

UN EXEMPLE DE FORMATION DES PROFESSEURS DE MATHÉMATIQUES À LA MODÉLISATION

LÉCUREUX-TÊTU * Marie-Hélène

Résumé – Après avoir mis en évidence des manques dans l’enseignement de la modélisation, nous décrivons une technique de construction d’un scénario d’enseignement essayant de répondre à ces manques. Au travers de la présentation de ce scénario en formation des professeurs stagiaires de mathématiques, nous décrivons des obstacles de natures diverses à cet enseignement de la modélisation.

Mots-clefs : modélisation, variables, définition de fonction, formation des professeurs

Abstract – After highlighting gaps in the teaching modeling, we describe a technique for constructing a scenario of teaching modeling. This scenario tries to answer the gaps. Through the presentation of this scenario to trainee teachers, we describe obstacles of various natures to this teaching modeling.

Keywords: modeling, variables, definition of function, teacher training

Dans de nombreux pays, la modélisation prend une place de plus en plus grande dans l’enseignement des mathématiques. Ainsi la dernière réforme du collège en France demande aux professeurs de mathématiques de développer chez les élèves un certain nombre de compétences, dont la compétence « modéliser » (Ministère de l’Éducation Nationale 2015), mettant ainsi la profession de professeurs de mathématiques devant les questions « comment développer cette compétence ? Comment enseigner la modélisation ? ». Ces questions se déclinent dans la formation des professeurs : « Comment former les professeurs à développer la compétence « modéliser » chez leurs élèves ? »

Nous nous proposons ici de présenter un temps de formation à la modélisation de professeurs de mathématiques stagiaires. Il s’agit de la formation initiale des enseignants de collège et lycée, au sein du parcours « mathématiques » du master métiers de l’enseignement, de l’éducation et de la formation (MEEF) 2^d degré, qui est la structure principale de la formation initiale des professeurs en France actuellement.

I. NOTION DE MODÉLISATION

Ce temps de formation des professeurs stagiaires se place au sein de l’unité d’enseignement (UE) « interdisciplinarité ». Il est à noter que les responsables de ce parcours ont demandé spécifiquement aux formateurs de cette UE d’insister sur l’enseignement de la modélisation. Nous commençons par interroger la notion de modélisation en sciences expérimentales, pour faire le lien avec la modélisation au travers du regard des didacticiens des mathématiques.

1. *Modélisation en sciences expérimentales*

Nous avons pu intégrer un groupe interdisciplinaire de scientifiques, essentiellement des physiciens, et participer à des phases de modélisation. Ce groupe de travail de sciences est composé de façon régulière de physiciens de différents domaines de la physique ainsi que de spécialistes du comportement animal. Dans toutes les réunions auxquelles nous avons pu assister, les problèmes sont liés à des équations différentielles, les méthodes de résolution pouvant relever de l’analyse ou de la mise en place de méthodes de Monte Carlo. La notion de

* ESPE Toulouse Midi-Pyrénées, Université Jean Jaurès ; UMR EFTS – France– marie-helene.lecureux@univ-tlse2.fr

modélisation est centrale dans ce groupe qui y a longuement réfléchi. Nous présentons des éléments de réflexion issus de l'observation de ce groupe, ainsi que différents entretiens menés avec certains de ses membres.

La première phase de travail consiste à essayer de définir le système étudié, la question posée sur ce système, et les variables pertinentes. Le temps de description verbale est très important. Il s'articule à des temps d'expérimentation auxquels nous n'avons pas pu assister. En lien avec la détermination du système et de la question, l'objectif est de faire émerger les variables pertinentes. Dans cette première étape de modélisation, on ne se sert pas des mathématiques. Du point de vue numérique, le travail essentiel consiste à évaluer l'importance de certaines variables, et éventuellement de simplifier en ne tenant pas compte d'effets considérés comme secondaires. Pour ces choix, on se fie plus à l'expérience qu'aux calculs. Une jeune femme venant d'obtenir une thèse interdisciplinaire physique-chimie-biologie raconte lors d'un entretien le travail sur les variables : « Qu'est-ce qu'on veut mesurer ? Qu'est-ce que je calcule ? C'est quoi les données d'entrée pour faire le calcul ? » Un physicien de ce groupe a décrit le processus de modélisation par le schéma ci-après. Notons que ce schéma n'est pas répandu chez tous les physiciens, c'est un schéma de pensée de notre groupe de travail.

