

## PETITE BIBLIOGRAPHIE À PROPOS DU MODÈLE

De plus en plus la notion de modèle est utilisée dans les didactiques de diverses disciplines. Mode ou nécessité ? Nouveau mot ? Nouveau concept ?

En tous les cas, il semble que l'on ne puisse faire l'économie de s'informer sur ces modèles. Des recherches pédagogiques se portent sur les modèles. En témoignent les numéros 7 et 8 d'*Aster*. Ces deux productions peuvent sembler déconcertantes pour les non spécialistes de l'enseignement des Sciences. C'est pourquoi j'ai pensé qu'il serait intéressant de faire une relation assez complète des "temps forts du numéro 7 d'*Aster*". Cette relation constitue la première partie de la présente bibliographie commentée. La seconde partie est consacrée à des ouvrages classiques sur la systémique et les modèles. Plutôt que de faire un inventaire de leur contenu (cela a déjà été très bien fait par ailleurs), j'ai essayé d'en extraire quelques idées qui me semblent caractériser l'environnement de la notion de modèle. Peut-être pourra-t-on ainsi juger de l'intérêt de cette notion ?

### À PROPOS DU NUMÉRO 7 D'*ASTER*

En cette fin de vingtième siècle, les scientifiques de toutes les disciplines, se trouvent confrontés au problème de la description des systèmes complexes et à celui de la prévision de leur comportement. Un système complexe pouvant être aussi bien un tourbillon dans un liquide qu'une ville. Un tel système possède de nombreux composants (éléments), qui sont unis entre eux par des relations multiples. Les composants d'une ville (éléments) peuvent être entre autre ses habitants. Pour décrire ces systèmes, il faut utiliser des concepts particuliers. L'un de ceux-ci est le concept de modèle. Il y a longtemps qu'en Physique et dans les autres "sciences dures" on utilise des modèles, par exemple le modèle atomique de Bohr. Avec les nouveaux problèmes qui se posent à la Science, les modèles ont été de plus en plus utilisés. Cela est encore plus vrai en technologie. Si l'on veut construire un nouvel avion, on ne va pas tout de suite fabriquer un prototype et l'essayer pour voir s'il vole ! On écrira un programme d'ordinateur tenant compte des caractéristiques prévues pour l'appareil. Puis on fera "tourner" ce programme. Les résultats obtenus à la sortie de l'ordinateur indiqueront si l'avion est viable ou non. Les techniciens se seront ainsi livrés à une simulation. L'ensemble PROGRAMME + ORDINATEUR constitue le modèle de l'avion étudié. Cela risque de n'intéresser, que peu, le commun des mortels. Pour autant sait-on que les modèles règlent notre vie ? Lorsque des économistes associés à des hommes politiques prennent des décisions, ils le font, dans certains cas, à partir de modèles utilisés lors de simulations. L'extraordinaire développement des ordinateurs qui permet de

prendre en compte des centaines voire des milliers de paramètres a encore accru l'intérêt des modèles. Une réflexion sur la notion de modèle devrait donc intéresser les pédagogues de tout poil. Et d'ailleurs aussi les non pédagogues. C'est une telle réflexion qui a été menée par l'équipe du numéro 7 d'*Aster*.

Ce numéro est construit autour de deux questions :

- QU'EST-CE QU'UN MODÈLE ?

- PEUT-ON FAIRE UTILISER OU INVENTER DES MODÈLES PAR DES ENFANTS DU PRIMAIRE OU DU PREMIER CYCLE DU SECONDAIRE ?<sup>1</sup>

Les réponses apportées à ces deux questions seront dans cet ordre examinées dans les pages qui suivent.

### QU'EST-CE QU'UN MODÈLE ?

Devant l'irruption du modèle dans les sciences on se pose la question :

"Finalement qu'est-ce qu'un modèle ?"

Cette question est traité dans *Aster* par l'article de A. M. Drouin. De façon à ce que chacun puisse faire son profit de cet article, donnons quelques précisions empruntées à des ouvrages de référence sur le sujet, après quoi nous reviendrons à *Aster*.

#### Vers une définition du modèle

En fait, le modèle est une partie importante d'une théorie (ou de plusieurs théories) dite théorie des systèmes<sup>2</sup>.

On peut désigner sous le vocable de système tout ce qui nous entoure, pourvu qu'il puisse échanger quelque chose avec son environnement. Un modèle d'un système (appelons-le système A) est un système abstrait présentant une certaine ressemblance avec le système A. Par système abstrait, il faut entendre tout système construit par l'homme.

Les mathématiciens diront que le modèle est homomorphe du système qu'il représente. Comme exemple, nous pouvons citer un paysage (réel) et sa photographie. Ils sont homomorphes. La photographie possède certains traits particuliers du paysage, mais pas tous. Aussi pouvons nous dire qu'il existe bien une définition "MODÈLE"<sup>3</sup>. Mais qu'elle est abstraite !

#### Divers aspects du modèle

Aussi ne peut-on qu'applaudir à la présentation très pragmatique faite du modèle, par A. M. Drouin dans son article "Modèles en questions". On y apprendra qu'un modèle peut aussi bien être une suite d'équations mathématiques abstraites, qu'une maquette. Ainsi (c'est moi qui ajoute ces exemples), les modèles économiques utilisés en France et répondant aux doux noms de COPAIN, AVATAR ou

---

<sup>1</sup> Certaines nations telles que le Québec ont explicitement mis la notion de modèle au programme de leur enseignement.

