

INTRODUCTION À LA MODÉLISATION

Jean-Louis Martinand

Le but de cet exposé est de présenter rapidement un certain nombre d'idées qui me semblent se dégager des travaux menés en commun ces dernières années avec l'équipe didactique des sciences expérimentales de l'INRP sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences. Il me semble en effet que certains enseignements peuvent en être tirés pour la didactique des disciplines technologiques, où la modélisation joue aujourd'hui un rôle tout aussi fondamental qu'en sciences.

1. PRÉOCCUPATIONS

Pour ceux que préoccupe l'éducation scientifique des jeunes, la question des rapports entre concret et abstrait, formel, celle de l'articulation entre expérimental et théorique, passe par la prise en compte des modèles, du rôle que nous voulons leur faire jouer, de la manière dont ils peuvent être appropriés.

En même temps, on ne peut cacher une certaine inquiétude devant des incohérences : par exemple, promotion d'une physique concrète, "manuelle", et incapacité à proposer autre chose que des concepts déjà abstraits (température, rayons lumineux) comme but de l'apprentissage. Ou bien, autre exemple, éloge de l'expérience, et dérive théorique, comme on a pu le voir pour la physique et la biologie au lycée dans les années 80 (Figure 1).

Surtout, l'insatisfaction ressentie devant un enseignement dogmatique où les modèles sont présentés comme des évidences non questionnées, non rattachées à des problèmes, le rejet par les élèves de ce dogmatisme, la critique destructrice l'année suivante de ce qu'on a introduit (atome de Bohr), incitent à réfléchir sur la manière dont on pourrait enseigner et faire apprendre la modélisation, c'est à dire la construction, l'adaptation, l'utilisation des modèles.

La question est alors non pas : quel bon modèle enseigner ? Mais : comment donner aux modèles manipulés leurs trois caractéristiques essentielles :

¥ ils sont hypothétiques

¥ ils sont modifiables

¥ ils sont pertinents pour certains problèmes dans certains contextes ?

Cette ambition se retrouve un peu partout. Citons seulement le projet **Science for all Americans**, de l'Association Américaine pour l'Avancement des Sciences, dans laquelle on propose comme fins (partie 11) : penser en termes de systèmes, de modèles (physiques, conceptuels et mathématiques), d'invariants, de figures de changement (tendance, cycle, chaos), d'évolution, d'échelles.

Il ne suffit pas cependant d'affirmer ces bonnes intentions. On voit par des travaux d'évaluation que l'usage des modèles, comme les modèles particuliers ou moléculaires

n'est pas si fréquent, même après enseignement. Et les modèles "spontanés" peuvent résister fortement aux modèles enseignés. Sans doute faut-il donc prendre le temps de poser les problèmes de la modélisation dans tous leurs aspects.

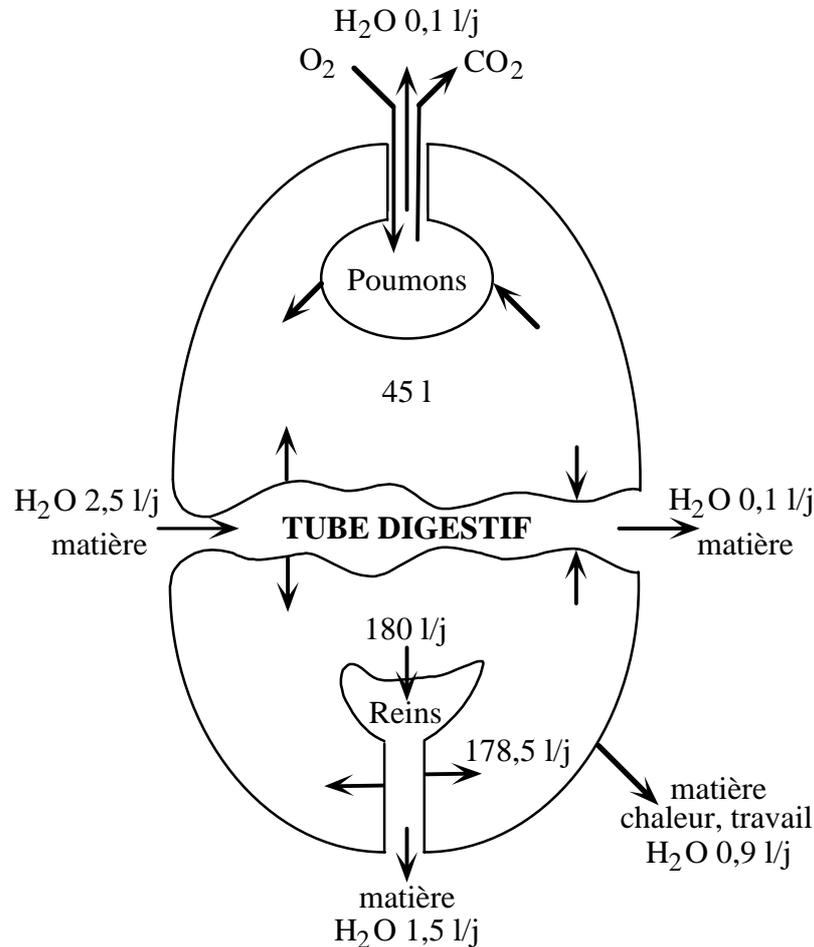


Figure 1 : Schéma d'un organisme mettant en valeur ses entrées et ses sorties d'eau et le rôle du compartiment rénal (unité : litre/jour).

