

Extraits de la thèse de Tran Kiem Minh, « apprentissage des fonctions au lycée avec un environnement logiciel : situations d'apprentissage et genèse instrumentale des élèves », 2011.

directeur : JB Lagrange.

[...]

2.1 APPROCHE INSTRUMENTALE

2.1.1 Introduction

Drijvers et al. (2010) s'intéressent aux cadres théoriques susceptibles d'éclairer les recherches récentes dans le domaine des TICE. Ils situent la théorie de l'instrumentation (Vérillon & Rabardel, 1995) comme un cadre important et fructueux. L'approche instrumentale, le corps de cette théorie, est particulièrement développée par des chercheurs français en relation avec une évolution des études en didactique des mathématiques sur les problèmes d'intégration des TICE. Plusieurs recherches dans le domaine de l'intégration des TICE dans l'enseignement/l'apprentissage des mathématiques ont utilisé l'approche instrumentale comme un cadre théorique essentiel. Citons ici, de façon non exhaustive, des travaux sur l'usage des technologies dans l'enseignement des mathématiques utilisant les éléments théoriques de cette approche : Guin & Trouche, 1999 ; Artigue, 1997 ; Artigue, 2002 ; Lagrange, 2000 ; Guin, Ruthven, & Trouche, 2005 ; Haspekian, 2005 ; Bueno-Ravel & Gueudet, 2009...

2.1.2 Fondements de l'approche instrumentale utilisée en didactique

a. Des artefacts aux instruments mathématiques

L'approche instrumentale se situe dans la perspective socio-culturelle de Vygotsky sur les processus d'apprentissage. Les fondements théoriques de l'approche instrumentale comprennent des éléments de l'ergonomie cognitive (Vérillon & Rabardel, 1995) et de la théorie anthropologique du didactique (Chevallard, 1999). Le point de départ essentiel de cette approche est la distinction entre artefact et instrument (Rabardel, 1995). Un *artefact* est souvent, mais non nécessairement, un objet physique de l'activité humaine, conçu pour des activités spécifiques. Une règle, une calculatrice, un logiciel de géométrie dynamique sont des artefacts. La fonctionnalité de déplacement d'un logiciel géométrique est aussi un artefact. Un scénario pour l'utilisation d'un logiciel de calcul formel dans l'enseignement de l'algèbre en environnement numérique, par exemple, est un artefact que l'enseignant peut utiliser pour ajuster son enseignement. La manière dont l'artefact est utilisé est non triviale. Pour un type de tâche donné, l'utilisateur construit et développe des structures cognitives (des schèmes d'utilisation ou des techniques) lors de l'usage de l'artefact pour réaliser ce type de tâche. Selon Rabardel, nous pouvons appeler : *un instrument* l'ensemble constitué d'une partie de l'artefact et des schèmes personnels d'utilisation, pour un type de tâche donné. La distinction entre artefact et instrument nous a conduit à deux remarques importantes :

- Un instrument n'est pas spontanément disponible mais il est construit par l'individu à travers un processus.
- Ce processus de construction et l'instrument lui-même ne sont pas neutres, ils ont un impact sur la conceptualisation.

b. Genèse instrumentale

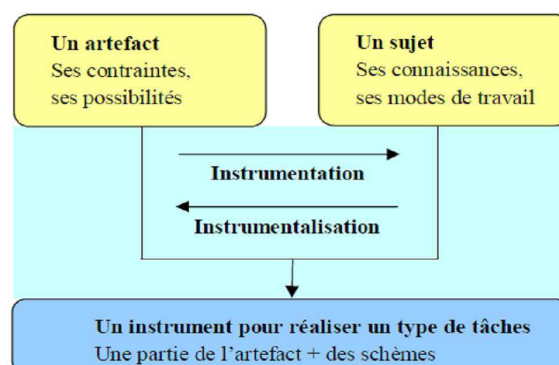


Figure 2.1. La genèse instrumentale (Trouche, 2004)

Un instrument est ainsi une entité mixte, constituée d'une partie de l'artefact mobilisée par l'individu et d'une composante psychologique, les schèmes. Le processus de construction de cet instrument est appelé genèse instrumentale, portant sur l'appropriation des schèmes d'utilisation.

