

Qu'est-ce qu'un modèle scientifique ? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l'enseignement intégré de science et de technologie

Lena Soler

Citer ce document / Cite this document :

Soler Lena. Qu'est-ce qu'un modèle scientifique ? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l'enseignement intégré de science et de technologie. In: Spirale. Revue de recherches en éducation, n°52, 2013. L'enseignement intégré de science et de technologie (EIST) au collège : à la recherche d'un curriculum. pp. 177-214;

doi : <https://doi.org/10.3406/spira.2013.1067>

https://www.persee.fr/doc/spira_0994-3722_2013_num_52_1_1067

Fichier pdf généré le 31/03/2018

Résumé

Le présent article vise à fournir une analyse conceptuelle et épistémologique de la nature et du statut du modèle scientifique, dans la perspective d'un enseignement intégré de science et technologie (EIST) préoccupé de travailler les difficultés notoires qu'ont les élèves à appréhender le lien entre «monde réel» et «représentations scientifiques» (modèles et théories). On prend pour point de départ une conception du modèle qui, d'une part, se trouve en harmonie avec un certain nombre d'usages, et apparaît pour cette raison acceptable, même si pas universellement acceptée, et qui, d'autre part, s'avère spécialement intéressante du point de vue de l'EIST, notamment vis-à-vis du but de travailler avec les élèves les liens science-réalité. L'analyse de cette conception du modèle se développe à partir d'une double comparaison. D'un côté, comparaison du modèle avec la théorie – d'où ressortent des différences importantes vis-à-vis des relations à la réalité (trois sens de «réalité » étant distingués au cours de la discussion). De l'autre côté, comparaison du modèle et de la modélisation avec les objets techniques et les pratiques technologiques – d'où ressortent cette fois des parentés fondamentales. Sur la base de cette double comparaison, et du réseau des similitudes/ différences mis à jour, est suggéré le principe d'une stratégie didactique susceptible d'aider simultanément les élèves : à penser de manière plus consciente et plus riche les liens des sciences et des technologies au «monde réel» ; à être mieux armés pour accommoder les remises en causes, au fil du cursus scolaire, de ce qui a été antérieurement appris en science ; enfin, à saisir les différences de «logique» qui distinguent pratiques scientifiques (visant une connaissance sur l'objet d'étude) et pratiques technologiques (visant l'obtention de moyens pour atteindre des buts pratiques particuliers). Le résultat se conçoit comme un outil et un point de départ pour l'élaboration de propositions didactiques plus concrètes.

Abstract

The aim of the present paper is to give a conceptual and epistemological analysis of the nature and the status of scientific model, in the perspective of an integrated teaching of science and technology (ITST) which intends to work on the frequent difficulties of pupils concerning the relations between the "real world" and "scientific representations" (models and theories). The paper starts from a conception of model which has two features : first, it is coherent with many uses of the term "model", and thus is acceptable, even if not universally accepted ; second, it proves to be especially interesting with respect to ITST, in particular regarding the aim to work the relation between science and reality with children. The analysis of this conception of the model is developed through a double comparison. On the one hand, comparison of model with theory – from which important differences are stressed regarding the links with "reality" (three senses of reality are distinguished along the discussion). On the other hand, comparison of model and modeling with technical objects and technological practices – from which important similarities are this time emphasized. On the basis of such double comparison and the corresponding network of similarities/differences put forward, the principle of a didactic strategy is suggested, which may simultaneously help pupils : to think the relations of science and technology to reality in a more conscious and richer way ; to be better armed to cope with the fact that many things learned at a point of a scientific curriculum are subsequently questioned ; and finally, to grasp the different "logics" which drive scientific practices (aiming at the acquisition of knowledge about the studied object) and technological practices (aiming at the acquisition of means to achieve particular practical goals). The result is conceived as a tool and a starting point for the elaboration of more concrete didactic proposals.

QU'EST-CE QU'UN MODÈLE SCIENTIFIQUE ?

DES CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE QUI IMPORTENT DU POINT DE VUE DE L'ENSEIGNEMENT INTÉGRÉ DE SCIENCE ET DE TECHNOLOGIE (EIST)

Résumé : Le présent article vise à fournir une analyse conceptuelle et épistémologique de la nature et du statut du modèle scientifique, dans la perspective d'un enseignement intégré de science et technologie (EIST) préoccupé de travailler les difficultés notoirement qu'ont les élèves à appréhender le lien entre « monde réel » et « représentations scientifiques » (modèles et théories). On prend pour point de départ une conception du modèle qui, d'une part, se trouve en harmonie avec un certain nombre d'usages, et apparaît pour cette raison acceptable, même si pas universellement acceptée, et qui, d'autre part, s'avère spécialement intéressante du point de vue de l'EIST, notamment vis-à-vis du but de travailler avec les élèves les liens science-réalité. L'analyse de cette conception du modèle se développe à partir d'une double comparaison. D'un côté, comparaison du modèle avec la théorie – d'où ressortent des différences importantes vis-à-vis des relations à la réalité (trois sens de « réalité » étant distingués au cours de la discussion). De l'autre côté, comparaison du modèle et de la modélisation avec les objets techniques et les pratiques technologiques – d'où ressortent cette fois des parentés fondamentales. Sur la base de cette double comparaison, et du réseau des similitudes/différences mis à jour, est suggéré le principe d'une stratégie didactique susceptible d'aider simultanément les élèves : à penser de manière plus consciente et plus riche les liens des sciences et des technologies au « monde réel » ; à être mieux armés pour accommoder les remises en causes, au fil du cursus scolaire, de ce qui a été antérieurement appris en science ; enfin, à saisir les différences de « logique » qui distinguent pratiques scientifiques (visant une connaissance sur l'objet d'étude) et pratiques technologiques (visant l'obtention de moyens pour atteindre des buts pratiques particuliers). Le résultat se conçoit comme un outil et un point de départ pour l'élaboration de propositions didactiques plus concrètes.

Mots-clefs : modèle scientifique ; théorie scientifique ; réalité ; réalisme ; anti-réalisme ; instrumentalisme ; technologie.

INTRODUCTION

Le présent article vise à fournir une caractérisation du modèle scientifique qui puisse être utile à ceux qui enseignent les sciences et les technologies, en particulier dans le primaire et le secondaire. Il propose un cadrage épistémologique et conceptuel sur la nature des modèles, en mettant en avant les aspects estimés les plus importants du point de vue d'un enseignement des sciences et des technologies préoccupé de travailler avec les élèves le rapport entre constructions scientifiques (modèles, théories, etc.) et « réalité » visée par ces constructions. Ce rapport a besoin d'être travaillé, car il fait difficulté pour de nombreux élèves, et peut

fonctionner comme un obstacle aux apprentissages. Divers auteurs ayant problématisé la question de la modélisation en rapport avec l'enseignement ont mis ce point en avant. Ainsi, les travaux de Tiberghien et Vince (2005) soulignent que les difficultés des élèves « portent majoritairement sur l'établissement des liens entre le monde des objets et événements et le monde de la théorie et des modèles ». De son côté, Anne-Marie Drouin (1988) note que « la distinction n'est pas toujours nette entre modèle et théorie », mais que « quel que soit le concept auquel on s'attache, une réflexion sur modèle (...) et théorie ouvre la question du rapport entre les phénomènes de la réalité et ce qui en est dit dans le discours scientifique, entre le "réel" et le "construit" ». Le présent article s'intéresse tout spécialement à ce rapport, et s'emploie à rendre plus nette la distinction entre modèle et théorie *de ce point de vue*. Les vertus spécifiques potentielles du modèle de ce point de vue – ou plus exactement les vertus potentielles d'activités scolaires mettant en jeu les modèles (construction et utilisation de modèles associées à une réflexion sur ce qu'est un modèle) – sont mises en évidence dans la perspective d'un enseignement de science et technologie, et plus particulièrement d'un enseignement *intégré* de science et de technologie (EIST) au collège.

1. OBJECTIFS, MOTIVATIONS, CADRAGE TERMINOLOGIQUE, PERSPECTIVE ADOPTÉE

1.2. Objectif et motivation

Dans la perspective de l'EIST, le recours aux modèles apparaît spécialement intéressant pour au moins deux raisons. D'abord, de manière assez évidente, parce que la construction et l'utilisation de modèles constitue un point commun aux pratiques scientifiques et technologiques. Les scientifiques qui explorent la nature, comme les ingénieurs qui élaborent des technologies, recourent *les uns et les autres à la modélisation et aux modèles* : modèles à propos de tel ou tel phénomène naturel dans le premier cas ; modèles à propos de tel ou tel artefact technologique dans le second (les modèles du second type mobilisant d'ailleurs souvent des modèles du premier type). En ce sens, il y a donc des modèles *scientifiques* et des modèles *technologiques* (et des liens entre les deux). Ensuite, de manière peut-être moins évidente mais cruciale et qui s'éclaircira au fur et à mesure des développements, parce que le modèle peut être considéré comme une sorte d'objet hybride, mi-scientifique mi-technologique, ou peut-être plus exactement un objet à la fois scientifique et technologique. Certaines caractéristiques du modèle semblent en effet apparenter celui-ci aux théories édifiées par les scientifiques, ce qui peut inciter à situer le modèle du côté de la science ; mais d'autres caractéristiques du modèle le rapprochent à l'examen fortement des objets technologiques, ce qui peut inciter à le situer du côté de la technologie. Pour au moins ces deux raisons, le modèle, *si l'on en comprend bien la nature spécifique, par comparaison avec une théorie scientifique d'une part et avec un objet technologique d'autre part*, et si l'on s'emploie à faire saisir ces aspects aux élèves, se présente comme un objet particulièrement intéressant du point de vue de l'EIST : un objet apte à la fois à faire du lien entre science et technologie, et à aider les élèves à appréhender les spécificités respectives de l'activité scientifique d'une part, et de

l'activité technologique d'autre part. C'est en tout cas le point de vue que cet article se présente d'exposer et d'argumenter.

*1.2. Modèle scientifique et modèle technologique ;
sens large et sens étroit de « science » et « scientifique »*

Avant d'entrer dans le vif du sujet, quelques remarques terminologiques s'imposent. Dans le cadre d'une réflexion sur le modèle en rapport avec les sciences, les technologies, et leurs relations, il est en effet indispensable de considérer d'emblée une ambiguïté terminologique susceptible d'engendrer des confusions.

Lorsque l'on cherche à *différencier* le domaine *scientifique* et le domaine *technologique*, on souligne premièrement que la science vise le monde naturel, tandis que la technologie vise des objets artificiels, et l'on peut en outre mettre en avant des différences essentielles au niveau des *buts* poursuivis dans les activités scientifiques et technologiques, au niveau des *contraintes* qui régissent chacune de ces activités, etc. – différences dont le contenu se précisera au fil des développements ci-dessous. Qualifions le sens des termes « science » et « scientifique » qui est mobilisé dans le descriptif ci-dessus de sens *restreint*.

Le problème, et la source de l'ambiguïté, est qu'il existe aussi un sens large. En effet, dans de nombreux usages communs qui n'ont pas spécialement pour but de différencier science et technologie, les termes « science » et « scientifique » sont utilisés en un sens large *incluant les technologies* et non pas au sens restreint les excluant. Cet usage correspond à un sens générique de « science » et « scientifique », qui rassemble dans une même catégorie les activités d'investigation de la nature et d'élaboration/utilisation de technologies – lesquelles entretiennent en pratique des liens d'interdépendance variés et souvent étroits –, pour les contraster en bloc avec des activités d'une autre nature, comme par exemple les activités de nature artistique.

En conséquence de l'existence de deux acceptions, étroite et large, des termes « science » et « scientifique », l'expression de « modèle scientifique » peut, selon les cas : soit renvoyer au modèle tel qu'utilisé en science au sens étroit, c'est-à-dire à une modélisation de phénomènes naturels se distinguant de la modélisation d'artefacts techniques mise en jeu dans le domaine de la technologie (c'est cette acception qui est mobilisée ci-dessus dans le paragraphe 2 du présent article) ; soit renvoyer indifféremment à l'ensemble des modèles utilisés dans le domaine scientifique au sens large, technologie comprise (c'est cette acception qui est mobilisée dans le titre de cet article).

Pour renvoyer sans ambiguïté au modèle dans les sciences *et les technologies* (i.e. dans les sciences *au sens large ou générique*), on manque d'un adjectif englobant. *Modèle scientifique et technologique* est lourd, et surtout, il suggère deux aspects différents, alors que l'on voudrait au contraire diriger l'attention sur des traits communs des modèles dans les deux domaines de la science et de la technologie. Je n'ai pas trouvé d'autre solution que de préciser explicitement « au sens large » lorsque le sens générique de « scientifique » est mobilisé – sauf dans le titre où l'explicitation aurait été lourde et incompréhensible d'emblée. Hormis l'occurrence du titre, en l'absence de spécification, « scientifique » sera, dans ce qui suit, employé au sens étroit.

Ces précisions terminologiques ayant été faites, nous pouvons dire qu'au

sein de l'ensemble des modèles scientifiques *au sens générique*, certains modèles sont scientifiques (au sens où ils modélisent une réalité naturelle : sens restreint), et d'autres sont *technologiques* (au sens où ils modélisent une réalité artificielle).

1.3. Perspective adoptée

Cet article aborde la question du modèle dans une perspective *conceptuelle et épistémologique* ayant des connexions métaphysiques, en accordant une *importance spéciale* à la question des *relations entre modèle et réalité modélisée*. En se centrant spécialement sur cette question, il propose une analyse systématique et approfondie de la nature du modèle, par comparaison d'une part avec la théorie scientifique, et d'autre part avec l'objet technologique.

Cette analyse est premièrement nourrie par mes recherches en philosophie des sciences et épistémologie – mon domaine premier de compétences –, mais est aussi éclairée, secondairement et plus indirectement, par une expérience de près d'une quinzaine d'années d'enseignement en IUFM auprès de professeurs stagiaires des premier et second degrés en physique-chimie. Cette expérience me permet de connecter la réflexion épistémologique à un horizon de pratiques « nouvelles » d'enseignement en science et en technologie – même si, comme je vais y revenir, il ne s'agit pas ici d'élaborer des propositions didactiques concrètes d'activités avec des élèves.

La littérature spécialisée impliquant centralement les modèles est extrêmement abondante et diversifiée, tant dans le domaine de la recherche en philosophie des sciences et épistémologie¹, que dans le domaine de la recherche en didactique des sciences et technologies². Les perspectives selon lesquelles les modèles sont considérés, les conceptions mêmes des modèles, s'avèrent extrêmement variées, et pas toujours homogènes, pour dire le moins. Comme l'écrivait déjà Drouin (1988) il y a plus de vingt ans « ce qui frappe tout d'abord lorsqu'on aborde une réflexion sur le concept de modèle, c'est la diversité de ses emplois ». L'auteur ajoutait que « ce concept est (...) souvent employé de manière contradictoire ou abusive », et parlait de « concept éclaté ». La situation ne me semble pas avoir fondamentalement évolué depuis. En dépit des efforts d'un certain nombre de chercheurs pour mettre de l'ordre dans les multiples conceptions et usages des modèles³, la diversité et l'éclatement subsistent. En 2006, Maryline Coquidé et Jean-Michel Le Maréchal (2006) soulignaient encore, dans l'introduction d'un numéro d'*Aster* intitulé *Modélisation et simulation*, « la diversité des cadres théoriques utilisables dans les différents contextes de recherche, qu'ils abordent la thématique de cet ouvrage selon des registres plutôt épistémologique, psychologique ou pédagogique ». Les auteurs concluaient que « de nombreuses questions demeurent en suspens ».

Le présent article touche à l'une des « questions en suspens » mentionnées par Coquidé et Le Maréchal (2006), à savoir, comment aider les élèves « à apprê-

¹ Pour un panorama d'ensemble des questions et conceptions mises en jeu en relation avec les modèles, et de nombreuses références bibliographiques, voir Frigg et Hartmann (2012).

² Pour une vue d'ensemble relativement récente assortie de nombreuses références bibliographiques, voir Coquidé et Le Maréchal (2006), qui introduit un numéro d'*Aster* consacré aux modèles et simulations dans l'enseignement scientifique.

³ Outre les références qui seront mentionnées au fur et à mesure en rapport avec tel ou tel point particulier, on peut signaler Martinand (1992, 1994) et Orange (1994, 1997, 2000) comme autres travaux de référence.

hender le statut de la modélisation », étant admis que modélisation (et simulation), « bien que leur statut épistémologique fasse débat, (...) peuvent, dans l'enseignement scientifique, fonctionner comme un pont entre théorie scientifique et monde réel ». Le présent article n'a cependant pas pour but direct de développer des propositions didactiques concrètes – bien qu'il suggère des pistes à un niveau assez général, et propose en conclusion une stratégie générale. Il vise – en harmonie avec mon domaine premier de compétences en tant que chercheur, à savoir l'épistémologie et non la didactique des sciences – une analyse *conceptuelle et épistémologique* de la nature et du statut du modèle ; une analyse qui est *destinée à être un outil* – espère-t-on éclairant et utile – pour les didacticiens et les enseignants en sciences et technologies.