2- UN OBJET ET SES MODÈLES

2.1. Prenons comme exemple un objet présent maintenant en France de l'école primaire à l'université : la diode à semi-conducteur (Figure 2). Elle y apparaît d'abord comme un objet à manipuler. Son utilisation pratique en développe une expérience familière, qui, dans le cadre scolaire, débouche sur une connaissance empirique que nous qualifierons de phénoménographique.

L'étude expérimentale de cet objet renvoie à un concept essentiel : celui de caractéristique, qui résume ce qu'on sait du comportement du "dipôle" en termes de grandeurs physiques, intensité de courant et différence de potentiel, et que l'on représente habituellement graphiquement (Figure 3).

Le constructeur fournit certains éléments sur les caractéristiques des objets qu'il fabrique et qu'il garantit (valeurs précises, conditions d'emploi) (Figure 4). L'ensemble

de ces connaissances sur l'objet et son fonctionnement double donc la phénoménographie d'une sorte de phénoménotechnique.

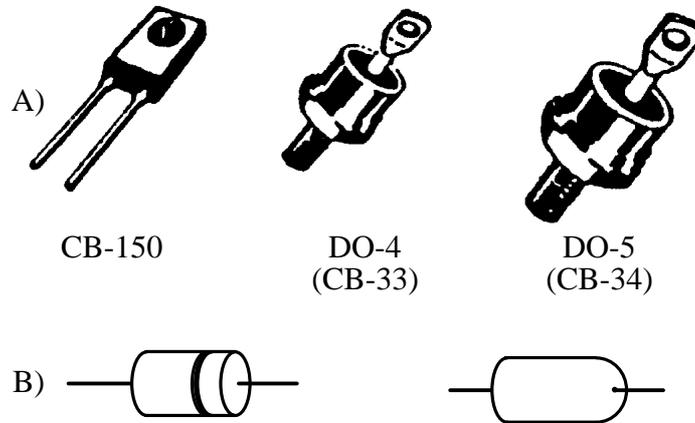


Figure 2 : A) Diodes de redressement au silicium
B) Quelques aspects de diodes

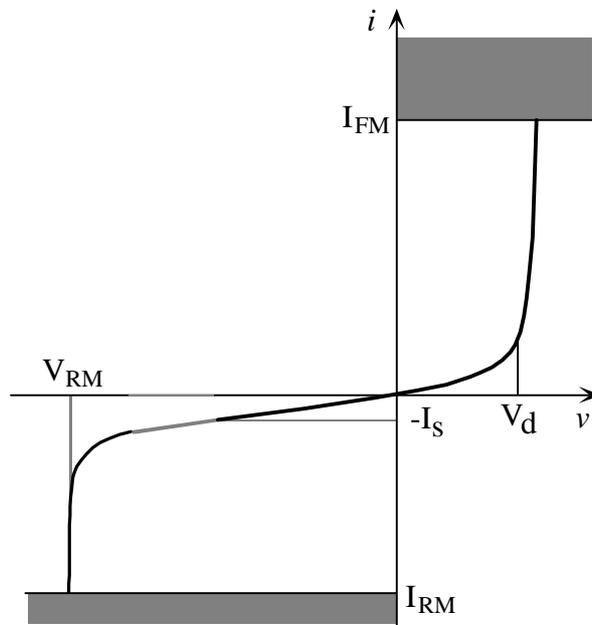


Figure 3 : Caractéristique d'une diode

L'important est ici de bien voir qu'il y a déjà une connaissance très importante, efficace, descriptive et prévisionnelle, liée à des moyens de symbolisation, et comportant des concepts, une "loi" (la caractéristique). Mais il n'y a pas à proprement parler de modèle.