<sup>2</sup> La définition la plus appropriée, et la plus compréhensible du "système" est sans doute donnée par Walliser (1977) : "Un système se définit tout d'abord comme une entité individualisable, qui se détache de son contexte ou de son milieu tout en procédant à des échanges avec son environnement".

<sup>3</sup> En fait la définition est plus compliquée que cela. Les modèles se définissent à l'intérieur d'un formalisme mathématique appelé théorie des catégories (voir J. Eugène, "Aspects de la théorie générale des systèmes").

RONDANLO sont des séries d'équations servant à "la préparation des budgets économiques et des politiques conjoncturelles..."<sup>4</sup>. Par contre, lorsqu'un chimiste vous montre un modèle moléculaire, il vous montre une série de boules de matière plastique reliées entre elles.

A ces observations concernant en quelque sorte la "forme" du modèle, A.M. Drouin en ajoute d'autres concernant la "fonction" du modèle dans diverses démarches de recherche (plus particulièrement, elle s'intéresse à des modèles dits analogiques) :

- un modèle est-il quelque chose qui sert à chercher ? (fonction heuristique ?)

- un modèle est-il quelque chose qui sert à montrer le résultat d'une recherche ? (fonction de communication).

A. M. Drouin répond en mettant en parallèle la notion de modèle et celle d'analogie. Il me semble qu'elle pense surtout à des modèles se présentant sous forme d'images. Nous voudrions signaler que les aspects heuristique et "monstratif" peuvent être considérés comme deux étapes d'un même processus de recherche. Imaginons un chimiste cherchant la forme d'une molécule. Il a dans l'idée une "image" de la molécule en question. Cette image constitue bien un modèle. A partir de cette image, il met en place des expériences pouvant confirmer ou infirmer cette "forme" de la molécule. Une fois que ce modèle de molécule le satisfait, il le présentera comme son modèle de la molécule. On rejoint ainsi la distinction modèle-modélisation, que fait A. M. Drouin (p. 9).

Finalement, l'auteur arrivera à une "définition de la dernière chance" du modèle à travers une interrogation destinée à placer le modèle dans le champ scientifique : quelle est la place du modèle par rapport aux théories, aux lois, au réel ?

Le modèle, conclut l'auteur, se définit comme un « substitut du réel qui en simplifiant celui-ci permet de prévoir, mathématiser, établir des analogies ».

#### Intérêt d'une définition du modèle

Cela peut sembler banal pour le non spécialiste, mais en fait cette distinction modèle-loi ou modèle-réalité est d'une importance fondamentale en Sciences et surtout pour l'enseignement des Sciences. Nous le montrerons maintenant en prenant un exemple. Tout le monde a entendu parler des électrons, mais posons-nous la question comment décrire cet électron ? Comme une petite bille ? Oui des fois. Comme une onde ? Oui des fois. En fait, la description choisie dépend de l'expérience dans laquelle on utilise l'électron<sup>5</sup>.

Mais, à un niveau élémentaire, que dois-je enseigner ? Si l'on veut réaliser un enseignement scientifique véritable, il est indispensable de faire comprendre que chacune de ces descriptions n'est, en fait, qu'un modèle approprié à une classe de problèmes. Sans quoi les élèves dans le meilleur des cas "s'accrocheront" à la première description qui leur a été donnée. Puis, lorsqu'ils devront en utiliser une

---

<sup>4</sup> B. Maris: "Des économistes au dessus de tout soupçon".

<sup>5</sup> Il existe bien entendu une description qui allie les deux aspects (dits "corpusculaire" et "ondulatoire"), c'est la mécanique quantique. Mais il est des cas où pour résoudre un problème on DOIT considérer un électron comme une petite sphère, d'autres où l'on DOIT surtout le considérer comme une onde.

autre cela leur sera très difficile tellement la confiance accordée à la première sera importante.

## DIDACTIQUE DU MODÈLE

Qu'il me soit ici permis de rappeler quelques truismes. Parler de didactique du modèle ne veut bien entendu pas dire que nous allons faire des cours sur la notion de modèle à des enfants. C'est à travers des situations vécues que des représentations sur le modèle seront créées. De telles situations constituent le corps même du numéro d'*Aster* dont nous nous occupons.

### Le modèle et la didactique des Sciences Expérimentales

Dans cette partie, nous allons situer le modèle à l'intérieur de la pratique des Sciences Physiques au primaire et dans le premier cycle du secondaire. D'abord, nous donnerons quelques idées générales sur cette situation, puis nous regarderons dans les articles d'*Aster* comment ces idées générales sont mises en pratique.

Tout le monde s'accorde maintenant pour dire que le savoir scientifique est quelque chose de construit. D'une seule expérience ou même de plusieurs, il est impossible, par exemple, de déduire la structure atomique de la matière. C'est en fait ce que G. Bachelard appelle le "consensus de la cité physicienne" qui fonde la validité des modèles utilisés. Qu'il soit bien clair que les atomes ou l'électron ne sont pas des évidences expérimentales.