Au cours de la genèse instrumentale, une relation bilatérale entre artefact et sujet est établie :

- vers l'artefact : les connaissances du sujet le guident d'une part pour mettre l'artefact « à sa main ». Ce processus est appelé instrumentalisation (sélection, production de fonctions, les diverses potentialités de l'outil sont progressivement découvertes par le sujet, éventuellement transformées de façon propre,...)
- vers le sujet : les potentialités et les contraintes de l'artefact influencent et conditionnent l'action et les stratégies de résolution de problèmes du sujet. Ce processus est appelé instrumentation (construction des schèmes d'utilisation et de leur fonctionnement, assimilation d'artefact nouveaux à des schèmes déjà constitués,...).

La nature duale de l'instrumentalisation et l'instrumentation au sein de la genèse instrumentale se manifeste à travers la pensée des sujets. En effet, d'une part, la pensée des sujets est influencée par l'usage de l'artefact, et d'autre part, cette pensée détermine également la construction de l'instrument. La genèse instrumentale est un processus complexe, elle nécessite du temps et dépend des caractéristiques de l'artefact (ses potentialités et ses contraintes) et de l'activité du sujet, de ses connaissances et de ses modes de travail. Les recherches en didactique des mathématiques ont montré qu'une telle genèse peut être complexe, même dans le cas des tâches simples comme le cadrage de la représentation graphique d'une fonction dans la fenêtre d'une calculatrice (Guin & Trouche, 1999, p. 217; Artigue, 2002, p. 250).

Pour analyser les processus d'instrumentation, il est nécessaire d'étudier les contraintes et les potentialités d'un artefact, relativement à certains types de tâches. Pour un artefact numérique, Trouche (2002) a distingué trois types de contraintes :

- des *contraintes internes* liées à la nature des matériels (processeur, pixels de l'écran,...) ;
- des *contraintes de commande* liées à la disponibilité et à la syntaxe des commandes ;
- des *contraintes d'organisation*, liées à la disposition du clavier, de l'écran et à l'ergonomie générale de l'artefact.

Les genèses instrumentales sont d'abord des processus individuels. Cependant, ces genèses ont également une dimension sociale, car les élèves développent des schèmes mentaux dans le contexte de la communauté de classe. Hoyles, Noss, & Kent (2004) ont discuté la notion de *situated abstraction* comme un complément à la notion de genèse instrumentale. Selon ces auteurs, bien que les schèmes d'action instrumentée reconnaissent le caractère crucial de l'interaction avec les artefacts lors de l'apprentissage, leur généralité rend d'autant plus important le fait de tenir compte de la façon spécifique dont des connaissances mathématiques ont pu être développées. L'idée principale de la notion de *situated abstraction* est que le processus d'abstraction des propriétés mathématiques est un point clé dans l'apprentissage des mathématiques et que ce processus est à la fois situé et déterminé par les outils utilisés et la relation des utilisateurs avec ces outils. Par conséquent, cette notion est considérée comme utile pour compléter l'idée de la genèse instrumentale de façon à décrire le type de connaissances mathématiques qui émanent de l'activité instrumentée individuelle et collective.

c. Schèmes et techniques

La genèse instrumentale est constituée par le développement des schèmes et des techniques. Les notions de schèmes et de techniques correspondent à deux directions au sein de l'approche instrumentale qui s'associent avec les deux fondements théoriques différents : l'ergonomie cognitive et la théorie anthropologique du didactique (Monaghan, 2007).

Dans l'approche de l'ergonomie cognitive, la notion de schème se fonde sur la définition de Vergnaud (1990). Vergnaud a défini un schème, concept introduit par Piaget (1936), comme l'organisation invariante de la conduite pour une classe donnée de situations. Un schème a trois fonctions principales : une fonction pragmatique (il permet au sujet de réaliser une tâche), une fonction heuristique (il permet au sujet d'anticiper et de planifier son activité) et une fonction épistémique (il permet au sujet de comprendre ce qu'il fait).

Parce que nous voyons ici un schème comme une partie de l'instrument, nous parlons d'un schème d'instrumentation. Au sein des schèmes d'instrumentation, Rabardel (1995) distingue deux types : schèmes d'utilisation et schèmes d'action instrumentée. Les schèmes d'utilisation sont directement liés à l'artefact et concernent plus spécifiquement le côté matériel de l'instrument. Les schèmes d'action instrumentée sont des schèmes constitués par un sujet dans le cadre de la réalisation d'un type de tâches, réalisation assistée par un artefact. Les schèmes ne sont pas observés directement. Ce qui est accessible, pour l'observateur, ce sont les gestes réalisés par un sujet. En effet, quand nous observons un élève qui travaille, nous ne pouvons directement accéder aux schèmes, mais seulement aux actions et gestes exécutés. Les *invariants opératoires* (les

connaissances implicites contenues dans les schèmes) pilotent les gestes, et la répétition des gestes contribue à l'installation de ces invariants opératoires et à l'extension de leur domaine de validité (Trouche, 2007).