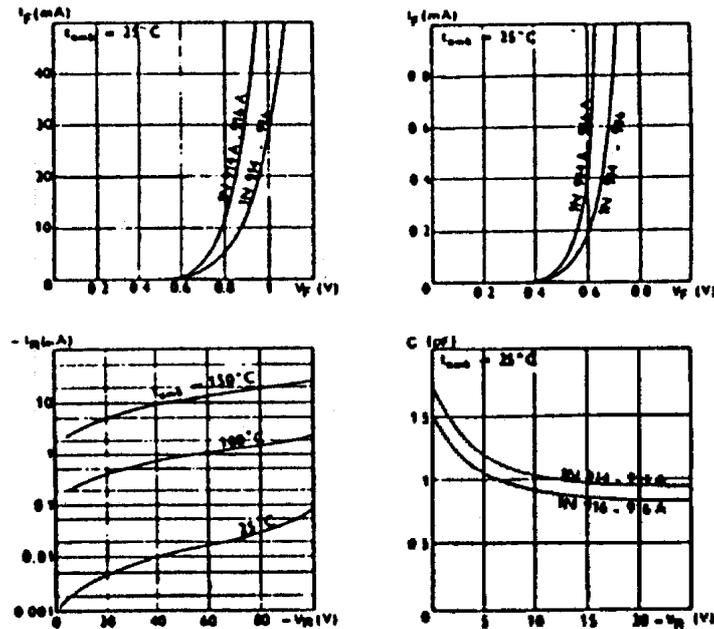


Figure 4 : Caractéristiques typiques

2.2. Deux exigences indépendantes conduisent à modéliser à propos de cet objet :

- ◆ La première exigence est d'ordre pratique. Pour mieux maîtriser l'action, il s'agit de mieux dégager la fonction technique d'un tel objet, les conditions de son utilisation. On va alors procéder à une réduction opératoire, dont la trace graphique est visible sur la figure 5. Prenons le cas de la diode "passante". Chacun des quatre encadrés contient de gauche à droite, un symbole de l'objet-diode, un schéma, et une représentation graphique de "caractéristique". Les opérations de "modélisation" se lisent particulièrement bien sur les représentations graphiques puisque celle du bas à droite, analogue à celle de la figure 4 peut être considérée comme d'origine expérimentale et fait donc partie de la "phénoménographie". Lorsqu'on parcourt ces représentations graphiques de bas en haut, on voit une successions de transformations qui sont des "abstractions" de certaines particularités de la courbe (linéarisation "par morceaux", redressement de la deuxième partie de la courbe, effacement de la valeur V_d). Les schémas au centre des encadrés représentent l'interprétation du comportement de la diode en termes d'éléments idéaux équivalents : ce sont précisément les schémas de modèles de la diode, à différents niveaux d'approximation. On peut donc lire sur cette figure le mouvement de modélisation lui-même avec ses caractéristiques de pluralité et de pragmatisme.
- ◆ Mais on peut être incité à modéliser pour de toutes autres raisons, expliquer par des théories la forme même de la caractéristique de l'objet (Figure 3), ou en tout cas une partie. C'est ce que fait la loi de Shockley (Figure 6), à partir de la théorie électronique des semi-conducteurs, elle-même application de la théorie quantique. Mais pour y arriver une longue série d'hypothèses a dû être posée ; elle correspond en fait à des modélisations du matériaux semi-conducteur et de l'objet "jonction entre des semi-conducteurs" :
 - il suffit d'étudier les électrons dans un cristal parfait,
 - il suffit de faire comme si on avait un seul électron,

- on corrige la théorie des bandes d'énergie ainsi obtenues par la prise en compte des "impuretés" (tout à fait volontaires et contrôlées : ce sont les donneurs et les accepteurs de la figure 6);
- on considère que la loi de répartition de Boltzmann peut s'appliquer (pour représenter les effets de la température).

