à la fin de l'expérience.

F5

• En vous servant du modèle, représentez le solide iode et le gaz iode



solide

→



→



gaz

→

La consigne de cette tâche ne rappelle pas les différentes propositions, énoncées de façon générale pour les gaz et pour les solides cristallins, dont disposent alors les élèves.

gaz	solides cristallins
est représenté par un ensemble de particules	idem
qui ne se coupent pas, ne se déforment pas, gardent la même masse	idem
le nombre de particules représentées est caractéristique de la quantité de matière considérée	idem

l'espace entre les particules est vide	idem
les distances entre particules sont grandes par rapport à la taille des particules	sont très petites
les particules sont fortement agitées de mouvements désordonnés	les particules sont très peu agitées
les particules ne sont pas liées, elles sont libres les unes par rapport aux autres	les particules sont très peu libres les unes par rapport aux autres l'ensemble des particules est ordonné
un gaz est représenté par une seule espèce de particules, un mélange par plusieurs espèces de particules	un solide pur est représenté par une seule espèce de particules

Il s'agit de deux états d'une même matière

Cette tâche est proposée alors que des gaz et un solide ont déjà été représentés. La seule information nouvelle à intégrer est qu'il s'agit des deux états d'une même matière. On peut donc considérer qu'il s'agit d'une phase d'application du modèle (le document 6 donne quelques exemples de réponses d'élèves).

• Les résultats :

On peut observer les résultats suivants comparés pour la phase gazeuse et la phase solide :

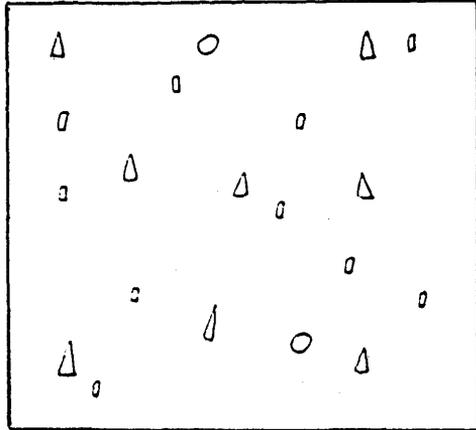
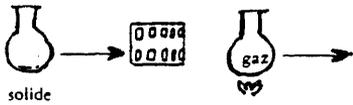
un même type de particules	pour la phase gazeuse	91%
	pour la phase solide	91%
distances entre particules	grandes en phases gazeuse	78%
	faibles en phase solide	64%
	nulles	18%
organisation des particules	réparties dans tout l'espace	83%
	en désordre dans le gaz	85%
	ordonnées en phase solide	71%

On remarque une meilleure différenciation du solide et du gaz sur le critère de distance (84%) que sur le critère d'ordre (70%).

Un petit pourcentage d'élèves (8%) a éprouvé le besoin de représenter, dans la case impartie à la phase gazeuse, l'air mé-

F5

- En vous servant du modèle, représentez le solide iode et le gaz iode



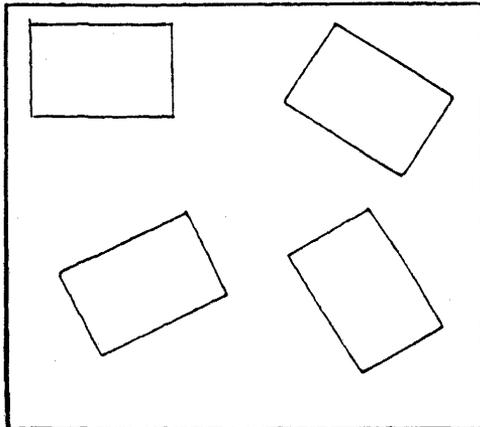
Δ azote ◻ iode

F5

- En vous servant du modèle, représentez le solide iode et le gaz iode

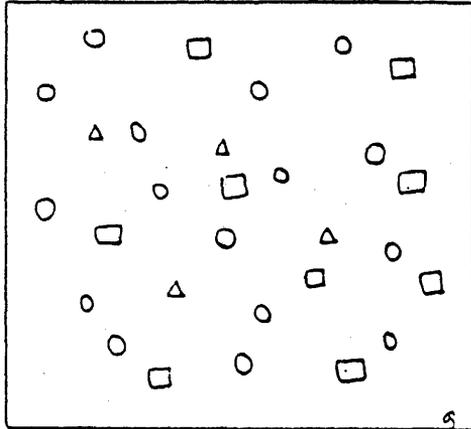
(gros) cristaux de iode à l'état gazeux

◻ cristaux de iode à l'état solide



F5

• En vous servant du modèle, représentez le solide iode et le gaz iode

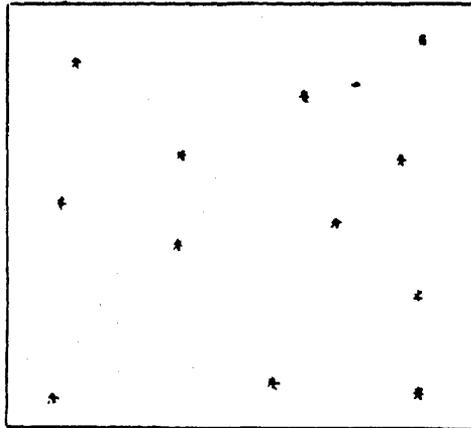


o iode
Δ oxygène
□ azote

un peu grossi

F5

• En vous servant du modèle, représentez le solide iode et le gaz iode



*: iode

langé aux vapeurs d'iode : ils ont tous pour cela utilisé une représentation particulière de l'air.

En ce qui concerne la prise ne compte de la relation de conservation de la matière dans le changement d'état, on observe d'une phase à l'autre :

la différenciation solide-gaz est plutôt traduite par la distance entre les particules

même forme de particules	81%
même taille de particules	41%
même nombre de particules	60%

Le non-respect de la taille des particules d'une case à l'autre peut avoir plusieurs origines :

- négligence ou maladresse dans le dessin ;
- interprétation erronée du statut de la case (certains élèves interprètent la différence de taille des deux cases comme un changement d'échelle) ;
- inobservation plus ou moins consciente de l'axiome initial du fait que l'attention se porte sur d'autres points ;
- retour à des conceptions personnelles (les particules grossissent quand on les chauffe) ;
- refus de la description du phénomène en termes de conservation de l'identité du corps et de la quantité de matière.

le non-respect de la constance de la taille des particules peut avoir plusieurs origines

Les représentations choisies par le professeur sont reproduites au tableau et discutées par l'ensemble de la classe.

3.6 A propos de l'état liquide

C'est encore une phase d'évolution du modèle. Le champ de référence est ici l'état liquide.

élargissement du champ de référence à l'état liquide

La démarche suivie sera la même que pour l'état solide : description phénoménologique, production de représentations, examen critique du modèle proposé pour les gaz (le document 7 donne quelques exemples de réponses d'élèves).

La description phénoménologique retenue, comparée à celle des solides et des gaz a été :

GAZ	SOLIDE	LIQUIDE
grande compressibilité	compressibilité très faible	compressibilité très faible
expansibilité	pas d'expansibilité	pas d'expansibilité
fluidité	pas de fluidité	fluidité

Elle a été reformulée de façon à éviter les obstacles de vocabulaire.

Des représentations proposées par les élèves de la classe, choisies par le professeur, sont reproduites au tableau et discutées.

61% des élèves disent que les distances entre particules sont très petites, l'argument principal étant la faible compressibilité.

F6

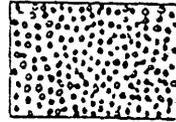
* Comme pour les gaz, on peut se représenter un liquide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

* Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des liquides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un liquide).

Articles qui conviennent aussi pour les liquides: par rapport au gaz
1-2-3-5-6-7

Articles qu'il faudrait modifier : 4-6



Propositions de modifications: Les distances entre les particules de petites. Les particules ne sont pas liées entre elles elles sont très peu liées les unes par rapport aux autres

F6

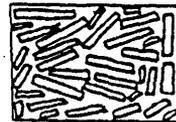
* Comme pour les gaz, on peut se représenter un liquide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

* Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des liquides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un liquide).

Articles qui conviennent aussi pour les liquides: 2,6,7,5,3

Articles qu'il faudrait modifier : 24



Propositions de modifications: article 24: les distances entre les particules sont très minimes pour une éventuelle compressibilité très faible

F6

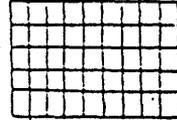
• Comme pour les gaz, on peut se représenter un liquide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

• Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des liquides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un liquide).

Articles qui conviennent aussi pour les liquides : 2.7

Articles qu'il faudrait modifier : 3.4.5.6



Propositions de modifications: Il y a peu d'espace entre les particules
des particules sont serrées les unes aux autres des particules s'agitent
mais elles sont toujours ordonnées des particules sont liées

F6

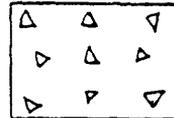
• Comme pour les gaz, on peut se représenter un liquide comme un ensemble de particules trop petites pour être visibles et ayant les propriétés suivantes:

- une particule ne se déforme pas
- une particule garde les mêmes dimensions
- une particule garde la même masse
- une particule ne se coupe pas

• Examinez les articles 2 à 7 énoncés pour les gaz. Vous paraissent-ils convenir pour rendre compte des propriétés des liquides ? (Pour vous aider, essayez de représenter un liquide).

Articles qui conviennent aussi pour les liquides : 2-4-6-7

Articles qu'il faudrait modifier : 3-4-5



Propositions de modifications: (3) Non, il n'est pas vide (l'espace) car
les particules sont un peu compressibles (4) Non, car si
elles étaient grandes, les particules pourraient beaucoup
se compresser, ce qui est faux (5) Non, car les particu-
les du liquides ne se propagent pas, ne se déplacent pas

té des liquides (16%). Très peu d'élèves (4%) pensent qu'il n'y a aucun espace entre les particules.