Le problème du professeur de physique est donc le suivant :

- comment, à partir d'un nombre réduit d'expériences, peut-on faire assimiler à des enfants des concepts qui ont mis des siècles à se construire. Il est bien évident, que l'enfant, livré seul à lui-même face à du matériel, ne va pas redécouvrir la structure atomique. Pour s'en convaincre, il suffit de relire Wallon (par exemple *Les origines de la pensée chez l'enfant*). On voit que les enfants mettent en place toute une série de stratégies explicatives qui, en général, ne rejoignent pas les concepts scientifiques<sup>6</sup>.

Si on veut les faire accéder au concept, il faut trouver une médiatisation. La méthode, qui consiste à exposer le concept, a montré son inefficacité au niveau élémentaire au moins. Un de ces outils peut-être l'utilisation consciente et avouée de modèles appropriés. Immédiatement, on se pose la question :

de jeunes enfants sont-ils en mesure d'utiliser des modèles ?

C'est à répondre à cette interrogation que s'est attaché un certain nombre de rédacteurs d'*Aster*.

Ne jouons pas les naïfs, tous les auteurs sont arrivés à la conclusion que les enfants, dans une plus ou moins grande mesure, pouvaient utiliser des modèles. Ce qui est instructif, c'est de voir comment ces enseignants s'y sont pris pour faire fonctionner des modèles avec de jeunes élèves.

Il est utile de placer ici quelques remarques sur la façon dont le modèle est utilisé en Sciences Expérimentales.

On trouvera d'abondantes illustrations de l'utilisation des modèles dans l'article de G. Rumelhard dans *Aster*. Mais pour la compréhension de mon propos, je

---

<sup>6</sup> Je parle ici de concepts tels que, par exemple, celui d'énergie. Bien entendu, les enfants sont tout à fait capables de résoudre des problèmes qui se posent et se résolvent à travers du matériel. Ce qui est en cause ici, c'est le passage de ce type d'activités aux concepts.

vais exposer un exemple d'utilisation du modèle, exemple dont on excusera l'anachronisme.

De tout temps, on a vu les objets. Cela constitue une expérience première. On a toujours cherché à expliquer ce phénomène de la vision des objets. Lucrèce supposait que les objets émettaient de petites particules, qui étaient la reproduction microscopique de l'objet. Ces particules arrivaient sur notre œil et y imprimaient l'image de l'objet. D'où la vision de l'objet. Lucrèce utilisait ici un MODÈLE de la constitution de la lumière (les petites particules reproduisant l'objet). Il attribuait à ces particules un certain comportement (elles se déplacent). Il interprétait ainsi le phénomène. Ce modèle pouvait permettre (je ne sais si cela a été le cas) de prévoir d'autres phénomènes que celui pour lequel il avait été conçu. Par exemple, la réflexion. Il suffisait de dire que les particules rebondissaient sur le miroir. Ce modèle, bien que périmé aujourd'hui, était tout à fait cohérent à l'époque. Cette démarche d'interprétation du réel au moyen de modèles est tout à fait semblable à celle qui est utilisée de nos jours en Sciences Expérimentales.

A savoir : On crée un "objet modèle" cohérent avec les théories de l'époque (dans l'exemple cité : les particules). On lui attribue un comportement. Dans le cas des particules, c'était le fait de se déplacer. Puis, on voit dans quelle mesure le modèle ainsi constitué rend compte des phénomènes.

Voyons comment cette utilisation des modèles peut-être réalisée en classe. Pour cela, nous examinerons l'article de J.-C. Gensling (p. 53) et celui de A. Chomat, C. Larcher, M. Méheut.

#### Utilisation des modèles en classe

Les articles cités ci-dessus traitent tous de la structure particulaire de la matière<sup>7</sup>. Je signale, pour éviter tout contresens, qu'on ne demande pas aux enfants de travailler sur la notion d'atome ou de molécule, mais simplement de supposer que la matière est constituée de particules distinctes.

La stratégie utilisée par les deux auteurs est semblable. Ils partent de l'étude d'un phénomène (évaporation ou compression d'un gaz). Ils proposent aux élèves ou élaborent avec eux un modèle particulaire de la matière, puis demandent aux élèves de l'utiliser. Le même modèle est ensuite appliqué à d'autres phénomènes (solidification, diffusion des gaz). On voit que l'on suit ici une démarche analogue à celle utilisée dans la pratique de la Science en dehors de l'école.

*Cette démarche suppose un travail préalable de l'enseignant. C'est sur ce travail que nous allons faire porter notre attention.*

Le problème essentiel pour l'enseignant est de prévoir un modèle utilisable par les élèves, et cohérent avec l'ensemble des phénomènes à étudier.

La création du modèle utilisé,  
en cohérence avec son champ d'application

Avant d'aborder des activités de modélisation avec les élèves, il faut répondre à trois questions :

– Quelle classe de phénomènes le modèle va-t-il devoir expliquer ? C'est ce qui est appelé dans *Aster* le champ de référence (p. 145).

---

<sup>7</sup> Pendant longtemps, deux conceptions de la structure microscopique de la matière se sont affrontées. L'une qui supposait que la matière était formée de particules séparées (les atomes), l'autre qui prétendait que la matière était quelque chose de continu à la manière des liquides. La première de ces hypothèses (atomes) a prévalu.

- Quel est "l'objet modèle" que l'on va utiliser. Dans les articles étudiés ce sont de petites particules sphériques.
- Quel est le comportement de l'objet-modèle. Ici les particules se déplacent, etc..

