

DE LA PROBLÉMATIQUE NOTIONNELLE À LA CONCEPTION D'INSTRUMENTS POUR L'ENSEIGNEMENT DES FRACTIONS ET QUEL DISPOSITIF DE FORMATION ENGAGER

Christine SCALISI NEYROUD

Chargée d'enseignement, HEP LAUSANNE

UER MS

christine.scalisi-neyroud@hepl.ch

Céline HUGLI

Chargée d'enseignement, HEP LAUSANNE

UER MS

celine.hugli@hepl.ch

Résumé

Dans cet article, nous proposons un dispositif de formation pour le corps enseignant et le corps étudiant testé à la Haute École Pédagogique de Lausanne. La formation décrite s'inscrit dans la théorie de la médiation sémiotique (Mariotti et Maracci, 2010). La conception d'un objet pédagogique, influencée par l'approche instrumentale (Rabardel, 1995), les affordances liées à l'artefact et les observations sur le terrain nous ont permis de construire cette formation ainsi qu'un modèle pour penser cet objet pédagogique. L'atelier proposé au 51^e colloque de la Copirelem (Strasbourg, 2025) a offert au groupe participant à l'atelier la possibilité d'expérimenter une étape de ce processus en élaborant un objet low-tech qui réponde à une problématique mathématique.

Un tel dispositif semble revêtir un possible changement dans la pratique enseignante, en augmentant les compétences du corps enseignant et en donnant du sens aux apprentissages des élèves.

I - INTRODUCTION

Dans cet article, nous décrivons comment la conception d'objets pour l'enseignement des mathématiques permet d'enrichir les compétences du corps enseignant relativement à la notion qu'elles et ils travaillent. Ce processus de formation (initiale ou continue) renforce ainsi les compétences en didactique tout en développant des compétences de conception et peuvent modifier les pratiques pédagogiques. Ceci en faisant bénéficier, par la suite, les élèves de supports différenciés, en soutenant ainsi la diversité scolaire.

Les exemples d'expériences relatées au début de cet article proviennent de formations dispensées à la Haute École Pédagogique (HEP) de Lausanne dans le canton de Vaud, en Suisse. Elles se sont déroulées en grande partie dans les locaux du FabLearn¹ de la HEP Vaud.

Dans les premiers paragraphes de cet article, le terme de FabLearn est défini de manière à le distinguer de FabLab. La suite est destinée à expliciter la modélisation de la conception d'un artefact. Ce processus de conception met en lien : objectif - mise en scène - schèmes d'utilisation - artefact. Les liens entre ces différents éléments, définis plus loin, permettent de comprendre le sens spécifique donné à ce processus. L'article se poursuit par les expériences vécues des trois groupes participant à notre atelier. La conclusion de l'article propose une synthèse des opinions échangées au colloque ainsi qu'un point de vue des auteures au regard des compétences pouvant être développées par un tel dispositif.

¹ <https://fablearn.hepl.ch/>

II - CONTEXTES

1. Les systèmes scolaires en Suisse

Commençons tout d'abord par expliciter quelques éléments de contexte relatifs aux particularités de la Suisse en matière d'enseignement. En Suisse, il existe quatre langues nationales (allemand, français, italien et romanche, figure 1) et 26 cantons dont chacun a un système scolaire spécifique.

En effet, chaque canton est souverain en matière d'éducation et dispose de ses propres lois sur l'enseignement. Il existe cependant une volonté d'harmonisation de ces législations. Pour la Suisse romande (cantons francophones), c'est la Conférence Intercantonale de l'Instruction Publique (CIIP) qui est l'institution de coordination. La coordination passe par le Plan d'Étude Romand (PER) et des Moyens d'Enseignement Romand (MER) qui sont communs aux cantons francophones (CIIP, 2010).