Les schèmes sont non seulement individuels mais encore sociaux. Un schème, selon Piaget (1936), est un moyen d'*assimilation* personnelle d'une situation et des objets auxquels il est confronté, mais pour Rabardel & Samurçay (2001), un schème est également le *produit d'une activité d'assimilation* dans laquelle les artefacts disponibles (de l'environnement) jouent un rôle majeur. Les artefacts sont d'ailleurs le produit d'une expérience sociale en ce sens, ils sont toujours des éléments sociaux. Selon Noss & Hoyles (1996), « Tools are not passive, they are active elements of the culture into which they are inserted ». Les schèmes ont toujours une part sociale et la genèse instrumentale combine toujours des aspects individuels et sociaux.

Il est évident que les artefacts sont utilisés dans un contexte social ou institutionnel et la manière dont on voit des activités dans ce contexte est également importante. Plusieurs chercheurs considèrent les activités mathématiques suivant l'approche anthropologique de Chevallard (1999) où les pratiques sont décrites en termes de tâche, technique, technologie et théorie. Les techniques sont considérées donc comme objets institutionnels. De cette perspective, il est important de considérer des conditions institutionnelles qui conditionnent la genèse instrumentale.

Les tâches et techniques sont particulièrement importantes dans les travaux de Lagrange et Artigue (Lagrange, 1999, 2000 ; Artigue, 2002). Artigue (2002) et ses collègues ont réduit les quatre composantes de pratique (Tâche, Technique, Technologie, Théorie) à trois : Tâche, Technique, et Théorisation. Selon ces auteurs, les tâches sont des artefacts qui sont construits (et reconstruits) dans les institutions. Les techniques ne sont pas simplement des manipulations. Dans le cadre théorique Tâche\Technique\Théorisation, le terme « Technique » doit être donné un sens plus large que d'habitude dans les discours éducatifs :

« A technique is a manner of solving a task and, as soon as one goes beyond the body of routine tasks for a given institution, each technique is a complex assembly of reasoning and routine work » (Artigue, 2002, p. 248).

Artigue (2002) et Lagrange (2005a) distinguent entre valeurs pragmatiques et valeurs épistémiques d'une technique. Les valeurs pragmatiques concernent l'efficacité, l'étendue d'application d'une technique. Les valeurs épistémiques concernent le rôle de la technique pour faciliter une compréhension mathématique. Une des contributions importantes des travaux de Lagrange et Artigue est l'affirmation que des techniques jouent un rôle épistémique, c'est-à-dire elles contribuent à la conceptualisation. Lagrange (2003, p. 271) a mis en valeur la technique :

« Technique plays an epistemic role by contributing to an understanding of the objects that it handles, particularly during its elaboration. It also serves as an object for conceptual reflections when compared with other techniques and when discussed with regard to consistency ».

Hitt & Kieran (2009) ont exploré plus loin la conjecture de Lagrange (2000) que l'apprentissage des techniques peut promouvoir la compréhension conceptuelle en étudiant une activité de factorisation des expressions algébriques basées sur les tâches d'un binôme d'élèves d'une classe de Seconde. Cette activité a illustré la façon dont l'usage des calculatrices symboliques, accompagné de tâches appropriées, peut stimuler l'émergence des actions épistémiques au sein d'une activité algébrique orientée vers la technique.

Selon Monaghan (2007), une tension entre les deux approches ergonomique et anthropologique vient de la signification du terme « Technique » dans les travaux de Lagrange et Trouche. Trouche (2005) se concentre sur la relation agent-outil et la structure psychologique des schèmes :

« One can describe human activity (and students' activity in particular) in terms of *techniques*, i.e sets of gestures realized by a subject in order to perform a given task. When a technique integrates one or several artefacts, we will speak of an *instrumented technique*. Instrumented technique is thus the observable part of an instrumented action scheme ».