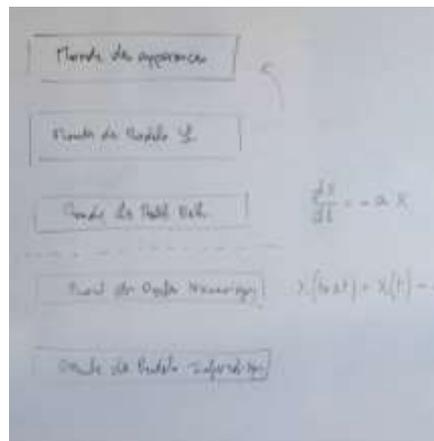


Figure 1 : le processus de modélisation, description par un physicien

Cette séparation marquée entre le temps de verbalisation et le temps d'utilisation des mathématiques a été pour nous une découverte qui nous questionne sur la possibilité de travailler la modélisation en classe de mathématiques hors interdisciplinarité. En particulier, la détermination des variables qui pilotent l'état d'un système, est une étape cruciale dans la modélisation et qui nécessite une longue réflexion, bien loin de l'expression « mettre en équation » que nous avons rencontrée chez des professeurs ou des étudiants de mathématiques.

2. Modélisation en didactique des mathématiques

Au cours du colloque EMF 2012, Soury-Lavergne et Bessot s'appuient sur des travaux en didactique des mathématiques pour décrire le processus de modélisation. Elles font référence à un schéma construit à partir des travaux de Coulange (1998) et Rodriguez (2007) pour définir le processus de modélisation :

Ce schéma découpe le processus de modélisation en quatre phases :

Phase 1. Passage du système extramathématique à un ou plusieurs modèles intermédiaires

Phase 2. Passage des modèles intermédiaires à un modèle mathématique calculable permettant de reformuler les questions initiales en un problème mathématique.

Phase 3. Phase de calcul dans le modèle mathématique pour produire les réponses au problème mathématique.

Phase 4. Retour à la situation étudiée pour transformer les réponses au problème mathématique en des réponses aux questions initiales et les confronter à la réalité modélisée.

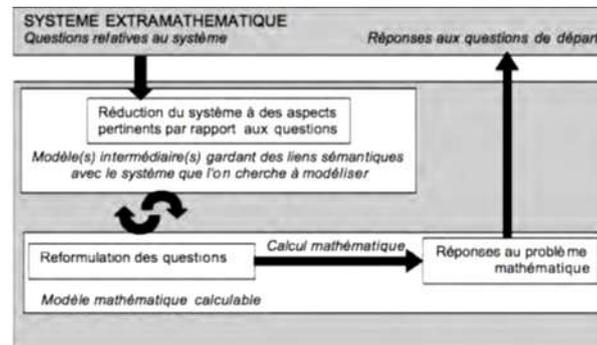


Figure 2 – Schéma du processus de modélisation (d'après Coulange 1998)

Les phases 1 et 2 ainsi décrites nous paraissent correspondre à ce que nous avons observé en sciences expérimentales : on part d'un système extramathématique, des questions se posent relatives à ce système, et à travailler sur les variables. Cela conduit à simplifier, en éliminant certaines variables, à modifier les questions, et on aboutit à un modèle mathématique calculable. On peut penser que la mention de « l'extramathématique » est une difficulté pour le professeur de mathématique hors interdisciplinarité.

Dans cette même communication, Soury-Lavergne et Bessot (2012) font référence à deux thèses, celle de Rodriguez (2007) et celle de Nguyen Thi (2011). Elles signalent que « Dans l'enseignement secondaire, il y a une propension à enseigner des modèles existants fournissant des éléments de savoir bien définis et négociables » (Rodriguez, 2007). Ainsi, en classe de mathématiques, les phases 1 et 2 du processus de modélisation serait rarement rencontrée.

Ces deux modèles de la modélisation, celui issu de la physique et celui issu de la didactique des mathématiques sont différents. En particulier, il n'y a pas de boucle dans le modèle issu de la physique. Mais les deux insistent sur l'importance de la formulation en début de modélisation.