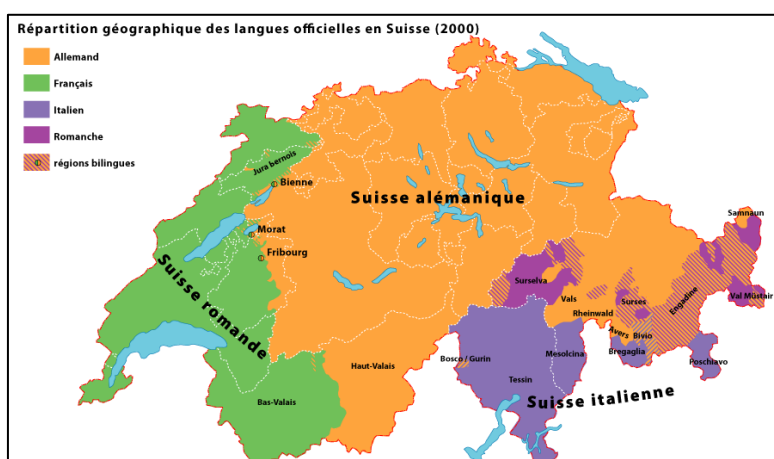


Figure 1. Répartitions géographiques des langues officielles en Suisse²

2. L'enseignement et moyens d'enseignement des mathématiques dans le canton de Vaud

Pour l'apprentissage des mathématiques, les moyens d'enseignement (manuels scolaires pour le corps enseignant et les élèves) sont conçus sous le mandat de la CIIP. Le processus de conception est très long car tous les cantons doivent se mettre d'accord et approuver les moyens d'enseignement. Depuis 2019, de nouveaux moyens d'enseignement de mathématiques, sous format numérique, ont été introduits progressivement dans les cantons romands. Pour le Canton de Vaud, ce déploiement a débuté en 2020 et s'est achevé en juillet 2025. Ce Moyen d'Enseignement Romand (MER) de mathématiques officiel, nommé ESPER, est constitué d'un livre, d'un fichier et d'un espace en ligne où figurent les tâches et d'un espace personnel où regrouper les choix effectués. Les tâches proposées sont en lien direct avec les objectifs et la progression d'apprentissages du PER (CIIP, 2024). Le plus souvent, du matériel est disponible pour réaliser les tâches proposées. Ce MER apporte donc la garantie de proposer des tâches adaptées aux niveaux et besoins des élèves. Le corps enseignant reste néanmoins libre d'ajouter d'autres contenus ou d'autres matériels d'enseignement afin de compléter des points qui leur semblent importants.

3. Des FabLabs au FabLearn de la Haute École Pédagogique de Lausanne

Dans les années 2015, la HEP Vaud s'est équipée d'un **FabLab**. Ce terme de FabLab provient de la contraction de *Fabrication Laboratory*. Les FabLabs³ ont débuté dans les années 1990 aux États-Unis.

² https://fr.wikipedia.org/wiki/Langues_en_Suisse

³ <https://artsetmetiers.fr/fr/quest-ce-quun-fablab>

Différentes définitions ont été données mais toutes convergent vers la proposition donnée par le site Internet de l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers qui définit ces espaces comme suit :

Les fablabs sont basés sur les principes d'ouverture et de collaboration. Ils s'appuient sur des machines de fabrication numérique et des réseaux qui permettent de s'échanger des fichiers dans le monde entier. Un objet peut donc être conçu dans un fablab, fabriqué dans un autre et amélioré dans un troisième.

Après quelques années de mise à disposition du Fablab de la HEP Vaud en libre accès, l'institution a décidé d'orienter cet espace vers une utilisation à des fins plus pédagogiques, c'est-à-dire se diriger vers la conception de matériel destiné à l'enseignement. Pour cette raison, le nom de cet espace a changé mettant ainsi en avant le terme *apprentissage* ; l'espace de fabrication porte à présent le nom de **FabLearn**.

L'accès au FabLearn de la HEP Vaud est restreint au corps étudiant et enseignant. Un groupe de collègues de l'institution de diverses disciplines est spécialement mandaté pour servir de guide et permettre ainsi aux personnes intéressées de concevoir, prototyper et fabriquer leur matériel éducatif à l'aide de machines (figure 2). Ces dernières sont actuellement de trois sortes : imprimantes 3D, découpeuses laser et découpeuses numériques (Cameo).



