Sur la notion de modèle en Informatique

Equipe MUSTIL

LAFORIA - IBP
Université Paris 6

> *"To create an artifact, the designer needs to be a scientist to model reality, an epistemologist to metamodel the design process, and an artist to contemplate the result."*
>
> *(Van Gigch, 1991).*

Introduction

Il existe de nombreuses façons d'envisager la notion de modèle dans le domaine scientifique. Quiconque se mettant en tête de proposer une définition à caractère universel, ne manquera pas de se heurter à quelque mathématicien, physicien, biologiste, informaticien, chercheur opérationnel ou économiste qui saura exhiber, dans le contexte particulier qui l'intéresse, nombre de cas illustrant l'inadéquation, l'étroitesse de la définition proposée, ou au contraire son insuffisance, son manque de spécificité. Afin de rester à un niveau suffisamment général nous nous contenterons tout d'abord de reproduire la définition proposée dans le dictionnaire (petit Robert 1991), à savoir :

Modèle. n. m. (1549 ; mot emprunté à l'italien modello, qui vient lui-même du latin populaire non attesté *modellus*, dérivé du latin classique modulus). *Sciences* : Représentation simplifiée d'un processus, d'un système. Modèle mathématique, modèle formé par des expressions mathématiques et destiné à simuler un tel processus.

Notons dès maintenant que cette définition générale peut paraître un peu restrictive dans la mesure où elle implique d'envisager tout modèle comme le reflet d'une réalité objective. Nous montrerons plus loin comment cette vision peut être élargie avec profit en *Intelligence artificielle* (IA) et en *Aide à la Décision* (AD). Nous proposons ici une courte présentation de diverses interprétations de la notion de modèle en informatique. Les sections 2, 3 et 4 s'inspirent de réflexions contenues dans Perny (1992), Brézillon(1983) et Lévine-Pomerol (1993).

1 Différents usages du mot modèles en Informatique (O. Dubois)

L'introduction qui suit, a pour but de rappeler ou de souligner la distinction qui existe entre deux usages principaux du mot modèle en Informatique et plus particulièrement en Intelligence Artificielle. Dans cette discipline, l'usage du mot modèle peut en effet correspondre à deux notions presque opposées. Selon l'une, le modèle désigne un système abstrait, selon l'autre, il désigne un objet concret. Pour expliciter d'emblée et d'une façon simple cette opposition, considérons une idée générale quelconque et des exemples qui illustrent cette idée. Selon l'une des notions, l'idée générale est dite être un modèle des exemples, selon l'autre notion, les exemples sont dits être des modèles de l'idée générale.

La première notion est celle utilisée dans de nombreux domaines: la Physique, l'Economie, la Biologie... Le modèle est, dans ce cas, *une représentation abstraite d'une réalité tangible*. Cette représentation est établie dans le but de fournir une meilleure connaissance d'un aspect d'une réalité ou de permettre une meilleure action sur elle. Le modèle sert en quelque sorte de pont entre une réalité et la science qui l'étudie, c'est-à-dire entre le réel et l'abstrait. De tels modèles sont qualifiés de mathématiques car leur construction relève le plus souvent des Mathématiques Appliquées.

L'Intelligence Artificielle, dans ses applications à de nombreux domaines, se réfère à des modèles pour simuler certains aspects de l'activité humaine ou aider l'homme dans son activité. C'est ainsi qu'on cherche à définir des modèles de la décision, des modèles d'acquisition de connaissances, des modèles de la vision... Ceci est le premier type d'usage du mot modèle en Intelligence Artificielle.

La seconde notion de modèle est celle particulière, définie en Logique Mathématique. Dans cette discipline le modèle est un objet concret qui illustre ou qui interprète certaines idées abstraites. Ces idées abstraites s'expriment sous la forme de formules logiques ou axiomes. On dit qu'elles constituent une théorie. Les axiomes d'une théorie traduisent habituellement des propriétés que doivent satisfaire des objets. Les objets qui les satisfont sont appelés des modèles de la théorie. Dans ce deuxième cas et à l'inverse du premier, le modèle réalise un passage de l'abstrait au réel. Cette notion de modèle a d'abord été utilisée en Mathématique. Par exemple en théorie des Groupes toutes les structures algébriques particulières qui satisfont les axiomes de la théorie sont autant de modèles de cette théorie. Cette notion s'est généralisée à tous les domaines. Pour donner un exemple particulièrement élémentaire, on peut expliciter les règles qui régissent tous les types de parenté entre les individus. Ces règles définissent une théorie des Parentés où chaque famille particulière avec ses ascendants, ses descendants et ses collatéraux, constitue un modèle de la théorie.

L'Intelligence Artificielle utilise la logique pour simuler, modéliser ou représenter de façon générale le raisonnement humain. Plus précisément, elle utilise plusieurs types de logique, par exemple la logique classique, des logiques non monotones, la logique temporelle ..., en fonction du domaine où elle est appliquée. Pour un domaine particulier, si on formule une théorie à l'aide d'une logique, on peut simuler un raisonnement sur les objets du domaine. Ces objets sont des modèles de la théorie. Ceci est le deuxième type d'usage du mot modèle en Intelligence Artificielle.

Nous venons de faire une distinction très marquée entre deux notions du mot modèle. Dans la pratique les emplois de l'une ou l'autre de ces deux notions peuvent ne pas être aussi tranchés en raison du rôle symétrique qu'elles ont l'une par rapport à l'autre. Dans l'exemple cité plus haut de la théorie des parentés, on pourrait considérer que l'ensemble des règles de parenté constitue un modèle, même très élémentaire, des structures familiales d'une société. Autrement dit et d'une façon plus générale, une théorie au sens de la logique ne pourrait-elle pas être considérée comme un modèle de la réalité correspondant à cette théorie? Inversement un modèle au sens des mathématiques appliquées, ne pourrait-il pas être considéré comme une *théorie de la réalité* pour laquelle a été construit le modèle en question, cette réalité devenant alors un modèle de la théorie au sens de la logique ?