Répondre à ces questions n'est pas chose facile. En effet, elles sont interdépendantes. Si l'on commence par choisir les phénomènes utilisés, la création d'un modèle adéquat va se révéler problématique. Ainsi un modèle constitué de petites billes sphériques sans interaction rend compte des phénomènes d'incompressibilité et de fluidité des liquides. Par contre, il ne peut sans hypothèse supplémentaire rendre compte du phénomène d'ébullition de l'eau. Si on veut alors compléter le modèle, celui-ci risque de devenir trop complexe pour être utilisé par des enfants. Au contraire, on peut choisir un modèle trop simple, par exemple des particules sans interaction entre elles. Mais alors la classe des phénomènes explicables devient très réduite. Un tel modèle permettra de rendre compte de la compression des gaz mais non pas du fait que les liquides ont un volume propre.

Voyons comment il a été répondu à ces questions dans les articles examinés.

La question du comportement des particules a été implicitement résolue. On suppose que les enfants possèdent intuitivement un certain nombre d'idées. Par exemple, le fait que le poids des particules intervient peu dans les phénomènes étudiés. Que le mouvement ne "s'épuise pas" tout seul (principe de l'inertie). En quelque sorte les enfants doivent posséder une intuition de ce que G. Bachelard appelle "la métaphysique de la poussière" (in "Les intuitions atomistiques"). Les enfants possèdent-ils bien ces notions ? Il me semble que cela demanderait à être vérifié, des incompréhensions du fonctionnement du modèle pouvant en résulter.

Les "objets-modèles" utilisés sont différents dans les deux articles. Dans celui de J.-C. Genzling, ce sont des particules sphériques, compactes, indestructibles (p. 62). Mais ces particules sont dépourvues d'interaction. Cela a une conséquence importante, on ne pourra pas expliquer de façon causale la constitution des liquides et des solides. Or, dans cet article, on étudie des solides et des liquides.

Ce que l'on attend des élèves, n'est pas une explication causale des propriétés des solides et des liquides (les solides et les liquides sont comme ceci parce que cela...), mais simplement une description microscopique des solides et des liquides. Il faut un remodelage important (p. 67) pour que le modèle acquiert une efficacité prédictive.

Le fait d'ajouter que les particules peuvent être liées les unes aux autres, permet de "comprendre" (c'est-à-dire d'établir des liens causaux) le comportement des liquides. C'est parce qu'il y a des liaisons entre les particules que le liquide reste au fond du récipient (mais si, réfléchissez voyons). C'est ce qui est fait dans le second article (p. 143 et suivantes).

On voit comment une différence minime dans la conception du modèle conduit à des visées pédagogiques très différentes.

Notons la remarquable stratégie utilisée dans le second article. Le modèle présenté dans un cas particulier (la compression des gaz) est ensuite appliqué SANS MODIFICATION à d'autres situations. La valeur explicative du modèle justifie ainsi la confiance qu'on lui accorde. Un modèle qui ne servirait qu'à expliquer une classe de faits (la compression des gaz) n'aurait qu'un intérêt limité.

## Le modèle dans le champ technologique

Nous avons signalé en introduction l'intérêt des modèles en technologie. Un article d'*Aster* s'attaque à ce problème. C'est celui de J.-L. Kanal. L'un des buts qui est poursuivi est de permettre aux enfants de se former une certaine représentation de ce qu'est un transistor. En fin de cursus, les enfants doivent comprendre que le transistor se comporte comme un interrupteur commandé par un courant électrique. C'est ici l'analogie qui fonctionne. On établit une analogie entre des interrupteurs mécaniques et un interrupteur dont le fonctionnement n'a rien de mécanique. L'explication de l'effet transistor se situe au niveau de l'atome. L'analogie n'est donc pas une analogie de constitution mais une analogie fonctionnelle. Et c'est là toute la difficulté de cette utilisation de l'analogie. Les enfants ayant repéré l'analogie fonctionnelle, vont, comme nous l'avons souvent constaté, en induire une analogie de constitution. Ce qui est, bien entendu, à éviter. Les élèves ne donneront pas dans ce travers, s'ils ont conscience de la notion de fonction technologique (une même fonction peut-être remplie par des systèmes différents). L'acquisition de cette notion de fonction pourra se faire dans un tout autre domaine que l'électronique, par exemple en mécanique. On voit que l'acquisition d'un modèle particulier peut nécessiter l'acquisition de notions fort éloignées du champ disciplinaire étudié.

Cet exemple montre qu'il faut absolument faire saisir aux élèves que l'on travaille effectivement sur des modèles. Ainsi, un enfant qui aurait suivi de trop près l'analogie utilisée pourrait penser que dans le transistor, il y a (comme dans le relais), une petite lame métallique qui assure les contacts. Une telle conception serait bloquante pour l'utilisation du transistor en tant qu'amplificateur. Le "réalisme du modèle" (réification du modèle), est un écueil qu'il faut toujours avoir à l'esprit.

A partir de ces divers exemples, on voit qu'un enseignement utilisant des modèles est donc possible. Il nécessite toutefois une analyse très fine des modèles à utiliser ainsi que des visées didactiques.