Nous faisons l'hypothèse que le temps de réflexion et de mise en œuvre des phases 1 et 2 est rarement mis en œuvre de façon approfondie dans une classe de mathématique ordinaire, au collège ou au lycée. Cette hypothèse concorde avec de nombreux travaux en didactique sur la modélisation. Elle concorde aussi avec notre représentation initiale de ce qu'est la modélisation.

La question de l'enseignement de la modélisation évolue alors : Comment permettre aux élèves de collège et lycée de rencontrer en classe de mathématiques ces phases 1 et 2 ? D'ailleurs, est-ce seulement possible de faire vivre ces phases dans un cours purement disciplinaire de mathématiques ? Dans le cadre de la formation des professeurs s'ajoute la question de formation : comment faire rencontrer aux étudiants ces phases 1 et 2 pour qu'ils sachent que ces phases existent ?

II. CONSTITUTION DU RECUEIL DES DONNÉES

Une contrainte majeure a pesé sur le recueil de données. Cette contrainte est liée aux évaluations de la formation : les professeurs stagiaires sont évalués comme dans tout master, mais sont aussi évalués pour leur titularisation de professeur de mathématiques, fonctionnaire de l'état. Ces évaluations pèsent très lourdement sur l'état psychologique des étudiants. Il a été fait le choix d'annoncer que ce moment de formation était hors évaluation, de façon à laisser toute liberté de penser – et de participer activement ou non – aux étudiants. Des étudiants sont venus remercier en fin de cours du fait qu'on puisse « enfin apprendre hors évaluation », ce qui reflète bien la pression vécue.

Mais en conséquence, nous n'avons pas de retour direct sur la façon dont les étudiants se sont ou non emparés de la situation proposée dans leur métier de professeur de mathématiques. Tout questionnaire pourrait être mal perçu par certains étudiants qui sont très défiants. Après l'année de formation, les étudiants sont très dispersés géographiquement, et il est difficile d'avoir des retours. L'évaluation de l'unité d'enseignement (UE) interdisciplinarité comporte un examen qui ne portait pas sur la modélisation, de façon à respecter ce qui a été affirmé aux étudiants, mais aussi un dossier contenant la construction d'un scénario d'enseignement en interdisciplinarité.

Le climat de défiance évoqué précédemment ne nous a pas permis d'enregistrer la séance. Le recueil de données repose sur deux éléments. La formatrice ayant l'habitude d'incorporer des éléments de réponse des étudiants dans ses diaporamas en cours de séance, nous disposons de ces traces écrites. Par ailleurs, nous disposons de son témoignage à l'issue de la séance. On ne peut que constater la fragilité de ce recueil de donnée, en espérant que d'autres possibilités s'ouvrent à nous dans les années ultérieures.

III. EXPÉRIMENTATION EN FORMATION DES PROFESSEURS STAGIAIRES

Dans l'expérimentation que nous présentons, nous avons un double objectif de formation. D'une part, permettre aux professeurs stagiaires de disposer d'un scénario d'enseignement à la modélisation qui puisse leur servir de ressource et d'autre part leur permettre de rencontrer les phases 1 et 2 du processus de modélisation. Nous avons fait le choix de proposer aux professeurs stagiaires un support d'activité pour des classes du collège, en reprenant une technique souvent utilisée dans la formation : les étudiants doivent analyser le support d'activité, accompagné éventuellement d'un scénario pédagogique. De façon usuelle, l'analyse implique de résoudre le problème mathématique posé.

1. *Construction du support d'activité pour une classe de collège*

Ainsi que nous l'avons indiqué, nous travaillons dans le cadre de l'UE « interdisciplinarité ». Malgré la possibilité d'être en lien avec d'autres disciplines, notre choix s'est porté sur une situation de la vie quotidienne pour apporter un système extramathématique. Pour le didacticien, cela évite d'avoir à prendre en compte les interactions avec les autres disciplines enseignées. Pour les professeurs stagiaires, il est indispensable que la présentation de la situation leur permette de se projeter et d'imaginer la situation mise en place dans la classe. L'organisation de séance d'enseignement en interdisciplinarité étant complexe, il a été choisi de séparer l'étude de la modélisation de l'étude de la façon de travailler en interdisciplinarité. Il est ainsi plus simple de s'imaginer réaliser l'activité dans sa classe.