Lagrange (2005a) utilise le sens de « Technique » de Chevallard (1999) comme une manière de faire des tâches : « Techniques help to distinguish and reorganize tasks. For instance different techniques exist for the task “find the intervals of growth of a given function” depending on what is known about the function. If the function is differentiable the task can then be related to task “find the zeroes” of another function. In other cases, a search based on a more direct algebraic treatment can be more effective ».

Chaque auteur porte peut-être son attention sur son propre domaine concernant des tâches : Trouche se concentre sur la micro-genèse et Lagrange met l'accent sur l'aspect socio-culturel. Pour conclusion, nous prenons la remarque de Drijvers et al. (2010, p. 110) : ce qui est essentielle dans les deux notions de schèmes et techniques, c'est que les deux aspects, techniques et conceptuelles co-émergent et sont étroitement liés. C'est à cette relation importante qui rend l'approche instrumentale puissante.

d. Orchestration instrumentale

Comme nous avons déjà mentionné plus haut, la genèse instrumentale est non seulement un processus individuel mais, de plus, un aspect social. Afin de décrire ce processus de genèse instrumentale collective et la gestion des instruments individuels par l'enseignant dans le processus d'apprentissage collectif, Trouche (2004) a introduit la

notion d'*orchestration instrumentale*. Une orchestration instrumentale est l'organisation systématique et intentionnelle par l'enseignant des différents d'artefacts d'un environnement informatisé d'apprentissage, pour le traitement d'une situation mathématique donnée, afin de guider les genèses instrumentales des élèves. Une orchestration instrumentale est définie par des configurations didactiques (c'est-à-dire l'arrangement des outils disponibles dans l'environnement selon chaque phase de la situation) et par des modes d'exploitation de ces configurations. Alors que nous abordons les manières dont l'enseignant peut orchestrer l'instrumentation collective des élèves, il est nécessaire de noter que les enseignants disposent également de propres artefacts tels que des ressources numériques, des scénarios d'enseignement... Dans cette perspective, l'approche instrumentale peut être un outil fructueux pour les recherches didactiques portant sur le travail du professeur : les enseignants s'engagent eux-mêmes dans un processus de genèse instrumentale pour transformer des artefacts en instruments pour l'accomplissement leurs tâches d'enseignement (Vandebrouck, 2008 ; Bueno-Ravel & Gueudet, 2009). Néanmoins, dans cette thèse nous nous limitons aux genèses des élèves en laissant de côté une discussion sur les choix de l'enseignant et son propre parcours.

e. Synthèse sur les potentialités et apports de l'approche instrumentale

En conclusion, l'approche instrumentale est particulièrement développée par des chercheurs français et elle est reconnue comme un cadre théorique fructueux pour les recherches dans le domaine de l'intégration des TICE dans l'enseignement des mathématiques. Cette approche offre un filtre qui nous permet de prendre en compte, d'examiner et d'évaluer la relation subtile entre l'usage des outils et la conceptualisation.

Elle permet d'analyser les genèses instrumentales aussi bien que d'en étudier la gestion didactique. Ces problèmes jouent un rôle essentiel dans les questions d'intégration technologique dans l'enseignement. Par le biais de descriptions a priori des schèmes hypothétiques et leurs genèses, des chercheurs formulent leurs hypothèses et organisent en conséquence leurs observations. Les éléments de l'approche instrumentale aident donc aussi à analyser a posteriori les données d'observation et à tirer des conclusions.

L'approche instrumentale en didactique conduit à une vision critique des potentialités des outils pour l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques. Elle nous permet de comprendre une complexité de l'intégration des TICE qui contraste avec l'habituelle opposition « technique/conceptuel » et l'hypothèse d'une intégration « naturelle » supposée dans de nombreux travaux de recherche (Artigue, 2002).

Cependant, l'approche instrumentale ne suffit pas pour comprendre les problèmes de l'intégration des TICE. En revanche, une combinaison avec d'autres perspectives théoriques telles que la médiation sémiotique (Mariotti, 2006), la notion de *communauté de pratique* (Wenger, 1998) ou le constructionisme (la notion de *situated abstraction* - Noss & Hoyles, 1996) est nécessaire et peut être une possibilité fructueuse pour des recherches sur l'intégration des TICE dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques. Un défi pour le développement de l'approche instrumentale est d'affiner l'équilibre entre le cadre de l'ergonomie cognitive et la théorie anthropologique du didactique :

« One of the future challenges for the further development of instrumentation theory is to fine-tune the balance – including both the similarities and the differences – between the cognitive ergonomics frame and the anthropological theory of didactics » (Drijvers et al. 2010, p. 113).