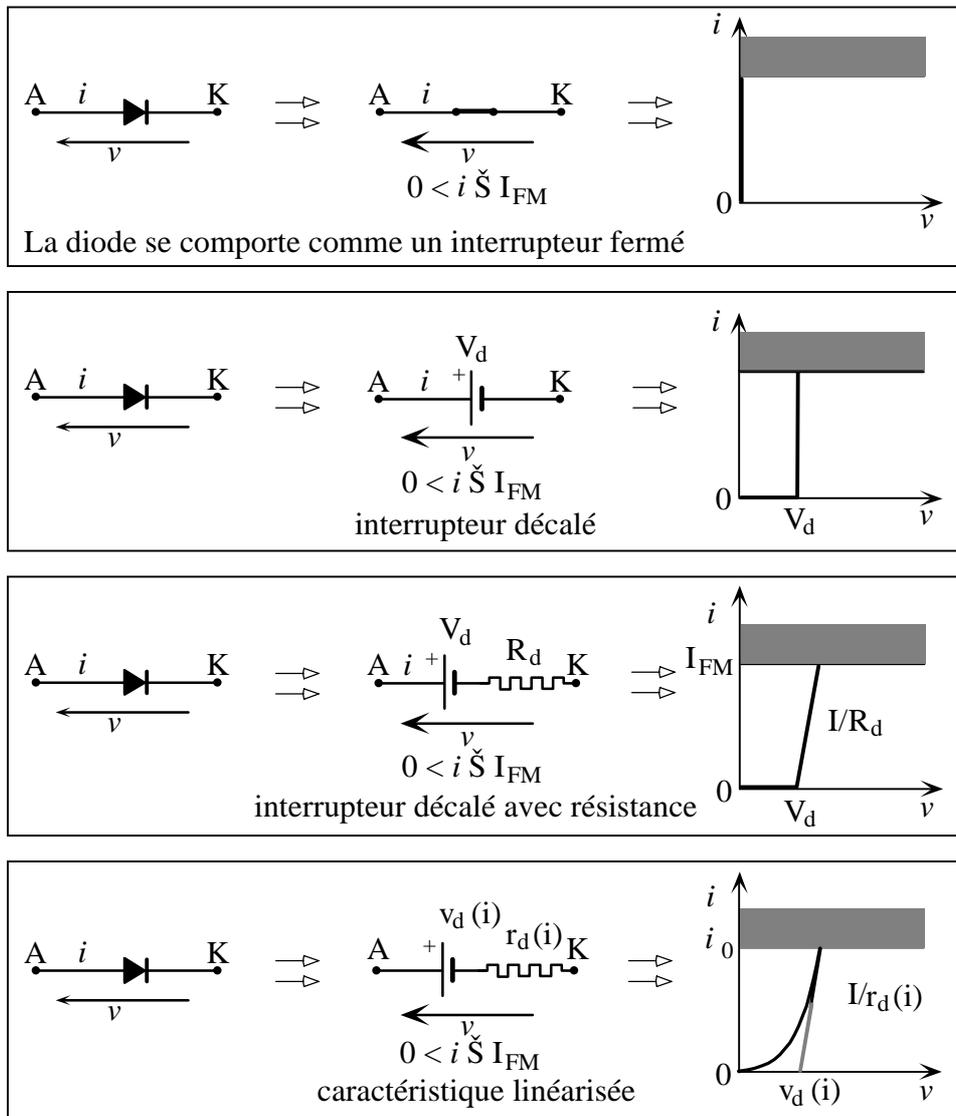


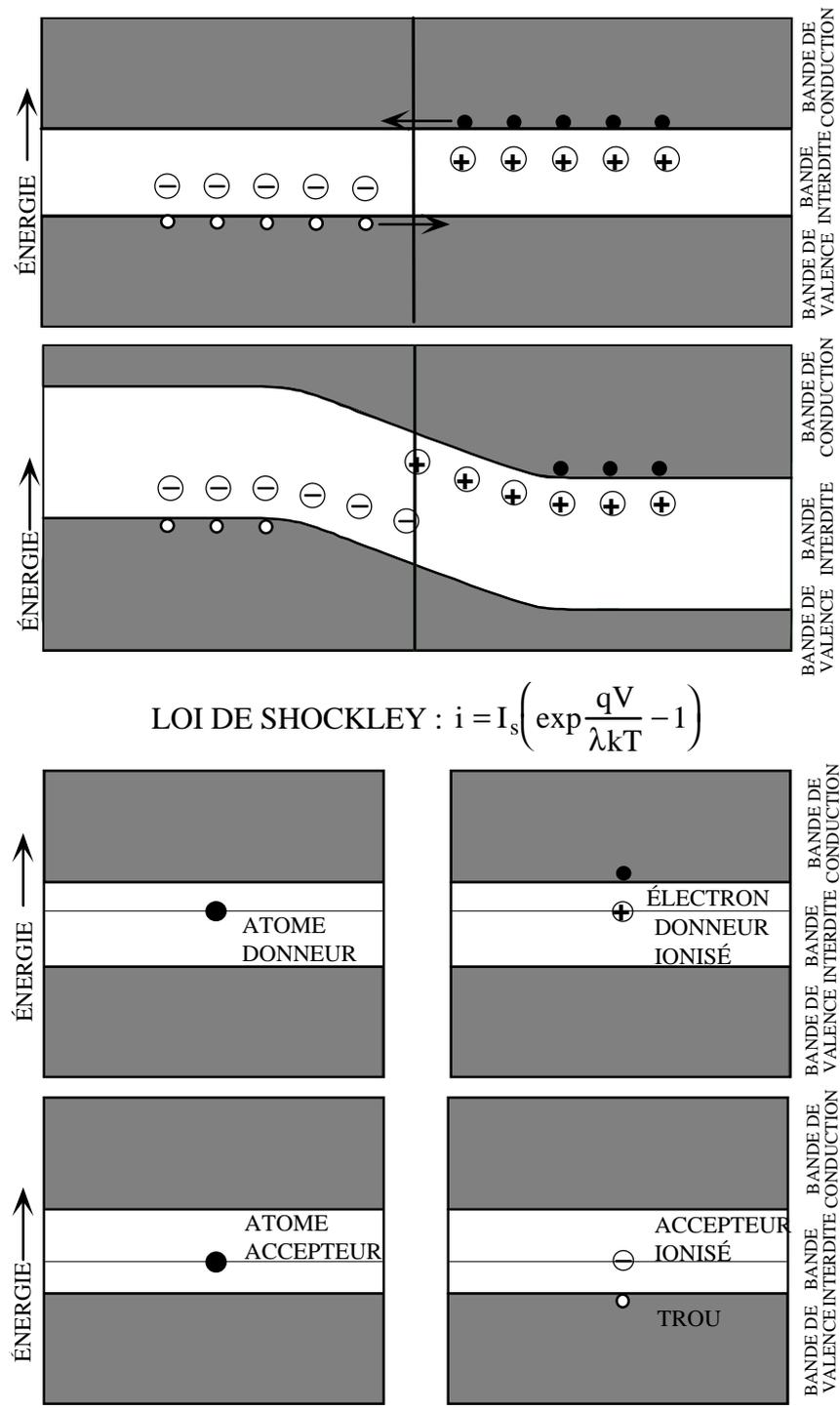
Figure 5 : La diode passante, réduction opératoire.