Figure 2. Machines à disposition au FabLearn de la HEPL

4. Le making

L'approche de conception peut se décliner de manières différentes pour l'objet matériel qui sera utile comme médiateur sémiotique (Bartolini Bussi et Mariotti, 2008), c'est-à-dire travailler soit en *low-tech* et/ou encore en *high-tech* :

- avec le *low-tech*, on utilise des matériaux simples (carton, crayon, ciseaux, papier...), c'est-à-dire une technologie très élémentaire ;
- avec le *high-tech*, on fait intervenir l'informatique et les technologies avancées, souvent critiquées pour leur caractère non durable.

Les deux types de conception peuvent cohabiter, se succéder ou exister indépendamment l'un de l'autre. Les apprentissages développés ne sont généralement pas les mêmes, étant données que des compétences numériques sont inhérentes au *high-tech*. L'objectif, l'utilisation et l'aspect durabilité doivent être pris en compte afin de s'orienter vers le choix d'une méthode de conception pertinente.

À partir de ce qui vient d'être dit, nous définissons le *making* comme la conception et la fabrication, numérique ou non, d'objets médiateurs pour l'apprentissage.

III - ÉVÈNEMENTS ET EXPÉRIENCES DE FORMATION DES ENSEIGNANT.E.S AVEC LE FABLEARN

Appréhender le potentiel du *making*, dans un dispositif de formation de conception d'objets matériels pédagogiques, nécessite d'être illustré.

1. Intervention de la HEP Vaud en lien avec le *making* : événement promotionnel « Salon MINT »

Le salon MINT, qui a ouvert ses portes pour la première fois en 2024, est un espace qui propose des expériences ludiques aux classes vaudoises, des élèves de 8 à 12 ans, dans le domaine des Mathématiques, de l'Ingénierie, de la Nature et la Technologie (MINT), dont le but est de promouvoir des métiers scientifiques.

L'unité de recherche et d'enseignement des mathématiques et des sciences (UER MS) de la HEP Vaud y propose des activités mathématiques qui permettent de faire des *mathématiques autrement* en regard des activités présentées dans les classes du canton de Vaud.

Élèves, corps enseignant, familles confrontent leurs compétences en manipulant des objets. Des collègues de l'UER MS de la HEP sont présent.e.s pour inciter le public à s'engager dans des activités de recherche en lien avec le PER.

Les photographies ci-dessous illustrent deux activités mathématiques en lien avec le repérage dans le plan et les solides. Les anamorphoses (figure 3.a) sont un exemple de *low-tech*. Les connecteurs (figure 3.b), en plastique et maïs, qui permettent d'assembler les baguettes d'un mètre de long (figure 3.c) font partie du *making high-tech*. Ces derniers ont été réalisés au FabLearn sur une imprimante 3D.

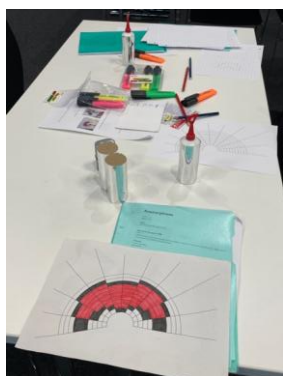


Figure 3.a Anamorphose

Figure 3.b Connecteurs

Figure 3.c Baguettes

2. Intervention de la HEP Vaud en lien avec le *making* : expérience de formation négociée

La HEP Vaud propose des formations négociées pour le corps enseignant du canton de Vaud qui peut être formé sur une thématique de son choix.

Un groupe d'enseignantes et d'enseignants a ainsi été réuni pour concevoir du matériel de différenciation pour l'enseignement des mathématiques. Lors de cette formation, ces personnes ont appris à préciser leurs problématiques, élaborer des prototypes et acquis des compétences techniques. Une fois l'objet concrétisé, elles ont pu aller l'éprouver en classe.