L'emploi de l'une ou de l'autre des deux notions de modèle pourrait finalement se réduire à une différence de points de vue, celui des mathématiques appliquées ou celui de la logique. C'est une première approximation qui peut être utile, par exemple pour s'assurer qu'on comprend bien celui qu'on lit ou qu'on écoute, en se demandant de quel point de vue l'orateur se place. La distinction va, bien sûr, au delà. *Sans prétendre la résumer, on peut dire qu'un modèle au sens des mathématiques appliquées, est plutôt un outil pour agir sur le réel alors qu'une théorie en logique, est plutôt un outil pour étudier des propriétés abstraites indépendamment des objets réels qui peuvent satisfaire cette théorie.*

2 Le rôle des modèles en aide à la décision (P. Perny)

Comme nous l'avons déjà souligné, le mot "modèle" renvoie à des concepts différents selon les domaines. C'est pourquoi il nous semble opportun de considérer la notion de modèle sous divers éclairages en s'attachant à discerner les idées qui restent pertinentes une fois transposées dans le domaine qui nous concerne plus particulièrement, à savoir celui de l'intelligence artificielle. Nous présentons tout d'abord un certain nombre de réflexions que nous avons menées concernant le rôle des modèles en aide à la décision, discipline carrefour dans laquelle les concepts et techniques d'intelligence artificielle trouvent naturellement leur place. Toutefois, notre présentation privilégie une vision du modèle proche de celle qui prévaut en Sciences Humaines mais aussi dans un domaine qui nous est plus familier et que l'on pourrait *dénommer la recherche opérationnelle moderne*. Cette vision met davantage l'accent sur le caractère contingent et évolutif des représentations et s'éloigne en cela d'une conception essentiellement descriptive, souvent privilégiée dans les sciences physiques et biologiques. Nous essaierons de dégager les points important de cette conception moderne et tenterons de transposer avec profit ce discours pour rejoindre les préoccupations de l'intelligence artificielle.

2.1 Différents types de modèles mathématiques

Selon nous, les différentes perceptions du modèle mathématique reflètent les grandes tendances philosophiques qui, depuis Euclide, ont animé et animent encore les mathématiques. En effet, un peu à l'instar de Zimmermann (1987) nous distinguerons trois types de modèles mathématiques dits factuels, formels et constructifs.

a) Les modèles factuels et le platonisme mathématique

Le platonisme mathématique et ses représentants (Bolzano, Frege, Cantor, Russel) affirment, entre autres, que toute science traite d'une réalité indépendante de chaque scientifique, que toute question mathématique concerne des objets réels et possède, de ce fait, une réponse (éventuellement inconnue) affirmative ou négative (principe du tiers exclu).

Ainsi, dans cette optique, on est conduit à manipuler des modèles supposés être les reflets d'une réalité objective. Il est donc possible de les tester en confrontant les "prédictions" des modèles avec les réalités qu'ils sont sensés refléter ; de tels modèles peuvent alors être falsifiés dans la tradition Popperienne (cf. Popper, 1978).

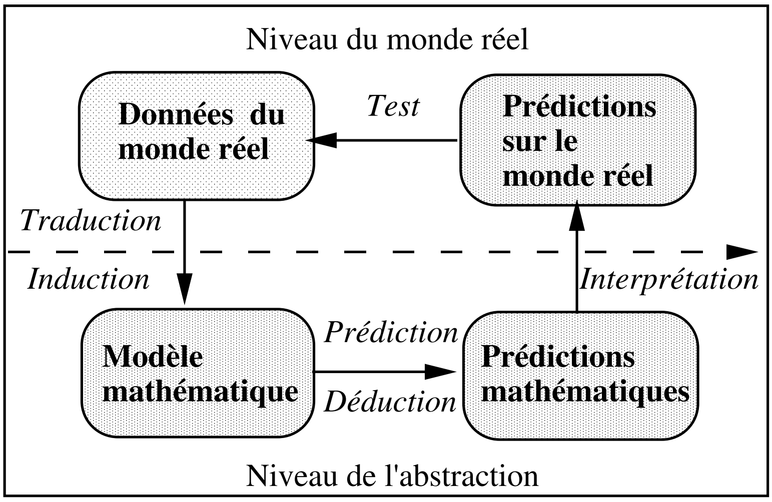


Figure 1 : Le cycle de la modélisation descriptive

On peut en effet imaginer un procédé de validation progressive de ces modèles fondé sur un processus cyclique de type *Traduction-Prédiction-Interprétation-test,* tel que l'envisagent, par exemple, Kemeny et Snell (1962) ou Roberts (1976), cf. fig. 1 ci-dessus.

Nous qualifierons ici ces modèles de factuels, reprenant ainsi la terminologie de Zimmermann (1980, 1988) qui propose la définition suivante : *"Factuals models include in their basic hypothesis falsifiable assumptions about the object system. Conclusions drawn from these models have a bearing on reality and they, or their basic hypothesis, have to be verified or can be falsified by empirical evidence."*

b) Les modèles formels et la philosophie formaliste

Le formalisme et ses représentants (Hilbert, Bourbaki) affirment, pour leur part, qu'il n'existe aucun lien entre les mathématiques et les autres disciplines. Ils considèrent que les mathématiques se réduisent aux textes écrits, ignorant le monde platonicien d'une part, et réduisant la pensée de l'homme de science à un épiphénomène d'autre part. Il va de soi qu'un tel point de vue n'autorise de concevoir le modèle que comme complètement déconnecté des objets réels et des faits humains. De tels modèles ne sont, bien entendu, pas falsifiables. Leur validation ne porte que sur leur cohérence interne (absence de contradictions et de paradoxes).

Nous qualifierons ici ces modèles de formels, reprenant toujours la terminologie de Zimmermann (1980, 1988) qui les définit ainsi : *"Formal models are purely axiomatic systems from which we can derive if-then-else statements and their hypotheses are purely ficticious. These models can only be checked for consistency but they can be neither verified nor falsified by empirical arguments."*

c) Les modèles constructifs et le constructivisme

Le constructivisme et ses représentants (Kronecker, Poincaré, Weyl) considèrent, comme le rappelle Apéry (1982), que "*les êtres mathématiques n'existent que dans la pensée du mathématicien et non dans un monde platonicien indépendant de l'esprit humain. ...les mathématiciens concrets sont divers, et chacun d'entre eux se modifie dans le temps ; cette diversité entraîne dans l'activité mathématique une part de subjectivité qui ne peut être supprimée.*" ; il ajoute un peu plus loin "*Comme le platonicien et contrairement au formaliste, le mathématicien constructif reconnaît une certaine réalité aux objets mathématiques, mais les différencie essentiellement des objets matériels, en ne leur attribuant que les propriétés susceptibles de démonstration.*"

Pour le constructiviste, le modèle est donc un instrument qui permet de forger une certaine réalité (potentiellement évolutive), mais cette réalité contient une part de subjectivité, d'artificiel, d'imaginaire puisqu'elle est contingente à la perception d'un individu particulier. Le concept de falsifiabilité, dans son acception classique (Poppérienne), se trouve alors dénué de sens puisqu'on ne prétend ici, en aucune façon, établir ou approcher une vérité. La validation d'un modèle passe par sa reconnaissance auprès d'une large communauté scientifique. Nous qualifierons ces modèles de constructifs.

