

Sabine Daro - Catégorie pédagogique HELMo - Asbl Hypothèse

Marie- Christine Graftiau - Catégorie pédagogique HELMo - Asbl Hypothèse

Marie- Noelle Hindryckx – Service de didactique des Sciences biologiques – Université de Liège – Asbl Hypothèse

Réfléchir avec les enseignants sur l’usage de la modélisation dans l’enseignement des sciences au fondamental

Présentation d’un outil d’analyse d’activités de modélisation dans le fondamental

Nous proposons un outil d’analyse de pratiques qui peut être utilisé en formation initiale ou continuée des enseignants pour aider à prendre du recul sur des activités d’apprentissage qui font appel à la modélisation. Il permet de susciter un recul critique sur les divers usages des modèles pour faire apprendre les sciences, sur les limites de l’usage des modèles dans l’apprentissage et sur la place de ce type d’activités dans une démarche de construction de savoir.

Pourquoi proposer un tel outil ?

Nous observons fréquemment chez nos étudiants, futurs enseignants, quelques écueils dans l’usage de la modélisation en sciences lors des activités qu’ils proposent en stage.

1. Trop souvent, le modèle est présenté comme étant « la » réalité et s’enseigne sans prendre la précaution de le proposer comme une lecture du monde possible. Le modèle, par la simplification qu’il apporte, donne alors une illusion de compréhension aux apprenants, mais cet apprentissage s’avère ensuite peu opérationnel pour approcher le réel.
2. Les étudiants confondent modélisation et expérimentation : le modèle, même dynamique, donne une réponse stéréotypée, celle pensée par le concepteur (modélisation), qui n’est en rien une réponse du réel à une mise à l’épreuve de ce réel (expérimentation). Par-là, il impose le mode de communication (le modèle) comme mode de pensée.
3. Devant un schéma animé explicatif des phénomènes qu’ils veulent faire apprendre, les étudiants n’ont pas toujours le recul nécessaire pour se rendre compte des simplifications et abstractions que contient le modèle. Celles-ci sont pourtant des obstacles possibles pour leurs élèves (exemple : le schéma du cycle de l’eau qui, par simplification graphique, semble dire qu’il ne pleut que sur terre et que l’eau ne s’évapore que sur mer).
4. L’usage principal des étudiants est l’utilisation des modèles pour illustrer un savoir ; ils placent rarement leurs élèves dans la situation de construire un modèle.
5. Les limites du modèle ne sont généralement pas abordées.
6. Le modèle est plus souvent utilisé dans sa fonction descriptive que dans sa fonctionnalité. Par exemple, la consigne « représente le trajet des aliments dans ton corps » aboutira à un modèle descriptif alors que la consigne « représente comment ce que tu manges donne de l’énergie à tes muscles » mènera la réflexion vers des aspects fonctionnels et permettra l’élaboration de savoirs plus puissants. (Rem. : Cet exemple est repris de « Enseigner les sciences » de C. Orange (2012), qui aborde l’importance de bien poser le problème dans une

séquence d'apprentissage.

Avant de vous présenter cet outil d'analyse et deux exemples de son application, il nous semble nécessaire de clarifier dans le paragraphe qui suit, notre acception du terme « modélisation » et son usage dans une démarche d'apprentissage.

La modélisation dans une démarche d'apprentissage

Un modèle est une représentation simplifiée, relativement abstraite d'un processus, d'un système, construit en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir. Le modèle réduit la complexité du réel afin de faire comprendre ce réel. Dans le domaine scientifique, un modèle est une construction matérielle ou abstraite « ressemblant » à l'objet. Il est modélisé selon un certain nombre de caractéristiques pertinentes au regard des données disponibles et/ou de l'objectif de communication poursuivi. Ainsi, le modèle est souvent utilisé dans une perspective de vulgarisation des sciences.

Dans le cadre de cette réflexion, nous avons restreint la définition de modèle au modèle 3D. Même si nous considérons que la schématisation est aussi une modélisation, entamer un débat sur les schémas risquait de nous éloigner de l'objectif que nous nous sommes fixé pour l'outil d'analyse de pratiques proposé.