Nous avons donc cherché à construire une situation concrète respectant les contenus du programme de mathématiques du cycle 4. Notre objectif est que cette situation puisse permettre de mettre en œuvre un élément de la première phase de modélisation, celle de description du système ainsi que les variables pertinentes.

Nous sommes allée puiser des idées dans une ressource méconnue des professeurs de mathématiques de collège et lycée : les documents à destination de l'enseignement des mathématiques en lycée professionnel. Cet enseignement a la particularité d'être proposé par des professeurs bivalents : mathématiques – physique chimie. Ces professeurs sont familiers de la notion de modélisation en sciences physiques et chimiques

Le ministère met à disposition des professeurs de lycée professionnels des documents appelés « ressources », sur le site Eduscol. Nous nous sommes servie de la proposition d'un document où il était proposé aux professeurs de donner à étudier la question : « il est régulièrement dit que, pour économiser de l'eau, il vaut mieux prendre une douche qu'un bain. Est-ce vrai ? » (DGESCO 2009).

Nous avons proposé comme point de départ une affiche – cela permis aussi de faire un lien avec un autre contenu de l'UE : l'éducation aux médias. On trouvera d'autres images d'un même type sur internet à partir de la recherche « je prends une douche plutôt qu'un bain ».



Figure 3 – L’affiche

Dans le scénario pédagogique le professeur commence par poser la question « est-ce bien vrai ? » à la classe en l'associant à une photographie de l'affiche. Dans le temps de débat qui suit, le professeur note au tableau ces différentes idées, sans intervenir sur les contenus qui peuvent être de tout ordre. Il émerge une comparaison des volumes d'eau utilisés, et le besoin de connaître le volume d'eau dans la baignoire ainsi que le débit de la douche. D'autres éléments de comparaison peuvent apparaître, en particulier sur la quantité d'énergie utilisée, mais la quantité d'eau utilisée sera toujours présente.

Au cours de la deuxième étape, le professeur annonce qu'on va s'interroger sur la quantité d'eau utilisée : « est-ce mieux de prendre un bain ou une douche pour la quantité d'eau ? » en laissant de côté dans cette étape tout autre élément apparu dans la discussion. On peut proposer un scénario où les élèves enquêtent sur les volumes de baignoire et les débits de douche. Les sites dédiés au bricolage ou aux professionnels de la plomberie sont riches en indications à ce sujet. On peut aussi fournir des documents donnant des indications sur ces grandeurs.

Une fois fixées les données : volume d'eau utilisé pour le bain, et débit de la douche, on passe à la troisième étape, l'écriture du modèle mathématique ou étape de mathématisation. Cette étape de mathématisation convoque la notion de fonction par le lien entre la quantité

d'eau utilisée sous la douche en fonction du temps. Le programme du cycle 4 (Ministère de l'Éducation Nationale 2015), dans le domaine mathématiques « organisation et gestions de données », pour la partie « comprendre et utiliser la notion de fonction » précise dans les connaissances et compétences associées à faire étudier :

Modéliser des phénomènes continus par une fonction.

Résoudre des problèmes modélisés par des fonctions (équations, inéquations).

- Dépendance d'une grandeur mesurable en fonction d'une autre.
- Notion de variable mathématique. [...]
- Cas particulier d'une fonction linéaire, d'une fonction affine.

Du point de vue du programme sur les fonctions, la situation proposée est donc conforme au programme du collège. Elle conduit à utiliser une fonction linéaire, par l'hypothèse du débit constant. Nous avons pu repérer cette hypothèse sur des sites de plomberie. Par ailleurs, la manipulation d'une grandeur quotient, le débit, est aussi au programme du cycle 4.

À la fin de cette étape de mathématisation, on peut alors commencer à travailler le modèle mathématique pour répondre à la question. Il est possible d'utiliser les représentations graphiques de fonction, ou de faire une résolution de type algébrique.