2.2 L'esprit de la modélisation en aide à la décision

Pour spécifier davantage le statut du modèle dans une démarche scientifique, il convient de préciser le cadre dans lequel l'activité modélisatrice prend place, les objectifs qui sous-tendent cette activité, enfin le rôle effectif que le modèle est destiné à jouer. Ainsi, dans le domaine de l'aide à la décision, il est désormais classique de distinguer et d'opposer deux attitudes concernant la façon d'appréhender le rôle et la nature des modèles : l'attitude descriptive et l'attitude normative. Néanmoins, cette dichotomie canonique a été récemment entamée notamment par Bell et al. (1988) et Roy (1990) qui proposent d'ajouter une troisième composante : l'attitude prescriptive. Nous nous proposons maintenant de définir et comparer sommairement ces trois attitudes.

L'attitude descriptive consiste, en postulant l'existence d'une structure de préférence clairement établie dans la tête du décideur, stable et indépendante de toute observation, à tenter de découvrir et d'extraire cette réalité enfouie et préexistante, afin d'en rendre compte par un modèle factuel, une sorte de clone mathématique destiné à reproduire, tel un automate, les mécanismes décisionnels du "modélisé", et qui peut même, à l'extrême, se substituer à lui dans le cas de décisions relatives à des situations répétitives et de même nature. Ainsi, une formule mathématique ou un système expert faisant du "*credit scoring*" reflète un certain nombre de règles rigides et préalablement définies à force d'expériences, et permet d'évaluer de manière quasi-automatique dans quelle mesure un dossier de crédit est digne d'intérêt pour le banquier sollicité.

L'attitude normative consiste, d'une façon ou d'une autre, à tenter de définir et modéliser les canons de l'acte rationnel en matière de décision. Il en résulte en général un modèle formel de comportement décisionnel, sensé définir l'attitude d'un décideur idéal (et par force mythique). Selon Bell et al. (1988) *" ...normative theory has something to do with how idealized, rational, super-intelligent people should think and should act."* Comme le souligne French (1984) par ailleurs on peut faire (de façon un peu schématique) la distinction suivante *" ...normative analysis tell us how we should behave in particular circumstances, whereas descriptive theories conjecture how things are behaving."* Une attitude normative consiste, par exemple, à déclarer que les préférences d'un individu rationnel doivent se conformer aux axiomes de la théorie de l'utilité (cf. von Neumman et Morgenstern, 1947, et Raiffa, 1968).

L'attitude prescriptive, en matière de décision, se distingue par son esprit, de l'attitude descriptive, en niant l'existence de vérités objectives, c'est-à-dire indépendantes des individus (observateurs ou participants) intervenant dans le processus décisionnel. Elle consiste à mettre en place des modèles (essentiellement constructifs) et des procédures qui jouent le rôle d'outils favorisant l'élaboration d'une structure de préférence et/ou la préparation d'une recommandation (parmi d'autres possibles), et ce, en accord avec des fins définies préalablement. Ainsi Roy (1990) déclare *"L'objectif n'est pas de découvrir une vérité existante extérieurement aux acteurs impliqués dans le processus mais de construire un "jeu de clés" qui leur ouvrira des portes et leur permettra de cheminer, de progresser conformément à leurs objectifs et à leurs systèmes de valeurs."* C'est dans cet état d'esprit que l'on a coutume d'envisager le rôle des concepts, modèles et techniques utilisés dans les méthodes d'aide à la décision.

L'attitude prescriptive se distingue également de l'attitude normative en s'intéressant à un décideur réel, bien loin de l'être idéal et mythique dont nous parlions ci-dessus. Ainsi, Bell et al. (1988) résument les proccupations qui relèvent de cette approche par la question suivante "*What modes of thought, decision aid, conceptual schemes are useful - useful not for idealized, mythical, de-psychologized automata - but for real people?"* et ajoutent " *...since real people are different, with different psyches and emotions, capabilities, and needs, good advice has to be tuned to the needs, capabilities, and emotional makeups of the individuals for whom the prescriptive advice is intended*."

Ainsi, à ces deux paradigmes que sont the "is" (ce qui est) et the "ought" (ce qui devrait être) (nous empruntons ces deux termes à Bell et al., 1988), vient s'ajouter une ultime composante qui renvoie à quelque chose de plus pragmatique qui traduit l'orientation principale de l'attitude prescriptive.

De cette description triangulaire résulte une classification des modèles d'aide à la décision en trois parties, chacune reflétant le rôle particulier du modèle, selon les diverses attitudes que nous venons de distinguer. Nous parlerons donc de modèles utilisés à des fins descriptives, normatives ou prescriptives, référant ainsi à des fonctions et qualités spécifiques que Bell et al. (1988) proposent de différencier ainsi : *"Descriptive models are evaluated by their empirical validity, that is, the extent to which they correspond to observed choices. Normative models are evaluated by their theoritical adequacy, that is, the degree to which they provide acceptable idealizations or rational choice. Prescriptive models are evaluated by their pragmatic value, that is, by their ability to help people make better decisions."*

Nous pensons ainsi avoir répertorié les principales attitudes qui caractérisent le modèle comme moyen de représentation des préférences. Le découpage proposé ne concerne qu'un domaine relativement étroit : celui de l'aide à la décision. Il n'a donc pas une portée universelle. Cependant, un certain nombre de caractéristiques dégagées peuvent être transposées de manière significative dans le domaine de l'intelligence artificielle. En effet, nombre de sous-domaines de l'IA tels que la logique formelle, la représentation des connaissances et la réalisation de systèmes "intelligents" sont des terrains privilégiés pour retrouver les différents types de modèles distingués ci-dessus. Il est clair que la logique est un domaine scientifique axé principalement sur l'étude de modèles formels. En revanche, les systèmes à bases de connaissances élaborés pour répondre à des problèmes réels constituent des modèles moins abstraits qui, selon les cas, peuvent être factuels ou constructifs. En particulier, les connaissances représentées dans un système expert réalisant le pilotage automatique d'un barrage hydraulique, un système neuronal pour la reconnaissance des caractères, un système expert jouant au bridge (cf. Labat, 1990) et même un planificateur implanté sur un robot sont des exemples de modèles factuels. Enfin, la représentation des préférences dans un système interactif d'aide à la décision, la représentation des connaissance d'un apprenant dans un système d'EIAO sont des exemples de modèles constructifs.