Dans une démarche d'apprentissage en sciences, on peut construire des réponses à des questions posées en utilisant la modélisation selon deux modes très différents quant à l'activité cognitive qu'elle suscite : utiliser un modèle ou construire un modèle.

Utiliser un modèle

Illustrer les phases de la lune en utilisant un montage animé comprenant une lampe, une balle qui modélise la Terre et une autre modélisant la Lune, c'est utiliser un modèle. C'est la même démarche lorsque l'on consulte des schémas de coupe d'un fruit.

Pour l'élève, le modèle, bien qu'utilisé dans un souci de clarté et de simplification, n'est pas toujours au service de la compréhension de la réalité. En effet, souvent il n'apporte un éclaircissement qu'à ceux qui connaissent déjà ce que le modèle veut expliquer. Approcher un concept en utilisant des modèles, éloigne du réel et entraîne parfois des représentations erronées chez l'apprenant. En conséquence, nous pensons que l'utilisation de modèles existants (comme toute activité à visée descriptive) trouve sa place après l'utilisation d'approches concrètes, qu'elles soient des expériences ou des observations du réel. En effet, l'utilisation de modèles n'est pas une activité qui va permettre, à elle seule, l'apprentissage, mais elle peut compléter une démarche d'investigation et prendre sa place lors de l'étape de structuration des apprentissages.

Comme le précisent Sanchez, Prieur et D. Devallois (2004), il est très important que le modèle ne devienne pas *objet* et *objectif* d'enseignement, ce qui aurait comme conséquence de le présenter comme « vrai », mais de le laisser à sa place *d'outil d'apprentissage*. En fonction de l'âge des élèves et

du sujet abordé, il sera également important de développer un regard critique sur le modèle proposé, en s'intéressant aux limites du modèle, par l'identification de « ce que le modèle ne dit pas ».

Construire un modèle

L'activité de « construction d'un outil qui possède une efficacité descriptive et/ou explicative » (Sanchez & Prieur, 2005) est une activité qui mobilise plus la compréhension de l'apprenant que l'utilisation d'un outil déjà élaboré par autrui.

Réaliser un schéma qui représente les transformations d'énergie dans la maison, c'est construire un modèle. Modéliser un bras articulé à l'aide de cartons et de ficelles relève de la même démarche. Plutôt que de réaliser un répertoire des modèles et modélisations possibles en classe, nous avons choisi de déplacer la question vers les manières de travailler ces modèles en classe. En effet, ce ne sont pas les modèles qui, par leur nature, sont d'un type ou d'un autre, mais l'utilisation que l'on va en faire, la fonction qu'ils prennent pour l'utilisateur en situation de résoudre un problème par la modélisation (Ney, 2007).

Dès lors, La construction de modèles peut être envisagée à plusieurs moments d'une démarche d'apprentissage :

1. la construction de modèles est proposée en tout début, **pour susciter des questions**, pour susciter l'imagination « d'un possible » qui sera confronté ensuite à l'épreuve de la réalité. Par exemple, au début de la séquence sur la reproduction des plantes à fleurs, l'enseignant donne cette consigne : « sachant que la fleur est l'organe de reproduction de la plante, avec le matériel, réaliser une plante qui porte une fleur et raconter comment la plante se reproduit ».

Ici, la modélisation permet de **mobiliser** l'élève dans l'apprentissage. Nous rejoignons, dans cet usage de la modélisation, Giordan (1991) pour qui la modélisation est une démarche qui consiste à « produire une représentation hypothétique se substituant à la réalité pour la décrire et la comprendre » et Martinand (1994) pour qui : « Dans les sciences de la nature, la modélisation consiste à établir des aller-retour entre le monde réel et le monde des modèles ».

La modélisation apparaît alors comme un des moments forts pour tout enseignement scientifique. Elle oblige à sélectionner, hiérarchiser, expliciter à la fois les variables, les hypothèses et les raisonnements effectués.