La loi obtenue alors reproduit bien la loi expérimentale : on a un modèle explicatif.

Bien sur la distinction opérée entre visée scientifique et visée technique est provisoire : il n'y a pas opposition définitive ; d'autres préoccupations comme l'amélioration des composants et des matériaux conduisent à conjuguer les deux modélisations.

2.3. L'exemple de la diode vise uniquement à poser plus concrètement quelques questions didactiques. On peut insister dès maintenant sur l'existence de deux registres (Figure 7).

- Le registre du “réfèrent empirique”, c’est-à-dire celui des objets, des phénomènes et de leur connaissance phénoménographique. Il y a bien une responsabilité de la didactique dans le choix, la définition du réfèrent empirique : quels objets, quels phénomènes, quelles manipulations introduire en classe, et regrouper ensemble en un champ de familiarisation empirique pour les élèves ? Quelles règles pour réussir les manipulations ? Quelles notions et représentations pour décrire les phénomènes, quelle loi empirique ?



$$\text{LOI DE SHOCKLEY : } i = I_s \left(\exp \frac{qV}{\lambda kT} - 1 \right)$$

Figure 6 :

- Le registre des modèles construits sur ces référents, selon des exigences qui n’ont pas de solutions sur le premier niveau. Alors, quelles sont justement ces exigences, les problèmes, les visées ? Quelles sont les théories éventuelles, les outils symboliques utilisés ? Quelles sont les significations construites, les conditions d’utilisation, le champ de validité du modèle ou des modèles ?

S’intéresser à toutes ces questions, de manière approfondie, c’est ce que certains ont appelé, par analogie, sémantique, syntaxe et pragmatique de ces modèles (Walliser, B., 1977).

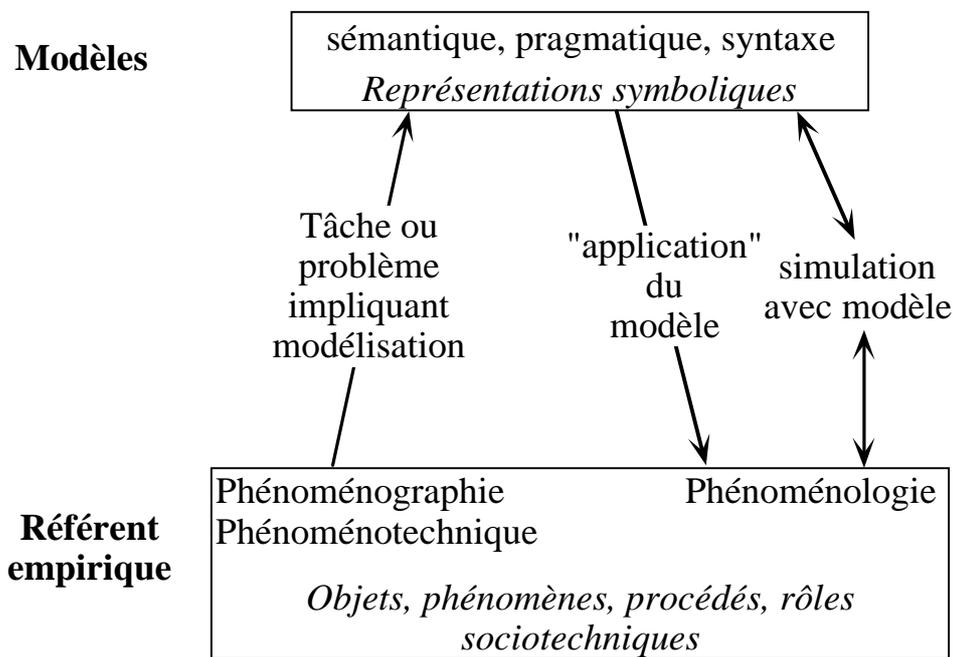


Figure 7 : Registre de modèles et registre du référent empirique

Quelques remarques doivent accompagner ce schéma.

1. Avec la notion de "tâche ou problème impliquant la modélisation" nous voulons affirmer d'abord que ce qui nous intéresse avant tout, ce sont les processus de modélisations que les élèves peuvent prendre en charge, en tout ou en partie, et non les modèles plus ou moins "arrangés" que nous pouvons leur présenter au nom de la science ou des programmes. Nous pointons ensuite une question qui a donné lieu à de nombreuses discussions : comment définir précisément cette tâche ou ce problème directeur ?