Pour préciser encore, l'analyse en question ne vise pas une caractérisation unitaire exhaustive de la nature et du statut du modèle – tâche qui serait extrêmement difficile, pour ne pas dire impossible, étant donné « l'éclatement » du concept de modèle. Comme le souligne Drouin (1988), « espérer trouver une définition unique, est sans doute chimérique » et l'« on ne saurait établir une définition qui satisfasse à tous les cas particuliers de modèles ». Qu'une définition unique soit délicate et insatisfaisante, n'empêche pas de soutenir la « nécessité d'une réflexion théorique qui permette de clarifier ce dont on parle quand on parle de modèle ou de modélisation » – c'est exactement dans une telle perspective que se situe le présent article –, ni d'essayer de dégager diverses « résonances » et traits généralement associés aux modèles, ainsi que de discuter leur pertinence et leurs relations. Drouin (1988) s'y emploie, et s'acquitte remarquablement de cette tâche. La présente réflexion s'inspire fortement d'une partie de l'analyse conceptuelle proposée par cet auteur, mais l'objet de cette réflexion est différent, à la fois plus spécifique et plus large. Plus spécifique car la présente réflexion est *centrée* sur la question des *relations au « réel »* du modèle comparé à la théorie ; plus large, dans la mesure où la réflexion vise à *comparer le modèle et la modélisation aux objets techniques et aux pratiques technologiques*, afin de mettre en avant des parentés fondamentales – comparaison qui n'est pas le but de Drouin.

L'objectif n'est donc pas de peindre un tableau de la diversité des conceptions du modèle, ni même de chercher à situer précisément les analyses du modèle qui vont être proposées par rapport à la multitude des conceptions disparates existantes – ce qui serait long, fastidieux et peu intéressant –, même si des indications seront données en notes. L'objectif est d'analyser de manière systématique et approfondie une *certaine conception du modèle*, qui d'une part se trouve en harmonie avec un certain nombre d'usages, et apparaît pour cette raison acceptable même si pas universellement acceptée, et qui d'autre part me paraît spécialement intéressante à exploiter dans le cadre d'un EIST préoccupé de prendre en compte les difficultés qu'ont les élèves à appréhender le lien entre « monde réel » et modèles-théories. Pour mieux servir sa vocation d'offrir un outil, le présent travail présente les résultats de l'analyse sous forme d'un tableau synoptique (Tableau 1, section 7), rendant ainsi ces résultats mieux lisibles et plus facilement « manipulables ».

Afin de donner d'emblée une idée – forcément grossière, incomplète et critiquable présentée telle quelle – de la conception du modèle adoptée, on peut dire que celle-ci approche premièrement le modèle à partir de la caractéristique sui-

vante : le modèle n'a pas pour but de « dire toute la vérité » (ou même parfois de dire la vérité tout court) à propos de la « réalité », par opposition à la théorie scientifique dont c'est idéalement le but – du moins dans l'interprétation intuitive « réaliste » la plus répandue des théories⁴. C'est cette caractéristique qui constitue le pivot à la fois de la conception retenue du modèle, et de la différence entre modèle et théorie. Les raisons pour lesquelles la conception retenue est « spécialement intéressante » vis-à-vis des objectifs spécifiés plus haut, et ce en quoi elle l'est, apparaîtront au fur et à mesure des développements, et seront dégagées de manière systématique en conclusion (section 9), en même temps que sera suggérée une stratégie générale d'exploitation des modèles dans l'EIST.

Une dernière remarque préliminaire à propos des types de modèles. On peut distinguer des *types variés* de modèles (se rencontrant dans l'un et l'autre des domaines scientifique et technologique) : certains modèles sont matériels et comportent une certaine parenté iconique avec ce qu'ils modélisent (c'est typiquement le cas des maquettes, par exemple le modèle réduit d'un avion ou une maquette du système Terre-Lune) ; certains sont mathématiques et en ce sens « immatériels » (représentations géométriques, systèmes d'équations analytiques) ; certains sont quantitatifs, d'autres seulement qualitatifs⁵... Ces distinctions ne nous retiendront

⁴ De multiples nuances et précisions seront apportées plus bas à propos du statut de cette affirmation. Toute définition, ou toute approche définitionnelle, implique des options et une part de convention, et peut donc toujours être contestée, notamment au nom du fait que certains usages en vigueur ne sont pas conformes à la définition. Je fais ici le choix de m'appuyer, pour la définition du modèle, sur des caractères qui me semblent coïncider avec *une* compréhension intuitive *commune* du modèle. En tout cas, la caractéristique mise en avant constitue, d'après Drouin (1988), l'une des « résonances » associées au modèle : « Par rapport à loi et à théorie il semblerait que modèle marque une grande *volonté d'établir une distance entre discours scientifique et réalité* » ; les théories sont « conçues souvent comme la traduction sur le plan intellectuel des phénomènes de la nature, alors que la notion de modèle s'avouerait plus volontiers et plus ouvertement (...) comme une interprétation plausible de la réalité, *sans prétendre en être la traduction fidèle* », (c'est moi qui souligne). Il existe cependant d'autres conceptions, très différentes et mêmes quasiment 'inversées', du modèle et de la théorie. Ainsi par exemple, Nancy Cartwright (1983) développe une philosophie des sciences – peu conforme au sens commun – dans laquelle les théories et les lois scientifiques « mentent », tandis que les modèles sont candidats à dire le vrai (localement). Pour une proposition d'exploitation de ce cadre à des fins didactiques (voir Sensevy et Santini 2006). Ces précautions et nuances ayant été apportées, dans la suite de l'article je parle, dans un souci de simplification, de *la* définition du modèle pour désigner la conception retenue, comme s'il n'y en avait pas d'autres.

⁵ On trouve dans la littérature touchant aux modèles, notamment dans celle de la philosophie des sciences, une immense variété de dénominations supposées désigner des types différents de modèles : modèles « matériels », c'est-à-dire qui se donnent sous la forme d'objet physique tels que les maquettes ; modèles d'« échelle », souvent présentés comme des « copies » d'un objet physique à échelle réduite ou agrandie, cas particuliers de modèles « matériels » donc, parfois encore appelés « vrais » modèles (Achinstein 1968) – une terminologie qui me semble devoir être évitée en contexte scolaire, dans la mesure où il suggère l'idée d'un double parfait abstraction faite de la taille du modèle, ce qui n'est pratiquement jamais le cas, et ce qui risque de brouiller le contraste entre théorie et modèle (voir section 8) ; modèles « mathématiques », susceptibles de recevoir diverses définitions – structures mathématiques, équations... – mais ayant tous en commun de faire un usage central des mathématiques ; modèles dits « idéalisés », simplifiant délibérément la réalité à modéliser, en négligeant, ou en distordant, certains aspects de celui-ci ; modèles « analogiques » – par exemple un modèle moléculaire des gaz qui assimile un gaz à un ensemble de boules de billards –, qui peuvent être basés sur différents types d'analogies, formelles ou non (voir Hesse 1963) pour une typologie des analogies susceptibles de sous-tendre les modèles ; à propos des modèles et analogies formelles – mathématiques – dans les sciences expérimentales (voir Canguilhem 1968) ; modèles « phénoménologiques », classiquement définis comme s'en tenant à modéliser des aspects observables de la réalité à modéliser, sans invoquer d'entités ou de processus inobservables... Malheureusement, les catégories ne sont pas toujours homo-

pas ici, car elles importent peu vis-à-vis de l'objectif poursuivi, à savoir, dégager des caractéristiques saillantes importantes des modèles scientifiques au sens générique, en référence à la question des rapports entre modèles-théories et réalité, et dans l'horizon d'un enseignement des sciences et des technologies, notamment de l'EIST.

2. LE MODÈLE, INFIDÈLE À LA RÉALITÉ

La première de ces caractéristiques, que nous considérerons comme définitoire⁶ et noterons D1, est celle qui vient d'être évoquée comme caractéristique « pivot ». Son sens progressivement affiné au fil des développements, mais énoncée d'abord grossièrement, D1 se laisse énoncer comme suit : le modèle scientifique est *sciemment et délibérément infidèle* à ce qu'il modélise. Précisons ce point.

Un modèle peut être défini en première approche comme i) une construction intellectuelle ii) à propos de quelque chose :

i) Le modèle (disons M) est une construction *intellectuelle*, dans la mesure où même les modèles ayant une dimension matérielle évidente (telles que les maquettes) ne sont compréhensibles et utilisables que sur la base d'une certaine interprétation intellectuelle – ou si l'on préfère cognitive – des objets matériels mis en jeu⁷. Ce caractère intellectuel rapproche les modèles des théories scientifiques (bien qu'il y ait aussi des différences importantes entre les deux, qui seront examinées plus bas, à partir de la section 4), et peut inciter à situer le modèle du côté de la science et non pas du côté de la technologie (à tort, comme nous allons le voir).

ii) Un modèle M est une construction intellectuelle *de quelque chose* (de la lumière, des gaz, de l'œil, de la constitution de la matière, des corps célestes et de leurs mouvements, d'une pile, d'un instrument de mesure, etc.) : il est le modèle d'un certain « objet » – souvent nommé « système cible » dans la philosophie des sciences dédiée aux modèles – ou d'une certaine « réalité » (disons R). Soulignons d'emblée que la notion de réalité ici mobilisée soulève des difficultés redoutables et doit être interrogée. Nous y reviendrons plus bas, section 5. En attendant, nous nous appuyerons sur une compréhension intuitive du « R » invoqué. Qualifier une construction intellectuelle (et éventuellement *de plus* matérielle) de modèle M, c'est signifier que M est revendiqué infidèle à la réalité modélisée R *sous un certain nombre d'aspects susceptibles d'être précisés* ; c'est assumer que *du point de vue de ces aspects*, M est faux, M ne « correspond pas » à R.

gènes d'un auteur à un autre, les relations entre ces différents types ne sont pas évidentes, et les définitions ne sont pas toujours éclairantes : par exemple, pour le modèle dit « idéalisant » : y a-t-il des modèles qui n'idéalisent pas ?

⁶ Pas au sens de conditions nécessaires et suffisantes pour que quelque chose soit identifié à un modèle, mais plutôt au sens des caractéristiques d'un « air de famille » à la Wittgenstein.

⁷ Drouin (1988) semble soutenir un point similaire lorsqu'elle écrit : « certains modèles sont en fait des objets, ayant une existence autonome, mais pouvant être utilisés comme modèle (le vase de Tantale). On peut alors considérer qu'un modèle est avant tout quelque chose qui *fonctionne comme modèle* (ce qui voudrait dire qu'un modèle est peut-être moins un 'objet' qu'une fonction particulière attribuée à un objet) ». En rapport avec ce point, voir aussi les réflexions sur le modèle de l'œil proposées section 5.

À titre d'illustration empruntée aux pratiques de l'enseignement des sciences, considérons un modèle M du système Terre-Lune-Soleil au moyen d'une balle de tennis, d'une balle de ping-pong et d'une lampe électrique. La taille, le poids et la matière des deux balles sont évidemment différentes de ceux de la Terre et de la Lune ; la puissance de la lumière émise par la lampe est évidemment différente de celles du Soleil ; etc. Autant d'aspects spécifiés sous lesquels M est incontestablement infidèle à la réalité R qu'il modélise : *du point de vue de ces aspects*, M est tout simplement faux.

À titre d'illustration empruntée à l'histoire des sciences et aux pratiques des scientifiques professionnels, considérons les modèles cinétiques des gaz développés au XIX^e siècle par d'illustres savants comme Maxwell et Boltzmann. De nombreuses versions de ces modèles – dont certaines, notons-le, sont aujourd'hui encore utilisées par les praticiens des sciences et mobilisées dans l'enseignement scientifique – assimilent le gaz à une collection de très petits corps élastiques invisibles (genre minuscules boules de billard), et les traite comme des points matériels (ou encore comme des sphères parfaites) indépendants les uns des autres et animés entre deux chocs d'un mouvement de translation uniforme. Alors que « en réalité », nous savons qu'il n'en est pas ainsi. Les gaz « réels » sont constitués de particules qui ne sont pas *rigoureusement* ponctuelles ni *strictement* indépendantes ; les collisions ne sont pas *parfaitement* élastiques ; etc. Sous ces aspects *spécifiables*, le scénario physique⁸ que propose M ne « correspond pas » à R. Les scientifiques savent parfaitement que ce scénario est faux à de multiples égards qu'ils sont capables de préciser.

La première caractéristique du modèle, c'est donc d'être une construction intellectuelle humaine qui *n'est pas*, et *n'a pas pour but*, d'être fidèle à la réalité modélisée : les scientifiques ou les ingénieurs qui construisent et utilisent des modèles savent pertinemment que de nombreux traits des « scénarios scientifiques » constitutifs de ces modèles sont en toute rigueur faux, et ils peuvent préciser quels traits sont faux⁹.

⁸ Le terme de « scénario » sera utilisé de manière récurrente dans ce qui suit. Par « scénario » associé à un modèle, j'entends à la fois les « acteurs » et les « relations entre ces acteurs », tels que les dépeint le modèle pris littéralement. Par exemple, dans le cas du modèle Terre-Lune-Soleil tel que présenté plus haut, les « acteurs » sont une balle de tennis, une balle de ping-pong et une lampe électrique, et leurs « relations » sont – par exemple, les relations mises en avant par l'enseignant dépendant des objectifs poursuivis – les positions respectives occupées dans l'espace par ces trois objets. Pour le modèle cinétique des gaz, les acteurs sont, par exemple, des points matériels, et les relations sont données par les équations mathématiques du modèle. Le scénario désigne « ce que raconte » le modèle pris littéralement, dans une certaine utilisation. L'idée de scénario s'harmonise bien avec la conception des modèles comme fictions (voir section IV). Elle me semble facilement exploitable dans le cadre d'un enseignement des modèles. On pourrait la considérer comme apparentée à ce que Morgan (2001) appelle des « stories » – sauf que Morgan contraste ces « stories », ou éléments narratifs, avec des structures mathématiques.

⁹ Au-delà de l'affirmation de l'infidélité entre le modèle et la réalité, il existe en philosophie des sciences une abondante littérature consacrée à la nature exacte des relations qu'entretient, ou que devrait entretenir, un modèle avec ce qu'il modélise. Les réponses proposées ne sont pas toutes consensuelles et sont parfois dépendantes du type de modèle considéré (par exemple mathématisé ou non). Certains auteurs (au sein de la dite « conception sémantique ») considèrent qu'un modèle et sa cible doivent être dans une relation d'isomorphisme (van Fraassen 1980 ; Suppes 2002) ; d'autres assouplissent l'exigence à un isomorphisme partiel (Da Costa et French 2003) ; d'autres encore invoquent une notion non formelle, ne pouvant être spécifiée qu'au cas par cas, de « similarité » (Giere 2004).

3. FONCTIONS ET VALEUR DES MODÈLES EN SCIENCE ET EN TECHNOLOGIE

Si le modèle n'a pas pour but de donner une description fidèle de la réalité étudiée, de dire la vérité sur la réalité R modélisée, quel est donc son intérêt, à quoi sert-il ? La question de la valeur épistémologique du modèle est tout aussi indispensable à aborder avec des élèves que celle de l'infidélité du modèle. La réponse est en substance la suivante : la valeur des modèles réside dans le fait qu'ils fournissent des *outils efficaces* en vue de résoudre des problèmes *particuliers*. En ceci, les modèles s'apparentent aux objets technologiques, dont la valeur pourrait être définie à partir de la même formule : les objets technologiques, eux aussi, sont des outils efficaces pour résoudre des problèmes particuliers.

Dans la réponse qui vient d'être proposée à la question de la valeur des modèles, interviennent deux nouvelles caractéristiques importantes, que nous traiterons ici comme deux nouvelles propriétés définitoires des modèles, qui pourraient également être considérées comme des propriétés définitoires des objets technologiques, et qui s'ajoutent et se tressent à la propriété D1 : l'efficacité (disons D2) et la localité (disons D3). L'efficacité D2 renvoie à la fois à la facilité d'utilisation et à l'aptitude du modèle à apporter des solutions aux problèmes posés. La localité D3 pointe vers le fait qu'un modèle, loin de viser à l'universalité ou même à traiter un maximum de configurations possibles, est par nature destiné à s'appliquer aux caractéristiques *spécifiques* d'une classe *particulière* de problèmes, à s'adapter facilement à tel ou tel contexte *circonscrit*. Comme l'illustre Drouin (1988), le modèle est « conçu pour une utilisation ponctuelle et provisoire, avec une efficacité qui est fonction d'un problème posé (on pourra par exemple continuer à utiliser le modèle planétaire de l'atome pour rendre compte de ce qui se passe lors d'une réaction chimique) ».

D2 et D3 sont étroitement liées, car un modèle ne peut être dit efficace *tout court*, dans l'absolu : il n'est opérant que *relativement* à certains objectifs humains *particuliers* associés à des énoncés de problèmes *particuliers*. Ceci s'applique tout autant à un artéfact technique, et constitue donc un point commun important entre le modèle et les objets technologiques.