La problématique retenue par ce groupe lors de cette formation était en lien avec les fonctions, concept difficile à intégrer pour les élèves en raison du lien parfois flou entre le graphique et l'écriture littérale.

Après leur choix de problématique, le groupe a fait l'esquisse, une ébauche, d'objet possible (figure 6.a et figure 6.b). Ensuite, il a conçu un premier prototype *low-tech* dans la salle qui permet la fabrication (figure 6.c et figure 6.d). Ce prototype a généré de nouveaux questionnements de l'objet et des modifications à lui apporter (figure 6.e). La première conception *high-tech* a alors émergé (figure 6.f). On peut constater sur les images ci-dessous que la démarche fait intervenir deux types de *making*.

Par la suite, le prototype aura été testé en classe afin de voir s'il permettrait de répondre aux objectifs disciplinaires visés et/ou s'il nécessiterait à nouveau des modifications.

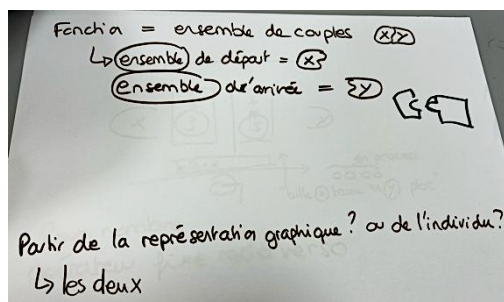


Figure 6.a. Premières réflexions

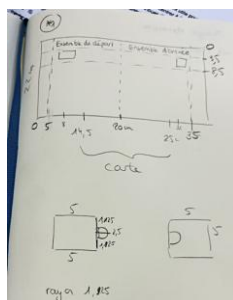


Figure 6.b



Figure 6.c. low-tech

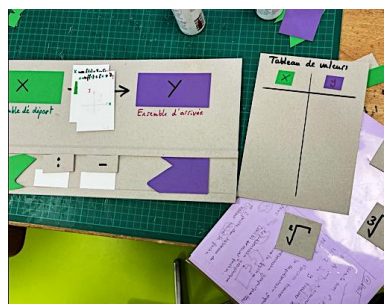


Figure 6.d. conception low-tech

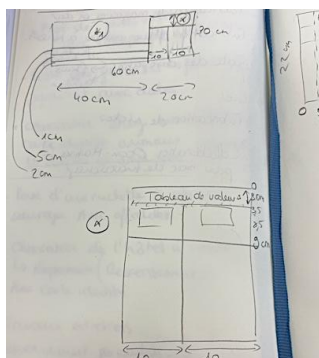


Figure 6.e

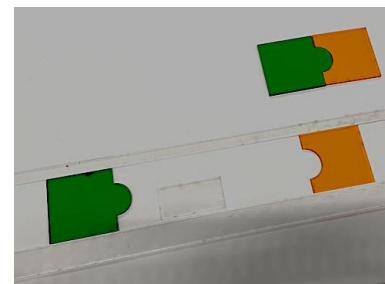


Figure 6.f. high-tech

Les différents entretiens réalisés avec les personnes de cette formation ont montré qu'elles avaient affiné leurs connaissances de la notion mathématique choisie.

3. Intervention de la HEP Vaud en lien avec le *making* : expérience en formation initiale cursus Bachelor Primaire

En dernière année de cursus formation initiale Bachelor Primaire, chaque membre du corps étudiant doit réaliser un mémoire professionnel. Certains groupes choisissent de concevoir et tester des objets pour l'enseignement des mathématiques. Ils sont accompagnés par les collègues du FabLearn.

Dans notre exemple (figure 7), deux étudiantes ont choisi d'introduire, dans une séquence d'enseignement, la « machine à calculer » vue fréquemment sur les réseaux sociaux.