- "Eh, y' a pas d'espaces dans un liquide, y a pas de vides"
- "Bon, à votre avis est-ce bien un liquide ?"
- "non, y'a de l'espace et dans un liquide y'a pas d'espace"

Il y a recherche d'une cohérence interne du modèle proposé

Pour 29% d'élèves, les particules sont peu ou très peu agitées. Certains argumentent cet aspect en invoquant les faibles distances entre particules ou le manque de place. Il y a là recherche d'une cohérence interne du modèle qu'ils proposent.

En ce qui concerne les interactions entre particules, 10% des élèves affirment que leur liberté est très réduite.

trois critères pour différencier solides, liquides, gaz

Sur les trois critères de différenciation apparus pour distinguer solide et gaz (distances plus ou moins grandes, agitation plus ou moins grande, liberté plus ou moins grande) le liquide apparaît pour les élèves très proche du solide pour le premier critère (distances très petites 61%) mais plus proche du gaz pour le troisième critère, 1 élève sur 4 seulement souhaite modifier la proposition énoncée pour les gaz : les particules ne sont pas liées, elles sont libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. En ce qui concerne le second critère, la moitié des élèves considère le liquide comme proche d'un gaz, mais l'autre moitié souhaite modifier la proposition : les particules sont fortement agitées de mouvements désordonnés.

BILAN

Dans le champ de référence restreint envisagé, les élèves ont, au cours des séances, développé des activités qui nous paraissent constitutives de la démarche scientifique ; ils ont

les élèves ont développé des activités constitutives de la démarche scientifique

- proposé des interprétations de quelques phénomènes physiques dans le cadre d'un modèle particulière ;
- discuté par petits groupes les règles de correspondance entre description empirique de ces phénomènes et modèle proposé ;
- discuté la cohérence interne du modèle proposé

Les activités de production de représentations et les discussions en groupes ont été jugées motivantes par la quasi-totalité des élèves : en témoignent ces appréciations d'élèves recueillies quelques mois "après enseignement" de la séquence.

• Pour la production de représentations

"Cela donne une meilleure visualisation des choses"

"C'est plus simple pour expliquer"

"Le dessin permet de comprendre mieux et plus vite"

"Le dessin représente mieux ce que l'on veut dire"

- Pour les discussions en groupes

la production de représentations et les discussions en groupes ont été jugées motivantes par les élèves

"On apprend plus en écoutant et en discutant les idées des autres"

"Cela aide à trouver des explications"

"Pour les élèves têtus, c'est dur, mais pour les autres, c'est bien"

Les avis sont partagés en ce qui concerne les critiques de représentations et la formulation d'explications des phénomènes.

- Pour les critiques de représentations

"Ça permet de mieux comprendre les erreurs commises"

"C'est intéressant de voir comment d'autres élèves peuvent dessiner des particules qu'ils ne voient pas"

"On exprime notre désaccord. On donne des raisons précises"

- Mais aussi :

"C'est surtout démoralisant pour celui qui est venu faire son dessin au tableau"

"On ne peut pas savoir exactement comment est faite la matière donc on ne peut pas critiquer"

les avis sont partagés en ce qui concerne les critiques de représentations et les formulations d'explications

- Pour la formulation d'explication des phénomènes

"On a l'impression de créer nous-mêmes des nouvelles lois de la physique"

"Ça nous fait réfléchir et penser des choses qui des fois sont dures à imaginer"

"J'aime bien réfléchir à des choses que je ne connais pas"

Mais aussi :

"J'aime mieux qu'on donne la réponse et qu'ensuite je dise si je suis d'accord"

"Les explications que l'on donne sont souvent fausses. On invente n'importe quoi".

LES ENRICHISSEMENTS DU MODELE AU COURS DE LA SEQUENCE

Au cours de la séquence sont apparus des aspects fondamentaux d'une modélisation particulière de la matière. Certains de ces aspects ont été proposés par les élèves ; d'autres ont dû être ajoutés par le professeur pour servir de base à des enrichissements ultérieurs.

Dès la première représentation d'un gaz, la plupart des élèves ont construit des distances non nulles et variables entre particules pour rendre compte de la compressibilité des gaz. La

moitié des élèves a ensuite affirmé que les distances interparticulaires sont faibles dans les solides en arguant de leur faible compressibilité. Deux élèves sur trois considèrent le liquide comme proche du solide sur ce critère de distance.

Un quart des élèves environ précise qu'entre les particules il y a le vide, affirmant ainsi une distinction entre espace occupé et matière qui leur permettra de mieux accepter les variations de volume sans variation de masse.

les apports des
élèves

La plupart des élèves traduisent par ailleurs la conservation de la nature de la matière dans les transformations physiques par la conservation du type de particules mais la conservation de la masse est mal traduite en termes de nombre de particules. Ce dernier fait peut être interprété par l'imprécision de la consigne "Représenter le gaz, le solide".

En ce qui concerne le mouvement des particules, il a été introduit par un quart des élèves environ pour rendre compte de la diffusion d'un gaz. Pour les solides, la moitié des élèves environ proposent un modèle statique ; ceux qui maintiennent une certaine agitation de particules le font sans pouvoir mettre en relation cette agitation avec une propriété observable des solides. Les élèves considèrent en général le liquide comme proche du gaz sur le critère d'agitation des particules ; un sur trois cependant considère que les particules dans le liquide sont peu ou pas agitées comme dans un solide.

Ces enrichissements ont été, en situation de classe, proposés par au moins un quart des élèves.

Si on considère les aspects introduits par le professeur, on peut distinguer ce qui a trait aux propositions distance/taille des particules, ce qui a trait au caractère désordonné du mouvement des particules et à l'interdépendance des particules.

les apports du maître

Pour ne pas trop s'écarter d'un modèle normalisé, nous avons affirmé lors de la modélisation d'un gaz que les distances interparticulaires étaient grandes par rapport à la taille des particules ; nous avons ensuite proposé de discuter cette propriété lors de la modélisation d'un solide. En fait, les élèves auraient pu, sans cet ajout, arriver à la conclusion "les distances sont beaucoup plus grandes dans les gaz que dans les solides" à partir de la comparaison entre la compressibilité des gaz et celle des solides.

Le mouvement des particules dans les gaz, introduit par les élèves, a été reformulé en termes de particules libres de se déplacer, cette propriété discutée elle aussi lors de la modélisation d'un solide a été modifiée par deux élèves sur trois ; les arguments pouvant être l'absence de mouvement ou la cohésion du solide. Cette reformulation a néanmoins introduit quelques difficultés du fait que les élèves ont du mal à imaginer des particules "liées" sans lien, sans contact ; il s'ensuit que les solides sont parfois représentés avec des particules jointives au détriment de l'interprétation de leur compressibilité.

6. L'APPROPRIATION DU MODELE PAR LES ELEVES A L'ISSUE DE CETTE SEQUENCE

Deux questionnaires proposés après la séquence d'enseignement visaient à évaluer différents aspects de l'utilisation du modèle particulaire construit au cours des séances, que ce soit sous forme verbale ou à l'aide de représentations iconiques. Certaines questions à propos de situations très voisines de celles rencontrées durant la séquence appelaient une explication sans préciser le type de description. Cela devait permettre d'évaluer la mobilisation spontanée d'une explication en termes de particules. D'autres questions concernaient des situations soit déjà décrites phénoménologiquement mais pas encore modélisées, soit entièrement nouvelles pour les élèves. Pour ces situations, on demandait explicitement une description particulaire.

Nous analyserons en détail un exemple de chaque type de question, puis nous donnerons une synthèse des résultats obtenus.

- Exemple de mobilisation spontanée du modèle particulaire

Le document 8 donne un exemple de réponses d'élèves.

<p>Dans un ballon de football gonflé, on peut encore introduire de l'air (à l'aide d'une pompe, par exemple) sans changer le volume du ballon.</p>	<p>Dans un bidon plein d'eau, il est très difficile d'introduire encore de l'eau sans changer le volume du bidon.</p>
<p>Comment expliquerais-tu cela ?</p>	
<p>Pour l'air</p>	<p>Pour l'eau</p>
<p>.....</p> <p>.....</p>	<p>.....</p> <p>.....</p>

Dans un ballon de football gonflé, on peut encore introduire de l'air (à l'aide d'une pompe, par exemple) sans changer le volume du ballon.

Dans un bidon plein d'eau, il est très difficile d'introduire encore de l'eau sans changer le volume du bidon.

Comment expliquerais-tu cela ?

Pour l'air

..l'air.. est.. faite.. de.. plusieurs
particules. mais, entre.....
chaques particules. l'espace...
vide.. est.. important.. donc on
rajouter encore de l'air
sans changer le volume
du ballon.

Pour l'eau

L'eau.. est... faite.. de...
particules., mais ces....
particules ne peuvent....
pas.. beaucoup.. se resserrer
car l'espace entre chaque
particules est faible
donc elles ne peuvent pas
beaucoup se resserrer alors
il est donc difficile
d'introduire de l'eau
dans un bidon plein sans
changer le volume du bidon.

Dans leur réponse, 35% des élèves donnent des arguments uniquement phénoménologiques en ce qui concerne l'air (40% dans le cas de l'eau) alors que 27% développent des arguments purement particuliers ; 38% ont donné les deux types d'arguments.

Les arguments de type phénoménologique proposés par les élèves sont pertinents dans les trois quarts des cas.

En ce qui concerne les explications en termes de particules : 30% des élèves citent le vide entre les particules de l'air, mais seulement 17% entre les particules d'eau.

30% des élèves sans citer le vide font intervenir les distances entre particules.

Quelques élèves font une description en termes de particules non libres mais sans parler d'espaces entre particules.

Enfin, quelques élèves précisent que les particules bougent.

On peut noter par contre que 1 élève sur 10 environ attribue aux particules les propriétés de l'ensemble de la substance (particules qui gonflent).

- Exemple de mobilisation induite du modèle particulaire dans la description verbale d'une situation nouvelle

Le document 9 donne un exemple de réponses d'élèves.

On dispose d'une boîte séparée en deux compartiments A et B par une paroi solide très mince.

A	B
---	---

On introduit un gaz dans le compartiment A (on a fait le vide dans le compartiment B). Après un certain temps on constate qu'une partie du gaz est passée dans le compartiment B. La paroi n'a pas été détériorée.