2.1.3 Discussion de la problématique avec l'approche instrumentale

La nécessité de considérer les genèses instrumentales des élèves et des enseignants lors de l'introduction de nouveaux artefacts est maintenant largement reconnue (Drijvers et al. 2010). Il est également reconnu que lorsqu'un artefact offre un grand nombre de fonctionnalités profondément liées aux connaissances mathématiques, la genèse instrumentale est complexe et demande du temps. C'est en particulier le cas des artefacts offrant des moyens de travailler à la fois sur des situations géométriques et algébriques, et de les articuler (Weigand & Bichler, 2010). Ces artefacts facilitent particulièrement les activités de modélisation que les curriculums récents du lycée, notamment en France, encouragent pour l'apprentissage des fonctions ; rappelons que cet apprentissage ne peut être réalisé que sur un temps long.

Notre objectif est d'analyser un exemple de genèse instrumentale d'un environnement logiciel géométrique et algébrique dédié aux fonctions, appelé Casyopée, pour l'apprentissage des fonctions au lycée. Nous visons en particulier à évaluer la durée nécessaire pour que des élèves puissent considérer Casyopée réellement comme un instrument de leur activité mathématique concernant les fonctions, et intègrent les fonctionnalités offertes par cet environnement comme constitutives de leurs connaissances mathématiques sur les fonctions.

Notre approche considère les fonctions comme modèles de dépendance dans le cadre géométrique. Nous considérons la conceptualisation de la notion de fonction et le développement de compétences relatives à l'outil dans un processus de genèse instrumentale. La genèse instrumentale que nous considérons ici concerne donc le

développement conjoint d'usages et de connaissances sur l'environnement et de connaissances mathématiques sur les fonctions, ce qui rejoint certaines dimensions du modèle de Weigand & Bichler (2010). Nous nous intéressons aux genèses instrumentales des élèves dans l'environnement Casyopée et à la manière dont ces genèses articulent l'appropriation de l'artefact et la construction de connaissances mathématiques. Notre accent est mis notamment sur les phénomènes relatifs au processus d'instrumentation en considérant l'interaction et l'imbrication entre le développement de connaissances mathématiques et de connaissances sur l'artefact chez des élèves pendant un temps long de la genèse.

Comme nous le verrons par la suite, l'approche instrumentale décrite ci-dessus sera utilisée pour :

- étudier le temps et la façon dont Casyopée devient un instrument mathématique pour les élèves à travers l'analyse de ses potentialités et contraintes d'utilisation.
- étudier l'articulation et le développement conjoint d'usages et de connaissances sur l'environnement Casyopée et de connaissances mathématiques sur les fonctions.

[...]

3.3 MODELISATION FONCTIONNELLE

3.3.1 Processus de modélisation : considérations théoriques

La modélisation et ses implications dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques sont les questions importantes dans la recherche actuelle sur l'enseignement des mathématiques. Cette importance se manifeste à travers des travaux de recherche dans les trois livres sur ce domaine qui ont été récemment publiés : *Modeling Students' Mathematical Modeling Competences – ICTMA 13* (R. Lesh, P. L. Galbraith, C. R. Haines, & A. Hurford, 2010) ; *Modelling and Applications in Mathematics Education* (W. Blum, P. L. Galbraith, H-W Henn, & M. Niss, 2007) et *Beyond Constructivism – Models and Modelling Perspectives on Mathematics Problem Solving, Learning, and Teaching* (R. Lesh & H. M. Doerr, 2003). Au niveau théorique, afin d'étudier le processus de modélisation, un point important que soulignent les auteurs porte sur la distinction entre un monde mathématique et un monde réel (ou un monde extra mathématique). Différents points de vue sur cette distinction conduisent aux *cycles de modélisation* avec les différents accents sur les étapes du processus de modélisation. Nous présentons ci-dessous quatre cycles de modélisation proposés dans les travaux récents sur ce domaine :