Dans un premier temps, elles ont analysé la machine en faisant des liens avec les concepts théoriques étudiés lors de leur formation. Dans un deuxième temps, elles ont créé leur machine au FabLearn en y apportant les modifications imaginées. Enfin, dans deux classes différentes, elles ont mené une séquence

sur les problèmes additifs de type composition d'états (Vergnaud, 1990a)⁴ pour obtenir des données « avec ou sans utilisation de la machine ».

Lors de la conception, ces étudiantes ont pris en compte les aspects théoriques suivants :

- différentes représentations du nombre (sous une forme analogique et sous la forme d'écriture chiffrée) ;
- la mobilisation de la manipulation active, en considérant que la manipulation est active lorsque l'élève recherche une stratégie en lien avec l'objectif de l'activité, contrairement à la manipulation passive, qui peut constituer une étape de familiarisation avec le matériel, ou intermédiaire lorsque l'objectif fait appel à des compétences d'abstraction.

Sur les illustrations, il y a les cartes créées avec représentation analogique ainsi que le boîtier amovible pour encourager le passage à l'abstraction (anticiper le résultat et pouvoir le vérifier).



Figure 7. Machine à calculer personnalisée

À la fin de leur mémoire, les deux étudiantes ont exprimé les compétences acquises en didactique des mathématiques, notamment la pertinence de travailler en parallèle les différents codes du nombre. La conception de l'objet a été un moyen pour mettre en lien savoirs théoriques et expériences pratiques liées à la didactique.

IV. UN MODÈLE POUR PENSER LE MATÉRIEL DIDACTIQUE

1. Situation de l'origine du modèle

Nos formations, en lien avec le design d'objets pour l'enseignement, nous ont menés à constater l'intérêt que revêt la théorie de la médiation sémiotique (Bartolini Bussi et Mariotti, 2008), qui traite de l'appréhension de l'artefact par l'élève qui va le transformer en instrument, mais également de l'importance de la posture de la personne enseignante en tant que médiatrice sémiotique. Cette théorie décrit le développement de la connaissance, de la pensée, par l'usage d'artefacts qui en facilitent l'élaboration. Les liens avec Vygotski (1981) sont clairement identifiés. Cette thèse articule des éléments tels que l'artefact, l'enseignante ou l'enseignant, le contenu transmis, la réceptrice ou le récepteur et le contexte. Ils s'inscrivent dans un processus qui permet le passage à la connaissance, mathématique dans notre cas. Lors d'une activité mettant en jeu une médiation sémiotique, les signes (langage, symboles, représentations graphiques...) et les artefacts utilisés dans une activité sociale sont partagés et permettent progressivement de faire émerger la connaissance mathématique cherchée. Ce processus doit être intentionnellement développé dans un environnement pensé en amont par la personne enseignante. Ainsi, l'instrument élaboré par l'élève à partir de l'artefact participe pleinement à la

⁴ Ce sont des problèmes du type : dans le vase de Sophie, il y a 5 tulipes et 6 jonquilles, combien y a-t-il de fleurs en tout ? Cette situation, pouvant être modifiée en fonction de ce qui est recherché : j'ai 11 fleurs dans mon vase. J'ai 5 tulipes et toutes les autres fleurs sont des jonquilles. Combien ai-je de jonquilles ? ...

résolution de la tâche et laisse émerger des signes, au sens large, dont l'enseignante ou l'enseignant doit se saisir afin de les faire évoluer en significations mathématiques.

Nous pouvons prendre l'exemple de la règle graduée pour effectuer une mesure de longueur. À sa première utilisation, l'élève prendra connaissance de cet artefact, peut-être pour en faire un objet de jeu. Puis, guidé par la personne enseignante, par la tâche proposée, par le contexte de la tâche, elle ou il apprendra à la positionner (schèmes d'utilisation), à en comprendre la graduation, afin d'obtenir la mesure de la longueur d'un segment. Il s'agit de rester conscient que cela s'inscrit dans un processus.