Comment rendrais-tu compte, en utilisant les particules, du fait que le gaz passe à travers la paroi?

Malgré la consigne de l'énoncé, 16% des élèves donnent une argumentation purement phénoménologique à la diffusion. Mais environ 1 élève sur 3 propose un mécanisme adéquat faisant intervenir le mouvement des particules de gaz ; l'existence d'interstices entre les particules de la paroi de façon à ce que les particules de gaz puissent se faufiler entre les particules de la paroi (quelques-uns introduisent une comparaison entre la taille des particules de gaz et la taille des trous dans la paroi).

Si on regarde plus en détail les arguments avec lesquels ils construisent leur explication,

à propos du gaz :

- 1 élève sur 3 fait intervenir la possibilité de déplacement des particules de gaz en termes de liberté des particules ou de faible cohésion ;
- 1 élève sur 3 dit que les particules bougent, se déplacent ou sont agitées ;
- par contre, 1 élève sur 4 attribue aux particules des propriétés de type phénoménologique (fluides, expansibles)

à propos de paroi :

- 1 élève sur 3 ne prend pas en compte la paroi ;
- 1 élève sur 5 ne la prend en compte que pour citer la présence de trous ;
- pour 1 élève sur 3 ces trous sont des intervalles entre les particules de la paroi.

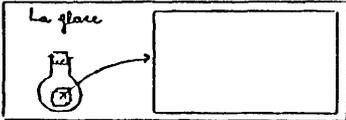
- Exemple de mobilisation induite du modèle particulaire dans une description iconique et verbale pour une situation nouvellement modélisée

Le document 9 donne un exemple de réponse d'élèves.

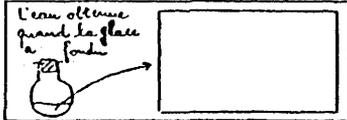
La glace est un solide cristallin. On met un morceau de glace dans un ballon. On ferme le ballon, on le pèse, on trouve 143 g. On laisse le morceau de glace fondre (en gardant le ballon bien fermé).

A l'aide de particules, représente :

La glace



L'eau obtenue quand la glace a fondu



Explique ce que tu as voulu montrer dans ces représentations :

.....

Une partie de cette tâche teste l'appropriation d'un modèle de description de l'état solide et de l'état liquide.

Pour la description du solide cristallin, on obtient :

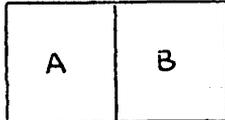
- 97% de particules identiques
- 56% de distances très faibles
- 85% de particules ordonnées.

Pour la description d'un liquide, on obtient :

- 97% de particules identiques
- 58% de distances très faibles
- 85% de particules désordonnées.

Document 9

On dispose d'une boîte séparée en deux compartiments A et B par une paroi solide très mince.



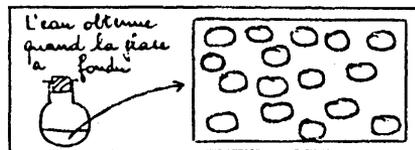
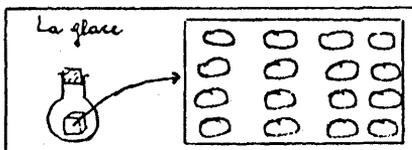
On introduit un gaz dans le compartiment A (on a fait le vide dans le compartiment B). Après un certain temps on constate qu'une partie du gaz est passée dans le compartiment B. La paroi n'a pas été détériorée.

Comment rendrais-tu compte, en utilisant les particules, du fait que le gaz passe à travers la paroi? ... La paroi entre A et B est un...

... solide... et le solide est fait de particules qui ont un espace vide entre elles donc le gaz dans la boîte A peut passer entre les particules du solide et aller dans la boîte B.

La glace est un solide cristallin. On met un morceau de glace dans un ballon. On ferme le ballon, on le pèse, on trouve 148 g. On laisse le morceau de glace fondre (en gardant le ballon bien fermé).

A l'aide de particules, représente :



Explique ce que tu as voulu montrer dans ces représentations :

... même matière \Rightarrow même particules.....
 Conservation de la quantité de la.....
 matière \Rightarrow même nombre de particules.....
 2 états se représentent différentes des particules

On remarque que les distances interparticulaires sont plus grandes dans le liquide que dans les solides, dans presque la moitié des cas.

En ce qui concerne la modélisation de la fusion, les aspects pertinents à prendre en compte étaient :

deux élèves sur
trois arrivent à mo-
déliser une situa-
tion entièrement
nouvelle

l'identité des particules dans le deux états	81%
la conservation du nombre de particules	72%

Dans les explications verbales, 8% des élèves indiquent que les particules sont plus agitées dans le liquide que dans le solide (quelques-uns disent "plus libres").

L'analyse des réponses nous permet de constater que :

- l'unité du type de particules pour une substance quel que soit son état et inversement la multiplicité des types de particules dans un mélange sont admises pour presque tous les élèves :

- la plupart des élèves différencient les états de la matière sur ces critères d'ordre mais un élève sur trois ne gère pas sans erreur le critère de distances interparticulaires ; ce résultat pouvait probablement être amélioré par une discussion plus précise de cet aspect des représentations au cours de la séquence d'enseignement. La variation des distances interparticulaires est bien mise en oeuvre pour rendre compte de la compression d'un gaz, mais seulement un élève sur deux la mobilise pour rendre compte de la dilatation d'un liquide ou d'un solide. Dans ces situations, un nombre non négligeable d'élèves ne respecte pas l'indéformabilité des particules (cela peut atteindre 1 élève sur 4)

- enfin, deux élèves sur trois ont construit une explication pour le phénomène de diffusion à travers une membrane en modélisant le gaz et le solide.

PERSPECTIVES

Les modèles construits par les élèves sont interprétatifs, essentiellement, d'aspects qualitatifs et quantitatifs de conservation dans des transformations physiques, mais ils sont peu prédictifs. En particulier, ils ne permettent pas de simuler un phénomène, en ceci qu'à partir d'un état d'un système, ils ne donnent aucune information sur les variations de grandeurs non conservées. Des possibilités de simulation à l'aide de modèles particuliers supposent des aspects cinétiques et énergétiques.

un modèle
cinétique

Dans cette perspective nous avons réalisé un film montrant une simulation dynamique des états de la matière. Il visualise l'agitation des particules en phase cristalline et en phase fluide

et donne une simulation très précise de la transition entre ces phases. Par ailleurs un logiciel interactif est en cours de réalisation. Il doit permettre une utilisation d'un modèle cinétique par les élèves. Nous nous proposons d'étudier les activités de modélisation supplémentaires rendues possibles par l'introduction de tels aspects cinétiques.

Alain CHOMAT
Collège A.Fournier, Clamart,
LIRESPT/INRP

Claudine LARCHER
Université Paris XI,
LIRESPT

Martine MEHEUT,
Lycée E.Delacroix, Maisons-Alfort,
LIRESPT/INRP

BIBLIOGRAPHIE

BACHELARD. G, 1979. Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles, **Actes du colloque : Elaboration et justification des modèles**. 1, 3-19

HALBWACHS.F, 1973. Histoire de l'explication en physique. **L'explication dans les sciences**. Flammarion, Paris, 72-119

JEFFREY.A.W., 1978. Physics in the teaching of integrated Science in Scottish secondary, Schools, a survey, **Physics in School**, Taylor and Francis Ltd, London, 189-202.

MEE. A.J., BOYD.P., RITCHIE.D., 1971. **Science for the 70's, Teacher's Guide 1**, Heinemann Educational Books Ltd, London.

MITCHELL.A.C., NOVICK.S, 1982. Learning difficulties associated with the particular theory of matter in the Scottish Integrated Science Course, **European Journal of Science Educational** 4, 429-440.

NOVICK.S, NUSSBAUM.J, 1978, Junior High School Pupil's understanding on the particulated nature of matter : an interview study, **Science Education**, 62, 3, 273-281.

NUSSBAUM.J, NOVICK.S, 1982. Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation : toward a principled teaching strategy. **Instructional Science**, 11, 183-200.

O'NEIL, 1972, **Faits et théories**. A.Colin éd, Paris.

PIAGET.J, INHELDER.B, 1968. De la conservation à l'atomisme. **Le développement des quantités physiques chez l'enfant**, Delachaux et Niestlé, Neuchatel, 81-140.

STASZEL.M, 1979. Teaching Structure of matter at introductory level, **Structure of matter in the school**, Roland Eötvös Physical Society, Budapest, 27-27.

THOMSEN.P, 1978. The danish Physics Chemistry project "Ask Nature", **Physics in School**, Taylor and Francis Ltd, London.

WALLISER.B, 1977. **Systemes et modèles**. Ed du Seuil, Paris.

LES REPRESENTATIONS DU CERVEAU : MODELES HISTORIQUES

Marie-Thérèse Mein

Une question essentielle posée dès le début des temps historiques est celle de la spécificité des phénomènes psychiques et de leur localisation, ainsi que celle du rapport entre ces phénomènes et notre corps matériel.

Au cours de l'Histoire des Sciences, la réponse à ces questions a pris des formes variées : thèse cardiocentrique ou céphalocentrique, cerveaux-machines, cerveau-mosaïque ou cerveau global se sont succédé ou plutôt ont coexisté sans se remplacer tout à fait. Le présent travail cherche à caractériser ces divers modèles explicatifs afin de mieux situer les modèles de notre temps.

Il ne s'agit pas ici de faire une étude exhaustive de l'Histoire des découvertes sur le cerveau, historique déjà largement étudié dans plusieurs ouvrages récents¹, mais bien d'essayer d'amorcer une réflexion sur les modèles explicites ou implicites utilisés par les différents auteurs à diverses époques.

Dans les ouvrages cités ci-dessous, il n'est pas fréquent de parler explicitement en terme de modèles (sauf Lanter-Laura, 1987) ; aussi le premier but de ce travail consistera à essayer de caractériser un certain nombre de conceptions-type auxquelles on puisse rattacher la pensée de tel ou tel chercheur.