2. La distinction modèle/référent empirique est une reprise et un aménagement de la théorie du signe de de Saussure ou des schémas de la conceptualisation de G. Vergnaud (1987). Si les modèles (en tant que signifiés, exprimés au moyens de systèmes signifiants) jouent des rôles analogues aux concepts et "théorèmes", ils réfèrent à un ordre de réalité que l'on appellera référent. Mais en sciences expérimentales, ce référent n'est pas constitué seulement d'objets et de phénomènes, ou d'actions sur des objets et d'interventions sur des phénomènes. Il y a "déjà là" des descriptions, des règles d'actions, des savoirs disponibles. Ils ont un statut "empirique", même s'ils sont

l'aboutissement de processus antérieurs d'élaboration conceptuelle, théorique ou modélisante, en ce sens qu'ils sont inconsciemment projetés sur la réalité. C'est ce que nous voulons désigner avec le syntagme "réfèrent empirique".

3. Outre la question de la définition précise de la tâche ou du problème impliquant modélisation, un tel schéma permet de mettre en évidence et de discuter les composantes "sémantiques", "syntaxiques" et "pragmatiques" de l'élaboration et de l'utilisation des modèles (Walliser, B., 1977), c'est-à-dire les enjeux, les systèmes symboliques, les ressources qu'apportent ces aspects du modèle pour questionner le réfèrent empirique, se représenter, expliquer, prévoir, inventer. Il permet aussi de distinguer la description première, avant modèle, devant donner lieu à une construction consensuelle (phénoménographie) et la description seconde où le modèle se projette sur le réfèrent (phénoménologie). Il permet enfin d'envisager cette manipulation-exploration du modèle et de ses virtualités, en relation avec le réfèrent, qui n'est autre que la simulation.

3. PROBLÈMES CURRICULAIRES

3.1. Le schéma de la figure 7 peut-être utilisé pour penser les problèmes de construction et de pilotage d'un curriculum centré sur la modélisation.

Il présente une sorte de "cellule élémentaire" ou minimale qui fait apparaître, à un moment donnée d'un développement curriculaire, la plupart des questions qu'on rencontre lorsqu'il y a effectivement modélisation, dans les conditions où nous travaillons, c'est-à-dire en éducation scientifique de l'école au lycée. Dans le détail, le schéma peut être complété et affiné, mais il peut être considéré comme représentant un moment d'un curriculum.

Un des résultats de nos recherches a été de montrer que dans la modélisation, il y a une tâche décisive : la tâche de représentation. La fonction de "représentation calculable" des modèles est essentielle ; les fonctions d'explication, de prévision et d'intervention qu'elle permet sont souvent insuffisantes pour solliciter et guider les élèves, contrairement aux suggestions de l'histoire des sciences et aux idées communes des didacticiens.

Un autre résultat a été d'attirer l'attention sur le registre du réfèrent empirique. C'est celui des pannes et des aléas, des manipulations effectives, avec les représentations spécifiques qui sont associées aux actions et aux observations, mesures ou contrôles. Dans ce registre, la distinction entre phénoménologie et phénoménographie signale un des pièges majeurs de l'enseignement : les objets et les phénomènes restant les mêmes, les adultes instruits ne se rendent pas compte que les apprenants ne "lisent" pas (ne "décrivent" pas) comme eux la "réalité".

En lui-même, le schéma de la figure 7 est donc un support pour poser les problèmes didactiques du triple point de vue d'une épistémologie appliquée, d'une psychologie des apprentissages et d'une ingénierie pédagogique.

3.2. Mais il permet aussi d'envisager, en tant que cellule élémentaire, ce qu'on peut appeler des figures de développement curriculaire.

A l'échelle d'un domaine et d'un niveau d'enseignement, la question centrale est celle des ruptures et des continuités qui caractérisent le développement des activités et des apprentissages qu'elles entraînent.

Un travail sur le modèle particulière a mis en œuvre ce qu'on pourrait appeler une reprise amplifiante : un germe de modèle est travaillé pour prendre en compte progressivement de nouveaux référents afin de constituer une représentation unitaire. Une des questions non encore élucidée de cette recherche consiste à savoir si le passage des changements d'état physique aux réactions chimiques pourra se faire dans la continuité du modèle progressivement enrichi et précisé ou si celui-ci devra être plus profondément remanié, avec donc une rupture marquée pour les élèves une tâche nouvelle.

Différents travaux sur des concepts de la mécanique, où les modèles provisoires ou plus permanents ont des statuts très divers, offrent un panorama exemplaire du jeu très complexe sur les tâches, les systèmes de symbolisation, les descriptions phénoménales prises en compte. Ainsi à propos de la quantité de mouvement passe-t-on de la recherche d'un modèle prédictif (modèle des objets) à un examen des formes de la relation prédictive (travail sur les modèles), pour finir par poser une relation générale comme un principe. Mais pour appliquer le principe théorique, il reste toujours à modéliser les objets et les événements comme lors de la construction du modèle prédictif. A ce dernier stade peut être posé concept de quantité de mouvement, associé à son principe de conservation.

Dans des travaux à l'école élémentaire, le schéma apparaît de façon plus répétitive, sur un nombre important de petits domaines d'investigation, avec parfois une réflexion sur la valeur des modèles : limites, règles du jeu, comparaison entre modèles, bref ce qu'on peut appeler avec les auteurs une "métamodélisation".