Au vu de l'importance de l'artefact (Rabardel, 1995), utilisé comme outil de médiation sémiotique (Mariotti et Maracci, 2010), il nous a semblé important de revenir à la conception de l'artefact, sachant toute la pertinence que l'instrument revêt dans le processus d'apprentissage. Pour le terme *instrument*, nous utilisons la définition de Rabardel (1995), pour qui l'instrument est constitué de l'artefact, porteur de contraintes par ses affordances notamment, ainsi que des schèmes (sociaux et personnels) d'utilisation, c'est-à-dire que la forme de l'artefact invite à certaines actions sans qu'elles doivent être explicitées, soit parce que ces actions sont déjà connues (schèmes sociaux), soit parce que l'artefact en question induit son utilisation (par exemple la poignée du bâton de ski dont la partie supérieure inscrit une tenue par la main). Ceci montre l'intérêt de penser les affordances et les schèmes d'utilisation en amont, cela lors du processus de création de l'artefact.

La forme de l'artefact, les schèmes d'utilisation qui lui sont appliqués, et la mise en scène (explicitée plus bas) qui l'entourent, doivent être non seulement réfléchis mais aussi éprouvés par les utilisateurs et utilisatrices afin d'atteindre les objectifs qu'on lui confère.

2. Un modèle pour penser le matériel didactique

Fortes de ces observations, nous avons voulu déterminer les éléments minimaux pour penser le matériel didactique. Dans ce modèle, quatre pôles de réflexion apparaissent, les quatre sommets du tétraèdre (figure 8). Des liens existent entre chaque sommet. Ceci donne la possibilité d'entrer dans la conception de matériel didactique non pas spécifiquement par l'objectif d'apprentissage, mais par l'artefact par exemple, rendant notre modèle utile également pour l'analyse d'instruments déjà conçus.

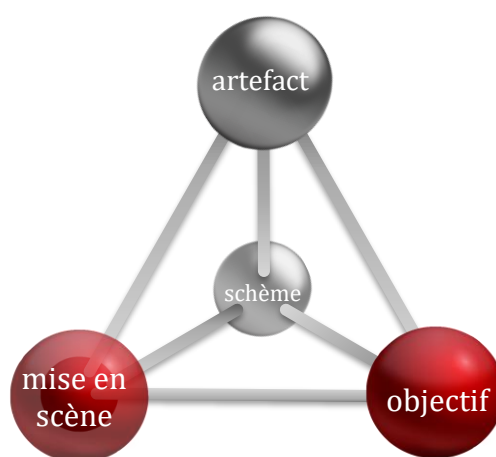


Figure 8. Modèle pour penser l'objet pédagogique

Nous ne voyons pas le processus de conception en didactique, *a fortiori* de création, comme linéaire, mais évolutif, en raison des va-et-vient entre ces quatre pôles, qui permettent progressivement d'atteindre la meilleure forme du prototype localement et temporellement situé.

2.1. *Artefact et schèmes d'utilisation*

Comme nous l'avons exposé plus haut, l'instrument est constitué de l'artefact et de ses schèmes (Rabardel, 1995). Ainsi, nous avons décidé de les garder séparés, car jouer sur l'un des deux seulement permet parfois de créer un déséquilibre qui conduit à une nouvelle connaissance.

Prenons l'exemple d'une tasse avec une anse, remplie de thé chaud. L'habitude et les affordances proposées par cet objet incitent à la prendre par l'anse et à la porter à sa bouche (usage classique, devenu un réflexe). Artefact et schèmes habituels se conjuguent pour une utilisation attendue de cet objet.

Prenons, à présent, une tasse sans anse remplie de thé chaud et mettons-nous à la place de l'enfant qui ne connaît pas ce type de tasse. Il va la prendre à pleines mains, sachant que c'est la meilleure façon de faire afin d'avoir plus de stabilité dans sa préhension, mais risque de la laisser tomber, ses doigts ayant ressenti une légère brûlure. Afin de prendre tout de même cette tasse, il va devoir planifier de nouveaux schèmes pour accéder à la boisson. Des tests successifs lui feront développer de nouvelles connaissances qui se stabiliseront par l'entraînement. Ainsi les affordances de cet artefact vont mettre en défaut des invariants opératoires qui devront évoluer.