Par ailleurs, l'efficacité est étroitement liée à la propriété D1. C'est précisément parce que le modèle n'a *pas* pour but d'offrir une peinture fidèle, aussi précise et complète que possible, de la réalité R modélisée, que ses scénarios sont autorisés à s'affranchir d'une multitude de caractères connus de R. On contourne ainsi l'extrême complexité de R et la difficulté humaine à la maîtriser directement¹⁰. Ce que le scénario du modèle perd en fidélité, il le gagne en simplicité, et partant en manipulabilité. Le scénario du modèle peut, pour les besoins de la cause didactique, être comparé à une grossière esquisse, un schéma ou une caricature¹¹

¹⁰ Cette vertu du modèle a souvent conduit à désigner le modèle comme un « substitut » de la réalité – mais à mon avis, trop souvent sans suffisamment préciser quel type de réalité est ici en jeu –, et la modélisation comme un « raisonnement substitutif » (voir notamment Swoyer (1991) qui parle de « surrogative reasoning »). Drouin (1988) recourt également à cette idée : « le modèle est un produit conceptuel jouant comme un substitut de la réalité » ; « En tant qu'objet de substitution le modèle permet une maniabilité (...) : le modèle est un objet transformable, plus facile à "manier" que la réalité ».

¹¹ Pour les modèles comme « caricatures », voir Gibbard et Varian (1978). L'idée associée au modèle comme caricature est de ne retenir qu'un très petit nombre de caractéristiques de la réalité à modéliser, et d'« exagérer » à l'extrême leur importance dans les scénarios attachés au modèle.

(nous reviendrons sur cette manière de parler section 8). Parce qu'il est aisément manipulable et apte à rendre saillants des aspects importants vis-à-vis du but particulier poursuivi, des aspects qui resteraient autrement invisibles ou noyés dans une masse de détails, il permet d'avancer efficacement dans la maîtrise des situations modélisées et dans la résolution des problèmes posés à propos de ces situations¹².

Les divers types d'aide que le modèle est susceptible d'apporter, du point de vue de la maîtrise humaine de la nature, sont décrits, dans la littérature relative aux modèles, au moyen d'un lexique aussi riche que dangereusement polysémique : on souligne que les modèles permettent, selon les cas, de *prédire* des phénomènes observables (phénomènes naturels pour la modélisation de situations naturelles ou effets observables susceptibles d'être obtenus pour la modélisation d'un dispositif technologique), ou d'*expliquer*, ou de *comprendre*, ou encore d'*interpréter* la réalité naturelle ou artificielle modélisée¹³... Il ne peut être question ici d'analyser et de distinguer les sens possibles de ces termes¹⁴, que l'on peut entendre comme divers modes d'efficacité du modèle. Nous nous contenterons de souligner deux points.

1. Ces vertus du modèle (prédire, expliquer, comprendre, interpréter...), incontestables et susceptibles d'intervenir tant dans les pratiques des scientifiques et ingénieurs professionnels que dans l'enseignement des sciences et des technologies, attestent du fait – au premier abord peut-être surprenant compte tenu de l'adage intuitif du « ça marche, donc c'est vrai », et sans aucun doute important à faire méditer aux élèves dans un cours de science et technologie –, qu'un scénario scientifique ou technique n'a pas besoin d'être « réaliste » pour offrir une « prise » sur le monde. Pour illustrer ce point à partir de l'efficacité prédictive, qui est souvent la première vertu mise en avant à propos des modèles visant la nature : les scénarios scientifiques de certains modèles scientifiques, *quoique extrêmement schématiques et indéniablement faux à de nombreux égards*, permettent néanmoins des prédictions de phénomènes observables *qui s'avèrent vérifiées*¹⁵. Ceci

¹² Sur cette fonction du modèle, voir par exemple Redhead (1980) ou Hartmann (1999).

¹³ « Comprendre, expliquer, prévoir, calculer, manipuler, formuler des analogies, communiquer, rendre pensable ce qui est difficile à cerner », telles sont les fonctions possibles du modèle telles que présentées par Drouin (1988). Dans la présentation de Coquidé et Le Maréchal (2006) : « Instruments pour explorer la réalité, les modèles peuvent (...) avoir des rôles très différents : ils peuvent décrire, expliquer, prévoir ou aider à une prise de décision. Legay (1997) distingue ainsi les « modèles d'hypothèse », les « modèles de mécanisme » (actuellement les plus répandus), et les « modèles de décision et de prévision » (les moins développés mais les plus demandés par la société) ». Dans les termes de Martinand (1988), le modèle sert à « questionner le référent empirique, se représenter, expliquer, prévoir, inventer ». Martinand souligne de plus l'importance de la fonction de représentation du point de vue de l'enseignement des sciences et technologies dans le primaire et le secondaire : « Un des résultats de nos recherches a été de montrer que dans la modélisation, il y a une tâche décisive : la tâche de représentation. (...) 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 ». À admettre ce qui précède, il serait d'autant plus important de distinguer – comme c'est un des buts de cet article – le statut des modèles et celui des théories *du point de vue de la fonction de représentation* (voir section 8 pour les différentes manières d'envisager modèles et théories de ce point de vue).

¹⁴ Pour une analyse détaillée des divers sens de ces termes et de l'espace de leurs relations, voir Soler (2009, chapitre 3, section 7).

¹⁵ Et permettent également d'atteindre bien d'autres buts utiles. Voir par exemple Wimsatt (1987) pour l'analyse de diverses fonctions utiles que sont susceptibles de remplir les modèles *reconnus faux*

confère au modèle la valeur d'un *outil opérant* permettant d'anticiper les situations naturelles, et, de là, d'agir en connaissance de cause. C'est cette caractéristique évidente et facilement illustrable du modèle qui le rend spécialement intéressant comme vecteur d'une réflexion sur les rapports entre constructions scientifiques (modèles et théories) et « réalité ».

2) Les vertus du modèle doivent aussi être considérées dans la perspective génétique dynamique du processus d'investigation d'une question scientifique ou technologique. Raisonner d'abord sur un schéma extrêmement grossier fournit des repères à partir desquels des représentations de moins en moins grossières peuvent pas à pas être élaborées. La construction d'une telle série de modèles permet aux êtres limités que sont les scientifiques et les ingénieurs professionnels (et *a fortiori* les élèves !) de se frayer progressivement un chemin vers un objet complexe impossible à appréhender ou à concevoir directement. On parle parfois en philosophie des sciences de « modèles développementaux »¹⁶. Ceci confère au modèle la valeur d'un *outil heuristique*, c'est-à-dire d'une sorte de béquille qui aide à se mouvoir dans le processus de la recherche. De ce point de vue, qui est évidemment crucial pour l'enseignement des sciences et des technologies à tous les niveaux, les modèles scientifiques peuvent être vus comme des *étapes* ou des *intermédiaires vers* les théories scientifiques les plus élaborées disponibles¹⁷. Dans un cursus d'enseignement des sciences et des technologies du primaire à l'université, de telles étapes sont inévitables : on ne cesse d'enseigner aux élèves des choses qui, en toute rigueur, sont fausses, parce que les théories en vigueur sont tout simplement impossibles à appréhender directement compte tenu de leur complexité et des limites de la cognition humaine, cette dernière ne pouvant maîtriser un problème de haut degré de difficulté qu'après avoir abordé au préalable toute une série de problèmes apparentés de moindre difficulté. Une meilleure compréhension précoce de la nature des modèles pourrait certainement prémunir les élèves contre certains étonnements, voire traumatismes ultérieurs, qui surviennent parfois lorsque l'enseignant leur annonce : « jusqu'ici, on vous a appris que... » (par exemple : le monde physique est déterministe), mais « en fait, il en va tout autre-

en biologie.

¹⁶ Cette expression semble avoir été introduite par Leplin (1980), qui présente les modèles comme des sortes d'étapes préliminaires ou d'exercices progressifs en vue de la théorie. Voir section 8, position (2) pour plus de détails.

¹⁷ Cette description ne doit absolument pas s'entendre comme une affirmation que dans les pratiques scientifiques, les praticiens procèdent toujours par versions de moins en moins idéalisées de modèles. Bien souvent, ils changent complètement de modèle en cours de route (Hartmann 1998), ou utilisent simultanément des modèles contradictoires (Morison 2000). Du point de vue des trajectoires d'apprentissage dans l'enseignement scientifique, les deux cas de figure sont également susceptibles de se présenter. La question des séquences dynamiques selon lesquelles se succèdent, ou devraient se succéder, divers modèles de la « même réalité modélisée » au fil d'une trajectoire d'enseignement scientifique, ainsi que celle des types de relations qui peuvent caractériser les éléments de la série, est évidemment cruciale d'un point de vue pédagogique. Martinand (1998) répertorie diverses « figures de développement curriculaire » caractérisées soit plutôt par la continuité (« modèle progressivement enrichi et précisé »), soit par des ruptures (remaniements profonds des modèles antérieurement introduits, modèles très différents). Quatre grandes figures sont distinguées : « la répétition simple du schéma sans intégration », « la reprise amplifiante », « le développement problématique », et « le changement de "niveau" ».

ment... » (par exemple : la physique quantique nous dit que le monde est fondamentalement indéterministe)¹⁸. Nous y reviendrons en conclusion.

Illustrons brièvement les points précédents à partir des exemples déjà invoqués plus haut du modèle cinétique des gaz et du modèle Terre-Lune-Soleil. De nombreuses versions plus ou moins complexes du modèle cinétique des gaz ont été construites historiquement. Même les versions les plus simples suggèrent déjà une certaine explication microscopique qualitative et imagée assez intuitive de phénomènes macroscopiques observables ou mesurables tels que la pression et la compressibilité des gaz. Des versions plus complexes et mathématisées permettent quant à elles de faire des prédictions quantitatives qui s'avèrent corroborées dans certaines situations particulières. Ainsi, Maxwell attribue au centre de gravité de chaque molécule une position et une vitesse, et définit une certaine fonction mathématique (la fonction de distribution, spécifiant le nombre de molécules dont la vitesse est comprise dans chaque intervalle possible de valeurs) qui suffit à déterminer complètement l'état macroscopique du gaz à l'équilibre. Le modèle réduit ainsi la réalité R à des éléments simples dont les rapports sont consignés dans des lois définies. De cette caractérisation microscopique, sont dérivées des propriétés macroscopiques du gaz (pression ou viscosité par exemple) qui peuvent être directement mesurées. Lorsque les valeurs mesurées sont conformes aux prédictions du modèle, elles attestent de la valeur prédictive de celui-ci dans un domaine d'application circonscrit. D'une caractérisation incontestablement fautive à divers égards spécifiés, mais en contrepartie aisément manipulable, on tire des prédictions mesurables ou observables qui s'avèrent vérifiées.

Passons au cas du modèle Terre-Lune-Soleil souvent utilisé dès le primaire. La Terre n'a pas grand-chose à voir avec une balle de tennis, la Lune et le Soleil ressemblent fort peu à une balle de ping-pong et à une lampe électrique, mais ce modèle matériel, tout simpliste qu'il soit, permet néanmoins à l'élève de commencer à appréhender qualitativement certains aspects de l'explication scientifique en vigueur d'observations quotidiennes (alternance jour-nuit, formes changeantes de la Lune vue de la Terre, etc.). D'un point de vue pédagogique, l'introduction de modèles simples, voire simplistes, est une étape indispensable pour maîtriser progressivement des situations complexes et des problèmes difficiles. L'enseignant est alors en charge de trouver des moyens appropriés de faire comprendre à l'élève la nature du modèle et ce qui, dans le modèle utilisé, ne doit pas être transféré à la réalité R modélisée (taille des balles, etc.). Lorsque les vertus prédictives de certains modèles sont invoquées dans l'enseignement scientifique et technologique, il revient de même à l'enseignant de faire comprendre à l'élève, selon des modalités à déterminer, le caractère limité de l'efficacité prédictive du modèle, et, lorsque le niveau le permet, le domaine d'application du modèle.

Pour aller plus loin dans la compréhension de la nature des modèles, il est éclairant d'examiner ce à quoi ils s'opposent, et dans ce but de demander : y a-t-il, dans le domaine de la science et de la technologie, des constructions intellectuelles qui, *contrairement aux modèles*, sont tenues pour fidèles à la réalité R, ou tout au

¹⁸ De nombreux auteurs ayant problématisé l'exploitation des modèles en classe ont souligné ce point. Martinand (1998), par exemple, évoque « la critique destructrice l'année suivante de ce qu'on a introduit (atome de Bohr) », qu'il met en avant comme l'une des raisons qui « incitent à réfléchir sur la manière dont on pourrait enseigner et faire apprendre la modélisation ».

moins qui sont élaborées dans le *but* d'être fidèles à R ? À cette question, la réponse est : oui, les théories, ou plus exactement une certaine interprétation très répandue, dite « réaliste », des théories. Dans la prochaine section, nous allons examiner brièvement cette conception réaliste des théories, en vue de mieux comprendre ce que les modèles *ne sont pas* et, ainsi, de saisir plus finement par contraste ce qui les caractérise *spécifiquement*.

4. LE MODÈLE INFIDÈLE, PAR OPPOSITION À LA THÉORIE SCIENTIFIQUE FIDÈLE

Nous allons examiner la conception réaliste des théories en nous focalisant sur le cas particulier des théories à *propos du monde naturel*.

Ce cas est *particulier*, car en toute rigueur, la réponse qui vient d'être proposée à la question de savoir s'il y a des constructions intellectuelles qui sont tenues pour fidèles à la réalité R visée par ces constructions, s'applique tout autant aux théories scientifiques à propos d'un certain domaine naturel (par exemple les théories physiques, ou les théories optiques, ou les théories biologiques de l'œil, *etc.*), qu'aux théories élaborées par les ingénieurs à *propos d'un certain type de technologie*, par exemple à la théorie d'un certain type d'instrument de mesure – théories que l'on peut d'ailleurs aussi qualifier, et qui sont souvent qualifiées, de *scientifiques*, en un sens qui sera précisé plus bas (voir note 19). Pour illustrer ce second cas, raisonnons sur l'exemple d'une balance à plateaux. La théorie d'un tel instrument est basée sur un certain principe scientifique – ici mécanique, le principe du levier. La théorie la plus élaborée dont on peut espérer disposer d'un certain type de balance à plateaux est supposée décrire fidèlement la physique de ce type d'instrument, c'est-à-dire, en l'occurrence, préciser les détails du scénario « réel » – ici mécanique – par lequel certaines opérations (poser un objet sur l'un des plateaux, puis ajouter des masses marquées sur le second plateau jusqu'à rétablissement de l'équilibre) vont produire, via une certaine chaîne causale de transformations mécaniques, des observations (ici l'observation des chiffres figurant sur les masses étalon posées sur le second plateau et de la déviation résiduelle de l'aiguille de la balance), observations à leur tour convertibles en une valeur déterminée d'une grandeur pertinente (ici la valeur de la masse de l'objet posé sur le premier plateau) associée à une certaine incertitude dépendant notamment des propriétés spécifiques du type de balance (longueur du fléau, qualité des couteaux sur lequel repose le fléau, *etc.*).

Trois raisons motivent la décision de se restreindre ici au cas particulier des théories scientifiques à propos du monde naturel. i) C'est d'abord à ce cas que l'on pense quand on invoque les « théories scientifiques » ; ce cas étant plus prototypique en ce sens, l'analyse à son propos sera plus facilement compréhensible. ii) Les théories des objets technologiques sont tributaires de théories scientifiques à propos du monde naturel, qu'elles exploitent d'une certaine manière en fonction de certains buts (dans notre exemple : la théorie de la balance à plateau est tributaire de, et exploite, la théorie mécanique du levier)¹⁹ ; dans cette mesure, analyser le

¹⁹ Le fait que les théories des objets technologiques exploitent des théories scientifiques à propos du monde naturel constitue une première raison pour laquelle la théorie d'un objet technologique peut

cas de la théorie d'un objet technologique exige d'avoir déjà analysé le cas de la théorie scientifique, ce qui complique sérieusement l'exposition. iii) L'essentiel de ce qui va être développé ci-dessous sur le cas des théories scientifiques à propos de la nature est transposable au cas des théories à propos des technologies ; c'est en fait la raison majeure qui motive la décision de se restreindre à raisonner sur les premières, dans un souci de simplification qui ne sacrifie pas les principaux points de fond.

Examinons donc la conception réaliste des théories scientifiques. Les théories scientifiques et les lois constitutives de ces théories sont, intuitivement et souvent implicitement, presque toujours assimilées à des descriptions fidèles de la réalité R qu'elles prennent pour objet d'étude (par exemple le monde physique pour les théories physiques). Spontanément, nous sommes à peu près tous convaincus que les énoncés constitutifs des théories physico-chimiques et biologiques les plus élaborées dont nous disposons à l'heure actuelle sont vraies, au sens où elles nous informent sur ce qui « est vraiment » dans le monde indépendamment des êtres humains, où elles « correspondent » à la réalité. Nous sommes convaincus que les entités et processus centralement mobilisés par ces théories – molécules, atomes, électrons, quarks, forces fondamentales, sélection naturelle... – existent effectivement, et préexistent à leur découverte par les scientifiques à telle ou telle période de l'histoire des sciences. Ce *credo* définit le cœur de l'interprétation réaliste des théories scientifiques.