2. La construction d'un modèle par essais-erreurs peut contribuer à **chercher de l'information**. Par exemple, dans le cas de la construction du « bras articulé », la modélisation est proposée pour amener des éléments de réponses à une question qui se pose en amont : « comment les muscles sont-ils insérés sur les os ? ». L'activité est présentée sous forme d'un défi (il faut que l'avant-bras se lève quand le biceps se contracte). Dès lors, la construction réussie permettra de tirer des conclusions quant à l'insertion musculaire et de corriger une représentation erronée apparue lors d'une collecte préalable des conceptions (beaucoup d'élèves attachent le muscle à un seul os, sans intégrer la fonctionnalité du muscle qui nécessite qu'un muscle soit au moins inséré sur deux os pour permettre le mouvement).


3. La tâche « construire un modèle » peut aussi s'envisager (cas le plus fréquent) à la fin d'une séquence, car elle constitue la synthèse et participe à la **structuration des apprentissages**. Il est alors important de ne pas faire la confusion qui placerait, à tort, l'activité de modélisation sur un même pied que « faire une expérience ». Si elle est annoncée en début de démarche, comme projet de communication, la modélisation peut participer à la **mobilisation** des élèves. Toutefois, pour éviter une impression de « construction-bricolage » et aboutir à un réel apprentissage, des activités annexes et des moments de structuration seront nécessaires.

Présentation de l'outil d'analyse

L'objectif de cet outil est d'analyser des situations d'apprentissage qui font appel au modèle (à construire ou à utiliser), d'en déterminer les apports, de situer le moment de cette activité dans une démarche de construction de savoir et de déterminer les limites de l'activité (ce que l'activité ne permet pas ou les écueils à éviter).

Les critères proposés permettent à l'étudiant, ou à l'enseignant, d'analyser des pratiques de classe. Cette prise de recul peut se faire *a posteriori*, à propos d'activités de classe observées. L'objectif est alors, en se familiarisant avec le cadre d'analyse, de comprendre les diverses modalités de la modélisation et ses usages. L'outil peut aussi être utilisé *a priori*, lors d'une préparation de séquences d'apprentissages afin d'en évaluer la juste portée et de l'améliorer, la compléter si besoin.

Outil d'analyse à propos de la place des modèles dans l'apprentissage au fondamental

Dans l'activité de modélisation proposée il s'agit de :				
l'utilisation d'un modèle existant		la construction d'un modèle par les apprenants		
La fonction du modèle est :				
Statique (qui nomme et décrit)	Dynamique (qui explique, qui propose des liens dans l'espace et/ou dans le temps)	Prédictive (si..., alors...) Cette fonction permet d'explorer les limites de validité du modèle		
La place de l'activité de modélisation dans la démarche d'apprentissage : (d'après - http://www.hypothese.be/PageQuiSommesNous.html)				
Mobiliser l'élève	En faisant construire une modélisation pour récolter les représentations des apprenants			
	En initiant un questionnement pour démarrer une recherche, en confrontant les élèves à différents modèles/représentations d'une même réalité			
Construire des savoirs	En illustrant par un modèle un savoir scientifique lors d'une démarche transmissive (et ainsi apprendre une loi, une explication d'un phénomène)			
	En utilisant plusieurs modèles d'une même réalité pour construire une représentation nuancée			
	En demandant à l'élève de construire un modèle inédit d'une réalité à partir d'autres activités réalisées en amont ou en parallèle (la consultation de documents, l'expérience, une visite, un cours théorique)			
Structurer les apprentissages Institutionnaliser Communiquer	En proposant d'intégrer / synthétiser tous les apprentissages réalisés en amont dans la réalisation d'un modèle inédit			
	En utilisant/montrant un modèle qui intègre les apprentissages réalisés en amont			
	En proposant comme projet une construction d'un modèle pour communiquer le savoir des scientifiques sur un thème défini			
Le degré de proximité du modèle utilisé avec la réalité (Situer le curseur entre les deux extrêmes)				
<p>Le modèle semble très proche de la réalité</p> <p>(ex : graphisme qui tend vers le réalisme)</p>			<p>Le modèle est très éloigné de la réalité qu'il représente et demande de la part de l'apprenant un certain degré d'abstraction ou une connivence avec les codes utilisés (symbolisme élevé)</p>	
Degré d'institutionnalisation du modèle				
Modèle empirique qui reflète une représentation individuelle	Modèle validé par le groupe comme étant le reflet d'un savoir collectif, justifié par les connaissances collectives	Modèle validé par l'enseignant comme état des connaissances en fonction de l'âge de ses élèves ; validé par les prescrits scolaires	Modèle communément admis par la communauté scientifique (savoir savant, savoir constitué)	

