



HAL
open science

Premiers contacts avec la modélisation scientifique à l'école

Estelle Blanquet, Éric Picholle

► **To cite this version:**

Estelle Blanquet, Éric Picholle. Premiers contacts avec la modélisation scientifique à l'école. Brigitte Amory et Thierry Evrard. Les Modèles, des incontournables pour enseigner les sciences!, de Boeck, pp.45-55, 2015, Outils pour enseigner, 978-2804194352. hal-01349628

HAL Id: hal-01349628

<https://hal.science/hal-01349628v1>

Submitted on 28 Jul 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Premiers contacts avec la modélisation scientifique à l'école

Estelle BLANQUET^{1,2,3} et Éric PICHOLLE^{3,4}

1. Laboratoire Cultures, Éducation, Sociétés (LACES), ESPE d'Aquitaine, Un. Bordeaux
2. Centre de Recherches en Histoire des Idées (CRHI), Université de Nice Sophia-Antipolis
3. Centre d'Analyse des Processus d'Éducation et de Formation (CAPEF), ESPE de Nice
4. LPMC, UMR 7336, CNRS, Université de Nice Sophia Antipolis

estelle.blanquet@unice.fr

Bien que les compétences nécessaires à l'élaboration, à l'interprétation et à la manipulation de modèles soient au cœur de toute activité scientifique, voire de nombre d'enjeux citoyens dans une société moderne largement informée par les sciences et les techniques, elles font rarement l'objet d'une stratégie éducative explicite. En France, il faut attendre le collège (12-16 ans) pour que l'apprentissage de la modélisation devienne un objectif explicite des programmes de sciences. Les collégiens doivent s'y construire une « première représentation globale et cohérente du monde dans lequel ils vivent » ; pour cela, « les mathématiques fournissent des outils puissants pour modéliser des phénomènes et anticiper des résultats, en particulier dans le domaine des sciences expérimentales. »¹

Faute de contact préalable avec la modélisation scientifique, ce couplage explicite de la notion de modèle avec celle d'outil mathématique amène souvent les collégiens à affronter simultanément deux types de difficultés, identifiés depuis longtemps par les didacticiens :

— *Des difficultés d'ordre mathématique, liées à la manipulation des outils formels et à leur aspect calculatoire.*

Celles-ci sont bien connues des enseignants du secondaire et même désormais, dans une certaine mesure, du supérieur. Pour y pallier, une solution consiste à limiter la technicité des modèles formels considérés. C'est ce que propose implicitement le programme du collège, en restreignant l'usage de l'outil mathématique à des situations relativement élémentaires (e.g. en électricité, où les calculs demandés dépassent rarement la maîtrise de la simple proportionnalité).

— *Des difficultés d'ordre épistémologique, liées à la compréhension même de la nature et du statut d'un modèle.*

Jean-Louis Martinand n'hésite pas à parler à propos de la modélisation d'un des « pièges majeurs de l'enseignement » car « les adultes instruits ne se rendent pas compte que les apprenants ne "lisent" pas (ne "décrivent" pas) comme eux la "réalité" ».² De nombreux élèves de secondaire sont en effet convaincus que « les modèles ne sont

1. Introduction commune aux programmes de science du collège, 2008.

2. Jean-Louis Martinand, « Introduction à la modélisation » in *Actes de l'Université d'été Tecne*, E.N.S. Cachan, 6-10 juillet 1998. Accessible sur le site de l'INRP : <http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/TicD.htm>

guère plus qu'une copie ou une réplique directe de la réalité »³. L'intérêt pratique de la modélisation, qui consiste avant tout à simplifier le problème physique considéré pour le rendre accessible à l'analyse, leur échappe donc en grande partie. C'est ce qui ressort également de la revue de littérature *Taking Science to School* : « Bien qu'ils connaissent certainement la différence entre un modèle et son référent, les enfants réfléchissent rarement à la distinction entre un modèle et le monde qu'il modélise. Par conséquent, ils montrent souvent une préférence pour des copies plutôt que de vrais modèles parce qu'ils tendent à résister aux représentations symboliques qui laissent de côté des informations, même si ces informations ne sont pas importantes pour l'objectif théorique considéré »⁴.

Pour les enseignants du collège, et *a fortiori* au-delà, la pression des programmes limite les possibilités de traiter indépendamment ces deux types de difficultés, et en particulier de convaincre ceux des élèves qui ne l'ont pas encore perçu de l'intérêt pratique de la modélisation scientifique. La priorité y est donc souvent accordée à la maîtrise des outils formels qui utilisent le langage mathématique. On admet toutefois souvent que ce "choc du formalisme" amène nombre de collégiens à considérer que « les sciences ne sont pas pour eux », alors même qu'une forte proportion d'écoliers déclarent aimer cette discipline.

Une stratégie pédagogique alternative pourrait alors être d'anticiper le travail proprement épistémologique d'appropriation du concept de modélisation scientifique en le reportant au moins en partie sur l'école primaire. L'objet de cet article est de mettre en évidence l'importance des modèles analogiques, en particulier, pour familiariser précocement les élèves avec la notion de modèle. Après une rapide discussion des compétences générales nécessaires à toute modélisation, formelle ou non, et *a fortiori* à la compréhension par les élèves du statut des modèles, nous montrerons, *via* quelques exemples de séquences propices à leur développement, qu'elles sont en grande partie accessibles dès l'école élémentaire, et même dans une certaine mesure dès l'école maternelle.