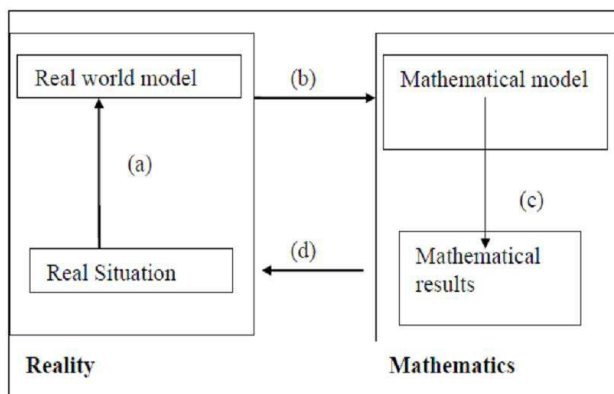


Figure 3.3. Le cycle de modélisation de Kaiser (cité par Borromeo-Ferri, 2006)

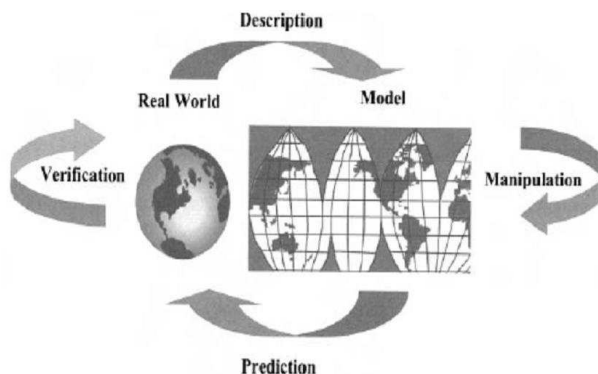


Figure 3.4. Le cycle de modélisation de Lesh & Doerr (2003)

Pour Kaiser, un processus de modélisation suit la procédure suivante :

Le point de départ est une situation du monde réel (ou une situation réelle). Cette situation est ensuite simplifiée ou structurée (a) pour obtenir un modèle du monde réel.

Ce modèle est mathématisé (b) pour obtenir un modèle mathématique de la situation de départ.

Des considérations et manipulations mathématiques (c) dans le modèle mathématique entraînent des résultats mathématiques.

Ces résultats doivent être réinterprétés (d) dans la situation réelle. L'adéquation doit également être validée.

Dans une perspective de la résolution de problèmes, Lesh & Doerr (2003) soulignent quatre étapes d'un cycle de modélisation : (a) *description* qui établit une « application » du monde réel au monde modélisé ; (b) *manipulation* du modèle afin de générer des résultats mathématiques ; (c) *prédiction* (ou *traduction*) apporte ces résultats dans le monde réel ; et (d) *vérification* concerne l'utilité de ces résultats pour la situation de résolution de problème originale. Selon Kuzniak & Vivier (2011), la distinction entre *Real Situation* et *Real Model* dans le cycle de modélisation de Kaiser s'avère trop simple lorsque le propos n'est plus seulement de traiter les problèmes calibrés et déjà épurés que proposent les manuels de mathématiques, mais de traiter des situations réelles. C'est ce qui a conduit Blum et Leiss (Blum & Leiss, 2005) à introduire une distinction entre *Real Situation* et *Situation Model* que Borromeo-Ferri (2006) assimile à la représentation mentale de la situation pour développer un point de vue cognitif sur le processus de modélisation chez les élèves.

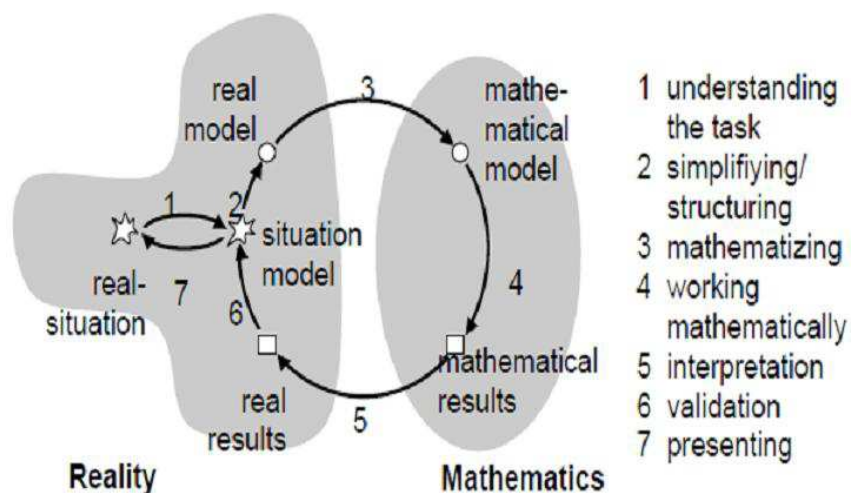


Figure 3.5. Le cycle de modélisation de Blum & Leiss (2005)