De même on peut penser que l'activité modélisatrice qui caractérise la représentation des connaissances en intelligence artificielle peut être envisagée à des fins descriptives, normative ou prescriptives. Nous avons déjà mentionné plus haut le cas d'un système expert pour l'octroi de crédit ; la connaissance permettant de réaliser un premier tri d'une liste de dossiers candidats n'est qu'une représentation traduisant la stratégie de la banque en matière d'octroi de crédit, stratégie clairement définie à force d'expérience. Cette représentation n'existe que pour permettre un traitement répétitif et automatisable du processus de tri. Il s'agit donc bien d'une approche descriptive.

L'attitude normative est aussi largement représentée en IA. Nombre de systèmes à base de connaissances sont destinés à reproduire les actions ou décisions d'un expert qui fait autorité dans un domaine donné. Le caractère objectif et établi des règles qu'il préconise confère parfois un caractère normatif au système. Ainsi un système expert pour l'aide à la conception de bâtiments, un système d'enseignement assisté par ordinateur, un contrôleur flou pour la régulation automatique de température sont des exemples de modèles à vocation normative.

Enfin, l'attitude prescriptive est également représentée en IA. Elle prévaut notamment dans certains systèmes interactifs d'aide au diagnostic. Qu'il s'agisse de détecter l'origine d'un dysfonctionnement dans un réseau électrique, de déceler une maladie à partir de symptômes parfois contradictoires, les connaissances utilisées sont principalement subjectives et le système les exploitant est généralement destiné à proposer une recommandation pertinente. La modélisation des connaissances utiles pour parvenir à cette recommandation s'inscrit essentiellement dans une approche prescriptive, même si certains peuvent considérer qu'il s'agit plutôt d'une approche normative.

Ainsi, il apparaît que les découpages proposés pour les modèles d'aide à la décision conservent une certaine pertinence pour décrire et différencier les modèles des connaissances utilisés en IA. Ceci ne constitue pas une réelle surprise compte tenu des liens étroits qui font de l'intelligence artificielle et de l'aide à la décision des disciplines connexes. Nous pensons qu'en IA comme en AD, on doit privilégier l'approche prescriptive et l'utilisation de modèles constructifs, pour favoriser davantage la communication homme-machine et parvenir à une meilleur intégration des systèmes dits "intelligents", dans les processus de commandes automatique et de décision.

3 Rôle et place du modèle en biologie (P. Brézillon)

Le rôle du modèle dans une démarche scientifique doit tout d'abord être replacé par rapport à l'objectif fixé: un modèle, par son aspect conceptuel, doit avoir une valeur explicative pour la communauté scientifique. "Support à la réflexion et outil d'intelligibilité" (Bachelard, 1979), il devient alors un outil efficace dans la confrontation de nos idées au réel. Le modèle joue un rôle particulièrement important dans les sciences du vivant.

3.1 La démarche scientifique

a) Présentation

La démarche scientifique comprend une *procédure déductive* et une *procédure inductive* qui sont utilisées de manière itérative. Nous commencerons par examiner l'aspect déductif, partant de la notion de concept et aboutissant à la notion de phénomène observable.

La démarche scientifique, du moins dans les sciences expérimentales, concerne la *confrontation* de nos idées (considérées comme des concepts au sens large du terme) aux *phénomènes observables* par lesquels se manifeste le réel. Pour cela, l'idée initiale doit être formulée en un *énoncé* susceptible d'être confronté au "réel". Enoncé et confrontation sont les deux principales articulations de la démarche scientifique qui permettent une *formalisation* des concepts.

b) L'énoncé

L'énoncé E des idées initiales résulte d'une composition de concepts déjà formalisés et de principes généraux. Principes généraux et concepts sont enchaînés à travers un *formalisme* selon des règles logiques qui conservent la clarté et la précision des concepts formalisés évoqués dans E.

Il est important de remarquer que les énoncés qui sont ainsi engendrés ont, de par leur origine conceptuelle, un *caractère explicatif potentiel* qui ne deviendra effectif qu'après une confrontation réussie avec le "réel".

Exemple

> Le concept d'homéostasie du métabolisme calcique sera l'énoncé E. E est considéré relativement à l'état d'une variable y (la calcémie). Ce concept correspond classiquement au maintien de y à une valeur constante y_o. Il est construit sur des concepts tels que masse, temps, erreur, stationnarité, etc., et des principes tels que régulation et faibles variations. Le formalisme différentiel linéaire permet de réaliser l'énoncé E sous la forme $y' = -ay + e$ où le concept initial d'homéostasie du métabolisme calcique transparaît clairement sous la forme $y' = 0$. En effet, toute petite perturbation de l'état stationnaire y_o est appelée à disparaître.

c) Les spécifications

L'énoncé E s'exprime à travers des spécifications qui produisent des phénomènes théoriques. Ce sont ces phénomènes théoriques que l'on confronte aux phénomènes observables du "réel".

Une spécification correspond à la détermination des valeurs des paramètres. Parmi celles-ci, on distingue les conditions qui nous disent ce qu'il faut substituer aux variables de l'expression littérale, des autres conditions qui définissent les contraintes délimitant le champ d'application de cette expression (par exemple, $y \geq 0$).

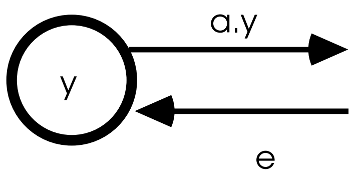
Exemple (suite 1)

La spécification de E correspond ici en partie à la quantification des paramètres 'a' et 'e', et de la condition initiale y(0) à partir de données expérimentales. Paramètres et conditions initiales doivent respecter des contraintes biologiques (a, e, $y(0) \geq 0$). Par exemple, y qui représente la quantité de calcium dans le sang doit avoir une valeur positive.