1. TROIS COMPÉTENCES MÉTHODOLOGIQUES FONDAMENTALES

La modélisation scientifique est avant tout une stratégie pour raisonner sur des systèmes trop complexes pour être analysés dans leur entièreté. Son application est très générale, dans la mesure où c'est en pratique le cas de tout problème faisant intervenir le monde physique (dont le physicien sait l'inexhaustible richesse, à toutes les échelles). L'élève qui met en œuvre cette stratégie doit donc être conscient du fait que les modèles qu'il manipule (et qui sont donc assez simples pour être effectivement manipulés !) ne sont pas directement identifiables à la réalité.

3. W. J. Pluta, C. A. Chinn et R. G. Duncan, « Learners' epistemic criteria for good scientific models ». *J. Res. Sci. Teach.*, 2011, vol. 48(5), pp. 486–511. DOI 10.1002/tea.20415. Ils s'appuient essentiellement sur deux études : celle de L. Grosslight, C. Unger, E. Jay et C.L. Smith, « Understanding models and their use in science : Conceptions of middle and high school students and experts ». *J. Res. Sci. Teach.*, 1991, vol. 28(9), pp. 799–822. DOI 10.1002/tea.3660280907 et celle de D. Treagust, G. Chittleborough et T. Mamiala, « Students' understanding of the role of scientific models in learning science ». *International Journal of Science Education*, 2002, 24(4), pp. 357-368.

4. National Research Council. (2007). *Taking Science to School : Learning and Teaching Science in Grades K-8*. Committee on Science Learning, Kindergarten Through Eighth Grade. Richard A. Duschl, Heidi A. Schweingruber et Andrew W. Shouse, Editors. Board on Science Education, Center for Education. Division of Behavioral and Social Sciences and Education, The National Academies Press, U.S.A., 2007. p. 76.

Des aller-retours entre le modèle et la réalité physique qu'il représente sont indispensables pour en dériver un enseignement. Par ailleurs cette « réduction opératoire »⁵ passe presque inévitablement par la limitation du nombre de paramètres impliqués et donc par l'identification de paramètres pertinents d'une part, et d'autre part de ceux qui ne le sont pas, pour un problème donné.

La modélisation mobilise par conséquent au moins trois compétences méthodologiques fondamentales :

1/ Recul

Nous définissons la *recul épistémologique* comme la distinction consciente entre le monde physique et ses représentations. Dans le cas de la modélisation scientifique, cette conscience doit en outre inclure celle de la plus grande simplicité du modèle, qui le rend opératoire.

2/ Navigation entre modèle et système représenté

La validation d'un modèle scientifique suppose sa confrontation au système représenté ; en cas de dissonance, la *primauté* revient par construction à l'*expérience*. Par ailleurs, une application classique des modèles scientifiques consiste à prédire des phénomènes, la vérification de ces *prédictions* se déroulant également dans le monde physique (une discussion plus précise de la distinction entre modèle et simulation est reportée en annexe).

L'élaboration d'un modèle scientifique suppose donc un double mouvement, partant du système à représenter, dont l'analyse détermine les objectifs du modèle, vers ce dernier ; puis un retour du modèle vers le système à représenter.

Dans une large mesure, c'est également vrai de la manipulation d'un modèle existant : une utilisation servile, exempte de tout retour critique, relèverait de la pure "consommation" (comme par exemple lors de l'utilisation des modèles numériques d'un jeu vidéo) et n'aurait rien de scientifique. Il devient en revanche légitime de parler de modélisation scientifique dès lors que l'utilisateur confronte les prédictions du modèle au système représenté (mouvement modèle → système), et en tire un enseignement sur le modèle (validé ou à adapter en conséquence : mouvement système → modèle).

L'élève doit donc être capable de naviguer à bon escient entre le modèle qu'il manipule et le système représenté.

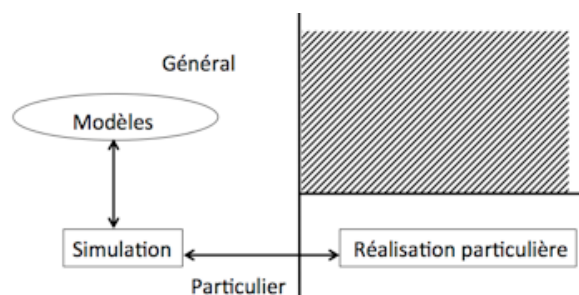


Figure 1 : Représentation schématique de l'aller-retour entre modèle et système référent

5. Dans le vocabulaire de Jean-Louis Martinand. « Introduction à la modélisation », op. cit., p. 4.

3/ Identification et extraction de paramètres pertinents

L'élaboration d'un modèle simplifié à partir d'un système surabondamment complexe suppose d'une part une compréhension de la *notion de paramètre* et une capacité d'évaluation de leur *pertinence* ; et d'autre part une capacité d'*élimination* (c'est-à-dire de renoncement à la prise en compte) des paramètres jugés non pertinents, ou "indifférents".

Nous entendons ici le terme de *paramètre* au sens physique, qui peut inclure le sens mathématique du paramètre d'une équation, mais également tout élément intervenant dans la caractérisation d'un système. Ainsi, les paramètres pertinents pour la description d'un puits incluent-ils la corde, la poulie et l'axe qui la supporte, ainsi que le poids des objets accrochés de part et d'autre de la poulie ; d'autres paramètres seront indifférents à son bon fonctionnement, comme la couleur de la margelle.

Ce terme n'a pas vocation à être employé par les enseignants avec les plus jeunes élèves. Pour autant, la plupart sont capables d'identifier les "éléments dont la modification a une influence sur le résultat et qu'il faut prendre en compte" dans une expérience, autrement dit les paramètres pertinents, de "ceux dont la modification n'a pas d'importance". Rien n'interdit en revanche de le proposer à des élèves de cycle 3 qui se sont formé une intuition de la notion, mais peinent à l'exprimer faute de terme approprié.