De façon plus générale, on voit que toutes les composantes du schéma doivent, dans une perspective curriculaire, faire l'objet de décisions précises de continuité ou de rupture : le référent (extension, description), les tâches impliquant modélisation (représentation unitaire, représentation de l'invisible, idéalisation du compliqué, explication, prévision), les modèles (systèmes symboliques, transformations et "calculs"...))

Quatre grandes "figures" peuvent être distinguées :

- ¥ la répétition simple du schéma sans intégration,
- ¥ la reprise amplifiante,
- ¥ le développement problématique,
- ¥ le changement de "niveau", dont l'enseignement de l'électricité offre de bons exemples : circuit d'objet, circuit de courant, courant d'électrons, etc... Dans le langage de notre schéma, cela implique la substitution d'une phénoménologie nouvelle à d'anciennes phénoménologies.

Enfin toutes ces figures, mises en œuvre dans la pratique peuvent faire l'objet d'une réflexion rétrospective. C'est là qu'on atteint vraiment à un apprentissage de la modélisation, non plus seulement vécue en acte, mais conçue et critique. Les questions de la continuité, de la rupture, de l'explication et de la comparaison sont sans doute les questions de base pour envisager l'acquisition de compétences et d'attitudes transférables en modélisation

4. UN SCHÉMA DE LA MODÉLISATION

4.1. Les remarques qui précèdent nous invitent à compléter le schéma de la figure 7 : s'intéresser aux formes des lois dans les modèles, discuter de leurs limites, chercher une

représentation à un niveau plus caché du réel, c'est travailler dans un troisième "registre".

Christian Orange a proposé l'appellation "réfèrent explicatif".

Mais on peut être méfiant vis à vis de cette appellation, avec les confusions que le double emploi de réfèrent peut induire (on aurait pu peut-être parler de références empiriques et de réfèrent explicatif, mais de Saussure était déjà passé par là ...). Il ne s'agit pas non plus de reprendre un des lieux communs de la littérature sur les systèmes et les modèles avec les oppositions empirique/théorique, modèle empirique (de "description")/modèle théorique (de "connaissance"), qui n'ont pas de pertinence avérée pour les niveaux d'enseignement où les modèles ne sont pas sous la "juridiction" de théories formalisées, comme c'est le cas à partir du baccalauréat.

Pendant on ne peut nier qu'un certain nombre de questions majeures doivent être posées : celles des enjeux et des "formats" de la connaissance, c'est-à-dire des formes de rationalité et d'objectivité, des outillages mentaux, graphiques, langagiers mathématiques ou théoriques pour penser et communiquer. Qu'est-ce qui est disponible et mobilisable ? Quelles en sont les possibilités ? Qu'est-ce qui doit être transformé pour être amené en conformité avec les exigences de la tâche ? Réciproquement, comment ces formes induisent et ouvrent ou restreignent les problèmes envisageables ?

Tout cela dépasse d'ailleurs la question du pouvoir explicatif, et personnellement, j'ai envie de parler de matrice cognitive, dans une perspective un peu analogue à celle des schémas d'intelligibilité étudiés par J. M. Berthelot en sociologie (1990). La matrice cognitive comprendrait à la fois des "paradigmes épistémiques" (conception de ce que doit être la connaissance, les formes, des "bonnes pratiques" théoriques ou empiriques), et les ressources théoriques (langages, schémas, théories).