Il est à noter que des spécifications différentes peuvent produire un même phénomène théorique. C'est le cas, par exemple, de l'expression de E dans divers formalismes de représentation :

Exemple (suite 2)

$$y' = - a.y + e$$



Deux formalismes de représentation (donc deux spécifications) sont couramment utilisés en biologie: celui de gauche pour les calculs, et celui de droite pour raisonner (il s'agit de la représentation compartimentale).

d). Confrontation des phénomènes théoriques aux phénomènes observables

Dans une confrontation au "réel", certains phénomènes théoriques vont correspondre à des phénomènes déjà observés, d'autres non. Les premiers montrent le caractère explicatif de E. Les autres correspondent à des phénomènes qui, soit ne sont pas observables, soit n'ont pas encore été observés. Le retour à l'expérimentation est alors nécessaire pour juger de la pertinence de l'énoncé E.

A l'inverse de la procédure déductive, dans la procédure inductive de la démarche scientifique, des concepts pertinents vont être extraits des spécifications et réintroduits sous une forme sublimée au niveau d'un nouvel énoncé qui possédera, par son aspect conceptuel, un caractère explicatif potentiel élargi. Le formalisme de représentation joue là le rôle de "révélateur des concepts".

Exemple (suite 3)

La spécification "y' = -ay + e = 0" ne permet pas d'expliquer les variations circadiennes de la calcémie (un phénomène observable du "réel"). E a donc été modifié pour prendre en compte des mécanismes non linéaires au niveau des tissus calcifiés (comme la cristallisation des cristaux d'hydroxyapatite de calcium), et le formalisme différentiel non linéaire a été utilisé.

3.2 Le modèle dans la démarche scientifique

a) Une définition du modèle

Le *modèle* peut être rapproché par ses aspects qualitatifs à l'énoncé E, et par ses aspects quantitatifs aux spécifications qui lui sont associées. Son élaboration passe par trois grandes étapes qui sont enchaînées itérativement: la formulation, la confrontation aux phénomènes observables, et l'exploitation.

b) Formulation, confrontation et exploitation du modèle

L'énoncé est établi à partir de concepts formalisés dont le caractère nécessaire et suffisant par rapport à un ensemble limité O_i de phénomènes observés sera jugé a posteriori. Il doit satisfaire à des exigences minimales (identification, identifiabilités a priori et a posteriori) pour avoir une valeur explicative par rapport à O_i.

L'exploitation du modèle passe par la comparaison des phénomènes théoriques à l'ensemble de tous les phénomènes observés (sur le système réel étudié). Chaque phénomène théorique est le résultat d'une *expérience théorique* que l'on peut réaliser, sans avoir à agir directement sur le système réel.

Dans l'hypothèse où le modèle décrit au minimum les phénomènes de O_i, les diverses situations possibles sont les suivantes:

• Le modèle ne décrit que O_i. Sa valeur explicative est faible et apporte peu à la compréhension du système réel: c'est le "modèle descriptif". A titre d'exemple, le lissage mathématique (e.g. régression linéaire) est un tel modèle. Il permet d'obtenir de nouvelles données (théoriques) par interpolation, mais pas par extrapolation.

• Le modèle rend compte de phénomènes qui n'ont pas été initialement considérés dans O_i. Ceci conforte le modèle au niveau de la représentation choisie.

• Le modèle ne rend pas compte de phénomènes observés hors de O_i. Il est alors réfuté (ou falsifié au sens de Popper).

• Des phénomènes théoriques correspondent à des phénomènes observables non connus. Ceci nous conduit à la prédiction de phénomènes dans de nouvelles situations expérimentales. Si ces dernières ne sont pas actuellement réalisables, le modèle devient alors, dans le sens où l'entend d'Espagnat, une théorie puisqu'il devient difficilement réfutable. Sinon, nos connaissances sur le système réel s'enrichissent.

La tentative de formalisation de la démarche scientifique que nous venons de proposer, nous a amenés à aborder de manière rationnelle, non seulement le problème des *exigences* que doit satisfaire la démarche pour que le modèle ait toute la rigueur voulue, mais surtout l'étendue des *possibilités* qu'offre le modèle formel lors de son exploitation: prédiction, réfutation et utilisation.

4 Quelques repères à propos de la notion de modèle dans les logiciels applicatifs (J.Ch. Pomerol)

Dans cette courte note, le terme de modèle est pris au sens des mathématiques appliquées (voir en section 1 la distinction avec le sens en logique). C'est-à-dire qu'un modèle est l'image conceptuelle d'un phénomène naturel, par exemple un modèle de réacteur chimique, un modèle de marché, un modèle du foie, etc. Nous nous contenterons de cette idée naïve sans soulever le problème de l'existence d'une réalité en dehors du modèle alors, bien entendu, qu'un modèle peut exister en dehors de toute réalité (par exemple les machines volantes de Léonard de Vinci). Dans la suite de cette note, nous allons essayer, dans le contexte exclusif de la réalisation de logiciels, de préciser un peu le concept de modèle tel que nous venons de l'esquisser très vaguement.

4.1 Modèles et représentations

Nous nous situons délibérément dans le contexte de la réalisation de logiciels. Dans ce cadre, quel est le but de la modélisation ? Je crois qu'il n'est pas outré de dire qu'un modèle est toujours soit un modèle de décision soit un modèle de simulation. Autrement dit, on prend la peine de modéliser une portion plus ou moins grande du monde qui nous entoure, soit pour savoir comment il va évoluer (simulation), ce qui nous permettra de prendre les dispositions nécessaires pour prévenir ou accompagner l'évolution annoncée par la simulation, soit pour construire un système "décideur" ou "agissant" qui interviendra sur son environnement. Remarquons que dans tous les cas, le modèle est lié à l'action et à la décision.

Le système agissant qui se dessine derrière le modèle est un système de traitement de l'information (STI), ce dernier terme étant la traduction du terme "Information Processing System" de Newell et Simon (1972). Cela revient à dire que le système puise des informations dans son environnement et renvoie une action (dans un sens très large, une information étant aussi une action). En fin de compte, vu de loin, notre artefact reçoit des stimuli, les transforme en une suite de 0 et 1, la traite et produit soit des actions (ou de l'information) à l'aide d'un actionneur approprié (bras de robot, imprimante, micro, etc).