Les modèles repérés sont le plus souvent de type analogique et on peut comparer ces analogies choisies au fil du temps, des modèles hydrauliques du XVII^e siècle à l'ordinateur de nos jours. Y-a-t-il eu remplacement d'un modèle périmé par un modèle plus "moderne" ? Y-a-t-il eu coexistence de plusieurs modèles ? Quels sont les modèles de notre temps ? C'est le but second de cet article d'apporter des éléments de réponse à ces diverses questions.

Enfin, si certains modèles anciens paraissent complètement dépassés (par exemple la localisation dans le coeur de phénomènes psychiques tel que les émotions, idée fondée sur des sensations élémentaires), ne peuvent-ils resurgir sous forme

(1) voir bibliographie : CHANGEUX, 1983 ; GOHAU, 1978 ; JEANNE-ROD, 1983 ; GIORDAN et alii, 1987 ; LURIA, 1978 ; LANTERI-LAURA, 1987 ; REUCHLIN, 1967.

de représentations-conceptions chez les enfants ou auprès d'un public non spécialisé ?

De fait, l'étude restera la plupart du temps "internaliste", c'est-à-dire ne cherchera pas à expliquer les changements de modèles par des variations dans les cultures en présence, mais seulement dans l'évolution de la science elle-même. Il n'en reste pas moins que les métaphores utilisées seront toujours très représentatives de "leur temps" (voir tableau récapitulatif).

Pour mémoire rappelons l'importance accordée au crâne (et au cerveau qui y est contenu ?) dès l'aube de la Préhistoire : collecte de crânes, élargissement du trou occipital en vue de consommer la cervelle et bien entendu, existence de trépanations préhistoriques soit pour soulager la pression intracrânienne à la suite d'un traumatisme, soit comme le soutiennent certains préhistoriens pour accroître le prestige des chefs.

1. LES CONCEPTIONS ANCIENNES

1.1. Des thèses cardiocentriques aux thèses céphalocentriques

Un papyrus du XVII^{ème} avant notre ère, mais sans doute rédigé vers 3000 avant Jésus-Christ, propose une série de cas de blessures à la tête avec la description précise des troubles consécutifs : nous y trouvons une première écriture du mot "cerveau" (figure 1).

En fait, pour les Mésopotamiens, les Hébreux et sans doute la plupart des Egyptiens, c'est le coeur qui est source de vie, d'intelligence et de sentiments. On peut lire dans un poème sumérien du XVI^{ème} siècle avant notre ère :

"O Reine, comment ton coeur a-t-il pu te soutenir, comment peux-tu encore vivre ?"

Cette idée fut réactualisée par Aristote ², à Athènes au IV^{ème} siècle avant J.C. ; il affirme que c'est le coeur qui est le siège des sensations, des passions, de l'intelligence ; le cerveau, composé d'eau et de terre ne joue que le rôle de réfrigérant.

Cette conception cardiocentrique n'est-elle pas pour une part encore ancrée dans nos mentalités ? Nous continuons à dire "avoir bon coeur, avoir le coeur sur la main, il est sans coeur, elle a des peines de coeur... etc..."

le cerveau n'est pas d'emblée considéré comme un centre psychique

(2) Pour les références sur les auteurs anciens, voir HECAEN et LANTE-RI-LAURA, 1977 ; et surtout LURIA, 1978

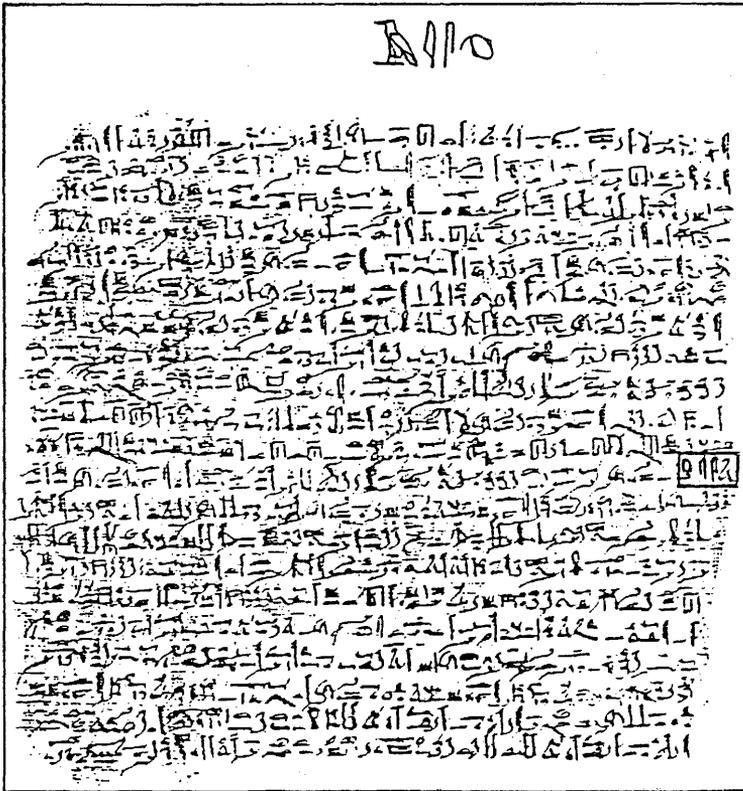


Figure 1: Fac-similé d'un papyrus égyptien (XVIIème siècle avant J.C.) avec le hiéroglyphe du mot "cerveau". D'après E.R. Kandel, 1982.

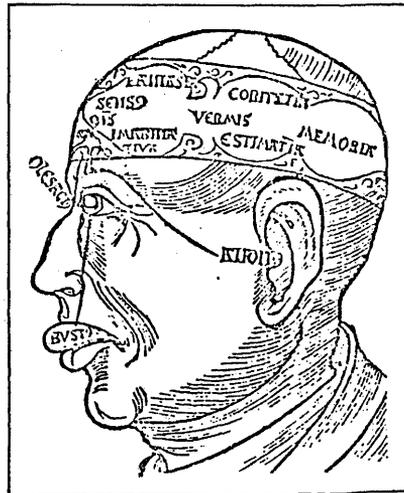


Figure 2: un des premiers modèles de subdivision de l'âme en facultés élémentaires, situées dans les ventricules. (XVIème siècle). D'après J.P. Changeux, 1983

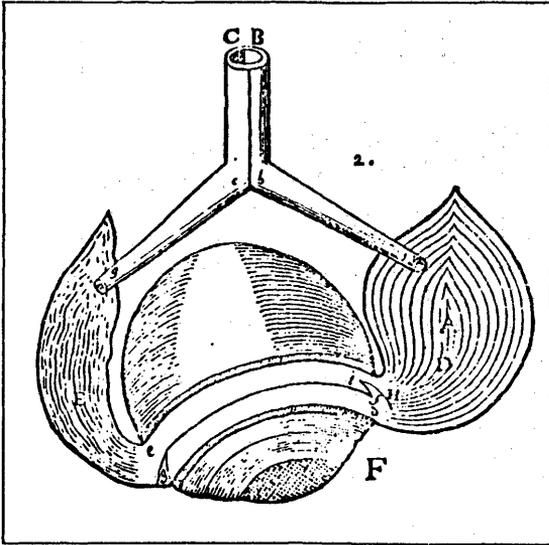


Figure 3: un modèle "hydraulique" de la contraction musculaire, d'après Descartes, in M. Jeannerod, 1983.



Figure 4: Structure du cerveau et des trois ventricules cérébraux selon un dessin de Léonard de Vinci illustrant les théories de son époque.

le coeur est candidat

Le sentiment de l'importance et même de la prédominance du coeur dans notre organisme se manifeste fréquemment à l'école élémentaire. Dès le Cours Préparatoire, le coeur est à peu près constamment présent sur des dessins de l'intérieur du corps ; plus tard, au niveau du Cours Moyen, des "fils" (nerfs ou vaisseaux sanguins joignent souvent coeur et cerveau). A la question "Qui commande, le coeur ou le cerveau ?" les réponses sont très partagées, le plus souvent dans le sens d'une primauté du coeur.

Enfin, pour des étudiants bacheliers, à la question "Citez cinq organes de votre corps dans l'ordre de l'importance que vous leur accordez", coeur et cerveau arrivent presque à égalité à la première place avec un léger avantage pour le coeur.³

Cependant, bien avant Aristote, parmi les Présocratiques, une thèse **céphalocentrique** avait existé : pour Démocrite, sensations et pensées ont une base matérielle dans des atomes fins, polis et ronds, toute sensation ou image dépendent de leurs mouvements.

Pour Démocrite encore, *"le cerveau, gardien de la pensée et de l'intelligence contient les principaux liens de l'âme"*.

les fonctions de l'"âme" sont logées dans les ventricules et fondées sur des fluides circulants

Hippocrate et son école, au siècle de Périclès, enrichissent cette thèse en étudiant les plaies du crâne et en montrant les relations entre le cerveau et des parties éloignées du corps.

C'est Platon qui sépare les parties intellectuelles des parties *"irascibles et concupiscibles"* et qui place les premières dans la tête.

Galien (131 après J.C.) développe l'idée d'un **pneuma** psychique qu'il dissocie de la substance du cerveau mais que les ventricules produisent et stockent. Ce **pneuma**, émanation de l'âme, circule dans les nerfs, mettant en relation cerveau, organes des sens et organes moteurs. Cet auteur divise l'âme en facultés motrice, sensible et raisonnable. Enfin, "l'âme raisonnable" est un ensemble complexe comportant imagination, raison, mémoire.

1.2. Esprit es-tu là ?

Vers les IV^{ème} et V^{ème} siècles de notre ère, les Pères de l'Église Némésius et Saint Augustin logent ces trois facultés dans les ventricules, connus et observés dans le cerveau. Ce thème des trois ventricules, siège des facultés intellectuelles, fut souvent repris et dessiné au moins jusqu'au XVII^{ème} siècle (figures 2 et 4).