Il faut certes nuancer un peu, car personne ne prétend évidemment que les théories scientifiques les plus élaborées aujourd'hui en vigueur sont « absolument vraies », c'est-à-dire absolument exactes et complètes, sorte de reflet, de double ou de *re*-présentation de la réalité. Même les réalistes les plus radicaux sont faillibilistes : prenant acte des enseignements de l'histoire des sciences (par exemple des remises en cause de nos conceptions du monde introduites par le passage de la physique dite classique à la physique quantique au début du XX^e siècle), ils reconnaissent que certaines de nos croyances scientifiques actuelles seront ultérieurement modifiées voire récusées, avec l'avancée de la recherche, avec de nouvelles expérimentations, etc. En outre, personne ne prétend que les théories scientifiques actuelles soient complètes, que nous possédons la dite « théorie du tout ». L'interprétation réaliste des théories consiste donc en fait à soutenir que les théories scientifiques sont « approximativement vraies » et progressent toujours plus de ce point de vue : qu'elles comportent une « bonne part » de vérité, et qu'au cours du temps, cette part augmente toujours davantage.

être qualifiée de « scientifique » tout autant que la théorie d'un secteur du monde naturel. Il faut cependant noter que cette qualification peut créer une ambiguïté, dans la mesure où « scientifique », appliqué à une théorie, est susceptible de désigner deux choses : soit le *champ disciplinaire au sein duquel la théorie emprunte ses matériaux* – et en ce premier sens, la théorie d'un objet technologique est bien « scientifique », puisqu'elle exploite des principes empruntés au domaine de la science au sens restreint (la mécanique, ou la chimie, etc.) ; soit le *domaine-objet auquel s'applique la théorie* – et en ce second sens, la théorie d'un artefact technique n'est *pas* scientifique, mais technologique). Une seconde raison pour laquelle la théorie d'un objet technologique peut être qualifiée, et est souvent qualifiée, de « scientifique », est celle invoquée dans la section 1 de cet article, à savoir les deux sens, étroit et large-générique, de l'adjectif « scientifique » : si « scientifique » est employé en un sens large incluant la technologie, alors, par définition, les théories des objets technologiques sont « scientifiques » au sens de « relevant du domaine de la science (au sens large) ».

L'interprétation réaliste des théories scientifiques soulève à l'examen de nombreuses difficultés et divise les philosophes des sciences professionnels en deux camps, celui des réalistes et celui des antiréalistes, chaque camp ayant développé de nombreuses variétés et un réseau complexe d'arguments qu'il est évidemment hors de question de cartographier ici²⁰. Vis-à-vis du but du présent article, il suffit de souligner que le *credo* réaliste correspond au « sens commun », c'est-à-dire à la position spontanément adoptée par la majorité des personnes qui ne sont pas des philosophes des sciences professionnels et n'ont pas eu l'occasion de s'engager dans une réflexion épistémologique systématique sur la nature des sciences et des constructions intellectuelles-matérielles produites par l'activité scientifique. L'épistémologie et la philosophie des sciences étant, à l'heure actuelle, quasiment absentes de la plupart des cursus scolaires et des cursus scientifiques et technologiques du supérieur, le *credo* réaliste est partagé non seulement par la plupart des enseignants, des concepteurs de programmes scolaires, et bien sûr des élèves, mais aussi par une bonne partie des praticiens des sciences. De nombreux scientifiques sont persuadés que les théories scientifiques actuelles peuvent prétendre à la vérité, et l'espoir de « lever un coin du voile » (selon une expression utilisée par Einstein dans sa correspondance) est bien souvent ce qui les motive foncièrement. Dit autrement, pour ces scientifiques, les théories scientifiques ont pour but de dé-voiler ou dé-couvrir ce qui est vraiment (mais qui est au premier abord « voilé » ou « re-couvert » pour les hommes), et elles réussissent largement à atteindre ce but. Corrélativement, une majorité d'enseignants, et une majorité de supports à usage scolaire, présentent les théories scientifiques et leurs lois d'une manière qui suggère fortement, voire affirme explicitement, leur vérité au sens de leur « correspondance » au réel.

L'interprétation réaliste des théories scientifiques est donc extrêmement répandue, notamment chez les acteurs de l'enseignement scientifique qui nous intéressent ici premièrement. C'est pourquoi nous pouvons ici faire abstraction des vifs débats qu'elle suscite au sein de la philosophie des sciences, et la traiter comme une conception largement partagée permettant de mieux comprendre par contraste ce qu'est un modèle au sens ici retenu. Dans cet esprit et par souci de simplification, nous ferons dans ce qui suit comme si l'interprétation réaliste des théories scientifiques était la seule possible (jusqu'à la section 8 où nous envisagerons d'autres possibilités), et sauf spécification contraire, nous utiliserons l'expression de « théorie scientifique » (tout court) à la place de « interprétation réaliste des théories scientifiques ».

Tout ceci étant posé, nous pouvons maintenant préciser la nature spécifique du modèle (M) par opposition avec la théorie scientifique (T), en offrant grâce à

²⁰ Pour une vue d'ensemble de la question, voir (Soler 2009, chapitre 5). Pour quelques grands classiques, voir par exemple : Duhem (1906) pour une défense classique de l'anti-réalisme ; Putnam (1975, 73) où l'auteur introduit le dit « argument du miracle » (argument central des réalistes, selon lequel le fait que les théories scientifiques font des prédictions vérifiées serait « un miracle », si ce n'était pas parce que ces théories contiennent une part de vérité ; en d'autres termes, la vérité approximative des théories est mise en avant comme la « meilleure explication » du succès prédictif de ces théories) ; Fine (1984) pour une présentation d'un ensemble d'arguments classiques des réalistes, et une discussion critique ; Laudan (1984, 121) où l'auteur présente sa fameuse « liste de Laudan », à savoir un répertoire des entités supposées exister d'après des théories physiques passées mais dont l'existence a été remise en cause par les théories scientifiques ultérieures.

ce contraste une analyse plus fine des propriétés de M. M et T sont deux constructions humaines intellectuelles :

1. Qui ont des *but*s distincts : M n'a pas pour but/T a pour but de fournir une description fidèle de R.

2. Qui ont des *prétentions* distinctes quant à leur fidélité à R : M ne prétend pas/T prétend être vrai(e) au sens de la « vérité-correspondance ». Le scénario scientifique associé à T est affirmé (approximativement) vrai au sens où « ce que dit » la théorie correspond (approximativement) à « ce qui est ». Le scénario scientifique associé à M est affirmé faux à *de multiples égards* – il n'est d'ailleurs par rare qu'il soit dit faux *tout court*. Il a un statut apparenté à celui d'une fiction²¹.

3. Qui sont toutes deux reconnues présenter un certain décalage avec R (y compris T, dans la mesure où même les réalistes les plus radicaux concèdent que nos meilleures théories ne sont *qu'approximativement* vraies), mais ce décalage est pensé très différemment dans les deux cas, et ceci sous au moins trois angles :

3a. Entre un modèle M et une théorie T d'une même réalité R, le décalage est, comparativement, toujours nettement plus important entre M et R qu'entre T et R.

3b. Le décalage entre M et R est délibéré, voulu par les praticiens des sciences, revendiqué pour les avantages qu'il procure (simplicité et manipulabilité, d'où efficacité). Le décalage entre T et R est regretté, pensé comme un manque (vis-à-vis de l'idéal d'une connaissance absolument complète) et comme la conséquence de limites humaines hélas inéliminables. Il est rapporté au fait que les sujets de la connaissance, en l'occurrence les scientifiques, ont des capacités bornées. Les scientifiques ne peuvent accéder tout d'un coup à toute la vérité. Ils doivent acquérir la connaissance fragment par fragment, petit à petit au fil du temps, en s'appuyant sur des indices partiels (les données observables, les résultats expérimentaux disponibles...). Leurs facultés cognitives (imagination, mémoire, etc.) sont limitées. Ils sont faillibles et s'aperçoivent souvent après-coup qu'ils se sont trompés dans leurs théories antérieures. Etc.

3c. Le décalage entre M et R est largement spécifiable (voir les deux illustrations données section 2). Le décalage entre R et la théorie T la plus élaborée en vigueur à une époque donnée ne peut être précisé. On reconnaît *que* un décalage existe forcément, puisque l'on concède que T n'est *qu'approximativement* fidèle à R, mais on ne peut dire *ce que* ce décalage est, puisqu'on ne peut savoir à l'avance quels aspects de la théorie scientifique en vigueur seront ultérieurement remis en cause.

Le point (2) appelle quelques réflexions supplémentaires. On pourrait être tenté d'objecter, à la caractérisation du modèle faux opposé à la théorie vraie, que le modèle contient lui aussi une « part de vérité », même si cette part est inférieure

²¹ L'interprétation des modèles en termes de « fictions » est répandue au sein de la philosophie de la modélisation, mais également débattue. Tout dépend aussi évidemment de la manière dont on définit la fiction. Les considérations développées dans cette section sont suffisantes par rapport au but poursuivi. Pour des philosophes des sciences ayant développé des conceptions récentes favorables à une compréhension des modèles en termes de fictions, voir par exemple Barberousse & Ludwig (2009), Frigg (2010), Godfrey-Smith (2009) et Toon (2010). Pour des auteurs rejetant l'assimilation des modèles à des fictions, voir par exemple Giere (2009), Teller (2009) et Magnani (2012).

à celle de la théorie. Les gaz ne sont-ils pas en effet constitués de molécules, même si le modèle des gaz est infidèle à divers égards à tous les détails de la réalité des molécules ? Les phases de la Lune ne sont-elles pas en effet le résultat de l'éclairage par une source de lumière (le Soleil) d'un corps globalement sphérique (la Lune) et de l'ombre portée d'un corps opaque lui-même globalement sphérique (la Terre) interposé entre les deux premiers selon diverses configurations, comme le met en évidence le modèle matériel des deux balles et de la lampe ?

L'objection est en elle-même recevable, et il n'est pas impossible de s'exprimer ainsi. Nous reviendrons sur cette possible manière de s'exprimer section 8. Mais s'il n'est pas impossible de s'exprimer ainsi, il est important de comprendre que *ce-faisant, on occulte une différence essentielle entre modèle et théorie*. En mettant l'accent sur la « part de vérité » du modèle, on brouille le contraste entre modèle et théorie, puisque tous deux sont alors caractérisés à partir d'une même référence à la vérité, situés sur une sorte d'« échelle de vérité » et différenciés l'un de l'autre par leur « plus ou moins grande part » de vérité – la théorie étant de ce point de vue supérieure au modèle. En mettant l'accent sur la part de vérité du modèle, *on occulte le but premier assigné au modèle dans les pratiques scientifiques ou technologiques effectives*, qui définit avant tout sa nature et qui le différencie fondamentalement de la théorie, à savoir un but avant tout *pratique* et non pas avant tout *re-présentationnel* (au sens d'un double) : le but premier du modèle est de fournir un outil efficace, pas un re-présentation (au sens d'un double) de l'objet modélisé (même si le modèle « dit quelque chose » sur ce qu'est l'objet modélisé).

Mieux vaut donc nous semble-t-il, *vis-à-vis de l'objectif de faire saisir aux élèves la spécificité du modèle*, insister – au moins dans un premier temps pédagogique – sur tout ce qui est évidemment faux au sein du modèle, ceci, dans la mesure où le *but* du modèle n'est pas la fidélité à R *mais l'efficacité*, où c'est précisément *parce que* le modèle se permet d'être infidèle qu'il peut simplifier drastiquement, et où c'est du fait de cette simplification qu'il peut remplir sa fonction d'outil aisément manipulable et efficace. Comparer le scénario du modèle à une fiction apparaît de ce point de vue parfaitement approprié. En effet, au sein d'un scénario de fiction, on peut toujours extraire des aspects qui 'correspondent à la « réalité » et sont vrais en ce sens (par exemple le fait qu'interviennent des êtres humains, ou des êtres intelligents, ou des êtres qui se meuvent dans l'espace et le temps, etc.). Pour autant, le but de la fiction n'est pas de fournir une peinture réaliste de notre monde, et personne n'est porté à dire qu'une fiction est « vraie » au sens où elle « correspond » à ce qui se passe dans le monde réel – même si le détour par la fiction peut parfois nous permettre de mieux comprendre le monde réel.

Pour conclure cette section : nous définissons une construction intellectuelle comme « modèle » à partir des caractéristiques listées ci-dessus, et c'est par ces caractéristiques que le modèle se distingue d'une théorie scientifique interprétée dans une perspective réaliste.

5. MODÈLE, RÉALITÉ OBSERVABLE, RÉALITÉ MÉTAPHYSIQUE ET RÉALITÉ SCIENTIFIQUE

Il convient à présent de clarifier les rapports du modèle à la réalité et, pour

ce faire, de revenir sur la notion de réalité, qui a joué un rôle important dans les réflexions précédentes sous couvert du symbole « R », sans être véritablement interrogée.

La notion de réalité est extrêmement délicate et soulève des difficultés épistémologiques ardues impossibles à prendre en compte ici (Soler 2009, chapitre 2, sections 1.2 et 3.2, et chapitre 3). Du point de vue du but de cet article, il est indispensable de distinguer au moins deux manières d'entendre le terme « réalité » (une troisième, en quelque sorte intermédiaire, sera introduite plus bas) :

1. Le terme peut renvoyer à ce qui est humainement observable, directement perceptible : par exemple les phénomènes lumineux, les formes changeantes de la Lune vue de la Terre, etc. ; ou bien les objets macroscopiques, naturels ou artificiels, de l'expérience quotidienne (corps physiques, œil, lentille, pile, instruments de mesure, etc.) ; ou encore les observations issues de l'expérimentation (taches sur des écrans, coïncidence d'une aiguille avec une graduation, etc.). Nous parlerons de la « réalité observable »²².

2. Le terme peut aussi renvoyer à la réalité telle qu'elle est indépendamment des êtres humains : au référent « X » indéfiniment visé par la recherche scientifique, qui est postulé exister et être ce qu'il est « en soi », au-delà de (ou « derrière ») ce qui apparaît aux êtres humains étant données leurs facultés perceptives particulières (telles que les cinq sens), et quoi que puissent croire les scientifiques à son propos. Ce « X » – dont le statut est hautement problématique d'un point de vue épistémologique, et que l'on désigne parfois, de manière plus ou moins métaphorique, à un « point de vue de Dieu » ou « point de vue de nulle part » – intervient concrètement, dans la pratique quotidienne des chercheurs, comme moteur et visée jamais atteinte – bref comme idéal régulateur. Nous parlerons de « réalité métaphysique » ou « indépendante », ou dans un vocabulaire inspiré de Kant, de « chose en soi ».

Reconsidérons les différences entre modèles et théories en prenant en compte ces deux sens de la réalité. Commençons par la question de la « correspondance » de M/T à la réalité, en examinant d'abord le cas de T avant d'en venir à celui de M. Quand le réaliste affirme que nos meilleures théories scientifiques sont (approximativement) fidèles à la réalité, l'affirmation renvoie à la réalité *métaphysique* : les scénarios qui sous-tendent les théories sont supposés « atteindre quelque chose » de la réalité telle qu'elle est indépendamment des êtres humains. Le réaliste soutient que « ce que disent » les théories scientifiques actuelles les plus élaborées à propos de la réalité métaphysique – appelons ceci la réalité *scientifique* – est globalement crédible. La réalité scientifique s'identifie à la description

²² La notion d'observation et de réalité observable peut paraître simple mais ne l'est à l'examen pas du tout. La frontière entre observable et non observable est problématique, et la philosophie des sciences du XX^e siècle a clairement montré que toute observation est « chargée de théorie ». Sur ces questions, voir Soler (2009, chapitre 3, sections 4 et 5, et chapitre 4). En outre et corrélativement, il est bien connu, dans le contexte de l'enseignement des sciences et des technologies, que l'observation n'est pas « neutre », et que ce que les élèves observent (remarquent), ainsi que la manière dont les élèves décrivent l'observation, dépend de leurs conceptions préalables plus ou moins explicites (les fameuses « représentations » initiales qu'il s'agit d'identifier et de détruire, parce qu'elles font « obstacle » à l'appropriation des savoirs savants acceptés). La notion de réalité observable n'est donc qu'un repère qui exige d'être travaillé de manière créative, et adaptée aux élèves, dans les situations d'enseignants. Pour des pistes, voir la note 28.

du monde que proposent les sciences d'une époque. Elle met en jeu de nombreuses entités non directement observables, comme par exemple des électrons, des quarks, des forces, etc. Le réaliste soutient que la réalité scientifique correspond (approximativement) à la réalité métaphysique. Certes, la réalité scientifique ne peut pas être dite *coïncider* avec la réalité métaphysique, car, encore une fois, même le réaliste le plus radical concède que la théorie en vigueur, et donc la réalité scientifique qui va avec, non seulement est incomplète, mais de plus subira inévitablement dans le futur des modifications dont personne ne saurait anticiper ni ce sur quoi elles porteront, ni leur ampleur. La réalité métaphysique reste donc ce X toujours visé et jamais atteint. Concrètement, nous n'avons accès qu'à la réalité scientifique, assumée (approximativement) fidèle à ce X par le réaliste. C'est la raison pour laquelle – comme déjà souligné section 4, point (3c) –, le décalage entre T et R ne peut *pas* être spécifié. Et nous pouvons à présent préciser la formulation du point (3c) donnée plus haut : le point (3c) signifie qu'il est impossible de spécifier le décalage entre la réalité *scientifique* et la réalité *métaphysique*. Comme l'écrit Einstein dans une lettre à Schrödinger du 19 juin 1935 : « la physique décrit la "réalité" [i.e., dans notre lexique : la réalité *métaphysique*]. Or, nous ne savons pas ce qu'est la "réalité" [métaphysique], nous ne la connaissons qu'à travers la description qu'en donne la physique ! [i.e., dans notre lexique : la réalité *scientifique*] » (Balibar *et al.* 1989, 234).