C'est là qu'interviennent deux des dispositifs introduits par Newell et Simon dans les STI. Premièrement l'interpréteur qui transforme les informations venant de l'extérieur en des *0,1 structurés* et le processeur qui traite ces 0 et 1 structurés.

Au fond, je suis tenté de dire que ces 0, 1 structurés correspondent aux données et que le programme correspond aux instructions constituant la partie procédurale du programme. Selon cette vue, le modèle est une fonction, *informatiquement parlant c'est le programme*. Dans ces conditions, les données structurées forment la *structure des données*, ce sont ces structures de données que je propose d'appeler *représentations*.

J'introduis ainsi une nouvelle notion qui est celle de représentation ou de données structurées que je distingue du traitement qui porte sur ces données. Donnons quelques exemples. Considérons le bilan comptable d'une entreprise avec actif et passif, ce bilan est une représentation de l'entreprise, l'organigramme fonctionnel avec le nom de chaque titulaire de fonction en est une autre. Autre exemple, la carte est une représentation du territoire. Prenons un exemple dans l'industrie, dix températures à différents endroits et cinq pressions, les flux entrants et sortants, forment une représentation d'un réacteur chimique, c'est-à-dire que l'on admet que le réacteur est représenté par un vecteur de température, un vecteur de pression et des vecteurs flux. En ce qui concerne ce réacteur, le traitement est formé des équations qui lient les températures, pressions et flux entre eux.

Au fond, la distinction entre "données structurées" et traitement est proche de celle faite entre déclaratif et procédural. Pitrat (1993, p.116) fait d'ailleurs très justement remarquer que "...les données ne sont qu'une façon très déclarative de fournir des connaissances". Et l'on sait bien que la frontière entre déclaratif et procédural est des plus floues. *L'ensemble (représentation + traitement) forme le modèle.*

Il me semble que même si les frontières sont floues, la distinction entre représentation et traitement est importante parce que d'une part, les représentations paraissent former une partie des connaissances qui est très stable chez un individu donné, comprenant sans doute une forte part psychologique et culturelle, mais surtout parce que ces représentations sont fortement impliquées dans le fonctionnement de l'interpréteur. Autrement dit, pour un STI (humain ou artificiel), il n'y a pas de communication possible avec l'environnement sans l'acquisition préalable des représentations.

Comment l'enfant construit ses représentations et quelle est la part de l'inné et de l'acquis dans ce processus, c'est une question qui fut au centre des travaux de Piaget et qui, bien sûr, n'a pas encore eu de réponse définitive. Au moins pour un artefact, les représentations sont-elles indiscutablement fournies par le concepteur et elles jouent un rôle très important pour la communication homme/machine puisqu'il est bien prouvé que si l'homme et la machine ne s'entendent pas sur les représentations, l'échange devient hasardeux et très pauvre.

J'ai insisté sur l'aspect représentation car c'est souvent l'aspect caché de la modélisation bien qu'en fait, les représentations contraignent le traitement. Ainsi, si vous vous représentez une firme sous forme d'un tableau comptable, vous pourrez, en calculant des ratios (procédural), vous faire une idée de la valeur de cette entreprise. En revanche, si vous vous représentez la même firme comme un lieu social, vous serez enclin à faire un système expert pour y évaluer la qualité de la vie et le "bilan social". Le type de traitement possible dépend donc de la représentation.

4.2 Différents niveaux de représentations, modèles et méta-modèles

Nous avons, Lévine et Pomerol (1993, 1995), insisté sur les niveaux de représentations et distingué quatre niveaux de représentations intervenant dans la modélisation. Pour illustrer ceci, prenons notre exemple favori qui consiste à réaliser un système d'aide à la décision dans l'entreprise.

Au plus haut niveau existe une représentation du monde (Weltanshauung) qui est difficilement utilisable dans nos machines. Par exemple, il importe évidemment que l'on considère le travail comme un moyen d'exploitation inventé par les patrons, comme un "don" de Dieu participant à la dignité de l'homme ou comme le meilleur moyen de passer le temps, les niveaux de représentations inférieurs seront différents, néanmoins ce niveau de représentation n'est pas, que je sache, jusqu'ici pris en considération dans les artefacts.

En dessous apparaît le niveau "théorie". Par exemple, la théorie sociale de l'entreprise qui débouche sur son bilan social maintenant bien codifié et pour lequel des logiciels (de type SE) existent déjà ou existeront. La théorie comptable de la firme est attestée depuis longtemps. On pourrait faire une théorie des flux, etc. Le niveau "théorie" définit à la fois la "théorie" à utiliser (par exemple comptabilité, sociologie, modèle de flux et aussi les champs d'applications (ou sous-domaines) puisqu'un individu peut fort bien décider de faire coopérer (c'est même recommandé) un modèle social et un modèle comptable.

Quand la théorie est fixée, on passe au niveau inférieur : définition des représentations et des traitements tels que nous les avons définis dans le paragraphe précédent, c'est-à-dire qu'on arrive au niveau modèle stricto sensu (modèle s.s.) qui est censé représenté une partie de la réalité dans le cadre d'une théorie donnée. Pour être plus précis, prenons l'exemple de la gestion de production. Quand on décide de réaliser un logiciel complet depuis la commande, jusqu'à la vente en passant par l'ordonnancement des fabrications, il est clair que l'on se base sur une représentation de haut niveau de l'entreprise comme un système cybernétique (Weltanshauung). L'ensemble du système est un modèle au sens large (modèle lato sensu). A l'intérieur de cette représentation globale de la production, il y a le choix d'une ou plusieurs théorie (par exemple la programmation linéaire pour le plan de production ou les statistiques pour la prévision de la demande). Une fois que les théories sont fixées, on passe à la réalisation du modèle s.s. qui sera par exemple un programme linéaire.

Une fois que le modèle s.s. ou les modèles sont connus et réalisés, le travail du décideur consiste à essayer différents jeux de données (analyse de sensibilité). Il choisit ces données en fonction de son expérience du monde. C'est le quatrième niveau de la modélisation : celui de la conception des jeux de données.