À ces trois compétences fondamentales viennent s'ajouter, le cas échéant, toutes sortes de compétences techniques (mathématiques et calculatoires, mais aussi de représentation, de bricolage, etc.) spécifiques.

Par ailleurs, elles ne seront spontanément mobilisées par les élèves que si ceux-ci sont conscients du fait que la modélisation est une *stratégie* efficace et ce dans des contextes variés (e.g. pour comprendre, prévoir, communiquer, expliquer, etc.⁶). Un corollaire est donc la prise de conscience du fait que :

- un modèle relève de choix en partie arbitraires (pertinence des paramètres). Ils sont *provisoires* et *modifiables* (prise en compte de nouveaux paramètres, etc.)
- plusieurs modèles différents peuvent légitimement coexister (une idée connexe est que tout modèle est limité et qu'on peut toujours développer un modèle plus sophistiqué mais elle semble difficile à systématiser au primaire).

Plus généralement, toute représentation simplifiée du monde physique est par construction une *fiction*. On peut définir un *modèle* comme *une fiction dotée d'un certain degré de généralité et dont l'objet est une vision simplifiée du monde physique, d'une partie de celui-ci ou de phénomènes qui s'y déroulent*.

6. Hamin Baeck, Christina Schwarz, Jing Chen, Hayat Hokayem et Li Zhan. « Engaging Elementary Students in Scientific Modeling : the MoDeLS 5th grade Approach and Finding ». *Models and Modeling*, 2011, vol. 6, pp. 195-218.

7. Pascal Ludwig & Anouk Barberousse. « Les Modèles comme fictions ». *Philosophie*, Minuit, 2000, 68, pp.16-43.

2. MODÈLES ANALOGIQUES

Si les mathématiques fournissent à partir du collège des « *outils puissants pour modéliser des phénomènes* » quantitatifs, la puissance et la généralité de ces modèles formels reposent en bonne part sur les notions de *variable* d'une fonction et d'*inconnue* d'une équation, hors programme à l'école primaire.

Au primaire, un travail de modélisation reposera donc le plus souvent sur des analogies qualitatives entre un objet connu et celui dont on souhaite représenter le fonctionnement. Par ailleurs, en physique, les situations et les comportements étudiés ne feront intervenir qu'un petit nombre de paramètres pertinents, assez facilement identifiables.

Ainsi, on l'a vu, le comportement d'un puits (Fig. 2a & b) pourra-t-il être reproduit en classe (Fig. 2c) en mettant en place des analogues de certains éléments cruciaux comme la corde, la poulie et l'axe qui la supporte. On n'est ici intéressé que par leur *fonction* et la poulie peut, par exemple, être avantageusement remplacée par une roulotte de récupération, voire un tube de papier-toilette. De nombreux autres paramètres, comme la présence ou non d'eau au fond du puits, la couleur de la margelle ou la matière de la corde s'avèrent rapidement indifférents.



Figure 2a, b & c : à gauche , le puits de Plouf ! ; au centre, un puits réel ; à droite, un modèle analogique

La manipulation de modèles analogiques consiste alors, dans les termes de Jean Gayon, « à utiliser les propriétés connues d'un artefact que l'homme connaît pour l'avoir conçu, en vue d'expliquer des propriétés inconnues des phénomènes ».⁸

Comme toute activité de modélisation, la mise en place d'un modèle analogique sollicite et permet de travailler, outre les compétences liées à l'identification de paramètres pertinents ou non, celles de recul épistémologique et de navigation entre modèle et système représenté.

Soulignons que ce dernier n'est pas nécessairement un système physique : on peut aussi bien réaliser un modèle analogique d'un puits réel (Fig. 2b) que d'un puits légendaire, comme celui d'Ératosthène, ou encore de celui d'une histoire de pure fiction⁹, comme le *Plouf!* de Philippe Corentin¹⁰ (Fig. 2a), bien connu des enseignants de maternelle.

8. Jean Gayon. « De la catégorie de style en histoire des sciences ». *Alliage*, n°28, 1996.

9. « Aborder les sciences à partir d'albums de jeunesse », La Main à la Pâte, avril 2013. Accessible en ligne : <http://www.fondation-lamap.org/fr/page/17971/comment-faire-aborder-les-sciences-a-partir-dalbums-de-jeunesse> (consulté juin 2015).

3. S'INITIER À LA MODÉLISATION DÈS L'ÉCOLE MATERNELLE ?

« Outils incontournables pour construire, comprendre et dire le monde »,¹¹ les albums jeunesse sont en effet très appréciés des jeunes élèves et peuvent constituer des auxiliaires précieux pour la découverte du monde dès l'école maternelle.¹²

3.1. Des compétences accessibles

La dimension méthodologique de cette première initiation aux sciences peut-elle aller jusqu'à l'acquisition des compétences de base de la modélisation scientifique ?

Opportunité

Les jeux d'imitation font partie de l'environnement familial de l'école maternelle. Les élèves jouent avec des maquettes de garage et des "petites voitures", à la dinette avec de "petites assiettes", "cuisent" des aliments en plastique dans des maquettes de four, etc. Toutefois, le seul enjeu est le plus souvent le plaisir ressenti à jouer, les simplifications opérées sur les jouets ont un caractère arbitraire. L'idée qu'une analogie peut avoir une finalité autre que purement ludique ne va en revanche pas de soi, et nécessite un travail spécifique qui peut par exemple s'appuyer sur un leitmotiv "scientifique" ritualisé du type « *Comment savoir ? On essaie* », appliqué en l'occurrence à la réalisation d'un modèle *en réponse à une question spécifique*.