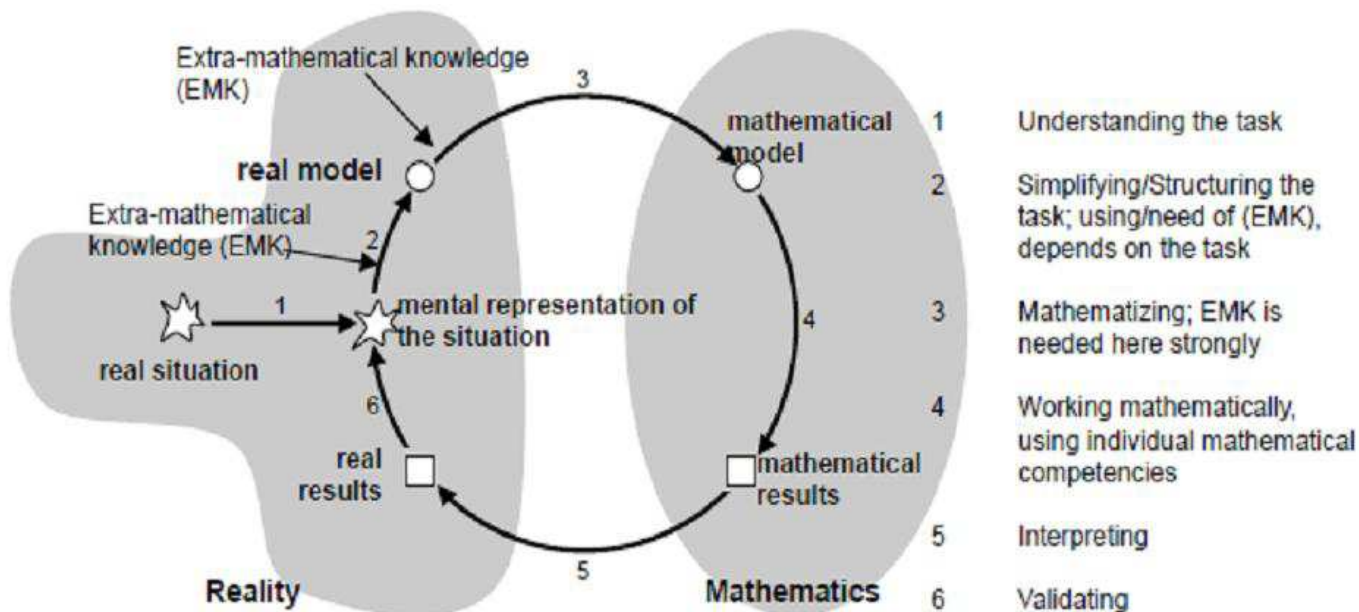
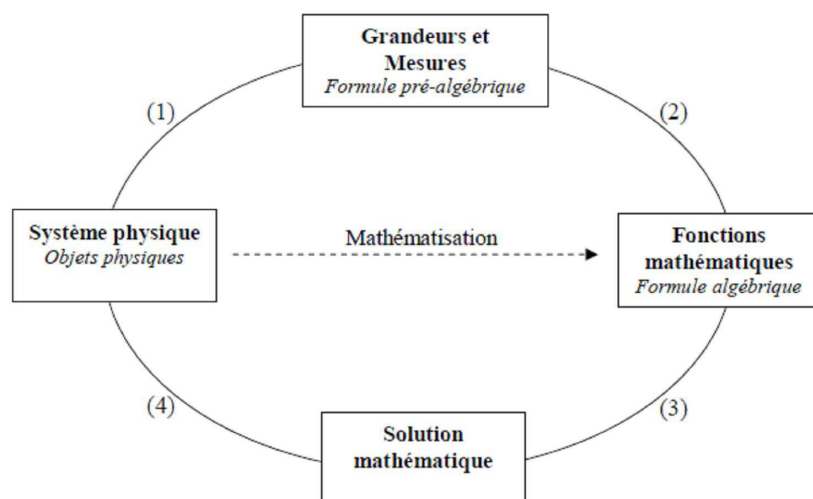