(3) Marie-Thérèse MEIN, Mémoire de DEA, 1987.

le dualisme cartésien oppose à un cerveau-machine une âme immatérielle

Il s'agit en fait d'un modèle **hydraulique** avec réservoirs et fluides circulants. Descartes lui-même parle des "esprits animaux" (animal est ici l'adjectif correspondant au latin anima, c'est-à-dire, pour nous, "de l'âme") qui s'écoulent dans les ventricules puis dans les nerfs pour agir au niveau des organes (figure 3).

Dès la Renaissance cependant, les études véritablement anatomiques du corps humain reprennent, et le rôle des ventricules, trop simple, est discuté au profit de la substance cérébrale elle-même.

Avec Descartes, se fait jour un premier **dualisme** : les esprits animaux ne peuvent être confondus avec l'âme unique immortelle et immatérielle qui échappe ainsi à l'emprise matérielle du cerveau et du corps. L'âme unique est cependant rattachée au cerveau par la glande pinéale (seule partie du cerveau connue à l'époque et unique dans l'encéphale). Malgré cette fantaisie, c'est de Descartes que date un modèle qui sera très riche d'enseignement : celui du **corps-machine** et corrélativement nous rencontrerons de nombreux modèles de **cerveaux-machines**. Avant de les examiner, suivons un peu plus avant la piste du matérialisme, né de la dualité cartésienne corps-âme.

un premier courant matérialiste

Vers 1747, est publiée une "Histoire naturelle de l'âme" par La Mettrie qui causera beaucoup de difficultés à son auteur. Celui-ci met en avant l'existence d'un **principe** "*incitant et impétueux qui serait la source de tous nos sentiments et de toutes nos pensées. Ce principe existe et il a son siège dans le cerveau, à l'origine des nerfs par lesquels il exerce son empire sur tout le corps*".

sensualisme

Autour des années 1750, naît en Angleterre avec Locke, un **courant empiriste** qui s'intéresse à la manière dont s'effectue la connaissance : la pensée est **sensualiste** ; "*il n'y a rien dans l'entendement qui n'ait été auparavant la sensation*"; les données sensibles fondent toute connaissance. Cette importance fondamentale des perceptions sensorielles dans l'acquisition des connaissances laissera longtemps des traces dans les techniques éducatives ; jusqu'en 1970, l'observation sera la seule opération du raisonnement scientifique reconnue à l'école élémentaire, d'où l'impérialisme des "leçons de choses".

la pensée sécrétion du cerveau

A la fin du XVIII^{ème} siècle, le modèle prégnant est que l'expérience intérieure de la réflexion est un peu différente de l'expérience extérieure de la sensation. C'est la thèse de Condillac, reprise par Diderot. La participation du cerveau à la genèse des phénomènes mentaux et intellectuels n'est plus discutée. La pensée ne serait qu'une sorte de sécrétion ou le résultat

d'une digestion. Cabanis ⁴ écrit... "Nous concluons avec la même certitude, que le cerveau digère en quelque sorte les impressions ; qu'il fait organiquement la sécrétion de la pensée".

Bien auparavant, dès le XVIIème siècle, ont été établies des cartes du cerveau dans lesquelles sont distinguées substance grise et substance blanche. Ces deux substances sont bien séparées dans l'oeuvre de Willis, publiée en latin en 1664. Les ventricules ont perdu de leur importance ; à une première description anatomique se superpose une différenciation fonctionnelle : le cortex aurait un rôle dans la mémoire, le cervelet est le siège des mouvements involontaires et les corps striés, le lieu de convergences des impressions venant des organes des sens ; c'est le "sensorium commune".

les premières
connaissances
anatomiques

2. LES CERVEAUX-MACHINES

2.1. Les modèles hydrauliques

Après les premiers modèles hydrauliques la réfutation de la thèse d'un fluide circulant ne fut établie que lentement au cours du XVIIIème siècle. Monro constate qu'un nerf coupé ne laisse pas échapper d'eau ; c'est dans ce contexte que l'expérience célèbre de J. Swammerdam qui montre que le muscle se contracte sans changement de volume, prend tout un sens. Les esprits animaux deviennent un **vis nervosa**, toujours véhiculée par un fluide nerveux ; un moment l'idée d'une force électrique est soulevée, mais les arguments contre cette hypothèse restent majeurs : les nerfs ne paraissent pas "isolés" électriquement, et personne ne pourra produire la moindre étincelle avec la substance nerveuse !

de la vis nervosa
au premier mo-
dèle électrique

2.2. Les modèles électriques

Pour arriver au **modèle électrique**, il faudra passer par le long détour de l'"irritabilité" du muscle et du nerf. En 1791, Galvani montre qu'une préparation isolée "muscle-nerf" est sensible à une décharge électrique. De plus, le contact d'une telle préparation avec un muscle fraîchement sectionné provoque une contraction ; le muscle "produit" de l'électricité.

Vers 1848, Dubois-Reymond finit par assimiler la "vis nervosa" à la propagation de quelque chose de comparable à l'électricité : l'**influx nerveux**. Notons au passage que ce terme d'influx que nous utilisons encore, garde un certain rapport avec les liquides (flux = écoulement). Ce modèle électrique du

(4) CABANIS P.G.J. Rapport du Physique et du Moral, 1802.

fonctionnement du cerveau inaugure une longue lignée de **cerveaux-machines** qui poursuivra les analoges jusqu'à nos jours.

2.3. Le cerveau-miroir

La description de Willis comporte l'intuition de la notion de réflexe : si l'impression est faible, elle ne dépasse pas le niveau des corps striés, **s'y réfléchit** et ressort sous la forme d'un mouvement qui reste inconscient. Cette idée de réflexe fera fortune plus tard avec l'oeuvre de Prochaska (1779 et 1784) et, avec elle, un modèle de **cerveau-miroir**. Le fonctionnement du système nerveux est conçu comme une réaction à une excitation provenant de l'extérieur ; de même qu'un miroir renvoie avec un certain angle le faisceau lumineux qui l'atteint, le cerveau renvoie une réponse, fonction de l'excitation qui l'a déclenchée.

Le concept sera affiné avec les travaux de Magendie (sens de circulation de l'influx dans les racines nerveuses) et en 1877, Pflüger rapproche les réflexes de l'animal d'une forme de conscience de la moelle.

Dès 1885, le philosophe Herbert Spencer, fortement influencé par les travaux sur les réflexes, propose la double idée suivante : le réflexe est déjà un acte physique et le psychisme est un assemblage de réflexes.

En 1863, cette thèse est radicalisée par Setchenov qui écrit : *"Tous les mouvements connus en physiologie pour être des mouvements volontaires sont des mouvements réflexes au sens strict du mot. La cause initiale de toute activité humaine se trouve hors de l'Homme"*, rejoignant ici le sensualisme du XVIIIème siècle.

Evidemment, cette idée d'un fonctionnement "stimulus-réponse" comme fondement du psychisme sera à la source du **Behaviourisme** (Watson, 1900) dont les applications "pédagogiques" de type "récompense-punition" sont bien connues.

La fin du XIXème siècle voit se développer une élaboration plus complexe de l'idée de réflexe. Avec le travail de Pavlov et de son école, certains réflexes sont permanents et innés, ce sont les réflexes absolus ; d'autres sont acquis, temporaires et individuels, ce sont les réflexes conditionnés ; ils s'installent chaque fois que l'on fait coïncider un agent indifférent avec l'excitant absolu d'un réflexe. En rapportant les processus psychiques ou mentaux à des réactions nées en dépendance avec le monde extérieur, Pavlov appartient bien à la tradition sensualiste et empiriste, mais par la relation qu'il établit entre ces phénomènes psychiques et un "état central" du cerveau (le cerveau devient, dans un réflexe conditionné, créateur d'associations nouvelles) il, s'écarte notablement des thèses du Behaviourisme qu'il critique par ailleurs violemment.

il est contemporain d'un modèle de **cerveau-miroir** qui "réfléchit"

le concept de réflexe est précisé et étendu à l'ensemble du fonctionnement cérébral

2.4. Cerveau-ordinateur

Après la mise en place des connaissances sur le neurone, le cerveau est conçu comme l'assemblage de milliards d'unités élémentaires et le plus actuel des cerveaux-machines devient le **cerveau-ordinateur**.

Cette comparaison est utilisée dès l'école maternelle et par les enfants de l'école élémentaire avec une plus ou moins grande précision. "*Le cerveau, c'est comme un ordinateur, y-a des fils partout ! (Cours Moyen)*" ou au contraire "*Le cerveau, c'est comme le nanoréseau : y a une mémoire centrale, et le reste, c'est comme les p'tits postes des élèves...*" ou encore "*Notre cerveau, c'est comme la disquette : il contient des informations qui peuvent être redonnées (Cours Moyen)*".

le plus actuel des modèles celui du cerveau-ordinateur, employé de la "maternelle à l'université" et jusque dans les laboratoires de Neurobiologie

Dès 1943, W.S. Mac Culloch et W. Pitts publient un article dans lequel, chaque neurone ayant une activité "tout ou rien" et chaque neurone étant relié à beaucoup d'autres par l'intermédiaire des synapses, le rôle d'un ensemble de neurones est assimilé à une machine logique. Ce premier système conduit à des réalisations techniques semble-t-il un peu trop simples⁵. Par la suite, l'explosion des machines informatiques s'est faite sans références explicites avec le fonctionnement de notre cerveau si ce n'est au niveau des performances.

Vers les années 1980 par contre, l'idée qui a prévalu est que notre encéphale est plutôt une machine de type connexionniste (ou analogique) : les neurones travaillent en grand nombre en parallèle, 45 millisecondes d'analyse suffisent à reconnaître un visage, l'information serait stockée non dans une cellule-mémoire, mais dans des configurations de réseaux de neurones en activité : certains ordinateurs essaient d'imiter ce type de fonctionnement.

La modélisation se développe donc dans un double sens :

- construire une "connection-machine" fonctionnant sur le principe des réseaux complexes,
- mieux comprendre le fonctionnement de notre cerveau en analysant les performances de la machine.