Recul

Habitué à jouer à "faire comme si", les tout-petits ne sont pas étrangers à une forme de recul. Ils ont bien conscience que ces maquettes et petits objets (cf. Annexe) sont distincts des objets auxquels ils réfèrent.

Les questions susceptibles d'être résolues à l'école maternelle portent bien sûr par construction sur des phénomènes assez simples, bien connus des élèves ou qu'ils peuvent observer en classe. Paradoxalement, cette dernière situation n'est pas très favorable à une approche par la modélisation, dans la mesure où une expérimentation directe sur le système considéré apparaît alors bien plus naturelle.

Un référent fictionnel, extrait par exemple d'un album jeunesse de qualité, fournissant des images pensées pour être compréhensibles par leur jeune public (e.g. le puits de *Plouf !*), peut s'avérer plus propice. S'il est relativement facile de susciter un questionnement stimulant pour les élèves,¹³ qui ont l'habitude de s'immerger dans ces univers imaginaires mais s'avèrent très tôt capables de les distinguer du monde physique,¹⁴ toute expérimentation directe y est impossible, et la modélisation

10. Philippe Corentin. *Plouf !* Ed. Ecole des loisirs, 1991.

11. Yves Reuter. Récits et disciplines scolaires. *Pratiques*, n° 133-134, 2007.

12. « Aborder les sciences à partir d'albums de jeunesse », La Main à la Pâte, avril 2013. Accessible en ligne : <http://www.fondation-lamap.org/fr/page/17971/comment-faire-aborder-les-sciences-a-partir-dalbums-de-jeunesse> (consulté juin 2015).

13. Estelle Blanquet, « Vrai pas vrai vs. possible, pas possible : Importance d'une formulation productive pour une investigation à partir d'albums jeunesse » in *Réveille-moi les sciences*, dir. T. Evrard & B. Amaury, Louvain-la-Neuve, éd. de Boeck, 2012. pp. 71-77.

14. J. Wooley & V. Cox, « Development of Beliefs about Storybook Reality », *Developmental Science*, 10 (5), 2007, pp. 681-693.

s'impose assez naturellement pour déterminer si « on peut faire comme dans l'histoire ».

En découverte du monde, on se limitera de préférence aux mondes imaginaires obéissant, en apparence du moins,¹⁵ aux mêmes lois physiques que la réalité consensuelle, sans s'arrêter toutefois aux conventions littéraires aisément identifiables en tant que telles (e.g. animaux habillés et doués de parole, etc.).

Identification de paramètres pertinents

À l'école maternelle, c'est en général l'enseignant qui définira les paramètres pertinents et présentera en détail l'analogie entre les différents éléments du modèle et leurs référents. On peut alors se satisfaire de l'appropriation de ce premier modèle analogique par les élèves idéalement après qu'ils l'ont testé et validé.

Il est également possible de travailler spécifiquement la compétence d'identification de paramètres pertinents avec de très jeunes élèves. On peut ainsi leur demander d'estimer l'impact d'une modification d'un paramètre (comme la couleur, la forme, la matière etc.) sur le résultat et de distinguer les éléments essentiels des paramètres indifférents. On peut ensuite leur proposer d'évaluer des modèles analogiques alternatifs, comparables sous certains aspects mais pas sous tous. Les élèves sont alors encouragés à comparer terme à terme les éléments constitutifs des différents modèles analogiques. Ils peuvent ainsi dégager ce qui peut être changé sans impact sur le résultat et ce qui ne peut pas l'être avant de le vérifier. Ils peuvent également identifier des éléments dont l'absence n'est pas préjudiciable au résultat et en déduire qu'ils étaient superflus.

Navigation entre modèle et système représenté

Comme dans le cas de l'approche ludique d'une « petite voiture », la construction et la manipulation d'un modèle analogique peuvent être perçues comme des fins en soi. Le rappel récurrent de la question initiale (e.g. *Peut-on faire comme dans l'histoire ?*) est donc essentiel pour amener les élèves à se rapporter régulièrement au référent. Sa formulation est également cruciale : la question doit être à la fois assez précise pour stimuler leur curiosité, et assez ouverte pour justifier des approfondissements successifs de la comparaison entre le modèle et son référent.

Un autre écueil est le risque que la réponse apparaisse évidente du seul fait du contexte scolaire : si l'enseignant propose un modèle, c'est bien sûr qu'il "marche" à coup sûr... De ce point de vue, des situations de départ anti-intuitives ou la possibilité d'une histoire contrefactuelle¹⁶ occasionnelle peuvent contribuer à maintenir la curiosité des élèves en éveil, et les inciter à naviguer systématiquement entre un modèle et son référent pour s'assurer de sa validité.

15. Éric Picholle, « Science et fiction spéculative : les jeux du plausible » in *Science et fictions à l'école : un outil transdisciplinaire pour l'investigation ?* dir. E. Blanquet & É. Picholle, Nice, éd. du Somnium, 2011. pp. 39–51.

16. Estelle Blanquet & Éric Picholle, « Déjantages, ellipses et incohérences formatives » in *Science et fictions à l'école : un outil transdisciplinaire pour l'investigation ?* dir. E. Blanquet & É. Picholle, Nice, éd. du Somnium, 2011. pp. 123–132.

3.2. Un exemple de mise en œuvre : le puits de *Plouf!*

Un tel travail peut être réalisé à l'école maternelle à partir de l'album jeunesse *Plouf!* de Philippe Corentin. L'intrigue avance grâce à un dispositif technique simple (Fig. 2a), dont il est facile de réaliser en classe un modèle analogique (Fig. 2c) : une poulie, une corde et un seau, au moyen desquels les personnages se succèdent au fond du puits, chacun faisant remonter celui qui les y précédait.