Quelles conclusions peut-on tirer de ce qui précède ? Tout d'abord, le modèle utilisé en classe se définit essentiellement par rapport à un objectif pédagogique. Dans ce cas, il s'agit d'expliquer TELLE ou TELLE chose. Il faut bien entendu que le modèle retenu ait un rapport avec le "savoir savant". Comme nous l'avons vu dans les exemples sus cités, cette relation peut-être lointaine. Le modèle choisi est une construction *ad hoc* permettant de rendre compte de phénomènes particuliers dans des circonstances particulières. Une de ces circonstances est le fait que nous sommes dans une situation d'apprentissage.

A cette approche s'oppose celle de la "mauvaise" vulgarisation scientifique. Lorsque certains vulgarisateurs veulent rendre compte de ce qu'est un atome, ils essaient d'en faire une description aussi complète que possible. C'est-à-dire qu'ils donnent le maximum d'informations sur l'atome. Information décontextualisée, sans résonance, sans signification pour celui qui la reçoit. Bref, un "savoir" sans aucune valeur opératoire. C'est bien pour cela qu'il s'agit de mauvaise vulgarisation et non pas d'enseignement.

Au contraire, si l'apprenant est conscient, lorsque c'est le cas, d'utiliser des modèles, il saura finalement lequel choisir en fonction du problème à résoudre. Peu à peu, au cours de la scolarité, ces modèles se perfectionneront et se juxtaposeront de façon à former un système de représentations, qui constituera son "savoir savant".

## Enseignement du modèle et enseignement des modèles

Ce qui précède montre la richesse du concept de modèle et la difficulté qu'il y a à l'utiliser.

Pour autant, faut-il renoncer à mettre le concept de modèle à la disposition de nos apprenants ? Faut-il renoncer à introduire le "modèle" dans l'enseignement primaire ? Je pense que non. Ce n'est pas la première fois que les enseignants en Sciences se trouvent devoir permettre l'assimilation d'un concept dont la formulation rigoureuse est très abstraite et les applications quotidiennes très fréquentes. Le même problème s'est posé lorsqu'il a été question d'introduire dans l'enseignement le concept d'énergie. En effet, comme le concept de modèle, celui d'énergie possède une définition très abstraite. Celle-ci se trouve contenue dans un théorème dont la compréhension demande des connaissances en Physique très élevées<sup>8</sup>.

Mais, tout comme le vocable modèle, le mot énergie est souvent employé dans la vie courante. Cela va des "économies d'énergie" à l'"énergie musculaire" de Mouna Aguigi. L'utilisation de ce mot a créé chez tous des représentations. Confrontées à la nécessité d'analyser des systèmes utilisant de l'énergie (moteurs, centrales électriques), ces représentations évoluent, et se rapprochent du concept scientifique. De même des situations appropriées, telles que celles qui ont été présentées dans le numéro 7 d'*Aster* peuvent faire évoluer les représentations concernant ce qu'est un modèle. La difficulté d'appliquer cette méthode, réside dans le fait que l'écart entre notion utilisée dans la vie courante et la notion "savante" est plus grande dans le cas du modèle que dans le cas de l'énergie. Heureusement, ce n'est pas la seule façon qu'il y a d'aborder le concept d'énergie. On peut aussi l'aborder "sans en parler". Ainsi les enfants peuvent constater qu'à partir d'un même moteur il est impossible de créer une voiture qui, à la fois, roule vite et puisse transporter des charges lourdes. Ils ne se doutent pas alors qu'ils sont en train de travailler sur la conservation de l'énergie. De même si l'on fait réaliser à des enfants un bricolage<sup>9</sup> montrant comment fonctionne un appareil photo, ne se douteront-ils pas qu'ils travaillent sur la notion de modèle.

Des séances dites de structuration permettront ainsi de faire la liaison entre les représentations et les situations où les concepts sont utilisés implicitement. Ainsi pourra-t-il se former, autour du mot "modèle", un "complexe" au sens de Vygotsky.

Outre cet aspect "enseignement de la notion du modèle", il y a l'aspect enseignement des modèles qui constituent le paradigme scientifique actuel. C'est cet aspect qui devrait susciter des recherches. Chacun peut effectivement concevoir un modèle "pédagogique" pour la structure de la matière, la notion de force, ou l'utilisation du transistor. De telles recherches sont faites actuellement pour le courant électrique. Mais les recherches sur ce point sont encore peu développées. Elles nécessitent que l'on prenne conscience que le modèle que l'on propose à un moment de la scolarité n'est qu'une étape dans un processus d'apprentissage. Mais aussi que l'on ne perde pas de vue que le but final est une connaissance de haut niveau. C'est donc dans cette perspective qu'il faut concevoir les modèles

---

<sup>8</sup> Il s'agit du théorème de NOETHER. Celui-ci relie l'énergie au fait qu'il est impossible de définir une origine du temps (instant zéro). D'où il s'en suit que "quelque chose" se conserve au cours du temps dans les systèmes physiques. Ce quelque chose est justement l'énergie. D'après Cohen-Tanoudji et Spiro, in *La Matière-Espace-Temps*.

<sup>9</sup> Je tiens à ce mot pour montrer l'aspect scientifique et non pas technologique de ce qui est en jeu.



didactiques. Ce qui disqualifie certains modèles utilisés, tel le modèle hydraulique de circulation du courant électrique.