Le retour à la situation montre la transformation naturelle de la question, conformément au schéma de la figure 2 (d'après Coulange 1998). On est passé de « est-ce vrai ? » à la question « quel est le temps au-delà duquel il vaut mieux prendre un bain qu'une douche ? ». En conséquence, la réponse n'est pas de la forme « vrai ou faux », mais est plus subtile : suivant le temps passé sous la douche, il est plus économique en eau de prendre un bain ou une douche. D'un point de vue épistémologique, il nous semble important de faire émerger le fait qu'on ne peut pas répondre simplement « c'est mieux ou c'est moins bien de prendre une douche plutôt qu'un bain ». Cela participe à mieux comprendre la différence entre réflexion scientifique et opinion.

La situation peut être prolongée par une amélioration du modèle, l'amélioration consistant à prendre en compte d'autres éléments de la comparaison bain-douche. On peut s'appuyer sur des points discutés lors de la première phase volontairement négligés dans la deuxième partie. Ainsi, il est possible de rappeler simplement que, généralement, on attend que l'eau soit chaude pour se laver sous la douche. En conséquence, la quantité d'eau dépensée en fonction du temps passé sous la douche est une fonction affine. En proposant une valeur numérique au temps de chauffe, on aboutit à un nouveau temps en-dessous duquel il est mieux de prendre une douche. On peut s'interroger aussi sur l'effet du remplissage de la baignoire : si elle est remplie à moitié ou aux trois-quarts, cela change la réponse. Cette possibilité offerte par la situation permet de mieux rendre compte de ce qu'est le processus de modélisation dans son retour au système et à la question posée sur le système. Elle éclaire le fait qu'on choisisse des variables et qu'on peut modifier ce choix pour affiner le modèle.

2. *Déroulement de l'expérimentation avec les professeurs stagiaires.*

Nous avons pu mener à bien cette séquence de formation deux années consécutives, dans le cours magistral de l'UE « interdisciplinarité ». L'effectif des promotions a été à chaque fois d'une soixantaine d'étudiants, placés dans une grande salle ou dans un amphithéâtre, ce qui contraint à une position frontale entre étudiants et formateur et n'est propice ni aux travaux en groupe, ni aux débats.

Avant de présenter la situation, la formatrice a affiché sur son diaporama la question « qu'est-ce que modéliser ? » et elle a demandé aux étudiants de prendre un peu de temps

pour y réfléchir. Cela a permis d'introduire un premier questionnaire sur la modélisation dans le milieu didactique. Pédagogiquement, c'est aussi un moyen pour que les étudiants se sentent autorisés à prendre la parole, malgré la disposition de la salle et l'effectif, ce qui est très important pour la mise en œuvre de la situation « bain-douche ». Les réponses ont été notées d'abord au tableau, puis dans la version du diaporama mise à disposition de la promotion dans l'environnement numérique de travail de l'université, ce qui correspond aux habitudes de la formatrice. Cette question nous permet d'accéder à une représentation de la modélisation proposée par les professeurs stagiaires.

Les réponses des deux promotions telles qu'elles apparaissent dans le diaporama de la formation sont disponibles en annexe. La seconde promotion a d'abord fait référence au programme du cycle 4, ce qui n'est pas étonnant car il est demandé très régulièrement au cours de la formation des professeurs de s'appuyer sur le programme.

L'affiche a ensuite été projetée ; pour des raisons techniques le texte « une douche nécessite 50 litres d'eau contre 200 pour un bain » n'est pas apparu. La formatrice a demandé alors si l'affiche dit vrai : est-ce qu'il vaut mieux prendre une douche plutôt qu'un bain ? Elle a pris note des réponses au tableau, sans aucune censure. Des propositions sont apparues sur l'énergie dépensée, le volume d'eau. Quelques jeunes parents présents ont évoqué la situation des fratries misent dans le bain ensemble, ce qui dépense moins d'eau que plusieurs douches successives. Ce n'est pas anecdotique : dans le cas de plusieurs enfants en bas âge, la question ne se pose pas de la même façon. Cela fait partie de la complexité de la situation réelle.