Figure 3 : La descente du cochon dans le monde imaginaire de *Plouf!* (à gauche) et sa simulation analogique (à droite)

L'histoire comporte toutefois un paradoxe physique, élémentaire mais se fondant si bien dans la dynamique narrative qu'il en devient transparent. Elle met en scène un loup qui, croyant voir un fromage au fond d'un puits, s'y retrouve piégé (Fig. 4). Il parvient à remonter en y attirant un cochon. Le cochon piège à son tour des lapins qui se retrouvent au fond du puits avant d'être enfin remontés par le loup du début. Cette dernière étape est clairement contrefactuelle, le loup ne pouvant logiquement être à la fois le plus léger et le plus lourd des personnages.



Figure 4 : Les différentes étapes de *Plouf!*

La séquence que nous avons conçue¹⁷ invite les élèves à s'interroger sur la possibilité pour les personnages de monter et descendre « comme dans l'histoire ». L'enseignant en propose une simulation analogique, avec des personnages fabriqués de façon à ce que le début de l'histoire y soit réalisable (e.g. en pâte à modeler, avec un loup plus

17. Séquences M11 du guide *Sciences à l'école côté jardin. Le Guide pratique de l'enseignant*, pp. 341-346, (Annexe 2.A.) et chapitre « Un Cas d'école (maternelle) : *Plouf!* de Philippe Corentin » in *Sciences et fictions à l'école : un outil pour l'enseignement des sciences ?* ; op. cit., pp. 179-202.

léger que le cochon lui même plus léger que les trois lapins).

Les simulations successives mettent ensuite en évidence l'impossibilité de réaliser de la même façon la dernière étape. L'attention des élèves se reporte alors sur le fonctionnement de la poulie qui ne permet pas à un personnage d'être remonté par un autre plus léger que lui.

On s'intéresse ici aux seuls aspects mécaniques liés aux déplacements des personnages. Le déroulement de la séquence permet alors de développer chez les élèves à la fois des compétences relatives à des contenus scientifiques et des compétences méthodologiques de modélisation pré-scientifique :

— Avec la simulation de l'histoire et l'utilisation de la poulie, ils peuvent construire ou affiner la distinction entre volume et poids d'un objet.

— D'un point de vue méthodologique, ils sont invités à réaliser un modèle analogique et donc à travailler le *recul*. Sa construction peut entraîner une réflexion sur le statut du puits réalisé en classe, en particulier sa distinction d'un puits du monde physique et du puits de l'histoire, et même parfois des négociations explicites entre élèves sur leurs statuts respectifs.

Exemple de négociation explicite entre élèves de Grande Section sur le statut d'un modèle de puits :

- « — Oh mais c'est un puits ça ! /.../
- Ca ressemble à un puits. /.../
- Si je vous dis que c'est pas un puits c'est que c'est pas un puits.
- C'est un puits fabriqué. C'est pas un puits qu'on a construit ça ! »

Cette modélisation est réalisée avec un objectif précis, tester l'histoire et donc *naviguer entre le modèle analogique et le système représenté dans l'histoire*. Cela conduit les élèves à comparer terme à terme certains éléments de l'histoire pour évaluer si leur équivalent analogique est ou non recevable.

Exemple de navigation entre le puits de l'histoire et le modèle analogique par des élèves de GS [Interview]

- « — Ah, c'est un tronc d'arbre qui le [le puits] tient (montre l'image) /.../
- Et là non ! (montre les barres en plastique du puits modélisé)
- [Adulte] C'est important si c'est différent ?
- Non ! »

Ces aller-retours les amènent, après avoir constaté la dissonance entre l'histoire et l'expérience, à discuter le statut de l'histoire et à *donner la primauté à ce qu'il se passe dans le monde physique*.

Exemple de prise en compte de la primauté de l'expérience par des élèves de GS [Interview]

- « — Moi au début je pensais que c'était possible mais là comme on a vu. Je croyais que c'était possible mais maintenant je dis que c'est plus possible parce qu'on l'a fait. »

Par ailleurs, en refaisant plusieurs fois les manipulations (reproductibilité) et en variant la matière et la forme des personnages utilisés, la matière et la taille de la

poulie, la couleur des différents éléments (robustesse¹⁸) il est possible de *dégager les paramètres pertinents* (i.e. poids des personnages et présence d'une poulie) et même de formuler une loi générale : « *quand on utilise une poulie, c'est toujours le plus lourd qui descend* ».

Exemple d'identification de paramètres pertinents ou non par des élèves de GS

« — [Ce n'est pas possible d'utiliser ce puits] *Parce que là, il n'y a pas une petite poulie qui fait descendre ou monter* [les personnages]. »

« — *Mais il faut mettre de l'eau !* »

« — *Mais non !* »

« — *On s'en fout de la couleur !* »

Sous réserve du choix d'outils adaptés, comme les albums jeunesse, et que l'enseignant prenne le temps d'explicitier ce que les élèves sont en train de faire et de les solliciter régulièrement pour qu'ils gardent en tête l'objectif de comparaison du modèle analogique à son référent, les trois compétences fondamentales associées à la modélisation apparaissent donc accessibles dès l'école maternelle, et en tout cas dès la grande section.

L'expérience prouve que ces derniers y prennent un grand plaisir dès lors qu'ils ont compris ce "jeu", et que ces compétences semblent durablement acquises, au moins à l'échelle de la classe suivante¹⁹ (un suivi de cohorte plus systématique serait nécessaire pour en observer les conséquences à plus long terme).