Passons au cas du modèle. Quand on souligne (où le « on » peut notamment désigner les professeurs de science) que contrairement à la théorie, le modèle n'a pas pour but d'être fidèle à la réalité R, et que le scénario scientifique constitutif du modèle présente, vis-à-vis de R, un décalage spécifiable important qui l'apparente à une fiction commode et utile, quelle notion de réalité est ici mobilisée ?

Commençons par raisonner sur le cas du modèle moléculaire des gaz. Bien qu'il y ait des manifestations perceptibles des gaz, un gaz n'est pas le prototype d'une réalité « directement observable » (comme l'est typiquement un objet matériel macroscopique, que l'on peut voir, toucher, etc.). C'est d'ailleurs une raison pour laquelle l'introduction des gaz avec des élèves présente des difficultés spécifiques. Les modèles moléculaires des gaz modélisent donc une réalité largement inobservable. Les scénarios des modèles en question mettent en jeu des entités qui sont elles-mêmes inobservables au moyen des cinq sens (par exemple de minuscules sphères invisibles). Mais alors, quand on dit que le scénario du modèle cinétique des gaz en termes de minuscules sphères parfaitement élastiques ne « correspond pas à la réalité » car « nous savons bien » que, « en fait », les molécules de gaz ne sont pas des sphères parfaitement élastiques, *comment le savons-nous donc*, si ce n'est pas par l'observation ? Nous le « savons », au sens où c'est ce qu'assument les théories scientifiques aujourd'hui en vigueur. Autrement dit, la référence qui, *en pratique*, est utilisée pour préciser le décalage entre le scénario du modèle et la « réalité », *c'est le scénario de la théorie scientifique la plus élaborée dont nous disposons* : ce que nous avons appelé plus haut la réalité *scientifique*. La réalité invoquée dans les énoncés du type « le modèle présente un décalage *spécifiable* par rapport à la réalité », s'identifie donc en pratique à la réalité *scientifique* : ce qui est spécifiable, ce sont les aspects selon lesquels le scénario modèle s'éloigne du scénario de la théorie en vigueur du même objet. Prendre le scénario de la théorie comme référence de réalité, c'est interpréter la théorie de manière réaliste,

ce à quoi tout un chacun est spontanément porté, comme souligné plus haut. Et bien sûr, au-delà de la réalité scientifique, c'est la réalité *métaphysique* qui est visée : la réalité scientifique est prise comme référence, en tant qu'elle est supposée (approximativement) fidèle à la réalité métaphysique. Certes, répétons-le, personne ne nie que la réalité scientifique d'aujourd'hui sera modifiée au cours de l'histoire des sciences ultérieure, mais concrètement, nous ne disposons que de la réalité scientifique d'aujourd'hui (*cf.* la citation d'Einstein ci-dessus). Concrètement, nous traitons alors la description du monde (ici des gaz) proposée par les théories actuellement en vigueur (i.e., la réalité scientifique) *comme si elle coïncidait* avec la réalité métaphysique. C'est en référence à la théorie en vigueur supposée approximativement vraie, autrement dit en référence à la réalité scientifique associée à cette théorie (i.e. aux scénarios de cette théorie interprétés comme globalement fidèles à la réalité métaphysique), que tous les *autres* scénarios théoriques *différents et moins détaillés* susceptibles d'être utilisés par les praticiens des sciences sont *assimilés à des modèles* au sens de représentations très simplifiées, schématiques, excessivement idéalisées, infidèles et littéralement fausses à de multiples égards.

Nous venons de raisonner sur le modèle moléculaire des gaz pris pour illustration de la modélisation d'un objet largement inobservable. Les choses se présentent-elles différemment lorsque le modèle vise à modéliser une réalité *directement observable* ? Si cette configuration semble rarement se présenter dans les sciences contemporaines, très abstraites, où les objets que l'on cherche à expliquer, et donc éventuellement à modéliser, sont pour la plupart inobservables, elle se rencontre en revanche plus fréquemment dans l'enseignement des sciences. Adressons à ces situations les mêmes questions que celles que nous venons de considérer dans le cas du gaz, pour examiner si les réponses diffèrent.

Nous raisonnerons sur l'exemple du modèle de l'œil au moyen d'une lentille convergente et d'un écran²³. On pourrait concevoir que dans la mesure où l'on peut mettre en vis-à-vis, d'une part un œil réel prélevé sur un animal (assimilé ici à une réalité observable), et d'autre part le modèle physique de l'œil constitué d'une lentille et d'un écran, le décalage spécifiable entre le modèle et la « réalité » renvoie dans ce cas à la réalité *observable* et non plus, comme dans le cas du modèle moléculaire des gaz, à la réalité métaphysique appréhendée par l'intermédiaire de la réalité scientifique. Cette intuition n'est pas complètement erronée, au sens où un élève pourra être sensibilisé aux différences perceptives qui existent entre les deux objets mis en vis-à-vis, à savoir le dispositif lentille-écran et l'œil réel. D'un point de vue pédagogique, une telle stratégie peut être envisagée comme une étape en vue d'aider les élèves à comprendre le caractère infidèle du modèle.

²³ C'est un cas particulier intéressant du point de vue de l'EIST, dans la mesure où l'objet à modéliser est un objet naturel (l'œil), mais où le modèle de cet objet naturel mobilise des objets technologiques (lentille, écran). De plus, étant donné le niveau du cursus scolaire où intervient ce modèle technologique et les objectifs didactiques poursuivis, la compréhension du modèle technologique « lentille-écran » supposé aider à saisir le fonctionnement de l'objet naturel qu'est l'œil, se fait *via un modèle intellectuel* de l'objet technologique (lumière représentée géométriquement par une droite mathématique, lentilles supposée parfaite, etc.), plutôt que *via la théorie scientifique la plus élaborée* dont nous disposons à l'heure actuelle pour décrire ce qui se passe lorsque de la lumière passe par une lentille et est recueillie sur un écran.

Cependant, une réflexion plus poussée met en évidence que ce cas ne diffère en fait pas fondamentalement de celui des gaz. En effet, ce par rapport à quoi le modèle lentille-écran, c'est-à-dire en fait la schématisation physico-mathématique à partir de laquelle est décryptée le dispositif physique verre-carton, est en décalage, ce n'est à l'examen *pas l'œil en tant qu'objet physique directement perceptible par l'élève* (y compris à supposer que ce dernier se lance dans des dissections). Le modèle lentille-écran est en décalage par rapport à « ce que disent » de l'œil *les théories biologiques aujourd'hui en vigueur*, dont les scénarios font intervenir une multitude de constituants (cristallin, rétine, cornée, humeur aqueuse, humeur vitrée, pupille, etc.) et surtout indiquent leurs interrelations et fonctions respectives. C'est en référence à l'œil *tel que décrit par ces théories*, et non pas en référence à l'œil *en tant qu'objet directement observable*, que le dispositif lentille-écran est un modèle infidèle dont les aspects en toute rigueur faux peuvent être répertoriés.

Nous venons d'examiner la question de la « correspondance » de M/T à la réalité, et de conclure que lorsqu'on dit que T correspond à R et M ne correspond pas à R, le R mobilisé s'identifie ultimement à la réalité métaphysique, et médiatement à la réalité scientifique supposée nous fournir une certaine connaissance de la première. Reste à préciser la relation de M/T à la réalité *observable*. Commençons cette fois par le cas du modèle.

Bien que le modèle soit, par définition, reconnu infidèle à la réalité scientifique qu'il modélise (et donc *a fortiori* à la réalité métaphysique), les modèles scientifiques sont toujours ancrés d'une manière ou d'une autre dans la réalité observable (qu'il s'agisse d'observations « données » de ce qui arrive naturellement dans le monde, ou bien d'observations « provoquées » résultant de mesures et d'expérimentations recourant à des dispositifs techniques artificiels). Des illustrations ont été données ci-dessus : le modèle permet de prédire, d'expliquer, de comprendre ou d'interpréter des phénomènes observables – par exemple ce que l'on voit du ciel à partir de la Terre (telle l'évolution de la forme de la Lune soir après soir, d'un fin croissant à un disque plein) ; ou encore la diminution de volume d'un piston contenant un gaz, manifestation de la propriété de compressibilité du gaz.

Précisons un peu. Une fois proposé et avant confrontation à la réalité observable, les propriétés intrinsèques du modèle sont explorées « de l'intérieur » : on examine comment s'agencent et interagissent les éléments du modèle (par exemple les molécules assimilés à des points matériels), on dégage des scénarios virtuels de comportement pour les objets virtuels qui ont été construits (par exemple différents types de comportements pour le gaz schématisé par un ensemble de points matériels)... On parle souvent de « manipulation » des modèles²⁴. Mais en-

²⁴ Voir par exemple Morgan (1999). « Les éléments à manipuler sont liés entre eux soit par des structures abstraites (modèle planétaire de l'atome) et/ou mathématisées (modèle quantitatif des flux de matière et d'énergie dans un écosystème), soit par des schémas figuratifs ou des objets concrets construits en fonction de leur ressemblance analogique avec l'objet à étudier » (Drouin 1988). La « manipulation » d'un modèle peut soit engager des manipulations sur des objets physiques impliquant le corps propre, comme c'est le cas pour l'exemple du modèle Terre-Lune-Soleil, soit engager des manipulations plus « purement intellectuelles ». Les premières sont souvent apparentées à des « expériences » (au sens de l'expérimentation), les secondes à des « expériences de pensée » (voir par exemple Gendler 2000 et Reis 2003). Canguilhem (1968) offre aussi d'intéressants éclairages, dans le domaine de la bio-

suite, ces potentialités symboliques doivent pouvoir être confrontées d'une manière ou d'une autre à des situations empiriques concrètes mettant en jeu des propriétés directement observables²⁵. Sans quoi, le modèle ne pourrait prétendre être un modèle *empirique* (ici physique)²⁶. Bien souvent, et notamment dans le cas de modèles mathématisés, cette confrontation se fait sous forme de prédictions. Par exemple, la confrontation à la réalité observable exige de trouver dans la nature — ou de produire artificiellement en laboratoire — des conditions réelles d'expérience (certains types *particuliers* de gaz considérés dans un domaine *circonscrit* de pression et de température) pour lesquelles les paramètres physiques négligés/idéalisés par le modèle (par exemple les interactions entre molécules) n'influent que *faiblement* sur le cours effectif des événements. Quand, dans un domaine d'application circonscrit déterminé, les résultats observables s'avèrent suffisamment conformes aux prédictions du modèle, ce dernier est jugé adéquat, utile, fécond²⁷. Sans cet ancrage dans la réalité observable, sans cette connexion à des observations, les modèles ne seraient pas des modèles *scientifiques* : ils seraient des fantaisies humaines n'ayant pas de valeur empirique²⁸.

logie, sur les différences entre expérimentation et « expériences de pensée » (ce n'est pas son expression) impliquées dans ce qu'il appelle « la méthode des modèles ».

²⁵ Divers auteurs se sont employés à caractériser des « phases » relatives à l'élaboration et l'usage des modèles (genèse du modèle, manipulation du modèle, confrontation du modèle à la réalité...). Par exemple, Hughes (1997) introduit trois phases : la « dénotation » (par laquelle est instaurée une relation entre un modèle et une réalité à modéliser) ; la « démonstration » (qui correspond à ce qui a été appelé plus haut l'exploration de l'intérieur du modèle — pour Hughes, la « démonstration » de certaines propriétés internes du modèle) ; et l'« interprétation » (qui correspond au moment où l'on établit des connexions entre le modèle d'une part, et des observations connectables à la réalité à modéliser d'autre part).

²⁶ Il existe cependant, dans les sciences expérimentales, une classe de modèles qui ne sont pas destinées à être directement connectés à la réalité observable. Ces modèles sont parfois appelés « modèles d'études » ou « modèles jouets » (« toy models »). Leur fonction est d'explorer (de manipuler « de l'intérieur ») certains outils intellectuels qui, une fois maîtrisés, seront *ensuite* utilisés comme ingrédients de modèles quant à eux destinés à être connectés à la réalité observable.

²⁷ « La prévision mettra en rapport le modèle et le réel [dans notre terminologie : la réalité observable] et cette mise en rapport pourra servir à tester le modèle » (Drouin 1988). La mise en rapport du modèle avec la réalité observable peut prendre bien d'autres formes que la prédiction. Dans l'enseignement primaire et secondaire en particulier, elle relève souvent plutôt d'une mise en relation analogique entre les éléments du modèle et la réalité observable (relation qui est souvent décrite comme une « explication » de la réalité observable par le modèle).

²⁸ La notion de réalité observable relève ici de ce que Martinand (1998) appelle le registre du « référent empirique, c'est-à-dire celui des objets, des phénomènes, et de leur connaissance phénoménographique » (qu'il différencie du « registre des modèles construits sur ces référents ». Dans une visée pédagogique, il paraît indispensable d'analyser plus finement l'idée de réalité observable et de distinguer, au sein du référent empirique que vise à modéliser le modèle, comme le propose Martinand, la « phénoménographie » (« description première, avant modèle, devant donner lieu à une construction consensuelle »), et la « phénoménologie » (« description seconde où le modèle se projette sur le référent », qui intervient dans la phase où le modèle, une fois construit et exploré de l'intérieur, est, dans un mouvement inverse, « appliqué » au référent empirique, ceci permettant de tester la fécondité et validité empiriques du modèle). Cette distinction est indispensable d'un point de vue pédagogique, car si la réalité observable reste la même, la manière dont les élèves l'appréhendent, la perçoivent et la décrivent est variable d'un élève à l'autre et évolutive au cours du temps chez un même élève (voir note 22). La distinction entre phénoménographie (ou réalité observable à modéliser) et phénoménologie (ou réalité observable à laquelle le modèle est appliquée et sur laquelle il est projeté) capture et aide à résoudre cette difficulté. Comme l'écrit Martinand : « La distinction entre phénoménologie et phénoménographie signale un des pièges majeurs de l'enseignement : les objets et les phénomènes restent les mêmes, les adultes instruits ne se rendent pas compte que les apprenants ne "lisent" pas (ne "décrivent" pas) comme eux la "réalité" ».

Du point de vue de l'exigence d'ancrage dans la réalité observable, les modèles ne sont pas fondamentalement différents des théories scientifiques. Ces dernières aussi doivent être étroitement connectables à des observations : si elles ne sont pas sources de prédictions vérifiables ou d'explications *de phénomènes perceptibles*, on ne les considère *pas* comme des théories *scientifiques* (de la nature ou d'artéfacts techniques). Ce qui, toutefois, distingue modèles et théories scientifiques à ce niveau, c'est le caractère local du modèle (la propriété D3 introduite section 3), ou plus exactement – car la localité est une caractéristique relative – le fait qu'un modèle est *plus* local qu'une théorie. On n'exige pas d'un modèle physique qu'il prédise ou explique « toutes », ou même « un maximum » d'observations physiques connues. On attend de lui qu'il permette de prédire ou d'expliquer *facilement* une classe *restreinte* de situations observables. C'est tout ce que l'on demande à un outil opérant n'ayant pas de prétention réaliste. Pour une autre classe d'observations, ou pour d'autres questions adressées aux mêmes observations, on utilisera un autre outil jugé plus adéquat.

En résumé :

- Dans les énoncés qui expriment d'une manière ou d'une autre que le modèle n'a pas pour *but* d'être fidèle à la réalité R (de dévoiler R, de décrire exactement et complètement R...), R renvoie à la réalité *métaphysique* X (le modèle n'a pas pour but de fournir une description aussi détaillée et complète que possible de la réalité telle qu'elle est indépendamment des humains).

- Dans les énoncés qui affirment que le scénario scientifique constitutif du modèle présente, vis-à-vis de R, un décalage important qui l'apparente à une fiction dont les aspects faux peuvent être précisés, R renvoie *en pratique* à la réalité *scientifique* (le scénario du modèle s'éloigne beaucoup du scénario de la théorie scientifique en vigueur du même objet, et on peut dire en quoi), et à travers l'invocation de la réalité scientifique, R renvoie *indirectement* à la réalité *métaphysique* X supposée (approximativement) bien décrite par la théorie scientifique en vigueur.