Après ce travail de réflexion, la formatrice, comme dans le scénario pour une classe de collège, propose d'étudier uniquement la question du volume d'eau. Elle projette alors un document indiquant différents volumes de baignoires – la contenance 200 litres est rare, les valeurs sont plutôt inférieures, puis un document donnant des indications sur les débits de douche. La formatrice demande alors aux étudiants comment on peut répondre à la question posée : « Vaut-il mieux prendre un bain ou une douche ? » Elle précise : on peut imaginer une baignoire de 180 litres – c'est un grand modèle, remplie aux trois quarts, et une douche avec un débit de 20 litres par seconde. La réponse des étudiants est loin d'être immédiate. Nous n'avons malheureusement pas pu filmer ces séances, mais nous gardons le souvenir d'une étudiante dont le visage s'est illuminé et qui a fait un geste de la main évoquant une « droite oblique ». La réaction nous a surprise : les mathématiques mises en jeu sont en principe dominées par les professeurs stagiaires. Pour terminer, un des étudiants propose l'expression de deux fonctions, représentant la quantité d'eau en fonction du temps soit pour la douche soit pour la baignoire – cette seconde fonction est constante.

Le temps de formation se poursuit alors sur la question : à quel niveau de classe peut-on proposer cette situation ? Les professeurs stagiaires ont reconnus facilement qu'il s'agit d'une situation utilisable en fin de cycle 4. Faute de temps, l'analyse avec les professeurs stagiaires n'a pas été poussée plus avant.

3. *Éléments d'analyse*

Dans la partie consacrée à l'affiche, le temps passé à réfléchir au système extramathématique, à estimer les variables qui pilotent l'état du système, a été long et les étudiants ont proposé des réponses très riches. Il nous semble qu'il y a eu réellement un temps de réflexion correspondant aux phases 1 et 2 de modélisation. De ce point de vue, la situation de comparaison bain-douche nous paraît porter la capacité à mettre en œuvre cette phase.

Nous nous sommes posée la question de la possibilité de travailler ces phases 1 et 2 dans une classe de mathématiques, sans lien avec les autres disciplines. Un des physiciens membre

du groupe que nous avons mentionné en début de ce texte nous a fourni un élément de réponse : la physique qui est travaillée dans la situation bain douche est bien connue de tous. Cela pourrait être considéré comme un élément caractéristique des situations souvent appelées « de la vie quotidienne ». Nous avons débattu de ce point dans notre groupe de travail : il n'est pas certain que la notion de débit soit si bien comprise des élèves. Sur certains sites de plomberie, nous avons trouvé des descriptions de technique pour mesurer le débit d'une douche, en prenant un récipient gradué, une montre et en mesurant le temps pris à remplir le récipient en ouvrant la douche à fond. On peut imaginer que cela fournisse une expérimentation qui soit utilisable en cours de mathématiques.

Les réponses fournies par les étudiants à la question « qu'est-ce que modéliser ? » ont fait émerger dans les deux promotions l'idée d'un changement de langage et l'idée de simplification. La première promotion n'a pas évoqué le passage du réel vers les mathématiques. Dans les deux cas, il n'est pas question de variables, mais il se peut que ce soit lié à la forme très générale de la question posée. Le retour des mathématiques vers le réel ou l'extra-mathématiques (phase 4 du processus de modélisation) n'est jamais évoqué, alors que le travail de modélisation est souvent décrit dans les travaux de didactique comme une boucle entre le réel et les mathématiques. Il se peut que ce soit lié à la formulation de la question : modéliser est perçu comme une phase de la modélisation dans son ensemble. Si « modéliser » est « fabriquer un modèle » ainsi que l'a affirmé un étudiant, il est normal de ne pas se préoccuper de la suite : le travail mathématique du modèle et le retour à la situation. Il est possible aussi que la modélisation ne soit pas pensée sous forme de boucle. Nous savons que dans la formation en didactique de ces étudiants, les formateurs proposent l'analyse d'énoncés proposant des situations du monde. Ces formateurs insistent sur le retour à la situation en fin de travail du modèle. Cela mériterait une étude plus approfondie

Nous n'avons pas anticipé la difficulté des professeurs stagiaires à résoudre le problème et la réaction d'étonnement manifestée par certains en cours de résolution. Une explication possible réside dans un aspect épistémologique souligné par Soury-Lavergne et Bessot (2012), la conception dynamique et la conception statique de fonction :

Les recherches sur la notion de fonction distinguent deux conceptions de cette notion que l'on peut repérer comme se succédant dans l'histoire :