4. À L'ÉCOLE ÉLÉMENTAIRE, DES MODÈLES QUALITATIFS POUR DES ENJEUX SCIENTIFIQUES

Les mêmes compétences sont bien sûr accessibles *a fortiori* aux élèves de l'école élémentaire. On même constate que l'analyse d'un album conçu pour les tout-petits, comme *Plouf !*, peut encore passionner une classe de Cours Moyen.

L'élargissement de leur connaissance du monde et de leur capacité à comparer le comportement d'un modèle réalisé en classe à celui d'un référent connu mais absent permettent d'envisager la modélisation analogique de systèmes relativement complexes. Celle-ci peut même constituer la seule méthode expérimentale disponible pour développer une démarche d'investigation sur des systèmes inaccessibles, comme une articulation humaine, en biologie, les mouvements de la Terre en géologie, ou encore les phénomènes d'alternance du jour et de la nuit, des saisons et des phases de la Lune en astronomie, comme le proposent par exemple les programmes français.

Des subtilités épistémologiques peuvent également apparaître et être maîtrisées en cycle 3, comme la coexistence et la complémentarité de plusieurs modèles différents

18. Estelle Blanquet & Éric Picholle. « Faire et refaire : varier les paramètres d'une expérience pour formuler une loi plus robuste » in *Réveille-moi les sciences*, dir. T. Evrard & B. Amaury, Louvain-la-Neuve, éd. de Boeck, 2012. pp. 71–77.

19. Blanquet, E. & Picholle, É. (2012). « Réception et analyse d'une fiction contrefactuelle : une approche de la primauté de l'expérience à l'école primaire ». Actes des Septièmes rencontres scientifiques de l'ARDIST, 14-16 mars 2012, Bordeaux. Accessible sur le site de l'ARDIST : http://ardist.org/wp-content/Actes2012_Bordeaux.pdf

partageant un même référent, le caractère discriminant ou non d'une expérience à l'égard d'un modèle.

4.1. Pour comprendre l'astronomie... et le statut du modèle scientifique

Une séquence classique sur l'alternance du jour et de la nuit²⁰ en fin d'école élémentaire (10-11 ans) permet de mettre en évidence l'intrication du travail de construction de connaissances scientifiques sophistiquées et de celui d'approfondissement de la compréhension du statut des modèles.

Coexistence de plusieurs modèles

La séquence propose deux modèles analogiques complémentaires du phénomène : l'utilisation, d'une part, d'une ronde d'élèves pour représenter la Terre et d'un élève isolé pour représenter le Soleil (Figure 5a), et d'autre part d'une boule en polystyrène et d'une lampe (Figure 5b).

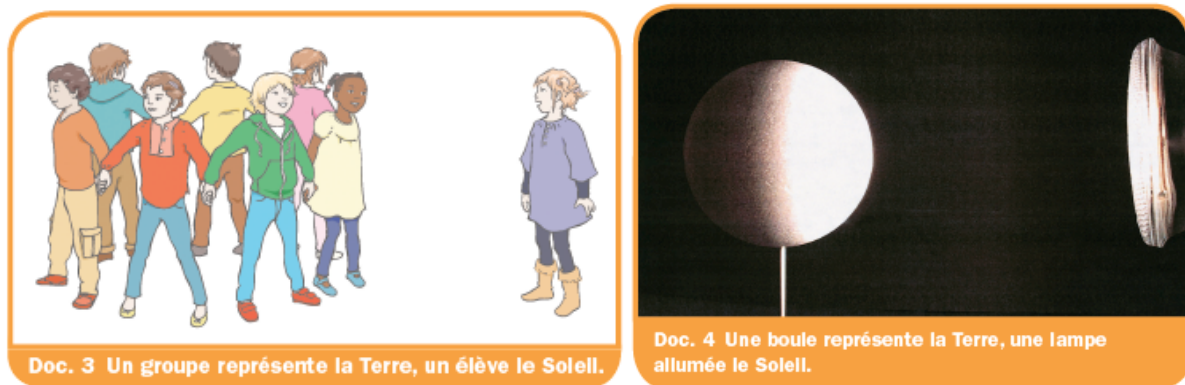


Figure 5a & b : Deux modélisations analogiques du système Terre-Soleil

Tous deux permettent effectivement de trouver la réponse à la question posée, dès lors que les élèves identifient dans chacun les éléments pertinents pour repérer si un endroit du globe est "dans le jour" ou "dans la nuit". L'enseignant peut alors discuter avec ses élèves de la possibilité d'utiliser indifféremment un modèle ou l'autre pour chercher la réponse à la question et d'établir une équivalence entre les deux modèles.

Cette discussion permet aux élèves de réfléchir au caractère arbitraire d'une modélisation analogique et sur le fait que deux modèles d'apparence très différente peuvent s'avérer équivalents pour un problème donné. Elle permet aussi de revenir sur la notion de paramètre, pertinent ou indifférent. Ainsi, la possibilité de se repérer sur l'analogie de la Terre, chaque enfant représentant une latitude donnée dans la ronde quand la sphère de polystyrène présente une symétrie de rotation, est-elle indifférente pour le pur problème d'alternance jour/nuit, mais peut devenir pertinente dès lors qu'on se demande quand telle et telle ville sont simultanément dans une période diurne.

20. *Sciences expérimentales et Technologie, CM1, Tout le programme en 24 enquêtes*. Collection Odysséo, éd. Magnard, p. 11.

Limites de l'outil

La séquence propose ensuite de tenter de départager deux hypothèses astronomiques historiques, le "système de Ptolémée" et celui de Copernic. Les deux modèles analogiques développés en classe étant compatibles avec les observations, l'enseignant doit s'en tenir aux résultats qu'ils permettent d'établir et résister à la tentation d'éliminer l'hypothèse de Ptolémée en faisant appel à un argument de soi-disant "bons sens" (e.g. "tout le monde sait bien que") ou d'autorité (e.g. "les scientifiques ont montré que"). Il est en effet illégitime, et contre-productif en termes d'initiation à la modélisation, d'exclure un modèle qui rend compte d'un phénomène physique sur de tels arguments.