Maintenant que la question de la "méthode" en Sciences Expérimentales a été éclaircie (du moins au niveau de la recherche), il faut passer à la question des notions à enseigner, donc des modèles à faire acquérir.

## DES CONSIDÉRATIONS PLUS GÉNÉRALES SUR LES MODÈLES

Les ouvrages de référence sur les modèles et la systémique le plus souvent rencontrés dans la littérature sont les suivants (les \* signalent le niveau de difficulté de chaque ouvrage) :

LA SYSTÉMIQUE \* de D. Durand – PUF, Que sais-je.

LA THÉORIE DU SYSTÈME GÉNÉRAL \*\* de J.-L. Moigne – PUF

SYSTÈMES ET MODÈLES DE B. Walliser \*\*\* – Seuil

ainsi que l'ouvrage de celui qui est considéré par certains comme le fondateur de la systémique : THÉORIE GÉNÉRALE DES SYSTÈMES de L. Von Bertalanffy.

Ces livres, sans être pour la plupart d'un accès facile, sont en général abordables avec un peu de bonne volonté.

Moins souvent cités, sans doute parce que plus difficiles d'accès, certains ouvrages de la collection Recherches Interdisciplinaires (Maloine, éditeur), abordent les problèmes de la systémique. Tel est le cas de ASPECTS DE LA THÉORIE GÉNÉRALE DES SYSTÈMES \*\*\*\*\*" de J. Eugène. Cet ouvrage utilise un formalisme mathématique de haut niveau dans son chapitre VII (LA CATÉGORIE DES MODÈLES).

A côté de cette littérature, que l'on peut appeler de base, on trouve des publications axées sur les applications pédagogiques de la notion de modèle. Outre le numéro 7 d'*Aster*, dont il vient d'être abondamment question, le numéro 8 de cette revue traite de EXPÉRIMENTER ET MODÉLISER. On trouvera d'ailleurs dans ce numéro la vision de V. HOST sur les ouvrages cités ci-dessus (sauf le Que Sais-Je, et le livre de J. Eugène). Et le "must" des années quatre-vingt-dix pour la question : REPRÉSENTATIONS ET MODÉLISATIONS de S. Johsua et J.-J. Dupin (Petr Lang).

Cette dernière production se base sur une analyse de l'étude de l'électrocinétique dans le premier cycle du secondaire. Après avoir réfléchi sur les divers types de pédagogie utilisés en Sciences Physiques, les auteurs rapportent en détail leurs expériences et leurs conclusions concernant cet enseignement.

J'ai déjà cité, dans la première partie, certaines idées extraites de ces livres. Je me placerai sur un plan plus général. Pour cela, je rechercherai maintenant les convergences et les divergences qui peuvent exister entre les divers ouvrages de base traitant de la systémique et des modèles. Nous nous appuierons plus particulièrement sur les ouvrages de J. Eugène, B. Walliser, J.-L. Le Moigne, D. Durand.

## Convergences et divergences des écrits sur les systèmes

A part, se situe le livre de B. Walliser, qui est une étude plutôt technique de l'utilisation des concepts de système et de modèle. Le sous-titre est d'ailleurs "Introduction critique à l'analyse des systèmes". C'est le seul parmi tous les livres cités qui ne se présente pas comme un "ouvrage militant". Le plan des autres livres peut-être divisé en deux parties (de longueurs inégales, il est vrai) :

– une partie que l'on pourrait appeler "Philosophie de la systémique" (le mot philosophie revenant dans les divers ouvrages, je l'utilise aussi).

– une autre partie que l'on pourrait appeler "Technique de la systémique".  
Voyons successivement ces deux parties.

### Considérations générales sur la systémique

D'après Walliser la systémique n'est ni une Science ni un art (au sens technique du terme). Faute de mieux nous l'appellerons "métascience", ce qui semble correspondre aux conceptions de J. Eugène. Mais quelle métascience ?

#### UNE MÉTASCIENCE DU NON ?

Le terme, consacré par l'usage, de systémique recouvre un certain nombre de théories. Que ce soient les "THÉORIES GÉNÉRALES DES SYSTÈMES", ou bien la "THÉORIE DU SYSTÈME GÉNÉRAL" de Le Moigne. Ces théories me semblent avoir en commun de situer la systémique en marge des Sciences traditionnelles. Ainsi, d'après J. Eugène:

"La nature de la théorie générale des systèmes est d'être l'interface de la philosophie et de la science. Son moyen de "codage" est le langage mathématique"<sup>10</sup>. Un peu plus loin, le même auteur précise cette notion d'interface. A travers ces interfaces les Sciences reçoivent des "entrées (au sens d'entrées d'informations) qui la contraignent à reconsidérer le paradigme sur lequel elles vivent"<sup>11</sup>. Il semblerait que "les théories générales des systèmes soient un défi sérieux (...) à l'empirisme de Carnap (...) et rationalisme de Popper"<sup>12</sup>". On voit par ces références que la théorie générale des systèmes trouverait plutôt ses adversaires dans le champ philosophique que dans le champ des disciplines scientifiques traditionnelles. On voit là l'ampleur du changement que veut promouvoir la systémique. L'analyse finale de Walliser ramène un peu la systémique à de plus justes proportions, c'est pour l'instant un domaine de la pensée qui cherche encore son identité. Quoi qu'il en soit J.-L. Le Moigne et D. Durand mettent aussi l'accent sur le fait que la systémique se définit contre la pensée scientifique habituelle, pensée qui est qualifiée de cartésienne. Ainsi, J.-L. Le Moigne dans un premier chapitre foisonnant indique l'inadaptation du *Discours de la méthode* de Descartes à l'époque actuelle. Il propose, lui, un nouveau paradigme, défini en quatre préceptes :

- pertinence, le modélisateur définit le système à modéliser par rapport à ses intentions,
- globalisme, l'objet est considéré dans sa totalité, et non pas disséqué en petits morceaux,
- téléologie, qui peut se traduire à mon avis par finalisme des systèmes,
- agrégativité, c'est-à-dire sélection arbitraire des éléments intéressants dans un système pour les besoins de la modélisation.