- Dans les énoncés qui mettent en avant que le modèle est un outil efficace pour traiter/résoudre des problèmes particuliers, l'idée de « traiter/résoudre » renvoie à une connexion étroite et spécifiable du modèle à la réalité *observable*, connexion qui confère sa valeur empirique au modèle : le modèle nous donne une « prise » sur un pan de la réalité *observable*, quelle que soit la nature de cette « prise » (prédire des phénomènes naturels observables nouveaux ; expliquer des phénomènes naturels observables connus ; avancer dans la compréhension d'observations naturelles énigmatiques ; expliquer les observations issues d'un dispositif technologique ; prédire les « sorties observables » de tel ou tel dispositif instrumental appliqué à tel étalon ; etc.). C'est l'effectivité de cette « prise » qui conduit à dire qu'un modèle est « valide ». « Ce qui compte alors n'est plus la fidélité à un hypothétique réel "en soi", mais l'efficacité descriptive, explicative ou prédictive d'un modèle dont la pertinence est validée en se confrontant au réel tel qu'il nous apparaît » (Drouin 1988).

6. PLURALITÉ DES MODÈLES VERSUS UNICITÉ DE LA THÉORIE D'UN MÊME OBJET

Reste à pointer une dernière différence entre modèles et théories, importante à faire saisir aux élèves à côté de celles déjà mises en avant plus haut : tandis qu'une multitude de modèles *incompatibles* des *mêmes* phénomènes ou objets est parfaitement acceptable²⁹, une exigence d'unicité pèse sur les théories scientifiques des mêmes phénomènes ou objets.

Cette caractéristique des modèles (disons D4) est étroitement liée à la propriété D1. Les scénarios des modèles ne prétendant pas à la vérité, mais étant conçus comme des instruments efficaces en vue de traiter des classes circonscrites de problèmes, le développement d'une multitude de modèles à propos des mêmes objets (naturels ou artificiels) est non seulement permis, mais de plus souhaitable. En effet, une telle stratégie pluraliste fournit davantage de ressources au sein desquelles pourront être puisées celles qui s'avèrent les mieux adaptées aux contextes particuliers et aux buts humains présents et futurs. Peu importe si les scénarios associés à ces différents modèles présentent des tensions entre eux, y compris s'ils sont littéralement contradictoires (par exemple si le premier assume l'absence de forces de frottement et le second leur présence, ou si le premier est déterministe et le second indéterministe). Tout ce qu'on demande à un outil, c'est d'être opérant. Le fait que plusieurs modèles incompatibles puissent être conjointement utilisés pour traiter les mêmes objets et les mêmes phénomènes observables n'a rien de choquant. Les différents scénarios ne prétendant pas fournir des descriptions fidèles de la réalité métaphysique, il n'y a pas à exiger qu'ils soient conciliables, ni à s'employer à déterminer lequel est « le bon » *tout court* : les expressions « le bon », « le (ou les) meilleurs », n'ont, appliquées aux modèles, de sens que rapportées aux buts poursuivis.

Il en va autrement avec les théories scientifiques. Les exigences qui pèsent sur les théories scientifiques interprétées dans une perspective réaliste sont beaucoup plus fortes. Dès lors que la théorie est conçue comme dévoilement d'une réalité métaphysique X supposée être ce qu'elle est indépendamment des êtres humains, la théorie vraie, celle qui « correspond » à la réalité, est forcément *unique*. C'est pourquoi lorsque *plusieurs* théories rivales *incompatibles* sont élaborées à propos des mêmes phénomènes, comme cela arrive parfois dans l'histoire des sciences, une telle situation est perçue comme foncièrement insatisfaisante par la plupart des scientifiques (qui, répétons-le, sont spontanément réalistes). Il semble à ces scientifiques qu'une telle situation ne peut être que provisoire, et qu'à plus ou moins court terme, il va falloir *choisir*. Il leur semble qu'il faut comparer les mérites des concurrentes, en vue de retenir celle qui, en l'état de la recherche, peut prétendre être *la meilleure*, c'est-à-dire la « plus proche de la vérité » (la plus fidèle à la réalité telle qu'elle est indépendamment des hommes).

La caractéristique (D4) rapproche les modèles des objets technologiques : de même qu'une pluralité de modèles du même objet d'étude (naturel ou artificiel)

²⁹ Martinand (1998), par exemple, parle des « caractéristiques de pluralité » des modèles – sans cependant contraster cette caractéristique avec les théories. Drouin (1988) écrit de son côté que le modèle « se donne sans doute plus immédiatement comme contingent, partiel, comme un parmi d'autres possibles » ; « le type de rapport qui existe entre le modèle et le réel dont il rend compte fait qu'une même réalité peut avoir plusieurs modèles ».

est possible et souhaitable, de même, une pluralité d'objets techniques susceptibles de remplir des fonctions similaires (par exemple se déplacer rapidement d'un point à un autre) est possible et souhaitable. Cette pluralité permet de disposer d'une multitude de moyens disponibles pour atteindre le but de se déplacer rapidement d'un point à un autre (avion, train, voiture, vélo, fusée, etc.), au sein desquels l'un ou certains d'entre eux seront retenus comme « le bon » ou « les meilleurs » en fonction d'autres données et contraintes de la situation (spécification du « rapidement », coût, etc.).

7. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU MODÈLE EN SCIENCE ET EN TECHNOLOGIE VERS UN EIST

En résumé, le modèle est une construction intellectuelle (et possiblement aussi matérielle) qui peut être caractérisée à partir de 4 propriétés fondamentales :

- (D1) *Infidélité revendiquée à la réalité modélisée et décalage spécifiable par rapport à cette réalité* – la « réalité » en question étant, *in concreto*, identifiée à partir de « ce que dit » la théorie scientifique la plus élaborée dont on dispose, à l'époque considérée, à propos de l'objet modélisé, c'est-à-dire ce que nous avons appelé la réalité scientifique. Le modèle s'apparente à une théorie scientifique, en tant qu'il est comme elle une construction intellectuelle, mais le modèle se distingue de la théorie (telle que communément interprétée dans une perspective réaliste) précisément par la caractéristique (D1).

- (D2) *Efficacité et opérativité par rapport à des buts déterminés*. L'efficacité inclut l'idée importante que le modèle offre une « prise » sur des phénomènes observables, en particulier l'idée qu'il permet de *prédire et d'expliquer* certains phénomènes observables, qu'il est « valide » en ce sens. Le modèle partage l'exigence (D2) avec l'objet technologique : ce dernier aussi doit apporter une solution satisfaisante vis-à-vis d'un problème humain déterminé, donc doit être un moyen efficace pour atteindre les buts associés à ce problème.

- (D3) *Localité*. La localité recouvre l'idée qu'un modèle offre une prise efficace sur un domaine *restreint* de phénomènes observables et qu'il n'a pas pour but de couvrir « toutes » les observations ou même « un maximum » d'entre elles. La caractéristique (D3) rapproche le modèle de l'objet technologique : ce dernier non plus n'est pas conçu pour résoudre tous les problèmes (ni même un maximum de problèmes) et pour produire tous les effets observables connus (ni même un maximum d'effets connus) ; il est conçu comme moyen pour résoudre un problème *circonscrit* ou produire des effets *spécifiques* déterminés.

- (D4) *Pluralité des modèles* à propos du même objet (y compris des modèles littéralement incompatibles, contradictoires, voire incommensurables...) *et cohabitation pacifique* entre ces modèles (pas d'exigence de ne retenir que l'un d'entre eux au détriment de tous les autres). La caractéristique (D4) est commune aux modèles et aux objets technologiques. Les ingénieurs ne se sentent nullement tenus d'élire, au sein d'une gamme d'objets technologiques de conception différente permettant d'atteindre des buts similaires, l'un d'entre ces objets comme *le meilleur tout court* (dans l'absolu, sur tous les plans...), et de cesser alors d'étudier et de développer d'autres possibilités, exactement de même que les scientifiques ne se sentent pas tenus de choisir, au sein des divers modèles à propos d'une

même réalité, l'un d'entre eux qui devrait être reconnu « le meilleur » tout court et qui éclipserait alors tous ses rivaux. Le *desideratum* de la pluralité est partagé par les modèles et les artéfacts techniques, puisque dans les deux cas, il semble non seulement permis, mais de plus préférable, étant donné un but quelconque, de disposer d'une multiplicité de ressources qui permette chacune d'atteindre le but d'une manière particulière et présente chacune des avantages et des inconvénients propres.

Modèle scientifique (M)	Théorie scientifique (T)
But assigné à M/T	
Outil efficace pour atteindre des objectifs humains particuliers Traiter efficacement des problèmes scientifiques particuliers Rendre compte de (expliquer, prédire, comprendre...) un domaine <i>limité</i> d'observations	Description vraie de R, détaillée et idéalement exhaustive Décrire ce qu'est R, dire la vérité à propos de R Rendre compte de (expliquer et prédire) <i>toutes</i> les observations
Relation de M/T à la réalité R	
M revendiqué infidèle à R (D1) Fiction, simplification, idéalisation, schématisation, esquisse grossière, caricature... Reconnu faux à de nombreux égards (ne correspond pas à R)	T assumée fidèle à R Description aussi complète et exacte que possible, re-présentation, dé-voilement, dé-couverte, double de R... Prétend à la vérité (correspondance à R)
Décalage entre M/T et R	
Important, toujours supérieur au décalage entre T et R	Aussi réduit que possible, toujours inférieur au décalage entre M et R
Voulu et valorisé pour les avantages qu'il procure	Subi et regretté comme effet inévitable des limites humaines
Spécifiable (spécification du décalage entre le scénario de M et le scénario de T, i.e. entre M et la réalité scientifique)	Non spécifiable (conçu comme le décalage entre le scénario de T et la réalité métaphysique visée mais toujours en partie inconnue X)
Caractéristiques pratiques de M/T du point de vue de l'utilisateur (scientifique ou élève)	
Efficacité (D2) M opérant, manipulable, commode, car M simple (en tout cas plus simple que la théorie la plus élaborée disponible) ; outil heuristique.	Manipulabilité délicate, complexité T difficile à appréhender et à manipuler, car T complexe
Localité (D3) Domaine d'applicabilité limité, validité restreinte à des buts et contextes particuliers Efficacité <i>relative</i> à un ensemble limité de problèmes et de phénomènes	Généralité, voire universalité Domaine d'applicabilité très étendu, idéalement universel Expliquer et prédire la totalité des phénomènes
Pluralité (D4) Les mêmes phénomènes ou objets (naturels ou artificiels) peuvent être traités au moyen de plusieurs modèles différents, éventuellement incompatibles entre eux, en fonction des buts poursuivis et des questions adressées aux phénomènes ou objets.	Unicité Les mêmes phénomènes ou objets (naturels ou artificiels) appellent une unique théorie (<i>la</i> théorie vraie ou qui se rapproche le plus de la vérité). Des théories incompatibles des mêmes phénomènes ou objets sont inacceptables.

Tableau 1 : Une caractérisation synthétique du modèle par opposition à la théorie interprétée de manière réaliste.

[D4 suite] Une telle multiplicité de ressources enrichit la gamme des options envisageables, et, espère-t-on, aide à prendre des décisions appropriées et optimales, lorsqu'il s'agit, dans des situations réelles particulières toujours multi-contraignantes, de réfléchir aux meilleurs compromis vis-à-vis de problèmes socio-techniques complexes. Disposer d'une multiplicité d'objets technologiques de

conceptions et de propriétés différentes qui, chacun, permette par des voies distinctes l'obtention d'effets observables et de pouvoirs similaires (par exemple : se déplacer rapidement d'un point à un autre), est donc tout aussi souhaitable que de disposer d'une multiplicité de modèles qui, chacun, par des schématisations distinctes, permette une certaine maîtrise des mêmes objets naturels ou artificiels, et notamment l'obtention de prédictions observables vérifiées à propos de ces objets.

Le Tableau 1 ci-dessus présente de manière synoptique et synthétique les principaux résultats des analyses précédentes. Il est organisé en deux colonnes, celle de gauche portant sur le modèle et celle de droite sur la théorie scientifique interprétée dans la perspective réaliste, de façon à mettre en relief les éléments centraux du contraste entre modèle scientifique (au sens large de « scientifique ») et théorie scientifique. En outre, sont indiquées en grisé les caractéristiques du modèle qui sont communes, ou peuvent être facilement transposées, à l'objet technologique.

**8. MODÈLES FAUX OPPOSÉS À LA THÉORIE VRAIE ?
MODÈLES « PARTIELLEMENT VRAIS », ESQUISSES PLUS OU
MOINS PROCHES DU VRAI SCÉNARIO DE LA THÉORIE ?
OU MODÈLES ET THÉORIES TOUS ASSIMILÉS À DES
INSTRUMENTS UTILES NE PRÉTENDANT PAS À LA VÉRITÉ ?**

Au terme de cette caractérisation des modèles nécessaire pour repenser l'EIST, il convient de revenir sur la relation du modèle à la vérité et à la théorie scientifique interprétée dans une perspective réaliste.

Nous y avons insisté plus haut, ce qui distingue premièrement les modèles et les théories scientifiques interprétées dans une perspective réaliste, c'est leur *finalité*, le but qui est assigné à chacun au sein de l'activité scientifique (voir section 4, point 1.) : but pratique pour le modèle (être un outil localement « efficace » par rapport à un but, ce qui implique de sacrifier la fidélité au profit de la manipulabilité) ; but représentationnel pour la théorie (dire la vérité sur l'objet d'étude). Parce qu'il n'a pas pour but d'être réaliste, et ne prétend donc pas l'être, le scénario du modèle est souvent assimilé à une fiction et globalement qualifié de « faux » (voir section 4, point 2.). Pour autant, ceci n'empêche pas de poser la question du rapport du modèle-outil à la vérité (voir les remarques déjà faites à ce propos en fin de section 4) – surtout dans les cas où le but poursuivi est la compréhension ou l'explication de certains phénomènes (par opposition à la prévision à partir d'un modèle qui pourrait être considéré comme une « boîte noire » dont on ne se préoccuperait pas d'interroger le rapport à la réalité modélisée). Or de ce point de vue, il y a deux manières différentes possibles de s'exprimer qui, comme dans le cas de la bouteille à moitié vide ou à moitié pleine, sont sous-tendues par des intuitions et génèrent des impressions très différentes.

Si l'on est avant tout sensible au décalage entre le scénario du modèle et celui de la théorie – à tout ce qui, dans le modèle, est faux à se baser sur la réalité scientifique telle que décrite par la théorie (absence de forces de frottements, dimensions des objets utilisés pour modéliser les corps célestes, etc.) –, alors, on sera porté à dire que le modèle est faux (tout court) : qu'il fournit une peinture erronée de la réalité qu'il modélise. Cette première manière de s'exprimer induit une

opposition entre modèle et théorie. Elle suggère une incompatibilité du type le plus insurmontable qui soit, à savoir une *contradiction* (puisque le modèle est vu comme niant ce que la théorie affirme – par exemple l’existence de forces de frottement – et que la théorie étant prise comme norme de vérité, le modèle est dit faux en tant qu’il contredit la théorie vraie). Elle suggère solidairement une *discontinuité radicale* entre d’une part l’ensemble des modèles (tous placés sur le même plan en tant que « tous faux »), et d’autre part la théorie (quant à elle placée sur un plan différent en tant que « vraie »).

Mais on peut aussi voir les choses autrement.

On peut aussi – bien que conscient de tout ce qui, dans le scénario du modèle, est littéralement faux à prendre le scénario de la théorie comme étalon de vérité – être avant tout sensible à la « part de vérité » subsidiaire du scénario du modèle, c’est-à-dire aux aspects de ce scénario qui coïncident ou sont facilement connectables avec le scénario de la théorie en vigueur. Dans cette perspective, on sera porté à dire, non plus que le modèle est faux, mais qu’il est une *simplification*, une *idéalisierung*, une représentation *schématique* ou une *esquisse* de la réalité qu’il modélise – réalité dont la peinture fidèle, non simplifiée, est supposée fournie par le scénario de la théorie (ce que nous avons appelé la réalité scientifique). Cette seconde manière de s’exprimer produit une impression très différente de la première. En pointant vers un mode de raccord entre les scénarios des modèles et le scénario de la théorie (les premiers étant envisagés comme des *simplifications* ou *esquisses* du second), elle suggère, à l’opposé de la première, à la fois une *continuité* et une *compatibilité* entre le modèle et la théorie.