La seule conclusion possible (et d'ailleurs scientifiquement correcte) est l'impossibilité de conclure sur la base de ces modèles, en l'occurrence de « *trancher entre l'hypothèse de Ptolémée et celle de Copernic* », pour reprendre la formulation du manuel Magnard (Fig. 6).

► Pour être sûr d'avoir bien compris

- Sur la fiche d'activité, complète par *oui* ou par *non* les cases vides du tableau.

	Système de Ptolémée : Terre immobile, Soleil tournant autour de la Terre	Système de Copernic : Soleil immobile, Terre tournant sur elle-même
Les élèves de la ronde sont-ils successivement face à « l'élève Soleil », puis dos à lui ?		
Sur la maquette, un point de la boule est-il successivement dans la lumière, puis dans l'ombre ?		

- Grâce à ces méthodes, peut-on trancher entre l'hypothèse de Ptolémée et celle de Copernic ?

Figure 6 : Mise en relation d'observations sur des modèles analogiques et de la validation des modèles pour représenter l'alternance jour/nuit

C'est encore une leçon importante : la modélisation n'est pas une opération magique permettant de répondre à coup sûr à n'importe quelle question, mais une stratégie scientifique, souvent efficace mais parfois mise en échec ou inadaptée à une question donnée, comme peut l'être n'importe quel outil.

4.2. Premiers modèles formels

Le choix de privilégier les modèles analogiques à l'école primaire ne signifie pas qu'il faille s'y interdire toute forme de formalisation. Au cycle 3, l'usage de symboles peut grandement faciliter la mise en commun et la discussion des résultats d'expérience. Ainsi, au tableau, les symboles m_{L} , m_{C} et m_{Lap} remplaceront-ils avantageusement les expressions complètes "masse du Loup/du Cochon/ des Lapins". Plus abstrait encore (à peine...), les masses et les distances à l'axe intervenant dans un problème de levier pourront s'appeler m_1 , m_2 , d_1 et d_2 , etc. (Fig. 7).

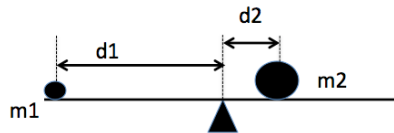


Figure 7 : Schéma d'un équilibre horizontal mettant en évidence les paramètres essentiels (pivot, masses et distances respectives)

Si le niveau des élèves le permet, rien n'interdit alors d'exprimer également de façon formelle les lois qualitatives établies expérimentalement (e.g. à l'équilibre, $m_1 d_1 = m_2 d_2$) — puis de raisonner sur un schéma au tableau : où faudrait-il placer m_2 pour retrouver l'équilibre si l'on amenait m_1 en $2d_1$? Un aller-retour avec le système représenté permet de prévoir de nouvelles situations d'équilibre, de s'assurer de la validité de ce type de représentation et de constater sa puissance.

En toute rigueur, on a ainsi créé un nouveau modèle, formel celui-là. Il ne semble toutefois utile de le souligner que dans le cas d'élèves s'étant effectivement approprié la stratégie de modélisation et susceptibles de percevoir déjà l'intérêt de ce nouveau type de modèle scientifique. Dans tous les cas, cette mathématisation de la physique restera néanmoins à l'école élémentaire aussi modeste que la boîte à outils disponible (typiquement, multiplication, division et proportionnalité pour les élèves de fin de cycle 3, 10-11 ans).

CONCLUSION

Il semble établi que l'on peut développer de nombreuses compétences utiles à toute forme de modélisation scientifique dès l'école primaire, et même dès l'école maternelle. Une fois qu'ils ont compris le jeu de la navigation entre un modèle analogique et son référent, les enfants se font un plaisir de le renouveler, dans la mesure où les démarches d'investigation associées sont choisies avec soin, en particulier, pour que les problèmes envisagés s'avèrent réductibles à un petit nombre de paramètres pertinents, et ne fassent intervenir que des référents physiques accessibles.

Dans certains cas, comme celui des éléments d'astronomie au programme de cycle 3, la modélisation analogique est même la seule voie accessible par une démarche d'investigation expérimentale : tels Monsieur Jourdain, nombre d'enseignants utilisent donc régulièrement la modélisation analogique sans le savoir. Faute d'en identifier les enjeux pour les élèves, ces premiers contacts avec la modélisation ne leur permettent pas de s'approprier cette stratégie.

Dans la mesure où le "choc du formalisme" est une source majeure d'échec, voire de décrochage scolaire au collège et au lycée, et où il pourrait être atténué par une saine compréhension préalable de la stratégie de modélisation et du statut des modèles, il nous semble donc utile d'anticiper les premiers contacts des élèves avec la modélisation scientifique, et de profiter de la souplesse des programmes de science à l'école primaire pour les y accoutumer progressivement, y compris le cas échéant dès l'école maternelle. Cet objectif de formation consistant avant tout à rendre les élèves attentifs au statut des objets qu'ils manipulent et à leur fonction, il est *a priori*

compatible avec les programmes et les pratiques scolaires existantes, dès lors que les enseignants sont conscients de son importance.

A minima, il nous semble donc utile de former les enseignants à développer ces compétences chez leurs élèves. Ces apports d'ordre épistémologiques peuvent être intégrés à une formation plus générale sur la démarche d'investigation ou un contenu disciplinaire.