Tout ceci est effectivement très excitant sur le plan intellectuel. Mais on sait depuis Khun et Feyerabend que les scientifiques et les penseurs suivent rarement une règle précise dans leurs recherches. Les rationalisations sont plutôt des rationalisations à posteriori. Quelle est la valeur d'un paradigme posé à priori ? Il n'en reste pas moins que ce travail de "contestation" d'une vision étroite de la rationalité était à faire, ne serait-ce que pour montrer la relativité de tout discours normatif sur la méthode. Mais outre cette réaction les diverses théories systémiques

---

<sup>10</sup> J. Eugène, op. cit.

<sup>11</sup> J. Eugène, op. cit.

<sup>12</sup> J. Eugène, op. cit.

apportent une autre façon de voir la réalité. Ce qui effectivement peut constituer une révolution.

Une métascience de l'universel ?

La volonté de généralité est ce qui frappe le plus lorsqu' on lit les ouvrages de Le Moigne et de J. Eugène.

Le premier base son ouvrage sur un SYSTÈME GÉNÉRAL défini de façon très large : c'est un objet actif, stable, évoluant dans un environnement et par rapport à quelque finalité.

La THÉORIE GÉNÉRALE DES SYSTÈMES telle que la conçoit J. Eugène est générale en ce sens qu'elle doit faire apparaître des (caractères) "universaux" applicables à tous les systèmes en tout temps et en tout lieu.

Ces universaux font, dans l'ouvrage de J. Eugène, l'objet de chapitres particuliers.

Le premier de ces caractères universaux des systèmes est la TOTALITÉ. Ce terme de totalité traduit le fait que les caractéristiques de la totalité du système ne sont pas réductibles aux caractéristiques de chacun de ces composants. Il en résulte pour l'auteur en question que pour décrire le système, il faut tenir compte du "mode d'action des éléments individuels, mais également de la structure du système". La structure du système étant définie comme un réseau d'interrelations entre les éléments.

On peut, en illustration, rappeler l'exemple cité par Atlan (in *À tort et à raison*), où des réseaux de microprocesseurs prennent des états bien particuliers, difficilement déductibles du comportement de chaque microprocesseur.

Pour qu'un système puisse durer, il doit posséder une certaine stabilité. Cette notion de stabilité est un cas particulier de la notion d'ergodicité. Un système est dit ergodique lorsque, éloigné de sa position d'équilibre, il a tendance à y revenir. L'étude mathématique des conditions de stabilité et d'ergodicité fait apparaître la nécessité de relations de rétroaction du système sur lui-même pour assurer sa permanence. Une réflexion sur cette notion d'ergodicité conduit l'auteur à réfuter tout concept finaliste-métaphysique, comme celui "d'entéléchie". L'entéléchie serait une force guidant le développement de l'organisme. Mais pour décrire un système, il faut aussi tenir compte de son aspect finalisé (téleologique).

Le Moigne, quant à lui, accorde une grande importance à la notion de finalité. "Tout système aurait une intervention finalisante sur le milieu". Même la pierre, même si elle n'a "rien d'autre à faire que d'être".

Stabilité et/ou finalité sont deux caractéristiques universelles des systèmes.

Une autre caractéristique des systèmes est de posséder une certaine organisation. J. Eugène distingue les systèmes à niveaux ordonnés où les relations entre sous-systèmes sont des relations d'inclusion (exemple : atomes, molécules, organismes) et les systèmes de type hiérarchique où les relations entre sous-ensembles sont des relations de dépendance d'un niveau à un autre. Le Moigne, lui, distingue neuf niveaux possibles dans l'organisation des systèmes. Il obtient alors neuf catégories de systèmes auxquelles on peut ramener l'ensemble des systèmes existants. C'est sans doute là la partie la plus populaire de son livre (repris par D. Durand).

Le dernier des universaux que nous citerons est le fait que tout système est sensé pouvoir échanger quelque chose (matière, énergie, information) avec le milieu extérieur. Toutefois, les besoins de l'analyse font que l'on est parfois obligé de supposer qu'un système est quasi isolé ou isolé.

L'intérêt du recensement des universaux est d'attirer l'attention sur un certain type de description des systèmes. Chacun de ces universaux peut trouver une formulation mathématique. Ainsi, la totalité est-elle décrite au moyen de deux systèmes d'équations faisant intervenir la structure et les propriétés des éléments du système. La finalisation peut être mise en évidence au moyen d'objets (mathématiques) appelés objet valeur et objet décision. La proximité du système à son but est déterminée au moyen d'une fonction performance. On franchit par cette mathématisation un nouveau pas vers l'universalité de la théorie des systèmes. En effet, une même description mathématique peut être appliquée à des systèmes totalement différents.