Outil d'analyse à propos des limites d'utilisation des modèles dans l'apprentissage au fondamental

Il est important d'explorer (avec les apprenants) les limites de validité du modèle. Le modèle n'est pas le réel. Le modèle est une représentation de l'objet modélisé, selon des choix orientés en fonction de l'objectif poursuivi par l'auteur. De plus, ce dernier est soumis à des limites techniques qui ne lui permettent pas de représenter tous les éléments de l'objet d'étude.

Ce que le modèle dit -et ce qu'il ne dit- pas du réel	
Les limites du modèle :	
Ne sont jamais évoquées	
Sont clairement annoncées par l'enseignant	
Par la présence d'un objectif de communication bien défini en légende du modèle	Qui attire l'attention sur ce que le modèle ne dit pas et qui en détermine les limites (par exemple le champ de validité)
Sont recherchées par les élèves	
Parce que l'enseignant inclut dans l'apprentissage une activité de prise de recul critique par (ou avec) les élèves sur les modèles construits et /ou utilisés (par ex : définir ce que votre modèle explique et ce qu'il n'explique pas)	

Regard de « l'enseignant-didacticien » qui s'interroge sur sa pratique

Quels étaient mes objectifs d'utilisation/de construction du modèle ? Le modèle a-t-il gardé sa place d'outil d'apprentissage ou est-il devenu l'objet de l'apprentissage ?
La place du modèle dans la démarche d'apprentissage a-t-elle permis d'atteindre ces objectifs ?
Quels ont été les obstacles (pour les élèves) à l'utilisation du modèle ?
Ces objectifs ont-ils réellement été acquis chez l'élève ?
En utilisant la modélisation de cette façon, quelle est l'image de la science qui est véhiculée ? <ul style="list-style-type: none">• image dogmatique de la science• image constructiviste : le modèle n'est pas la réalité, il en est une lecture possible, les sciences évoluent dans le temps ...

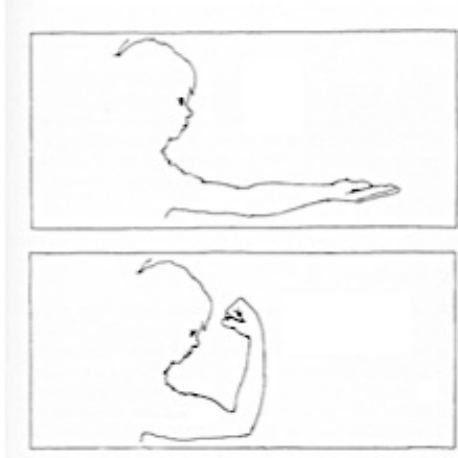
Application de l'outil à des pratiques de classe

Exemple 1 : Activité pour comprendre l'insertion musculaire

Après avoir étudié le squelette (nom des os et rôles), la classe tente de répondre à la question suivante : « qu'est-ce qui rend possible l'extension ou la flexion de ton bras ? ».

Etape 1. Emergence des préconceptions

Pour ce faire, l'enseignant leur propose de dessiner sur la silhouette d'une épaule et d'un bras, les os et ensuite de placer le biceps et le triceps.

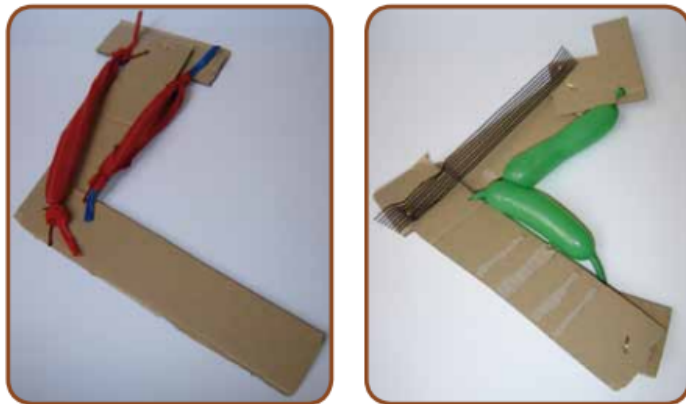


La confrontation des différents dessins permet de mettre en évidence les divergences et les ressemblances entre les modèles mentaux (tout le monde ne pense pas la même chose).