Une étude plus ample, incluant un suivi de cohorte à moyen et long terme, sera nécessaires pour déterminer si cette approche pédagogique est effectivement susceptible d'avoir une influence significative sur le décrochage en sciences au collège et au lycée. Mais même si elle ne devait pas s'avérer aussi efficace que nous l'espérons, elle se justifierai encore par le plaisir évident des jeunes (voire très jeunes) élèves lors de démarches d'investigation par modélisation analogique, leur enthousiasme et leur soif d'apports construits sur la méthodologie scientifique, dès lors qu'ils commencent à en percevoir la cohérence et à en pressentir la puissance...

ANNEXE : MAQUETTES, PETITS OBJETS, SIMULATIONS ET MODÈLES

Nous nous proposons dans cette annexe de définir les termes de maquette, petit objet, simulation et modèle tels qu'ils sont employés dans cet article.

Maquette et petit objet

On parlera de *maquette* lorsqu'un objet reproduit la *forme* d'un autre objet fonctionnel, comme un avion ou une voiture (on rencontre parfois en français l'expression de *modèle réduit* pour décrire ce que nous avons appelé une maquette ; nous nous abstenons d'utiliser cette expression pour éviter toute confusion entre maquettes et modèles scientifiques). Lorsque c'est sa *fonction* qui est reproduite, on parlera de *petit objet*.

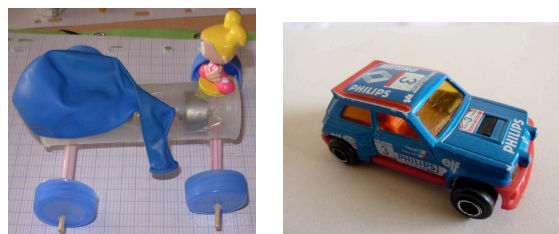
La plupart des maquettes à l'usage des enfants sont elles-mêmes non-fonctionnelles. Certaines toutefois le sont ; on pourra alors parler indifféremment, selon le point de vue, de *maquette fonctionnelle* ou de petit objet.

Ainsi, si l'on définit un avion comme un objet fabriqué qui a des ailes et dont la fonction est de voler, une sculpture d'avion en bois, fidèle à la forme mais incapable de voler sera une maquette, non un « petit avion ».



Maquette en bois d'un Airbus A340²¹

Inversement, un petit objet ne ressemble pas forcément à son objet de référence. Ainsi, si l'on définit une voiture comme quelque chose qui a des roues et dont la fonction est de rouler, une « petite voiture » pourra être aussi bien être une voiture miniature du commerce, d'apparence très reconnaissable— et qui est donc à la fois une petite voiture (elle a des roues et elle roule) et une maquette (elle ressemble à une voiture) —, qu'un objet construit en classe, doté de quatre roues et capable de rouler mais d'apparence plus lointaine. Dans ce dernier cas, l'usage de qualificatifs comme « à nous » ou « notre » (e.g. « notre petite voiture ») par des élèves ou des enseignants indique typiquement que la définition choisie n'est pas celle du garagiste.



Un petite voiture fabriquée par des enfants de 11 ans (à gauche) et une autre du commerce (à droite)

21. Photographie extraite du site : <http://www.quirao.com/fr> (consulté juin 2015)

Simulations

Nous définissons une *simulation* comme une *fiction rendant compte d'une réalisation particulière du monde physique, d'une partie de celui-ci ou d'un phénomène qui s'y déroule*.

Une simulation est donc toujours, par construction, distincte de ce qu'elle représente.

En particulier :

a/ Une simulation n'a, par définition, aucune généralité.

b/ Une simulation peut utiliser des supports très variés (e.g. des mots, des images, des symboles, des maquettes, des petits objets, un programme informatique, des objets physiques). Il va de soi que les traces matérielles d'une simulation (dessin, page de texte imprimé, etc.) relèvent quant à elles du monde physique.

c/ Une simulation est de complexité finie, quand le réel qu'elle représente est toujours inexhaustiblement complexe.

d/ Des simulations très différentes sur la forme comme sur le fond peuvent porter sur le même référent physique.

La vocation principale d'une simulation est le plus souvent de permettre une confrontation directe avec son référent physique. Si tous les paramètres considérés comme pertinents apparaissent conformes, à un niveau de précision donné, la simulation peut être considérée comme validée, à ce niveau de précision du moins. Dans le cas contraire, elle doit être remise en cause, par exemple par la prise en compte de paramètres précédemment omis.

Une simulation doit donc être considérée comme *modifiable*.

Par ailleurs, la validité d'une simulation n'est jamais que *provisoire*. En effet, la prise en compte de nouveaux paramètres pertinents peut introduire une dissonance entre une simulation précédemment tenue pour valide et son référent.

Une simulation peut prendre des formes très différentes (e.g. analytique, informatique etc.). On s'intéresse plus particulièrement à l'école primaire aux simulations analogiques. Une simulation analogique repose sur une analogie entre certains éléments du système référent et ceux de sa simulation. Elle est souvent associée à une maquette ou à un petit objet ; mais elle peut également exister par elle-même, dans l'esprit de son concepteur.

Modèles

On peut également souhaiter rendre compte d'une famille de réalisations (par opposition à une réalisation particulière) du monde physique. Il ne s'agit alors plus de simulation (puisque cela ne porte plus sur un cas particulier) mais de *modélisation*.

Nous définissons un *modèle* comme *une fiction dotée d'un certain degré de généralité et dont l'objet est une vision simplifiée du monde physique, d'une partie de celui-ci ou de phénomènes qui s'y déroulent*.

Comme pour les simulations, les modèles peuvent prendre des formes très différentes. On s'intéresse plus particulièrement à l'école primaire aux modèles analogiques (cf. section 2.).