Le schéma de la modélisation (Figure 8) rassemble toutes ces propositions

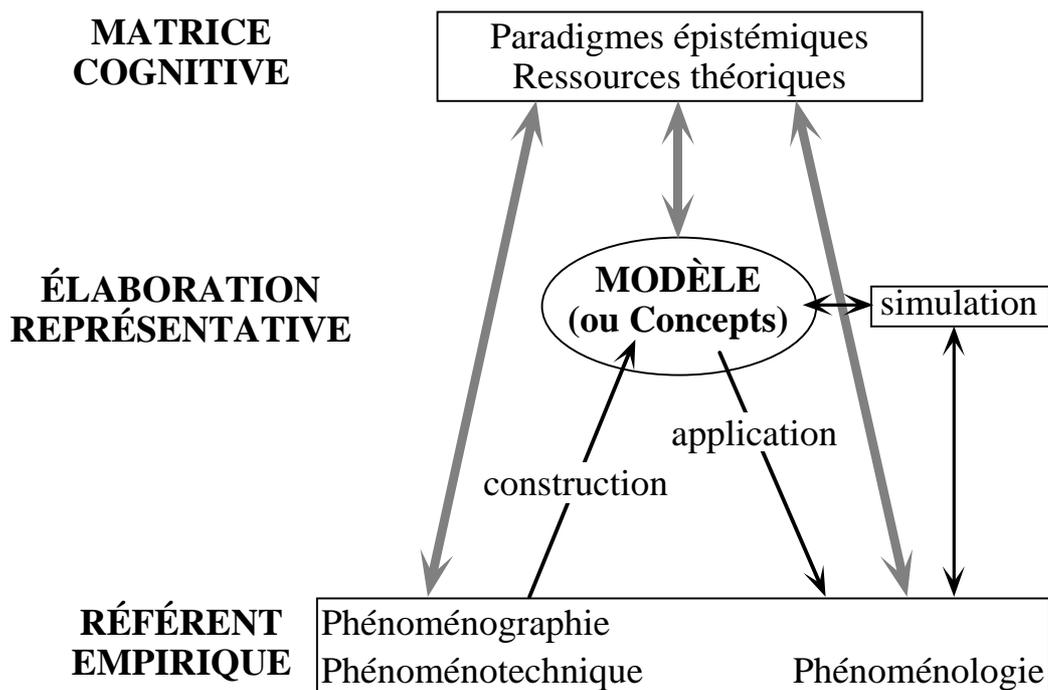


Figure 8 : Schéma de la modélisation

4.2. Aujourd'hui les recherches stimulées par le travail effectué sur la modélisation s'orientent dans quatre directions, si l'on met à part l'extension des investigations aux "champs techniques" :

- ¥ Celle de l'objectivation, des rapports à l'expérience, ou si l'on est déjà dans une visée d'élaboration de modèle, de la construction du référent empirique. L'interprétation du mesurage et des mesures physiques, la représentation des substances chimiques et de leurs interactions, avant tout modèle particulière et a fortiori moléculaire, la représentation de processus physiologiques ou écologiques, révèlent en fait des difficultés parfois redoutables. Dans certains cas, ces difficultés ne sont d'ailleurs levées que par une modélisation qui permet de porter l'attention sur des systèmes idéaux complexes ou cachés, mais qui donnent prise à la représentation et permettent par là même l'objectivation.
- ¥ Celle des rapports entre conceptualisation et modélisation. Il n'y a pas de modèles sans concepts. Lorsque des états de la matière donnent lieu à des modèles particuliers pour les interpréter dans un effort de représentation unifiée, les caractéristiques de chaque état ont déjà dû donner lieu à conceptualisation, pour les désigner. Et lorsque, après de multiples essais d'ajustement du modèle particulière à l'interprétation non contradictoire de plusieurs états de la matière, on peut effectuer provisoirement un "arrêt sur modèle" parce que celui-ci, certes encore hypothétique, a acquis un pouvoir de représentation général et d'interprétation cohérente, mais encore ouverte à de nouveaux "bricolages", c'est le concept de particule qui devient lui-même mobilisable parce qu'il est associé à des spécifications précises et "combinables", ajustables.
- ¥ Celles des opérations intellectuelles qui sont mises en jeu dans les tâches d'objectivation et de modélisation. Quels en sont les genèses, les appuis, les obstacles, les aides ? Lorsque les constructions et les apprentissages ont l'ampleur et la durée qui caractérisent de véritables activités d'élaboration et d'utilisation de modèles, seule une approche développementale peut être pertinente. Le point de vue classique de la résolution de problèmes offre un cadre manifestement trop étroit du point de vue psychologique.
- ¥ Celle des actions et des effets de médiation par les enseignants, le matériel, le contexte. Les caractéristiques des processus de médiation sont-elles avant tout les déterminants matériels, symboliques, individuels, sociaux ? Il est évident, comme l'avait reconnu Marcel Postic (1977) que la circulation de la parole est très insuffisante pour comprendre les processus dans des séances de travaux pratiques. Et c'est seulement très récemment que Niquette et Schiele (1991) ont commencé à étudier des interactions comme celles entre parents et enfants dans un musée scientifique autour d'un élément d'exposition.

Ce panorama est sans doute outrageusement simplificateur. J'espère cependant, qu'avec les données plus concrètes apportées par Claudine Larcher, il permet d'apercevoir tout ce que la problématique de la modélisation peut apporter à la didactique des sciences et techniques.

RÉFÉRENCES

- AAAS (1989). *Science for all Americans. A Project 2061 Report on Literacy Goals in Science, Mathematics and Technology*. Am. Ass. for the Adv. Science, Washington.
- BERTHELOT, J.M. (1990). *L'intelligence du social*. Paris : PUF.
- MARTINAND, J.-L. & al (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- MARTINAND, J.L. et al (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- NIQUETTE, M. & SCHIELE, B. (1991). Voyons voir. Attribuer un sens à l'exposition. In M.J. Choffel-Mailfort & J. Romans, *Vers une transition culturelle*. Nancy : Presses Universitaires de Nancy.
- POSTIC, M. (1977, 1e édition). *Observation et formation des enseignants*.
- VERGNAUD, G. (1987). Les fonctions de la symbolisation dans la formation des connaissances de l'enfant. In J. Piaget, P. Mounard & J.P. Bronckart (Eds), *Psychologie*. Encyclopédie de la Pléiade (pp 821-844). Paris : Gallimard.
- WALLISER, B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris : le Seuil.