Cela fait émerger des questions, évoluer les représentations de chacun, en montrer les limites. On récupère donc, pour la classe, des « germes » de modèles anonymisés qui vont servir pour la suite du travail.

Etape 2. Construction d'un modèle

Les élèves doivent ensuite construire un modèle qui répond à la consigne : placer un biceps et un triceps sur le bras articulé en carton afin que quand on tire (contracte) le biceps, l'avant-bras se relève (et que quand on tire sur le triceps, l'avant-bras s'étende).



Il s'agit d'une activité qui est choisie parce qu'elle va permettre de faire la nécessaire rupture entre le système explicatif de l'élève et le réel. Si les élèves attachent les muscles comme sur leur dessin de départ, le muscle en se contractant n'aura aucun effet.

La réalisation du modèle permet de comprendre que le muscle doit au moins s'attacher sur l'avant-bras pour « agir sur lui ».

Pour les insertions vers le haut du bras, c'est grâce à la **consultation de documents** que les élèves affinent le modèle réalisé.

Cette construction collective et en trois dimensions des modèles préalable et négociés, permet de se rendre compte des difficultés techniques, des simplifications systématiques et des choix à opérer pour représenter ce qu'on découvre. Il s'agit donc ici d'élaborer un **modèle explicatif** en transposant des éléments observés liés aux mouvements (éventuellement issus des modèles étudiés préalablement, des observations, de la littérature).

Etape 3. Confrontation au réel

Les élèves peuvent ensuite confronter les modèles élaborés à la réalité en disséquant une patte de lapin. Ils réalisent la complexité de la situation réelle (muscles, tendons, ligaments...), par rapport à celle simplifiée du modèle en carton. Cette étape permet donc de comprendre le rôle simplificateur et ainsi réducteur, d'un modèle et grâce à la découverte de la complexité du réel, de comprendre les limites de ce modèle. Cependant, le modèle construit est tout de même utile puisqu'il répond à la question posée au départ (ce qui permet la flexion et l'extension du bras).

Etape 4. Evaluation des apprentissages

Pour évaluer si le processus de modélisation mis en place a abouti à un modèle institutionnalisé chez chacun des élèves, on leur demande de compléter un schéma de la flexion et de l'extension d'un bras et décrire ce qui se passe.

Utilisation de l'outil d'analyse

Si l'on examine cette activité avec la grille d'analyse construite, on peut dire qu'ici, il s'agit bien d'une activité de **construction** d'un modèle par les apprenants. Le modèle à construire est plutôt ce qu'on a appelé un modèle **dynamique**, puisqu'il doit permettre de montrer un mouvement et d'en expliquer les composantes.

La place du modèle dans la démarche d'apprentissage se situe dans l'étape de **construction de savoirs** puisqu'on demande à l'élève de chercher des réponses à la question posée, en construisant un modèle inédit d'une réalité, à partir d'autres activités réalisées en amont ou en parallèle (la consultation de documents, l'expérience sur soi ou la dissection, un cours théorique...).

Le degré de **proximité du modèle construit avec la réalité** est faible, bien que pour l'élève, ces bouts de cartons symbolisent bien l'avant bras. C'est ici la simplification exigée par le bricolage, qui va faire que le modèle sera éloigné de la réalité, tout en mimant certains mouvements du bras.

Le **degré d'institutionnalisation** du modèle construit est celui d'un modèle validé par le groupe classe, reflet d'un savoir collectif, justifié par les connaissances des élèves ; il est même, dans un second temps, validé par l'enseignant comme un état des connaissances de la classe suivant l'âge et les prescrits scolaires de ses élèves.