Dans la configuration la plus facile à présenter et à comprendre (qui est aussi certainement celle qui se rencontre le plus souvent dans l’enseignement des sciences), la simplification qui intervient de la théorie au modèle est de type soustractif³⁰ : le scénario du modèle « ignore » délibérément, « laisse de côté », « met entre parenthèses », un certain nombre d’aspects du scénario plus complexe de la théorie (par exemple les forces de frottement)³¹. Dans une telle configuration soustractive, les scénarios d’un ensemble de modèles du même objet, ordonnés du plus simple au plus compliqué, peuvent alors facilement apparaître comme une série de versions se rapprochant toujours davantage du « vrai » scénario identifié à celui de la théorie en vigueur : comme des esquisses de plus en plus raffinées M, M', M'' , etc., du scénario quant à lui assumé exact et complet fourni par la théorie, chaque

³⁰ On parle parfois d’« idéalisations aristotéliennes » ou d’« abstractions », par opposition aux « idéalisations galiléennes » (Mc Mullin 1985) supposées introduire des distorsions et donner lieu à des « distorted models ». La frontière entre une abstraction et une distorsion ne semble cependant pas si claire. Par exemple, des modèles impliquant des points dépourvus de masse se mouvant sans friction sur des surfaces sont couramment décrits comme des distorsions, mais on pourrait les considérer comme impliquant l’abstraction (ou la soustraction) de la masse et des frottements.

³¹ Le type soustractif est le plus simple à présenter, et nous nous tiendrons ici à celui-ci, mais il est loin d’épuiser les rapports possibles entre modèles et théorie. Que l’on pense à titre d’illustration au « modèle ondulatoire » de la lumière comparé à la théorie quantique de la lumière qui invoque la « dualité onde-corpuscule ». Quels que soient dans le détail la manière dont on précise les rapports entre ces deux termes, il est clair que l’on n’a pas affaire à un rapport soustractif simple du type absence/présence de forces de frottement. À noter que dès que l’on sort du rapport soustractif simple entre plusieurs constructions intellectuelles, qu’elles soient des modèles ou des théories, la tâche d’ordonner ces constructions de la plus simple à la plus compliquée se heurte à de redoutables difficultés. Sur ce dernier point, voir par exemple Popper (1979).

esquisse étant obtenue en rajoutant quelque élément à l'antécédente. On forge ainsi l'idée d'une série continue M, M', M'', \dots, T , qui place sur le même plan et met en avant une continuité entre les différents modèles et la théorie du même objet, et qui conduit alors à penser modèles et théorie comme aisément conciliables, compatibles, ceci *en dépit du fait* qu'ils sont, littéralement et à divers égards, contradictoires (par exemple : présence/absence de forces de frottement). A y regarder de plus près, la compatibilité est obtenue, et la contradiction dépassée, en interprétant les aspects « littéralement contradictoires » du modèle sur le mode du « comme si ». Selon une telle interprétation, le modèle ne nie pas l'existence de forces de frottement, il fait « comme si » ces forces n'existaient pas.

À s'en tenir à ce qui précède, il semble y avoir deux manières possibles, et *seulement deux*, de penser les rapports entre les modèles et la théorie scientifique des mêmes phénomènes : soit (1) opposer les modèles faux à la théorie vraie, c'est-à-dire mettre en avant une discontinuité et une incompatibilité entre eux ; soit (2) présenter les modèles comme des esquisses partiellement vraies et plus ou moins proches de la théorie vraie, c'est-à-dire penser les deux types de constructions intellectuelles humaines que sont le modèle et la théorie à partir d'une « commune mesure » identifiée à la vérité, et les ordonner alors sur une sorte d'« échelle de vérité » où la théorie occupe la position supérieure, ce qui met en avant une continuité des modèles à la théorie et une compatibilité entre eux.

Mais il y a en fait une troisième possibilité.

Le point de départ de cette troisième possibilité consiste à récuser l'interprétation réaliste que nous avons jusqu'ici – en tant que présentation de la position du « sens commun » – associée de manière étroite à l'idée de théorie scientifique, et à adopter une position anti-réaliste, dite « instrumentaliste », vis-à-vis des théories scientifiques. La position instrumentaliste nie que les théories scientifiques, y compris les plus sophistiquées et les plus développées que nous puissions jamais espérer développer, puissent être littéralement interprétées et prétendre fournir une description globalement fidèle de la réalité telle qu'elle est indépendamment des êtres humains (réalité métaphysique). A la métaphore de la théorie-reflet, l'instrumentalisme substitue celle de la théorie-outil – ce qui a pour effet de rapprocher fortement les théories des modèles, et donc aussi les théories des technologies, comme nous allons y revenir plus en détails juste ci-dessous. Les théories sont alors elles-mêmes conçues comme des instruments utiles pour atteindre certains buts humains – tels que comprendre le monde, classer l'ensemble des phénomènes connus, synthétiser via la formule économique d'une loi dite « universelle » une infinité de cas concrets possibles, prédire des phénomènes, etc. Le scénario des théories, et les entités qui y interviennent, sont alors eux-mêmes identifiés à d'utiles fictions intellectuelles. Le physicien est décrit comme construisant, voire inventant, des électrons, des forces, etc. – et non pas comme dé-voilant ce qui était déjà là mais voilé aux hommes.

Une telle interprétation instrumentaliste des théories scientifiques a ceci de commun avec la perspective (2) présentée ci-dessus, qu'elle place elle aussi modèles et théorie sur le même plan (en leur conférant à tous le même statut épistémologique d'instruments utiles dépourvus de prétention ontologique) et permet ainsi elle aussi, comme la perspective (2) et contrairement à la (1), d'envisager un certain type de continuité et de compatibilité entre modèles et théories. Seulement,

dans la perspective (3), la commune mesure entre les modèles et la théorie n'est plus, comme dans la (2), la vérité, et l'ordre éventuellement instauré entre différents modèles et la théorie n'est plus interprété comme une mesure de la plus ou moins grande « part de vérité ». Dans la perspective (3), la commune mesure entre M, M', M'', ... et T est, pourrait-on dire, l'instrumentalité (tous sont des instruments, de même que les objets technologiques), et l'ordre qui est éventuellement instauré entre eux est fonction du degré de complexité relatif de M, M', M'', ... et T (degré de complexité non interprété comme une mesure de la « part de vérité » de ces termes).

Dans la perspective (3), un autre type d'ordre peut aussi être parallèlement instauré entre M, M', M'', ... et T, en fonction du caractère *plus ou moins approprié* de M, M', M'', ... et T *vis-à-vis de tel ou tel but humain déterminé* (auquel cas T n'est pas forcément au sommet de la hiérarchie instituée). Les modèles et la théorie ayant tous le même statut, défini par l'affirmation que ce sont *tous* des instruments féconds vis-à-vis de buts humains déterminés, on utilisera de préférence l'un de ces instruments plutôt qu'un autre (tel modèle ou telle théorie), selon qu'il apparaît plus ou moins bien adapté au but poursuivi. Vis-à-vis du but d'expliquer et de prédire à partir d'un même cadre un *maximum* de phénomènes connus, la théorie est supérieure aux modèles. Mais il n'y a pas à en inférer, insiste l'instrumentaliste, que le scénario de la théorie est vrai. Et vis-à-vis d'autres buts, tel ou tel modèle sera supérieur à la théorie.

Dans la perspective instrumentaliste, le contraste entre modèle et théorie s'estompe fortement³². A l'examen, il n'y a plus que la caractéristique (D3) qui différencie alors le modèle de la théorie : le fait que le modèle est un instrument destiné à s'appliquer *localement*, à résoudre efficacement une classe *particulière* de problèmes (ce qui permet d'opérer avec des scénarios relativement simples) ; tandis que la théorie est un instrument visant une « envergure phénoménale » maximale, un haut degré de généralité (ce qui oblige à opérer avec des scénarios plus complexes). En bref, les modèles se distinguent des théories en ce qu'ils sont « plus locaux »³³. Mais comme il n'y a pas de seuil absolu en deçà duquel une construction intellectuelle serait locale et au-delà duquel elle serait générale, la frontière entre modèles et théories devient difficile à tracer. Cette difficulté devient encore plus palpable quand on prend acte qu'à pousser jusqu'au bout les conséquences de l'interprétation instrumentaliste des théories, l'exigence d'unicité qui, dans l'interprétation réaliste, pesait sur les théories rivales incompatibles et exigeait de choisir la meilleure (au sens de « la plus proche de la vérité »), est le-

³² On se rapproche alors de la situation envisagée – et considérée peu favorablement – par Drouin (1988) lorsqu'elle écrit : « on a pu se demander si (...) la science toute entière ne pouvait être considérée comme un modèle : répondre affirmativement à cette question correspondrait à une tendance globalisante où le Grand Tout gomme toutes les différences ».

³³ La localité est peut-être la propriété des modèles qui fait le moins problème et sur laquelle tout le monde s'accorde. Martinand (1998), entre autres, introduit le fait d'être « pertinents pour certains problèmes dans certains contextes » comme une des « caractéristiques essentielles » des modèles. Même des travaux comme Sensevy et Santini (2006), qui travaillent dans le cadre d'une conception des rapports entre théories et modèles inspirés de Cartwright, et fort différente de celle développée ici, soulignent néanmoins aussi la « sensibilité très grande des modèles aux situations, aux contextes qui leur donnent sens », qui leur « semble devoir constituer une dimension fondamentale en didactique des sciences ».

vée. Il devient parfaitement acceptable de développer et de laisser cohabiter plusieurs théories scientifiques contradictoires ou « incommensurables » des mêmes phénomènes. Comme l'écrit Henri Poincaré (1902, 219) : « deux théories contradictoires peuvent [...] pourvu qu'on ne les mêle pas et qu'on n'y cherche pas le fond des choses, être toutes deux d'utiles instruments de recherche »³⁴. Le caractère contre-intuitif de cette idée, le malaise qu'elle suscite presque inévitablement, témoigne du fait, souligné plus haut, que le réalisme est une interprétation profondément ancrée en chacun d'entre nous. L'instrumentalisme reste cependant une position philosophiquement défendable, et même, aux yeux de certains spécialistes, plus convaincante que le réalisme. Certains chercheurs estiment qu'il faudrait l'introduire explicitement dans l'enseignement des sciences, ou au moins, en tout cas faire prendre conscience aux enseignants de la possibilité de cette interprétation à côté de l'interprétation réaliste implicite qui règne en maître comme si elle allait de soi (Maty 1997). Il me semble qu'ils ont raison, et ce point est pris en compte dans la section conclusive qui suit.

9. CONCLUSION :
UNE STRATÉGIE POSSIBLE QUI REND LES MODÈLES
SPÉCIALEMENT INTÉRESSANTS DANS UN EIST
SOUCIEUX DE TRAVAILLER LES RAPPORTS
ENTRE « DISCOURS SCIENTIFIQUES » ET « MONDE RÉEL »

En nous appuyant sur l'ensemble des développements précédents, explicitons les raisons pour lesquelles le modèle – la construction et l'utilisation de modèles, ainsi que la réflexion sur la nature des modèles – peut être spécialement intéressant dans un EIST préoccupé de travailler la question des rapports entre les constructions intellectuelles scientifiques (modèles et théories) et le « monde réel ». Commençons par récapituler un certain nombre de points développés dans cet article.

(i) Le « réalisme » au sens philosophique de l'expression – à savoir l'idée qu'il existe, « derrière » les phénomènes (derrière ce que nous avons appelé la « réalité observable »), une réalité indépendante de l'homme (« réalité métaphysique »), « cachée » *mais que les êtres humains peuvent cependant découvrir et connaître toujours davantage* – est, dans notre culture tout au moins, la position implicite commune spontanée, donc en particulier celle des élèves du primaire et du secondaire (cf. section 4). Elle correspond de plus à une intuition profondément ancrée en « tout un chacun » : nous sommes tous spontanément réalistes dans la vie quotidienne, et le réalisme est la position qui apparaît « naturelle »³⁵.

(ii) Dans notre culture, ce sont les *sciences* (au sens étroit) qui sont en charge d'explorer cette réalité « cachée », et qui sont créditées d'être les plus compétentes pour en « dire quelque chose »³⁶. L'idée qu'il existe une réalité méta-

³⁴ À noter qu'en dépit de cette déclaration de tonalité fortement instrumentaliste, Poincaré est en fait réaliste : il défend une forme particulière de réalisme qualifié de « structural ». Voir Soler (2009, chapitre 5).

³⁵ Cf. Fine (1984) et l'« attitude ontologique naturelle ».

³⁶ Cela n'a pas toujours été le cas historiquement. Avant la dite « révolution scientifique » amorcée à la renaissance avec les travaux de Copernic, c'était la théologie qui occupait cette position. C'est

physique que les êtres humains peuvent connaître se spécifie alors en l'idée qu'il existe une réalité métaphysique que les *scientifiques* nous *dé-couvrent*, via les théories scientifiques acceptées les plus élaborées disponibles à une époque. On aboutit au « réalisme *scientifique* », c'est-à-dire à la position selon laquelle les théories scientifiques « disent vrai » à propos de la réalité métaphysique (ce qu'elles en disent s'identifiant à ce que nous avons appelé la « réalité scientifique », cf. section 4).

(iii) Le réalisme a une *forte valeur motivationnelle*. Le désir de dé-couvrir ce qu'est la réalité « cachée », ce qu'il y a « derrière les apparences », est souvent ce qui motive foncièrement les scientifiques (cf. section 4, l'exemple d'Einstein, décrivant son but, en tant que scientifique, comme celui de « lever un coin du voile » ; on pourrait donner de très nombreux autres exemples). Il en va fréquemment de même pour les élèves, notamment les jeunes élèves. L'intérêt pour les sciences s'avère fortement lié au désir de savoir ce qui existe et qui est « caché » (ce qu'il y a à l'intérieur du corps, dans un volcan, etc.). Il se nourrit de l'exaltation liée à l'idée d'un mystère à résoudre, ou de la curiosité d'une grande énigme à décrypter, accompagnée du présupposé que *la* solution existe. De ce point de vue, le réalisme spontané des élèves peut être considéré comme un *allié* de l'enseignement des sciences au sens étroit.

(iv) *Sur fond de présupposés réalistes implicites*, les remises en cause qui surviennent inévitablement, au cours d'un cursus d'enseignement scientifique, du primaire à la fin du lycée, au niveau de qui a été antérieurement appris en sciences, sont potentiellement choquantes et déstabilisantes. Elles sont susceptibles de fragiliser simultanément, et la confiance en l'école comme institution (« on nous y ment » ; « on nous y apprend des choses fausses »), et l'intérêt pour les sciences (« à quoi bon, si la réponse apportée aujourd'hui sera affirmée fausse demain ? », voir section 3). De ce point de vue, le réalisme spontané des élèves peut être considéré comme un *problème* pour l'enseignement des sciences au sens étroit.

(v) Au-delà du fait qu'il peut fonctionner comme un problème ou un allié de l'enseignement des sciences, que dire de la *plausibilité* du réalisme scientifique comme thèse philosophique, en se plaçant du point de vue des « savoirs savants » – à supposer que cette expression soit pertinente dans le champ de la philosophie ? Que nous disent les philosophes des sciences professionnels, ceux qui ont examiné et discuté la question en détails, à propos de la solidité du réalisme scientifique comme thèse philosophique ? La réponse, forcément schématique dans le cadre de cet article³⁷, est la suivante. Le réalisme scientifique est une position philosophiquement *tenable*, au sens où de nombreux philosophes professionnels la soutiennent et la revendiquent sur la base d'un réseau déterminé d'arguments (voir section 4). Le réalisme scientifique n'est cependant pas la seule position possible vis-à-vis des théories scientifiques. C'est seulement *une* position philosophique possi-

pourquoi l'interprétation réaliste des théories scientifiques est parfois dite « théologique » (par exemple Drouin (1988) écrit : « l'espoir d'une connaissance totale et définitive apparaît comme un rêve théologique »). Théologie et science interprétée dans une perspective réaliste répondraient l'une et l'autre à un besoin d'absolu, à un désir de trouver la réponse à la question de « ce qui est » et au mystère de la vie humaine.

³⁷ Notamment parce qu'elle ne prend pas en compte les multiples variétés de réalisme et d'anti-réalisme.

ble *parmi d'autres*. Les anti-réalistes ont développé de nombreux arguments contre le réalisme, mettant en évidence des difficultés profondes de cette position (voir section 4, note 20 pour quelques références clé). On peut donc ne pas adopter l'interprétation réaliste des théories, et juger l'interprétation instrumentaliste, selon laquelle les théories sont des instruments pour atteindre divers buts humains (voir section 8), plus convaincante et préférable.

(vi) Dans la mesure où réalisme et instrumentalisme sont deux positions philosophiques antagonistes ayant chacune des défenseurs et des détracteurs au sein de la communauté des philosophes des sciences professionnels, une école laïque ne devrait pas privilégier l'une au détriment de l'autre (c'est-à-dire, par défaut, presque toujours le réalisme au détriment de l'instrumentalisme), comme si cette position s'imposait, sur des bases rationnelles, de la même manière qu'une démonstration mathématique ou une expérience de physique est supposée imposer un résultat mathématique ou physique à tout individu suffisamment compétent. Une école laïque devrait donc idéalement faire en sorte que les *deux* interprétations réaliste et instrumentaliste des théories scientifiques existent pour les élèves – et encore plus idéalement, que les élèves aient une idée des arguments qui parlent en faveur et en défaveur de chacune d'elle.