Il est clair que les niveaux définis ainsi pourraient être raffinés, ce n'est pas le plus intéressant, je crois qu'ils suffisent à structurer les idées et on les retrouve un peu partout en informatique (cf. Lévine et Pomerol, 1993 et 1995). En revanche, on peut faire à leur propos deux observations importantes.

En ce qui concerne la décision, les deux niveaux supérieurs (représentation de haut niveau et théorie) sont considérés comme stratégiques, le niveau du bas est opérationnel (choix des jeux de données/analyse de sensibilité et introduction des données). Dépendant des situations, la frontière stratégique/opérationnel passe quelque part dans le niveau du milieu (celui de la modélisation s.s.), parfois la définition du modèle est considérée comme stratégique, tantôt il suffit de fixer la théorie. En ce qui concerne l'informatique, il faut remarquer que les artefacts s'arrêtent en général au niveau modèle s.s. et n'essayent pas de toucher au niveau théorie et a fortiori au niveau représentation du monde.

J'appellerai *méta-modèle* tout modèle qui organise la coopération entre différents modèles s.s. du niveau 3. Autrement dit, le méta-modèle se situe à la frontière modèle/théorie, il dit comment se crée du sens à partir de différents modèles de niveau 3. Dans la plupart des SIAD, le méta-modèle est soit inexistant, soit incomplet (Pomerol, 1992). Dans ce cas, le décideur complète le méta-modèle dans sa tête, ce sont des connaissances qui ne sont pas explicitées dans l'artefact.

4.3 Recherche heuristique

Pour finir remarquons que la notion de recherche heuristique peut nous aider aussi dans le monde des modèles. On connaît le principe de la recherche heuristique dans un graphe d'états. Evidemment, Newell et Simon (1972) ne donnent pas de recette pour déterminer ce qu'on doit mettre de connaissances dans les états. Il est clair que c'est souvent une question difficile. Devant une situation concrète, que doit-on mettre dans les états, dans les opérateurs, l'un étant lié à l'autre, c'est affaire de goût et d'intuition et surtout d'efficacité. Malheureusement, le résultat dépend évidemment de ce que l'on a effectivement mis dans les états et les opérateurs. La vision classique suppose que la construction des états et des opérateurs se passe dans le cadre d'une représentation et d'un traitement au niveau modèle s.s. Par exemple, on représente le problème de la chèvre, du chou et du loup comme un triplet (état) et on considère les opérateurs idoines. Cela forme un modèle du problème de la chèvre, du chou et du loup.

Ce que je voudrais noter ici, c'est que la notion de recherche heuristique s'étend récursivement bien au-delà du modèle. Dans les systèmes d'aide à la décision, le décideur peut pratiquer une recherche heuristique sur les modèles, chaque état étant un modèle; il peut aussi se placer au niveau théorie et explorer différentes théories pour résoudre un même problème.

Pour fixer les idées, supposons que le décideur soit un chef d'entreprise confronté à une perte. Il peut d'abord se tourner vers l'aspect budgétaire de son entreprise et explorer l'idée de faire des économies. Donc il fera un modèle s.s. des dépenses et cherchera où mettre en oeuvre des diminutions de coût en testant divers jeux de données. Mais il peut aussi être tenté d'envisager une vision marketing de son entreprise et faire un modèle de ventes, de publicité, etc, pour augmenter ses ventes. Il peut aussi se concentrer sur l'aspect salarial et faire un modèle centré sur la productivité, le nombre de salariés, etc. On voit sur cet exemple qu'il y a passage d'un état à un autre, chaque état représentant une famille de modèles s.s. de même type. Comment la décision se fixera-t-elle sur une solution du type : réduire les coûts de production, augmenter le budget publicité ou licencier, c'est une autre histoire qui dépend du méta-modèle qui reste largement inexprimé et contenu dans la tête du décideur. Remarquons que ce méta-modèle dans le cas présent est bien contraint par la représentation du monde (niveau 4, culturel et socio-psychologique).

Il est important de noter, pour la réalisation d'artefacts, que le processus de recherche heuristique s'applique pour les modèles et les niveaux supérieurs, comme il s'applique au sein d'un modèle s.s. Nous retrouvons là le processus du raisonnement universel (du moins selon l'idée de Newell et Simon).

Dernière remarque, cette notion d'exploration et de méta-modèle inachevé permet de mieux comprendre l'interactivité puisque l'interactivité est alors le contrôle par l'utilisateur d'une exploration de niveau 3 (dans le monde de la théorie ou des méta-modèles). On pourra vérifier que lorsque l'interactivité ne se réduit pas à l'acquisition de données par la machine (qui est un processus purement passif), l'utilisateur s'en sert pour construire sa décision en combinant les divers résultats des modèles qui sont à sa disposition. Comment cette combinaison se fait et par quelle alchimie le décideur en déduit l'action qu'il va entreprendre, c'est la part du méta-modèle qui généralement nous manque.

Conclusion

L'idée de modélisation est au cœur de l'informatique puisqu'on ne programme bien que ce que l'on a préalablement modélisé. C'est le sacro-saint cahier des charges, passage obligé de tout projet informatique un peu conséquent. Pourtant, l'activité modélisatrice est mal connue, parfois même mal reconnue.

Il faut dire que c'est une discipline difficile à enseigner. Vous êtes-vous déjà demandé comment apprendre à des étudiants à faire de bons modèles ? Cela reste plus un art passible de méthodes d'apprentissage artisanales qu'une science susceptible d'un bel enseignement avec théorèmes et exercices. Encore que, bien entendu, il soit possible d'enseigner, à partir de bases de modèles a priori des modèles types adaptés à certaines situations. L'ennui est que souvent l'on apprend aussi ainsi à tordre la réalité pour la faire correspondre, croit-on aux modèles.

D'abord, pour enseigner à bien modéliser, il faudrait savoir ce que c'est qu'un bon modèle. Est-ce un modèle à la cohérence interne parfaite reposant sur des axiomes clairs et précis ou un modèle qui colle bien à la réalité. Cette question est sous-jacente aux discussions dans le domaine de la décision, évoquées par P. Perny dans le paragraphe 2. Et puis encore, tout modèle laisse échapper une partie de la réalité, bien sûr "la carte n'est pas le territoire" ; dira-t-on pour autant que les cartes sont inutiles ?