Figure 3.6. Le cycle de modélisation de Borromeo-Ferri (2006) dans une perspective cognitive

3.3.2 Modélisation fonctionnelle

a. Un cycle de modélisation fonctionnelle

Dans les cycles de modélisation proposés ci-dessus, nous nous intéressons plus particulièrement au processus de mathématisation qui transforme un modèle du monde réel en un modèle mathématique. Dans le contexte de l'enseignement et l'apprentissage des fonctions au lycée, il nous semble qu'il est nécessaire de détailler et compléter ce processus de mathématisation afin d'élucider les activités des élèves sur les fonctions impliquées dans ce processus. En s'appuyant sur la typologie d'activités de Lagrange & Artigue (2009), nous proposons ci-dessous notre cycle de modélisation pour approcher les fonctions en environnements numériques d'apprentissage :



- (1) Choisir une variable et créer une formule pré-algébrique exprimant la relation de dépendance
- (2) Représenter algébriquement la formule pré-algébrique
- (3) Preuve algébrique
- (4) Interprétation

Figure 3.7. Un cycle de modélisation fonctionnelle

Dans notre cycle de modélisation fonctionnelle, nous mettons l'accent sur le niveau intermédiaire « Grandeurs et mesures » entre le « Système physique » (le monde réel) et les « Fonctions mathématiques » (le monde mathématique). Le processus de mathématisation est divisé en deux étapes (étapes (1) et (2) dans la figure). Des situations ou problèmes issues des domaines d'application sont données aux élèves dans le *Système physique* où ils peuvent observer, explorer et percevoir des relations de dépendances entre grandeurs et mesures. Afin de quantifier les observations, les élèves peuvent choisir une variable puis créer une formule pré-algébrique exprimant la relation de dépendance (l'étape (1)). Ensuite, l'étape (2) concerne un processus de calculer et représenter algébriquement la formule pré-algébrique construite au niveau intermédiaire *Grandeurs et mesures*. Au niveau des *Fonctions mathématiques*, les élèves obtiennent une fonction mathématique modélisant une dépendance fonctionnelle entre grandeurs dans la situation donnée dans le *Système physique*. L'étape (3) comprend des manipulations, des transformations algébriques ou une preuve pour trouver la solution mathématique de la situation. L'étape (4) est le processus d'interprétation. Il s'agit de revenir dans le *Système physique* pour interpréter les solutions mathématiques trouvées.

b. Cohérence entre le cycle de modélisation fonctionnelle et la démarche expérimentale

Nous montrons maintenant la cohérence entre notre cycle de modélisation fonctionnelle et la démarche expérimentale, particulièrement en utilisant des TICE. Le *Système physique* (dans notre cas c'est la Géométrie dynamique) est réservé aux explorations éactive-iconiques où les élèves peuvent déplacer des objets, observer la transformation du système à l'aide des TICE, et percevoir préliminairement les relations de dépendance entre objets. Au niveau de *Grandeurs et mesures*, les élèves peuvent utiliser les potentialités des TICE pour quantifier des explorations et des observations et formuler des conjectures sur la solution du problème donné. La construction d'une formule préalgébrique exprimant la relation de dépendance entre

objets à ce niveau est fructueuse pour soutenir ces explorations et observations. Le niveau de *Fonctions mathématiques* est réservé aux transformations algébriques et preuves. Finalement, le retour dans le *Système physique* a pour objectif de vérifier et valider la solution mathématique. Dans les chapitres qui suivent, nous illustrons en détails la mise en oeuvre de ce cycle de modélisation fonctionnelle dans un environnement numérique dédié à l'apprentissage des fonctions et comment les situations d'apprentissage des fonctions sont conçues de manière cohérente avec la démarche expérimentale et la modélisation fonctionnelle que nous venons de présenter ci-dessus.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons premièrement fait une analyse institutionnelle de la partie « Fonctions » dans le curriculum actuel et dans un manuel scolaire choisi. Cette analyse institutionnelle nous conduit à conclure que le type de tâche de modélisation fonctionnelle des situations géométriques est préconisé dans l'enseignement actuel des fonctions au lycée. Ensuite, nous avons proposé et un cycle de modélisation fonctionnelle des situations géométriques et avons discuté le rapport entre ce cycle de modélisation fonctionnelle et la démarche expérimentale dans le contexte d'usage des TICE.