Les limites du modèle en carton sont tout d'abord méthodologiques : la représentation du mouvement du bras est limitée (glissement) à cause du matériel donné aux élèves. La limite scientifique est également forte : il n'y a pas que le biceps qui peut faire plier le bras... Le champ de validité est faible, mais la dissection permet de bien compléter ce que le modèle ne dit ou ne montre pas. C'est pourquoi cette dissection, même s'il est tentant d'en faire l'impasse, est nécessaire pour revenir vers le réel et éviter une épistémologie dogmatique.

Les limites du modèle peuvent donc apparaître grâce au travail des élèves, encore faut-il que l'enseignant les fasse identifier clairement, oralement ou par écrit.

Il semble donc que la modélisation utilisée de cette façon rencontre bien les objectifs fixés par l'enseignant au départ de l'activité.

Exemple 2 : La tour qui penche : un modèle pour illustrer ce qui définit la stabilité des corps posés

Nous évoquons ici une séquence d'apprentissage à propos de la stabilité des corps posés, décrite dans le livre : « Sciences en classe. Une démarche d'investigation pour donner du sens au cours de sciences entre 10 et 14 ans » Daro S., Graftiau M.-Ch., Stouvenakers N & Hindryckx M.-N. (2011).

Etape 1. Mobilisation

Cette séquence d'apprentissage démarre par différentes évocations de situations qui suscitent l'expression des idées des élèves à propos de la stabilité des objets : un article qui raconte la chute d'un engin de chantier ; une étagère qui est tombée, un vase qui, bien que penché, semble stable ; une photo de la tour de Pise....

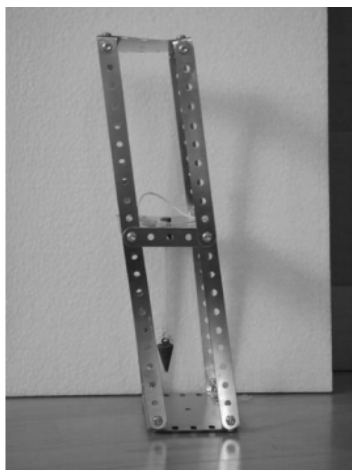
Etape 2. Construire des réponses

Ensuite, diverses activités permettent de déterminer les facteurs qui influencent la stabilité des objets : des activités corporelles pour ressentir les situations de stabilité ou de déséquilibre et un défi de faire tenir des objets non stables par divers moyens. Quelques pistes se dessinent : pour plus de stabilité, il semble qu'il vaut mieux que l'objet soit court ou lesté dans le bas, ou encore qu'il ait une base de surface importante. Sinon, il faudra le soutenir ou le retenir. Diverses expériences permettent ensuite de confirmer ou non ces impressions.

Des élèves ont évoqué le terme de « centre de gravité » comme élément important, sans trop savoir comment il intervient. Un temps de construction de la définition de centre de gravité et la recherche de celui-ci dans des objets divers est alors consacré. Des liens sont faits entre hauteur de l'objet d'une part et répartition de masse dans l'objet d'autre part et variation de la position du centre de gravité.

Ce n'est qu'ensuite qu'une tour inclinable au centre de gravité de laquelle est attaché un fil à plomb, est proposée aux élèves.

Etape 3. Observation d'un modèle : la tour penchée



En inclinant la tour, le fil à plomb indique nettement que s'il reste dans le périmètre de base, la tour tient, s'il en sort, la tour tombe. Il s'agit d'un modèle animé qui illustre la loi de stabilité des corps posés. La loi est alors exprimée en ces termes : la verticale abaissée au centre de gravité de l'objet doit passer par la base de sustentation pour avoir un équilibre stable.

Un retour aux situations rencontrées en amont permet une application de cette loi.

Utilisation de l'outil d'analyse

Dans cette séquence, l'enseignant **utilise un modèle** préexistant pour illustrer la loi de stabilité des corps posés, à savoir : « Pour qu'un objet soit en équilibre stable, la verticale abaissée au centre de gravité de l'objet doit passer par la base de sustentation ».

Il s'agit d'un modèle **dynamique**, qui permet à l'observateur de faire des liens entre la position du fil à plomb et la chute ou non de l'objet.