2.5. Cerveau-usine chimique

En parallèle s'élabore le modèle de **cerveau-usine chimique**, présent dès le XIX^{ème} siècle, mais que les très nombreuses recherches actuelles sur les multiples substances produites

(5) COMMIOT D., 1987. L'ordinateur à neurones.

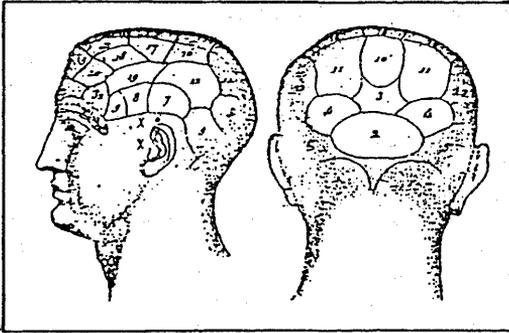


Figure 5: Représentation phrénologique du modèle de Gall. D'après F. Broussais 1836.

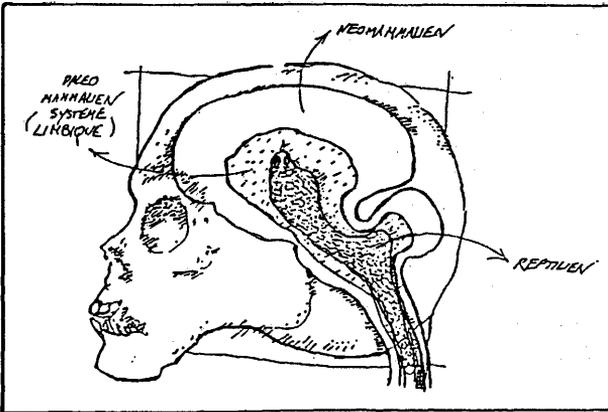


Figure 6: Représentation caricaturale du cerveau tri-unique. D'après J.D. Vincent, 1985.

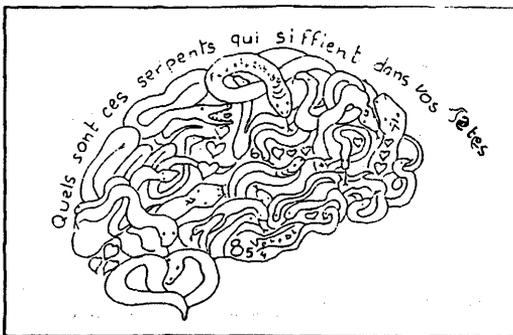


Figure 7: Extrait de Cahiers pédagogiques n° 244-245. 1986

ou mises en cause dans la physiologie de notre encéphale viennent renforcer ⁶.

C'est aussi le **cerveau-glande** des neurophysiologistes ; J.D. Vincent ⁷ écrit : *"Le cerveau est une glande endocrine qui libère dans le sang un certain nombre d'hormones et est souvent soumis aux rétroactions de ces dernières..."*

Ce modèle comme celui de l'ordinateur débouche sur de très importantes applications pratiques : compensation des substances produites en trop faibles quantités (traitement des nanismes, des stérilités) et plus encore tranquilisants, anti-douleur, modificateurs de l'humeur, camisole chimique etc...

le cerveau est aussi une usine chimique ou fonctionne comme une glande endocrine

3. CERVEAU-MOSAÏQUE OU CERVEAU UNITAIRE ?

A côté des avatars des "cerveaux-machines" deux thèses déployées dès le XVIIIème siècle, alimenteront de nombreuses polémiques : les thèses **localisationnistes** qui segmentent le psychisme en fonctions dissociables et les thèses **unitaristes** souvent spiritualistes qui unissent ce même psychisme au sein d'une entité globale.

3.1. Les localisations cérébrales

Le cours du XVIIe siècle verra apparaître des cartes de plus en plus précises du système nerveux et, à ce repérage anatomique, est lié l'idée d'une localisation des fonctions : le modèle devient celui d'un cerveau-mosaïque. A la suite de Meyer (1779), il faut naturellement citer Gall.

D'abord remarquable anatomiste, il met au point une analyse de 27 facultés dont 7 sont propres à l'homme, qu'il estime innées, essentielles et irréductibles (voir figure 5). On y trouve pêle-mêle instinct de propagation (nous dirions sexuel), goût pour les rixes (pour nous, agressivité) et d'autres dont les recherches actuelles ont bien montré l'individualité, avec amour de la gloire, talent poétique ou dévotion dont l'innéité laisse actuellement perplexe. Un peu plus tard, sa théorie sera poussée à l'extrême dans la phrénologie, connaissance des tendances d'une personne fondée sur la palpation des bosses de son crâne. Cette thèse combattue par les physiologistes et certains penseurs comme symbole du matérialisme, eut cependant un long succès dans le public ("il a la bosse des maths...").

des thèses localisationnistes apparaissent au XVIIIème siècle

la plus populaire est la phrénologie due à Gall

(6) ENJALBERT A., EPELBAUM J., 1986. Le cerveau hormonal.

(7) VINCENT J.D., 1986. Biologie des passions.

Les faits à l'appui de la théorie localisationniste ne viendront pas de la phrénologie, mais des physiologistes travaillant particulièrement sur le langage.

En 1861, les cas présentés par Broca, puis par Wernicke montrent à la fois l'existence d'aires indispensables à l'accomplissement correct d'une fonction et la dissymétrie fonctionnelle des deux hémisphères.

des centres spécialisés commandent le langage

La fin du XIX^{ème} siècle offre une imposante série de recherches qui s'attachent à faire coïncider les fonctions psychiques les plus complexes avec des zones de l'encéphale fonctionnant comme "centre". En 1909, Brodman publie des cartes de localisation très précises dont la nomenclature est encore utilisée.

De nos jours, des techniques très récentes comme celle de la caméra à positrons qui enregistre des variations locales de débit sanguin ou de consommation de glucose ou oxygène, ont réussi à produire de très belles images aux couleurs reconstituées par ordinateur, de zones du cortex plus particulièrement actives en relation avec certains comportements (lecture ou mouvement d'un doigt par exemple).

3.2. Un découpage en niveaux d'organisation

La tendance au découpage du cerveau peut se faire également en zones non plus "horizontales" dans le cortex, mais en **niveaux d'organisation**.

le cerveau peut aussi être divisé en niveaux d'organisation

Dès le XIX^{ème} siècle, Jackson appuie sa réfutation des thèses de Broca sur la mise en évidence d'étages successifs dans la construction du cerveau ; niveau médulaire, bulbaire, niveau moyen, niveau supérieur (les régions frontales). Pour lui, la localisation d'un symptôme ne peut être liée à la localisation de la fonction.

Dans la même ligne, furent mises en évidence des structures internes, centres sous-corticaux comme le système limbique (Mac Lean, 1949). Le même Mac Lean produit en 1945 un modèle nouveau : **le cerveau tri-unique**.

le cerveau tri-unique

"Au cours de l'évolution, le cerveau des Primates se développe selon trois schémas principaux qui peuvent être qualifiés de reptilien, paléo-mammalien et néo-mammalien : il en résulte une remarquable association entre trois cérébrotypes qui diffèrent radicalement par leur chimie et par leur structure... Il existe pour ainsi dire une hiérarchie de trois cerveaux en un, ce que j'ai appelé "cerveau tri-unique". On peut en déduire que chaque cérébro-type a sa propre forme d'intelligence, sa propre mémoire spécialisée et ses propres fonctions motrices et autres. Bien que les trois cerveaux soient étroitement interconnectés et dépendent fonctionnellement l'un de l'autre, il est prouvé que chacun est capable d'opérer indépendamment des deux autres".

L'idée de trois cerveaux superposés et surtout celle d'un cerveau reptilien a suscité la verve des caricaturistes (figure 6 et 7).

3.3. Des hémisphères spécialisés

la spécialisation
des hémisphères

Un dernier type de dualité de fonctionnement est apparu avec les travaux de Sperry (1968) sur la spécialisation des hémisphères, spécialisation qui permettrait d'individualiser cerveau droit et cerveau gauche et même d'opposer ces deux moitiés de notre encéphale, en oubliant trop souvent qu'il n'y a qu'un seul "maître-cerveau sur son Homme perché" comme le souligne plaisamment Paul Valéry. Cette notion de latéralisation fonctionnelle des hémisphères a donné lieu à diverses exploitations dans un sens innéiste ou héréditariste (cerveau des femmes...).

un cerveau social
où circule l'infor-
mation

Enfin, récemment, un élève de Sperry, Michaël Gazzaniga, introduit le terme de **conception modulaire** : "*Nous sommes le siège d'une confédération de systèmes mentaux...*"⁸. L'accent est mis sur la circulation de l'information entre les divers "blocs de la mosaïque"⁹.

3.4. Un cerveau global

le cerveau unitaire

Parrallèlement à l'existence des thèses localisationnistes une école de pensée antilocalisationniste a coexisté.

Dès 1769, Haller avait émis l'idée que l'encéphale fonctionne globalement pour transformer les impressions en processus psychiques car une atteinte focalisée peut provoquer des déficits variés et les altérations occasionnées peuvent se compenser dans une certaine mesure.

une relative plasti-
cité cérébrale

Un demi-siècle plus tard, Flourens (1824) se fonde sur des données expérimentales pour exprimer la même idée : il observe que la destruction de divers secteurs du cortex des oiseaux pouvaient se compenser sur le plan des comportements. Ses expériences les plus célèbres ont consisté à intervenir les nerfs fléchisseurs et extenseurs de l'aile d'un coq pour observer que le vol était de nouveau possible. Selon Flourens "*la masse des hémisphères cérébraux est physiologiquement aussi homogène et équivalente que la masse d'une glande quelconque par exemple le foie*".

Bien sûr nous savons maintenant que le cortex des Oiseaux est moins spécialisé que celui des Mammifères et que les essais de croisement des nerfs ne donnent pas chez l'homme des résultats parfaits ; il n'en reste pas moins que les expériences de Flourens constituent un progrès manifeste sur les spéculations employées par ailleurs à la même époque (Gall). Elles mettent en évidence des conceptions dynamiques de l'activité cérébrale et une possible plasticité du cortex.