Mais si l'on postule avec Le Moigne l'inconnaissabilité de la réalité intrinsèque des systèmes, on en vient à dire que chaque fois que l'on décrit un système on ne fait que décrire un modèle de ce système. La conception de modèles est donc une préoccupation importante de la systémique. Nous allons voir comment le problème de la modélisation est abordé par les auteurs auxquels nous faisons référence.

#### La modélisation comme technique

Le Moigne affirme que sa THÉORIE DU SYSTÈME GÉNÉRAL est une théorie de la modélisation. Il propose effectivement un certain nombre de concepts aidant à la modélisation. Toute description (donc toute modélisation) se fait, d'après cet auteur, dans le cadre d'une "trialectique". Celle de l'ÊTRE du FAIRE et du DEVENIR. Ce qui revient toujours d'après Le Moigne à situer toute description entre trois pôles : le pôle "ontologique" (être), le pôle "génétique" (histoire-devenir), le pôle fonctionnel (faire). Cette description rappelle les universaux de J. Eugène. Au pôle "ontologique" correspond la structure du système et les éléments de celui-ci. Au pôle "génétique" correspond le finalisme du système. Au pôle fonctionnel correspond l'aspect échange avec le milieu extérieur.

Pour aider à la modélisation, le même auteur propose la notion de processeur. Un ensemble de processeurs pourrait constituer une sorte de boîte de Meccano, dans laquelle on puiserait pour réaliser son modèle. Le Moigne donne un exemple d'un tel Meccano, que l'on pourrait utiliser en biologie et en informatique.

Sur le plan de la méthode, le même auteur met l'accent sur l'aspect non objectif de la modélisation. A un même système correspond une infinité de modèles conçus en fonction des décisions du modélisateur. Le modèle devra toutefois être :

- isomorphe du Système Général (voir plus haut)
- homomorphe de l'objet à représenter.

Les indications les plus abondantes et les plus précises se trouvent toutefois chez Walliser. Il est exposé une syntaxe des modèles, une sémantique des modèles (relation système-modèle), une pragmatique des modèles (utilisation des modèles). L'auteur a fait lui-même une analyse épistémologique de son propos sur ces différentes questions (p. 220 et suivantes), je n'y reviendrai pas ici. Un point de cet ouvrage a été insuffisamment signalé. C'est la mise en évidence du caractère circulaire des démarches de modélisation (p. 156), de la relation entre outils de la modélisation (p. 158), de la démarche connaissance action (p. 182). Ainsi, pour les phases de la modélisation, on peut distinguer plusieurs étapes.

On part du champ théorique, dans lequel on définit un modèle théorique. Par déduction on construit un modèle empirique. C'est-à-dire un modèle qui peut être testé au moyen d'expériences. Ce modèle doit donc contenir des variables

susceptibles d'être testées. Ces tests sont effectués au moyen de manipulations. Des observations sont alors réalisées, qui permettent de modifier le modèle empirique (par prise en compte de variables nouvelles par exemple). Par induction, on rectifie alors le modèle théorique (théorie) et un nouveau cycle recommence.

Cette conception circulaire de la modélisation peut être appliquée à toute démarche expérimentale. Il est instructif de la connaître car souvent lorsque l'on veut représenter cette démarche, on lui applique des schémas linéaires inadaptés.

Comme conclusion de cette partie, nous reprendrons une idée de G. Rumelhard (*Aster* n° 7). Il n'existe pas une méthode des modèles, il existe de très nombreuses façons d'utiliser les modèles. Le mérite des ouvrages précédents est de mettre en évidence ce que les spécialistes appellent modélisation.

En finir avec les palabres

Lorsque des pédagogues des Sciences ou des Techniques discutent, ils passent beaucoup de temps à dissenter sur le sens des mots. Ainsi y a-t-il eu des discussions longues et assommantes sur la distinction entre "technique" et "technologie". Chacun voulant bien délimiter la frontière entre ces deux notions. Bien entendu comme un mot, non défini à l'intérieur d'un système axiomatique, ne saurait avoir une seule signification, ces échanges étaient interminables. De semblables discussions ont eu lieu à propos de la notion de modèle. A partir de quand se trouve-t-on en face d'un modèle ? Quelle différence y a-t-il entre modèle et représentation ? A partir de quel moment la représentation sur un sujet donné, d'une spécialiste en la matière, devient-elle un modèle ?

Toutes ces questions semblent préalables à l'utilisation des modèles en pédagogie. En fait, elles sont surtout un obstacle pour les pédagogues plutôt que pour les enseignés. Les écrits cités plus haut fournissent des réponses à ces questions. Ils montrent qu'il n'y a pas de définition unique facilement utilisable du modèle. Chacun à partir de ce qui précède se fera sa propre représentation du modèle. Les textes ci-dessus peuvent constituer un fond commun de références théoriques. Ce fond sera suffisant pour que l'on sache de quoi on parle, sans qu'il soit nécessaire pour cela d'en arriver à des définitions inutilement précises. On pourra alors quitter le domaine de la spéculation pour passer à celui de l'action.

Ricardo ROMÉRO  
École Normale Mixte de LILLE