- la covariation de deux grandeurs. Nous parlerons de conception dynamique de la notion de fonction, décrite par Euler en 1755 :

Si certaines quantités dépendent d'autres quantités de telle manière que si les autres changent, ces quantités changent aussi, alors on a l'habitude de nommer ces quantités fonction de ces dernières. (Euler 1755)

- la correspondance associant un nombre unique à un nombre donné. Nous parlerons de conception statique de la notion de fonction, définie par Hankel en 1870 de la façon suivante :

On dit que y est fonction de x si à chaque valeur de x d'un certain intervalle correspond une valeur bien définie de y sans que cela exige pour autant que y soit défini pour tout l'intervalle par la même loi en fonction de x , ni même que y soit défini par une expression mathématique explicite de x . (Hankel 1870)

Les étudiants n'ont pas eu le réflexe de décrire par une fonction le lien entre la quantité d'eau utilisée sous la douche et la durée de la douche. Ainsi que nous l'avons préalablement indiqué, dans le programme actuel du cycle 4 (Ministère de l'Éducation Nationale 2015), les fonctions doivent être étudiées avec « la dépendance d'une grandeur mesurable en fonction d'une autre. » On peut s'interroger sur la façon dont les professeurs vont pouvoir faire vivre cette dépendance alors que la conception statique de fonction est aussi prégnante.

REFERENCES

- Coulange L. (1998) Les problèmes concrets à mettre en équation dans l'enseignement. *Petit x* 47, 33-58.
- DGESCO (2009) *Ressources en mathématiques et sciences physiques et chimiques, Exemples d'activité en algèbre et analyse* <http://eduscol.education.fr/cid46460/ressources-en-mathematiques-et-sciences-physiques-et-chimiques.html>
- Euler L. (1755) *Opera Omnia ser.I.* vol. VIII. Editions A. Kazer & F. Rudio (1922).
- Hankel H. (1870) *Untersuchungen über die unendlich oft oszillierenden und unstetigen Funktionen.* Tübingen (Dissertation).
- Ministère de l'Éducation Nationale (2015) *Bulletin Officiel Spécial n°11 du 26 novembre 2015* http://cache.media.education.gouv.fr/file/MEN_SPE_11/35/1/BO_SPE_11_26-11-2015_504351.pdf
- Nguyen Thi N. (2011) *La périodicité dans les enseignements scientifiques en France et au Viêt Nam : une ingénierie didactique d'introduction aux fonctions périodiques par la modélisation.* Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier Grenoble 1 et Université Pédagogique d'Ho Chi Minh Ville - disponible sur HAL <tel-00630048>
- Rodriguez R. (2007) *Les équations différentielles comme outil de modélisation mathématique en Classe de Physique et de Mathématiques au lycée : une étude de manuels et de processus de modélisation d'élèves en Terminale S.* Thèse de doctorat Université Joseph-Fourier, Grenoble I – disponible sur HAL <tel-00292286>
- Soury-Lavergne S., Bessot A. (2012) *Modélisation de phénomènes variables à l'aide de la géométrie dynamique.* In Dorier J.-L., Coutat S. (Eds.) Enseignement des mathématiques et contrat social : enjeux et défis pour le 21e siècle – Actes du colloque EMF2012 (GT5, pp. 742–753). <http://www.emf2012.unige.ch/index.php/actes-emf-2012>

ANNEXE

Réponses des promotions à la question « qu'est-ce que modéliser ? ». Ces réponses sont celles qui sont notées dans le diaporama de la formation, les diapositives étant reproduites ci-après.

Promotion 1 :

- Représenter
- Coder
- Passer d'un langage à un autre
- Simplifier
- Se rapprocher de quelque chose qu'on connaît, un modèle
- On perd de l'information

Promotion 2 :

- Passer d'un langage disciplinaire à un autre (les changements de registre seraient de la représentation ???)
- Extraire de l'information utile d'un texte pour répondre à une question précise
- Partir d'un phénomène, d'un constat pour en faire une vérité mathématique
- Passer d'une situation réelle à des données exploitables
- Traduire un problème extra mathématiques en mathématiques
- Trouver une représentation simplifiée d'une situation complexe
- Fabriquer un modèle
- À partir d'un problème créer un espace de travail mathématique (ou se ramener à ...)