La place du modèle dans la démarche d'apprentissage se situe dans l'étape de **structuration des savoirs**. Le modèle est ici utilisé en synthèse. Il prend place dans la séquence après toute une série d'activités concrètes qui permettent à l'élève de donner sens à cet objet animé qui généralise, *in fine*, les apprentissages réalisés en amont.

Le degré de **proximité du modèle construit avec la réalité** est élevé car il s'agit d'une tour qui, dès qu'on l'incline un peu, évoque chez les élèves la tour de Pise. La présence du fil à plomb matérialise « la verticale abaissée au centre de gravité » énoncée dans la loi. Concernant **le degré d'institutionnalisation du modèle**, comme celui-ci est une illustration animée de la loi, on peut dire que le degré est élevé. Il est le modèle communément admis par la communauté scientifique. Il est le reflet du savoir constitué.

Le modèle est explicite, mais présente certaines **limites** dans son usage didactique. En effet, le modèle comme la loi qu'il illustre, est une abstraction qui, même si elle semble limpide, ne permet pas à l'élève de faire des liens avec son savoir empirique. Quel lien entre ce fil à plomb qui passe ou non dans la base de sustentation et la stabilité exemplaire de la tasse de bébé lestée de plomb ? Nous pensons que l'utilisation d'un modèle comme celui-ci, n'a de sens que si elle se vit en synthèse d'une recherche qui permet à l'élève d'approcher des facteurs plus tangibles tels que la hauteur de l'objet et la répartition de la masse dans l'objet. L'usage de ce type de modèle qui illustre une loi de manière très explicite peut, si on n'y fait garde, devenir une activité très dogmatique. Par exemple, si l'utilisation du modèle par les élèves était la seule activité d'apprentissage proposée (comme c'est d'ailleurs souvent le cas en classe de sciences), la loi serait certainement acceptée et retenue, mais resterait un vernis de savoir, non opérationnel pour comprendre pourquoi il vaut mieux, dans une étagère, mettre les objets les plus lourds dans le bas.

Par contre, tel qu'il est proposé ici dans la séquence, il nous semble à sa juste place. En effet, il est proposé à la fin, en synthèse, et les liens avec le vécu concret se font alors très naturellement chez l'élève. Le modèle a gardé sa place d'outil d'apprentissage ; il n'est pas l'objet de l'apprentissage.

Pour en savoir plus à propos de la modélisation

Bereiter, C. (2002). *Education and Mind in the Knowledge Age* (second ed.) Mahwah, New Jersey, United States : Lawrence Erlbaum Associates.

Coquide, M. & Le Maréchal, J.-F. (2006). *Modélisation et simulation dans l'enseignement scientifique : usages et impacts*. Aster. 7-16.

Daro S., Graftiau M.-Ch., Stouvenakers N & Hindryckx M.-N. (2011). *Sciences en classe. Une démarche d'investigation pour donner du sens au cours de sciences entre 10 et 14 ans*. Namur : Labor Education. Giordan, A. (1991). *La modélisation dans l'enseignement et la vulgarisation des sciences, Impact : science et société*, no 164

Kopp, R., & Lombard, F. (2012). *La modélisation en biologie, comment la traiter en classe ?* Institut universitaire de Formation des Enseignants. Formation en Enseignement secondaire. Université de Genève.

Martinand, J.-L. (1994). *Introduction à la modélisation. Séminaire de Didactique des disciplines technologiques*, Paris : INRP.

Ney, M. (2007). *Modélisation formelle en sciences expérimentales : problématiques de la transmission*, Mémoire Université Claude Bernard, Lyon I.

Orange C. (2012). *Enseigner les sciences. Problèmes, débats et savoirs scientifiques en classe*. De Boeck, Louvain-la-Neuve.

Sanchez E., Prieur M., *Place et rôle des modèles dans l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre* , INRP 2005 <http://acces.inrp.fr>

Sanchez E., Prieur M., Devallois D., *L'enseignement des sciences de la Terre en seconde* – INRP 2004 http://acces.inrp.fr/Access/biotic/enquete-ST/Textes/Rapport_de_recherche_enquete