(8) GAZZANIGA Michaël, 1987. *Le cerveau social*. Trad. Robert Laffont.

(9) BULLIER Jean, 1983. *Les cartes du cerveau*.

La tendance à localiser trop précisément les phénomènes psychiques continuait à susciter des doutes profonds. Le célèbre physiologiste allemand Golz (1876-1881) refait les expériences de Flourens mais cette fois-ci sur des chiens, en détruisant certaines parties des hémisphères cérébraux : il obtient des modifications plus ou moins profondes des comportements de l'animal, mais peu à peu, les troubles s'atténuent ou disparaissent et le chien récupère une partie de ses fonctions.

Pour Golz "... n'importe quelle partie du cerveau est en relation avec la formation de la volonté, des sensations, des représentations et de la pensée". Cet auteur attire donc l'attention sur un fonctionnement d'ensemble du cerveau, mais ses observations ne comportent comme référence que des critères peu différenciés : volonté, intellect etc...

Cinquante ans plus tard encore, Lashley entreprend les mêmes expériences mais sur le rat et reprend les mêmes arguments. Il aboutit à la conclusion que le degré de perturbation du comportement dépend directement de la masse de substance enlevée.

Ces thèses furent violemment critiquées par Pavlov, mais elles rencontrèrent un écho favorable du côté de la Psychologie de la Forme, théorie dans laquelle la structure mentale du sujet organise la "forme" de la perception et oriente de ce fait, l'élaboration de la représentation. Les cadres de la pensée sont innés et/ou développés indépendamment de l'expérience. Le rejet de l'analyse détaillée du physiologiste fut donc bien accueilli : une conduite "intégrale" est rapportée à un cerveau "intégral".

Il faut retrouver ici les thèses de Jackson qui lors de ses discussions avec Broca avait formulé des arguments sérieux contre les idées trop étroitement localisationnistes : la lésion d'un secteur défini, limité ne conduit jamais à la perte totale de la fonction. Par exemple un malade ne peut exécuter une action volontairement : à la demande de son médecin de prononcer le mot "non", il peut répondre : "non ! Docteur, je ne peux absolument pas dire non !". Réponse paradoxale qui montre à l'évidence que c'est la partie "volontaire et consciente" de la fonction qui a disparu. Dès 1870, Finkelburg interprète le langage comme une "fonction symbolique" complexe.

Au début du XIXème siècle, sous l'influence de la philosophie idéaliste et de la psychologie, les auteurs qui adoptent la conception d'une "fonction symbolique" pour le cerveau deviennent plus nombreux.

Bergson (1896)¹⁰ et surtout l'école de Wurzburg¹¹ avancent l'idée que la pensée abstraite est un processus primaire, indé-

le cerveau a également un fonctionnement d'ensemble

(10) in JEANNEROD, 1983.

(11) in REVEHLIN, 1967.

pendant, ne pouvant se réduire aux images sensorielles et à la parole.

Cependant pour Bergson, "le cerveau ne doit pas être autre chose... qu'une espèce de bureau téléphonique central : son rôle est de donner la communication ou de la faire attendre". Pour lui, notre cerveau est un instrument d'action et d'action seulement ; il y a une différence de degré et non pas de nature, entre les facultés dites perceptives du cerveau et les fonctions réflexes de la moelle épinière. C'est avec une métaphore plus moderne, le modèle du cerveau-miroir.

Des neurologues se mobilisent également sur ces idées d'une activité symbolique et, en particulier Head (1926) et Goldstein (1934, 1942, et 1948), pour lesquels la forme fondamentale des processus psychiques se réalise dans des schémas abstraits : leur position fut compliquée par les avancées localisationnistes, mais ces auteurs mettent l'accent sur des notions telles que la "vigilance" (Head) ou "l'orientation abstraite" ou encore "l'attitude catégorielle" (Goldstein) qui permettraient de s'abstraire du contexte pour atteindre le niveau de la signification et de la représentation. Pour Cassirer, en référence avec la notion kantienne de symbole, certains déficits observés pourraient s'expliquer par une incapacité à apprécier le contenu symbolique des objets ou des situations. Le cortex n'est plus un simple relai dans le traitement des informations en provenance de l'extérieur, il a des fonctions propres et globales. Les représentations liées à ces façons de voir généralement de type organigramme, et sous l'influence de la cybernétique de type servo-mécanisme (figure 8 et 9).

4. UN CERVEAU QUI SE CONSTRUIT

Est-il possible de concilier les thèses localisationnistes et les thèses globalistes ?

Les localisationnistes nous ont montré l'importance et la richesse des découvertes dans une démarche analytique et expérimentale. Si on met de côté les aspects caricaturaux, ces techniques sont la source de connaissances essentielles dont les applications pratiques sont multiples, dans le domaine médical en particulier.

Les thèses globalistes limitent utilement les déviations d'un "cerveau éclaté" et ont suscité de nombreux problèmes et concepts : elles mettent l'accent sur l'intérêt qu'il y a à relier anatomie et faits de comportement d'un organisme dans son ensemble.

Pour concilier les deux thèses, neurologues et physiologistes proposent en général une théorie de la "localisation dynamique" des fonctions du cerveau (Luria, 1978) avec une révision fondamentale de la notion de fonction, conçue non plus comme

l'accent est mis sur les fonctions "abstraites" du cerveau mais le modèle reste celui du central téléphonique

pourtant le cerveau a bien un fonctionnement global

le cerveau auto-organisateur

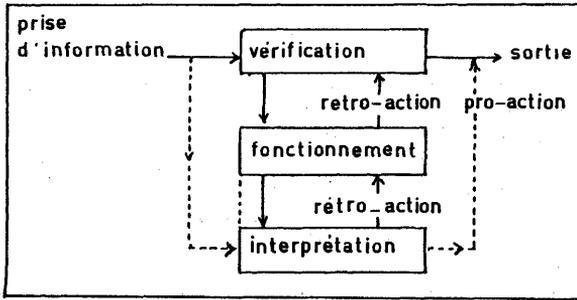


Figure 8: Un modèle de cerveau servo-mécanisme.
D'après K. Pribram

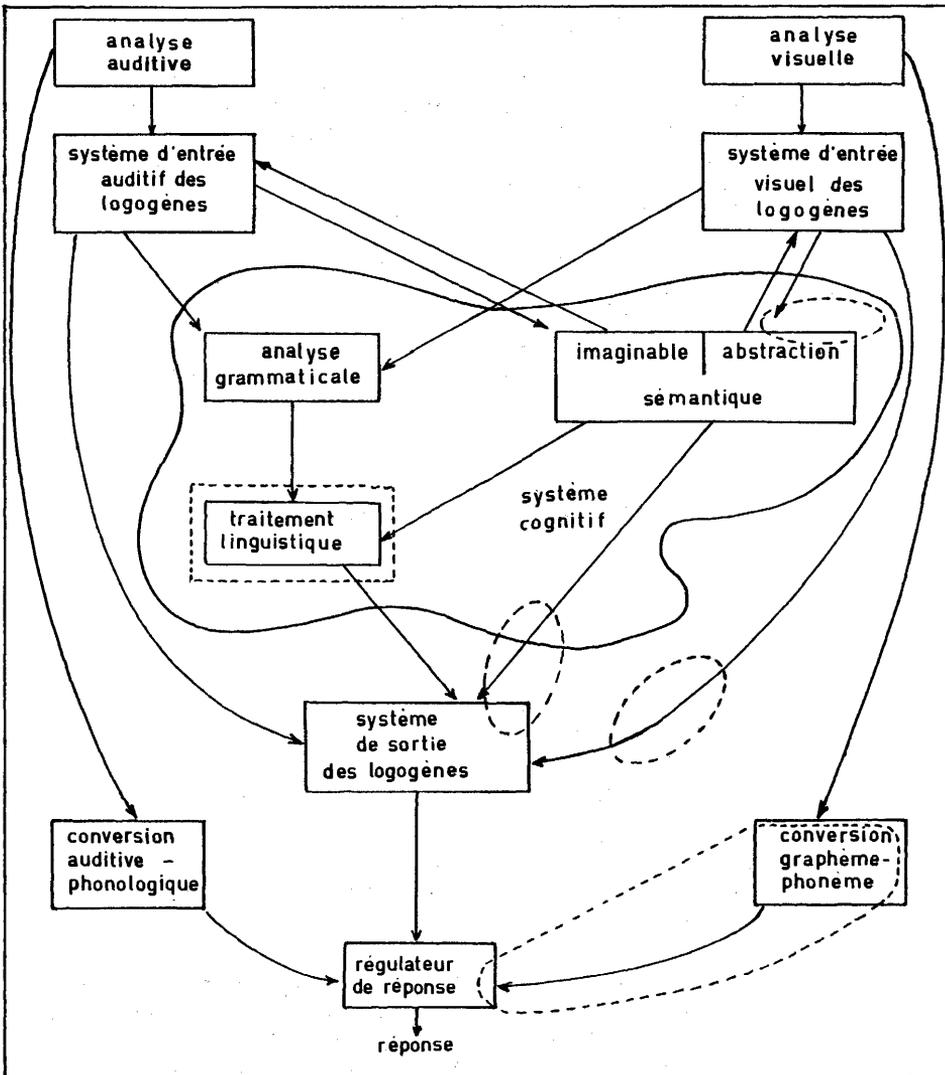


Figure 9: Modèle de la fonction Lecture sans essai de localisation d'après J. MORTON
La Recherche, 1983.

l'exercice de tel ou tel organe, mais comme un processus intégrateur d'une série de fonctionnements élémentaires et d'informations venues de l'extérieur de l'organisme.

Les travaux les plus récents, sur le rôle de certains neurones ou plutôt de configurations de neurones (Changeux, 1984) ; Jeannerod, 1983) sur des comportements d'apprentissage (chaton actif-chaton passif, Held et Hein, 1963)¹² permettent d'établir un modèle de **cerveau auto-organisateur** (Paillard, 1983) intégrant l'expérience, non par accumulation successive comme dans l'empirisme sensualiste, mais par organisation dans des configurations de neurones, de représentations du réel à travers une action sur l'environnement. Ce modèle s'oppose évidemment au modèle innéiste (ou nativiste) parfois proposé, en particulier pour l'acquisition du langage (Chomsky, 1979), modèle non sans relations avec la Psychologie de la Forme, dans lequel le cerveau se construit de l'intérieur. Le problème n'est donc pas tranché.