Un concept aussi central dans les applications de l'informatique et aussi difficile méritait bien quelques instants d'attention. A vrai dire, dans l'inconscient collectif des informaticiens et en particulier en IA on a parfois cherché à oublier la dure nécessité de la modélisation.

Malgré quelques voix discordantes, ("L'ingénierie de la connaissance, c'est de la modélisation", Pomerol, 1988, p.49), la programmation déclarative, les systèmes experts ont longtemps participé de l'illusion de la programmation sans modélisation. Cette idée semble provisoirement reléguée aux oubliettes par les concepteurs de systèmes d'acquisition des connaissances, voir par exemple Wielinga et al., 1992. Mais il ne faut pas tomber d'un extrême dans l'autre, reconnaître que derrière toute application il y a une phase de modélisation n'implique pas que l'informatique ne puisse pas progressivement desserrer le carcan de la modélisation en n'étant pas obligé de spécifier tout le modèle, en utilisant des méthodes prototypes, en développant des langages qui permettent de la programmation "progressive et révocable".

Reconnaître que l'on puisse ne pas modéliser dans tous les détails la réalité que l'on cherche à informatiser, nécessite aussi que l'on reconnaisse la pertinence de différents niveaux de représentation et partant de modélisation. Cela nous renvoie sur les différents niveaux de représentations, les métaconnaissances et les méta-modèles au sein desquels une spécification incomplète ou une programmation plus déclarative peut être rendue efficace. La très grande capacité humaine à se mouvoir dans les niveaux de représentations et de modélisation est loin d'avoir été copiée et/ou exploitée par les informaticiens même si cette mobilité commence à être prise en compte comme une donnée fondamentale de la pratique de la modélisation (Srinisavan and Dov Te'emi, 1995).

Les modèles sont partout dans la tête des humains, ils nous servent à maîtriser la complexité de la nature. Pour l'informaticien, ils sont une étape contraignante, irritante sur le chemin qui mène aux applications. Ce sont deux raisons qui à elles seules suffisent à justifier une réflexion collective dans une équipe qui se propose entre autres activités, une réflexion sur les logiciels applicatifs.

Références

Apéry, R., (1982), "Mathématique constructive", dans *Penser les mathématiques* : *Séminaire de philosophie et mathématiques de l'ecole normale supérieure*, Seuil, 58-72.

Bachelard S. (1979), "Quelques aspects historiques des notions de modeles et de justifications des modeles, Actes du Colloque Elaboration et Justifications des Modeles? Applications en Biologie", Serie Recherches interdisciplinaires, Maloine ed., Tome I, pp. 9-20.

Bell, D.E., Raiffa, H., Tversky, A., (1988), "Descriptive, normative and prescriptive interactions in decision making" dans Decision making: descriptive, normative and prescriptive interactions, D.E. Bell, H. Raiffa, and A. Tversky (Eds.), Cambridge University Press, 9-30.

Brézillon P. (1983), "Place et rôle du modèle en biologie: - son intérêt et ses impératifs (Tome I) ; - son application à l'étude de la représentation compartimentale des métabolismes de la sérotonine et du calcium (Tome II)", Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Physiques, Paris VI.

d'Espagnat B. (1979), *A la recherche du reel*, Gauthiers-Villars, Paris.

French S. (1984), "Fuzzy Decision Analysis: Some criticisms", dans TIMS/Studies in the Management Sciences, Elsevier Science Publishers B.V., North-Holland, 20, 29-44.

Kemeny J.G, Snell J.L. (1962), *Mathematical Models in the Social Sciences*, Blaisdell Publishing Co., Waltham, Mass., reprinted by M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1972.

Labat J.M. (1990), "Une contribution à l'amélioration des capacités pédagogiques des tuteurs intelligents", Thèse de l'Université Paris 6.

Lévine P., Pomerol J.Ch. (1989), *SIAD et Systèmes Experts*, Hermès, Paris.

Lévine P., Pomerol J.Ch., (1993), "Are DSSs problem solvers ?" à paraître en rapport LAFORIA.

Lévine P., Pomerol J.Ch., (1995), "The role of the Decision Maker in DSSs and representation levels", in Proceedings of the 28th Hawaï International Conference on System Science, Nunamaker Jr. J.F. and Sprague R.H. Eds., 3, 42-51.

Newell A., Simon H. A. (1972), *Human Problem Solving*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Perny P. (1992), "Modélisation, agrégation et exploitation de préférences floues dans une problématique de rangement : bases axiomatiques, procédures et logiciels", thèse de doctorat université de Paris Dauphine, LAFORIA 93/09.

Pitrat J. (1990), *Métaconnaissances*, Hermès, Paris.

Pitrat J. (1993), *Penser l'informatique autrement*, Hermès, Paris.

Pomerol J.Ch. (1988), *Les systèmes experts*, Hermès, Paris.

Pomerol J.Ch. (1992), "Autour du concept de décision assistée par ordinateur", *Journal of Decision Systems* 1, pp. 11-13.

Popper K.R. (1978), *La logique de la découverte scientifique*, Payot, Paris (traduction de "*The logic of scientific discovery"*, Hutchinson C°, London, 1959)"

Raiffa H. (1968), *Decision Analysis - Introductory lectures on choices under uncertainty*, Addison-Wesley.

Robert P. (1991), *Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue Francaise*, dictionnaires LE ROBERT, Paris.

Roberts F.S. (1976), *Discrete Mathematical Models with applications to social, biological, and environmental problems*, Prentice-Hall, Inc. EnglewoodCliffs, New Jersey.

Roy B. (1990), "Science de la décision ou science de l'aide à la décision", Cahier du LAMSADE n° 97, Université Paris Dauphine.

Srinivasan A., Te'emi D. (1995), "Modeling as constrained problem solving: an empirical study of the data modeling process", *Management Science* 41, 419-425.

Van Gigch J.P. (1991), "System design modeling and metamodeling", Plenum press, New-York

Von Neumann J., Morgenstern O. (1947), *Theory of games and economic behavior*, John Wiley and Sons, New-York.

Wielinga B.J, Schreiber A.T. and Brenkner J.A. (1992), "KADS: a modelling approach to knowledge engineering", *Knowledge Acquisition* 4, 5-53.

Zimmermann H.J. (1980), "Testability and the Meaning of Mathematical Models in Social Sciences", Mathematical Modelling, 1, 123-139.

Zimmermann H.J. (1987), *Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, Lancaster.