(vii) Or en vertu des points (i) et (ii) ci-dessus, les deux interprétations ne sont pas d'emblée à égalité, et il est clair que si l'école ne fait rien, l'interprétation réaliste est en position de force. Par ailleurs, en vertu du point (iii), eu égard au fait que le réalisme peut être un allié pour l'enseignement de science, en nourrissant la motivation des élèves, l'objectif de remettre en question le réalisme peut ne pas apparaître souhaitable. En même temps, comme souligné en (iv), le réalisme crée aussi un problème, puisque c'est parce que les savoirs scientifiques appris à l'école sont interprétés sur le mode réaliste que leur remise en cause au fil d'un cursus est choquante.

(viii) C'est ici que le modèle entre en scène. Le modèle, compris à partir des caractéristiques récapitulées section 7, introduit un autre schème d'intelligibilité des constructions théoriques que le schème réaliste. Exploité par les enseignants d'une manière qui donne à voir, et éventuellement souligne explicitement, les caractéristiques (D1) à (D4), il peut devenir le vecteur d'une interprétation instrumentaliste *d'une certaine classe de constructions théoriques* – la classe des modèles. Le modèle peut de ce point de vue être assimilé à un cheval de Troie : il fait pénétrer subrepticement un schème interprétatif instrumentaliste dans une place foncièrement réaliste. Étant donné le caractère très profond de l'interprétation réaliste (évidemment largement implicite chez les élèves), il est clair que cette position ne saurait être attaquée de front par des discours explicites : outre que ce serait très difficile avec de jeunes élèves, ce serait de plus très probablement inefficace, et en outre possiblement perçu comme agressif (ainsi qu'est perçue toute remise en cause trop directe d'une croyance profondément ancrée). En revanche, introduire certaines constructions théoriques comme des modèles, et travailler, par l'intermédiaire de celles-ci, à faire intégrer les caractéristiques (D1) à (D4) aux élèves, semble une stratégie potentiellement féconde pour que les élèves s'approprient le schème instrumentaliste sans pour autant avoir à remettre en cause leurs *credo* réaliste à *propos des théories*.

(ix) Les modalités envisageables sont diverses, mais il est clair que des situations exemplifiant la manière dont une même « réalité observable » est susceptible d'être lue à partir de plusieurs modèles nettement différents, voire littéralement contradictoires, seront particulièrement efficaces. Si l'attention de l'élève est attirée *simultanément*, et sur ce qu'il y a de *faux* dans chacun des divers modèles mobilisés, et sur les *apports spécifiques* de chaque modèle du point de vue de l'appréhension *d'une seule et même réalité observable* (selon les cas : comprendre, expliquer, prédire, etc.), les élèves en viendront progressivement à intégrer une autre manière possible d'interpréter les constructions théoriques. Parallèlement, rien ne les empêchera de maintenir l'interprétation réaliste à propos des autres constructions intellectuelles que sont *les théories scientifiques*. De ce point de vue, un choix est à opérer. On peut soit différencier nettement deux types de constructions intellectuelles, modèles et théories, en travaillant le schème instrumentaliste du côté du modèle – auquel cas il s'agira de mettre du côté des théories des connaissances scolaires qui peuvent s'interpréter facilement comme version simplifiée des théories aujourd'hui en vigueur, ceci afin d'éviter les problèmes liés aux remises en cause destructrices évoqués au point (iv). Soit faire jouer aux théories scientifiques le rôle d'un horizon et idéal régulateur qui ne pourra être atteint que plus tard, lorsque suffisamment de jalons intermédiaires auront été posés au cours du cursus scolaire. Dans un cas comme dans l'autre, le *credo* réaliste n'est pas directement attaqué, et la motivation associée au réalisme peut se maintenir. À partir d'un certain niveau d'études, on peut envisager d'aller plus loin, et de conduire les élèves à expliciter progressivement, au niveau métacognitif, les deux schèmes d'intelligibilité mis en jeu, le réaliste et l'instrumentaliste, voire – rêvons un peu – d'engager des discussions à propos des arguments qui existent en faveur ou en défaveur de chaque interprétation – ce qui signifierait introduire de manière sérieuse et conséquente l'épistémologie dans l'enseignement des sciences, et bien sûr former les enseignants en amont.

(x) Et la technologie dans tout ça ? Nous y avons insisté tout au long de cet article, le modèle (et l'activité de modélisation), compris à partir des caractéristiques (D1) à (D4), met en jeu un schème d'intelligibilité *homologue à celui qui sous-tend l'objet technologique (et l'activité technologique)* (voir les parties grisées du Tableau 1). Dans un enseignement de technologie, l'un des objectifs est de faire intégrer aux élèves la démarche qui est spécifique à la technologie (ou si l'on veut la « méthode technologique »), à savoir, très grossièrement exprimée, l'idée de trouver *un moyen* (parmi toujours *plusieurs possibles*) pour atteindre un but formulé comme un problème intégrant un certain nombre de contraintes. Cette démarche se distingue de la démarche expérimentale, qui est presque universellement interprétée dans une perspective réaliste, et dans laquelle il s'agit *in fine* – quels que soient les tâtonnements et l'ouverture que l'on veut bien associer à la méthode dite d'« investigation » – d'aboutir à *la réponse* (supposée unique) à une question préalablement élaborée (modulo les incertitudes s'il s'agit de réponse chiffrée). Les « logiques » des deux démarches technologique et scientifique-expérimentale sont donc bien différentes, et les élèves ne comprennent pas toujours clairement cette différence. La suggestion faite ici est de se servir du travail sur le modèle tel que caractérisé plus haut, afin d'aider les élèves à mieux intégrer cette différence. Ou plus exactement, la suggestion implique une aide à double sens. La

suggestion est que le travail sur le modèle et la modélisation d'une part, et le travail sur les objets technologiques et la démarche technologique d'autre part, soient conçus comme fonctionnant main dans la main, comme *se soutenant et se renforçant l'un l'autre*, dans la mesure où ils se déploient sur la base du *même schème d'intelligibilité*, à savoir, une grille de lecture *instrumentaliste* (recherche d'une solution – ou d'un outil – parmi d'autres, qui résolve un problème impliquant diverses contraintes). La suggestion est en outre, parallèlement et symétriquement, que l'interprétation classique des théories et la démarche expérimentale telle que traditionnellement enseignée se soutiennent et se renforcent l'une l'autre, dans la mesure où toutes deux se déploient à partir du même schème d'intelligibilité nettement différent du précédent, à savoir, cette fois, une grille de lecture *réaliste* (recherche de la réponse à une question préalablement élaborée à propos de ce qu'est la nature). L'EIST aurait alors pour tâche de donner à voir, de suggérer et de clarifier ces parentés et ces différences.

Pour récapituler, la stratégie proposée est donc en fin de compte la suivante : travailler l'interprétation instrumentaliste *sur le cas des modèles* (et de la modélisation), ceci, d'une part en différenciant clairement les modèles *des théories scientifiques* (auxquelles l'interprétation réaliste pourra rester attachée), et d'autre part en connectant le travail sur les modèles et la modélisation au travail sur l'objet technologique et la démarche technologique, c'est-à-dire en faisant apparaître et méditer les homologues fondamentales qui existent entre les deux ; laisser parallèlement vivre l'interprétation réaliste, en la canalisant sur *certaines* cibles, à savoir les *théories scientifiques* et les *faits expérimentaux* ; progressivement, au fur et à mesure du cursus, s'employer à rendre de plus en plus explicites les deux schèmes d'intelligibilité mis en jeu. À un moment, les élèves devraient être en mesure de comprendre que l'instrumentalisme peut *aussi* être appliqué *aux théories scientifiques*. À ce moment, on peut espérer qu'ils auront acquis les ressources intellectuelles pour, s'ils le souhaitent, examiner et peser les arguments qui existent en faveur et en défaveur des interprétations réaliste et instrumentaliste des théories, et décider alors librement, en connaissance de cause, la position qui leur paraît la plus plausible.

Il semble évident que vis-à-vis de cette stratégie, un enseignement *intégré* de science et de technologie est mieux armé qu'un enseignement qui séparerait le pôle « science » (au sens étroit) et le pôle « technologie ». Un enseignement intégré sera mieux à même de penser et de mettre en œuvre les articulations entre les différentes tâches impliquées, et les manières appropriées de faire apparaître et méditer les homologues et différences mises en jeu. Réciproquement, une telle stratégie servirait l'EIST. L'EIST aurait ainsi plus de sens ; il ne se rendrait pas complice par défaut d'un renforcement subreptice non questionné de l'interprétation réaliste commune ; il resterait néanmoins respectueux de la posture réaliste, et pourrait alors espérer bénéficier du potentiel motivationnel de celle-ci.

Léna SOLER

LHSP – Archives Henri Poincaré, UMR 7117 CNRS

Université de Lorraine

IUFM de Lorraine

l_soler@club-internet.fr

Abstract : The aim of the present paper is to give a conceptual and epistemological analysis of the nature and the status of scientific model, in the perspective of an integrated teaching of science and technology (ITST) which intends to work on the frequent difficulties of pupils concerning the relations between the “real world” and “scientific representations” (models and theories). The paper starts from a conception of model which has two features : first, it is coherent with many uses of the term “model”, and thus is acceptable, even if not universally accepted ; second, it proves to be especially interesting with respect to ITST, in particular regarding the aim to work the relation between science and reality with children. The analysis of this conception of the model is developed through a double comparison. On the one hand, comparison of model *with theory* – from which important differences are stressed regarding the links with “reality” (three senses of reality are distinguished along the discussion). On the other hand, comparison of model and modeling *with technical objects and technological practices* – from which important similarities are this time emphasized. On the basis of such double comparison and the corresponding network of similarities/differences put forward, the principle of a didactic strategy is suggested, which may simultaneously help pupils: to think the relations of science and technology to reality in a more conscious and richer way ; to be better armed to cope with the fact that many things learned at a point of a scientific curriculum are subsequently questioned ; and finally, to grasp the different “logics” which drive *scientific* practices (aiming at the acquisition of knowledge about the studied object) and *technological* practices (aiming at the acquisition of means to achieve particular practical goals). The result is conceived as a tool and a starting point for the elaboration of more concrete didactic proposals.

Keywords : scientific model ; scientific theory ; reality ; realism ; anti-realism ; instrumentalism ; technology.

Bibliographie

- Barberousse A. & Pascal L. (2009) « Fictions and Models » – in : M. Suárez (ed.) *Fictions in Science. Philosophical Essays on Modelling and Idealisation* (56-75). London : Routledge.
- Cartwright N. (1983) *How the laws of physics lie*. Oxford : Oxford University Press.
- Da Costa N. & French S. (2000) « Models, Theories and Structures : Thirty Years On » – *Philosophy of Science* 67, Supplement (116-127).
- Coquidé M. & Le Maréchal J.-F. (2006) « Modélisation et simulation dans l’enseignement scientifique : usages et impacts » – *Aster* 43 (7-16).
- Drouin A.-M. (1988) « Le modèle en questions » – *Aster* 7 (1-20).
- Duhem P. (1906) *La théorie physique, son objet, sa structure*. Paris : Vrin.
- Bachelard S. (1979) « Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles » – in : P. Delattre et M. Thellier (éds.) *Élaboration et justification des modèles* (9-20). Paris : Maloine.
- Balibar F. (dir.) (1989) *Albert Einstein, Œuvres choisies. Vol.1 : Quanta (mécanique statistique et physique quantique)*. Paris : Seuil/CNRS.
- Canguilhem G. (1968) *Études d’Histoire et de Philosophie des Sciences concernant les vivants et la vie* (305-318). Paris : Vrin.
- Fine A. (1984) « The natural ontological attitude » – in : J. Leplin (ed.) *Scientific realism* (83-107). Berkeley : University of California Press. Traduc-

- tion française : Fine A. (2004) « L'attitude ontologique naturelle » – in : S. Laugier et P. Wagner P. (éds.) *Philosophie des sciences. Naturalismes et réalismes* (331-372). Paris : Vrin.
- Frigg R. (2010) « Models and Fiction » – *Synthese* 172, 2 (251-268).
- Frigg R. & Hartmann S. (2012) « Models in Science » – in : E. Zalta (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Stanford : Stanford University.
<http://plato.stanford.edu/archives/fall2012/entries/models-science/>.
- Gibbard A. & Varian H. (1978) « Economic Models » – *Journal of Philosophy* 75 (664-677).
- Giere R. (2004) « How Models Are Used to Represent Reality » – *Philosophy of Science* 71, Supplement (742-752).
- Giere R. (2009) « Why Scientific Models Should Not be Regarded as Works of Fiction » – in : M. Suárez (ed.) *Fictions in Science. Philosophical Essays on Modelling and Idealisation* (248-258). London : Routledge.
- Godfrey-Smith P. (2009) « Models and Fictions in Science » – *Philosophical Studies* 143 (101-116).
- Hartmann S. (1999) « Models and Stories in Hadron Physics » – in : M. Morgan et M. Morrison (eds.) *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science* (326-346). Cambridge : Cambridge University Press.
- Hesse M. (1963) *Models and Analogies in Science*. London : Sheed and Ward.
- Hughes R. (1997) « Models and Representation » – *Philosophy of Science* 64 (325-336).
- Laudan L. (1984), *Science and Values : The Aims of Science and Their Role in Scientific Debate*. Berkeley : The University of California Press.
- Legeay J.-M. (1997) *L'expérience et le modèle : un discours sur la méthode*. Paris : INRA Éditions.
- Martinand J.-L. (1992) *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- Martinand J.-L., Genzling J.-C., Pirrard M.-A., Larcher C., Orange C., Rumelhard G., Weil-Barais A. & Iemeignan G. (1994) *Nouveaux regard sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP/LIREST.
- Martinand J.-L. (1998) « Introduction à la modélisation » – in : G.-L. Baron et A. Durey (éds.) *Les technologies de l'information et de la communication et l'actualisation des enseignements scientifiques et technologiques au lycée d'enseignement général et au collège*. Université d'été. Paris : INRP/ENS Cachan.
<http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf>
- Maty P. (1997) *Donner du sens aux cours de sciences*. Bruxelles : de Boeck.
- Magnani L. (2013) « Scientific Models Are Not Fictions : Model-Based Science as Epistemic Warfar » – in : L. Magnani et P. Li (eds.) *Philosophy and Cognitive Science : Western and Eastern Studies* (1-38). Heidelberg/Berlin : Springer.
- Morgan M. (2001) « Models, Stories and the Economic World » – *Journal of Economic Methodology* 8, 3 (361-84).

- Morrison M. (2009) « Fictions, Representations and Reality » – in : M. Suárez (ed.) *Fictions in Science. Philosophical Essays on Modelling and Idealisation* (110-135). London : Routledge.
- McMullin E. (1985) « Galilean Idealization » – *Studies in the History and Philosophy of Science* 16 (247-273).
- Orange C. (1994) « Les modèles, de la mise en relation au fonctionnement » – In J.-L. Martinand (dir.) *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation*. Paris : INRP.
- Orange C. (1997) *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- Orange C. (2000) « La construction du concept de milieu intérieur par C. Bernard. (Essai d'analyse du point de vue de la construction du problème et de la modélisation) » – in : C. Orange (dir.) *Changer ses connaissances sur le milieu intérieur*. Rapport de recherche INRP, IUFM des Pays de la Loire (coordination nationale G. Rumelhard).
- Poincaré H. (1902) *La science et l'hypothèse*. Paris : Flammarion.
- Popper K. (1979) *La connaissance objective*. Paris : Flammarion.
- Putnam H. (1975) *Philosophical Papers. Vol. 1 : Mathematics, Matter and Method*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Redhead M. (1980) « Models in Physics » – *British Journal for the Philosophy of Science* 31 (145-163).
- Robardet G. & Guillaud J.-C. (1997) *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris : P.U.F.
- Sensevy G. & Santini J. (2006) « Modélisation : une approche épistémologique » – *Aster* 43 (163-198).
- Soler L. & Léna P. (2009) *Introduction à l'épistémologie*. Paris : Ellipses.
- Suppes P. (2002) *Representation and Invariance of Scientific Structures*. Stanford : CSLI Publications.
- Teller P. (2009) « Fictions, Fictionalization, and Truth in Science » – in : M. Suárez (ed.) *Fictions in Science. Philosophical Essays on Modelling and Idealisation* (235-247). London : Routledge.
- Tiberghien A & Vince J. (2005) « Étude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique » – *Cahiers du Français Contemporain* 10 (153-176).
- Toon A. (2010) « Models as Make-Believe » – in : R. Frigg et M. Hunter (eds.) *Beyond Mimesis and Convention : Representation in Art and Science. Boston : Studies in the Philosophy of Science* (71-96). Dordrecht : Springer.
- Van Fraassen B. (1980) *The Scientific Image*. Oxford : Oxford University Press.
- Wimsatt W. (1987) « False Models as Means to Truer Theories » – in : N. Nitecki et A. Hoffman (eds.) *Neutral Models in Biology* (23-55). Oxford: Oxford University Press.