Bien au contraire, G.Lanteri-Laura, 1987 souligne : *"une situation inédite : plusieurs modèles régionaux et partiels, plus pertinents ici et moins pertinents là coexistent ; aucune synthèse vraiment unifiante ne paraît praticable..."*

Et l'âme ? Jean Bernard, 1987 pose la question et fait le point de la situation :

"En l'état actuel, trois hypothèses demeurent possibles : l'hypothèse athée (nous dirions matérialiste), est assurément renforcée par les progrès de la biologie. Renforcée seulement. Elle ne peut être aujourd'hui ni assurée ni écartée. L'hypothèse spiritualiste (qui si longtemps a été la seule) demeure aussi faible, aussi forte que par le passé. Nos méthodes scientifiques actuelles ne peuvent là encore ni la confirmer ni la réfuter. La troisième hypothèse est évolutive. Elle prend acte de l'impasse présente. Elle prévoit que l'avenir apportera la solution."

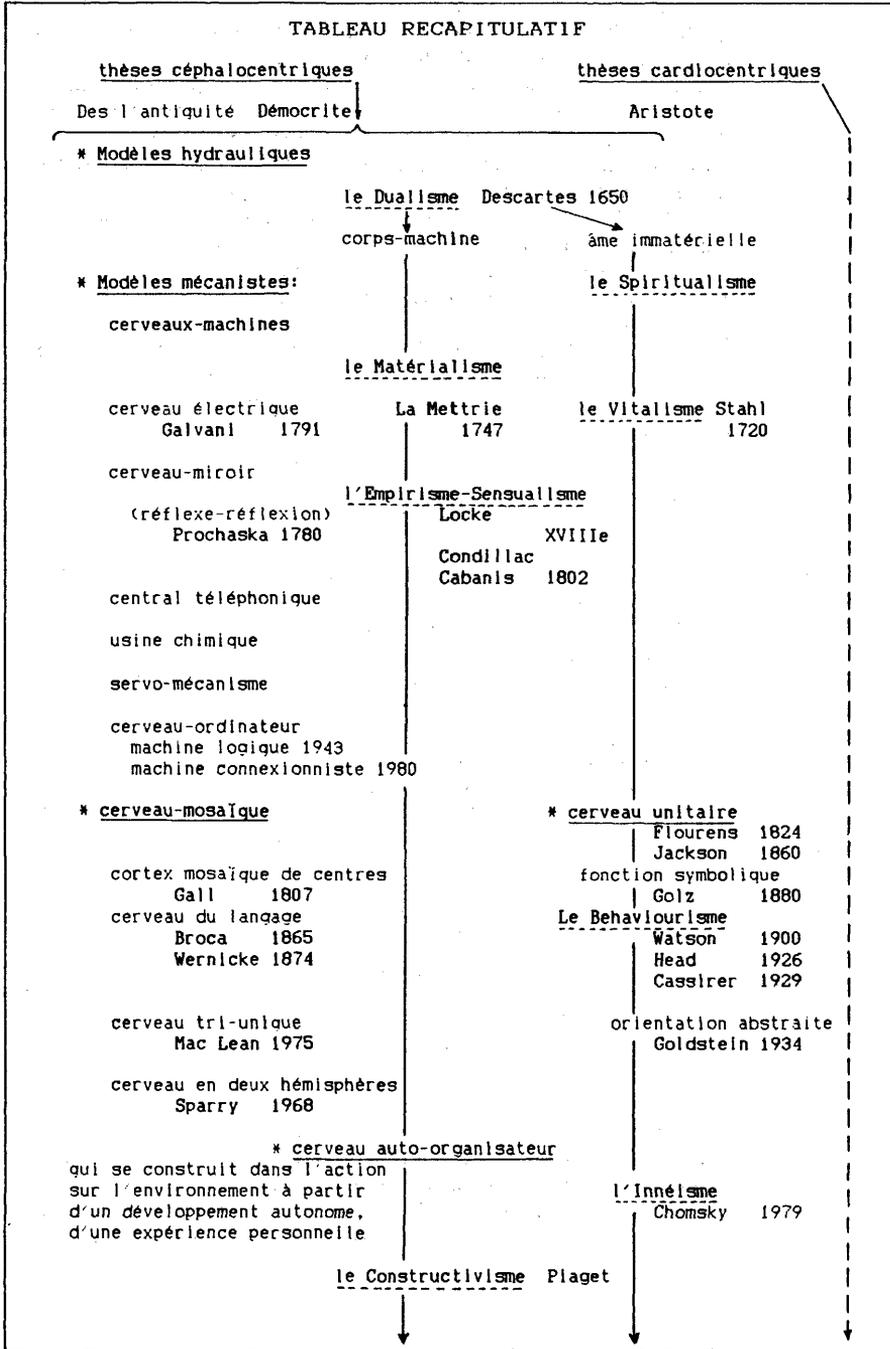
Il nous semble avoir montré, au travers de ce rapide survol des conceptions sur le cerveau et ses fonctions que la découverte scientifique, bien loin de progresser de manière linéaire vers un progrès constant, fonctionne en fait à travers quelques idées qui réapparaissent à chaque époque sous des formes différentes et avec des métaphores ou analogies propres à cette époque.

Il faudrait d'ailleurs discuter sur la valeur de modèle de la plupart de ces conceptions. Généralement, il s'agit de métaphores destinées à faire comprendre le propos de l'auteur. Ainsi La Mettrie au début du XVIII^{ème} siècle utilise-t-il la métaphore musculaire : *"car le cerveau a ses muscles pour penser comme*

les conceptions
sur le cerveau res-
tent multiples

(12) in JEANNEROD, 1983.)

TABLEAU RECAPITULATIF



modèles ou métaphores ?

les jambes pour marcher", pour exprimer fortement sa pensée matérialiste sur le problème de l'âme. De plus chacune de ces métaphores peut avoir une signification différente selon la personne qui l'emploie : il est bien clair que le chercheur en intelligence artificielle qui utilise la métaphore de l'ordinateur le fait dans un contexte complètement différent de celui de l'enfant qui emploie le même vocabulaire (... parce qu'il y a beaucoup de fils !) et pour lequel l'ordinateur est justement une merveilleuse boîte noire au fonctionnement de laquelle il ne peut accéder.

Concluons à l'aide d'une paraphrase de R. Ornstein et R. Thompson ¹³. Depuis des millénaires, les hommes ont cherché à comprendre ce qu'est leur cerveau. Au cours de ce dernier XXème siècle, il a été successivement comparé à toutes les inventions les plus performantes connues : le central téléphonique en début de siècle, l'ordinateur (ou cerveau électronique !) de nos jours, sans parler de l'analogie avec l'hologramme (qui est plutôt une analogie, d'ailleurs à double sens, pour la vision ou la mémoire). Sans doute d'autres comparaisons surgiront-elles au fur et à mesure des inventions ; mais ce que chacun de nous sait au fond de lui-même, c'est que notre cerveau est plus que toutes ces inventions aussi brillantes soient-elles. Notre cerveau reste pour longtemps un "jardin extraordinaire".

Marie-Thérèse MEIN
Ecole Normale d'Instituteurs du Rhône
Laboratoire Interdisciplinaire de
Recherches en Didactique des Science,
Université LYON I

BIBLIOGRAPHIE

BULLIER J., 1983. Les cartes du cerveau. *La recherche*, n° 148, vol 14 pp. 1202-1215.

CHANGEUX J.P., 1983. *L'homme neuronal*. Paris, Arthème Fayard.

CHOMSKY N., 1979 "A propos des structures cognitives et de leur développement. Une réponse à J.Piaget", dans *Théories du langage, théories de l'apprentissage*. Paris, Le Seuil. pp. 65-87.

(13) R.ORNSTEIN - R.THOMPSON, 1987. *L'incroyable aventure du cerveau*. Traduction Interéditions Paris.

- COMMIOT D., 1987. **L'ordinateur à neurones**. *Sciences et Avenir*, n479.
- ENJALBERT A., EPELBAUM J. 1986. **Le cerveau hormonal**. Collection Sciences et Découvertes. Le Rocher.
- GALL F.J., 1810-1819. **Anatomie et physiologie du système nerveux en général et du cerveau en particulier**. Paris.
- GAZZANIGA M., 1987. **Le cerveau social**. Paris, Robert Laffont, Original : **The social brain**, New-york, Basic Books, 1985
- GIORDAN A et alii, 1987. **Histoire de la Biologie**. T.1. Paris Technique et Documentation Lavoisier.
- GOHAU G., 1978. **Biologie et biologistes**. Paris. Magnard.
- JEANNEROD M., 1983. **Le cerveau-machine**. Paris. Arthème Fayard, 1983.
- LANTERI-LAURA G., 1987. **Clefs pour le cerveau**, Paris Seghers.
- LAZORTHE G., 1982. **Le cerveau et l'esprit**, Paris. Flammarion.
- LURIA A.R., 1978. **Les fonctions cérébrales supérieures de l'Homme**, Paris. Presses Universitaires de France,
- ORNSTEIN R., THOMPSON R., 1987. **L'incroyable aventure du cerveau** Paris : Interéditions Paris. Original : **The Amazing Brain**, Houghton Mifflin Compagny. Houston. 1984.
- PAILLARD J.M., 1983. "Les sciences du système nerveux et le formalisme du hasard organisationnel" dans Colloque de Cerisy-L'auto-organisation. Paris. Seuil.
- REUHLIN M. **Histoire de la psychologie**. Paris, PUF. Que Sais-Je ? n° 732.
- TROCME H. 1986. "Trois cerveaux pour apprendre". *Cahiers pédagogiques*, n° 244-245 p. 30-33.
- VINCENT J.D., 1985. **Biologie des passions** Paris. Seuil.