C'est parce que les liens entre artefact et schèmes d'utilisation sont très forts que l'approche instrumentale (Rabardel, 1995) les dissocie. En émettant des hypothèses sur les schèmes possibles mais inefficaces, on ouvre la voie à des déséquilibres propices à l'apprentissage.

Le matériel didactique est un objet phénoménal individuel, c'est-à-dire que ses affordances, quand bien même elles ont été pensées intentionnellement ainsi que sa relation à l'individu, restent personnelles.

2.2. *Mise en scène*

Il est aussi tout à fait possible de garder les schèmes habituels d'un instrument, schèmes dont les invariants opératoires sont une composante (Vergnaud, 1990b), et de créer le déséquilibre par une mise en scène imaginée à cet effet. Ce terme de mise en scène est important et choisi à dessein. À l'instar d'une pièce de théâtre, le scénario n'est pas suffisant ; il doit intégrer entre autres les affordances de l'artefact et les hypothèses de schèmes que l'élève utilisera ou développera pour s'approprier ce qui deviendra un instrument au service de l'apprentissage. À cela s'ajoute la mise en scène, l'environnement, les modalités, les consignes à donner (qui se doivent d'être relativement ouvertes pour permettre à l'élève d'entrer dans un processus de recherche). C'est un espace où l'action est encouragée par des guidages implicites. De plus, afin de guider l'élève vers cette appropriation désirée, la personne enseignante devra peut-être jouer le rôle de médiatrice sémiotique à un moment donné (Bartolini Bussi et Mariotti, 2010).

Nous illustrons nos propos avec l'exemple que nous nommons « tours de Lego® ». Nous avons créé une situation de recherche qui utilise une plaque et des pièces 1x1 de Lego® de couleurs différentes. Nous les organisons selon l'image ci-dessous (figure 9). Nous plaçons un nouveau cube, un peu plus loin sur la plaque, et demandons aux élèves de dire le nombre de cubes qui se trouveront à cet emplacement.

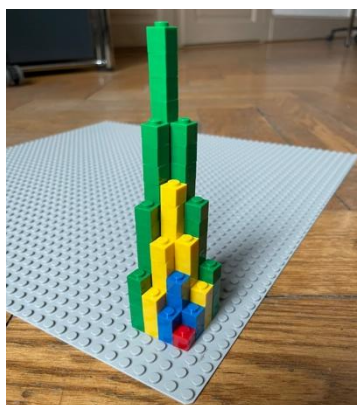


Figure 9. Tours Lego

L'analyse que nous pouvons faire selon notre modèle (figure 8) :

- L'artefact se révèle être le petit cube unité.
- Les schèmes, initiés par l'artefact, correspondent à l'empilement (schèmes usuels et connus). L'élève ne se trouve donc pas confronté à une surcharge cognitive qui l'obligerait en plus à comprendre comment utiliser l'artefact.
- La mise en scène se situe dans la disposition de ces cubes unités (empilés selon les nombres des tables de multiplication), la consigne (volontairement large, combien de cubes sur celui qui est éloigné des autres ?). Ainsi, la disposition des cubes et la consigne orienteront les élèves sur la recherche de la formation des tours dans un premier temps, puis sur la réponse à la question dans un second temps.

L'objectif mathématique est d'activer une nouvelle représentation des tables de multiplications au moyen d'une modalité peu utilisée, à savoir haptique, et ainsi exercer le transfert de connaissances.

Cette situation de recherche permet d'émettre des hypothèses, de les tester, de confronter et argumenter ses propres idées aux autres. Elle peut être menée sous la forme de débat mathématique (au sein du groupe, puis de toute la classe) dans le but de soumettre une solution qui fasse l'unanimité (Scalisi Neyroud et al., 2025). Dans cette situation, la personne enseignante se met en retrait pour laisser les élèves formuler leurs hypothèses. C'est à la toute fin, lors de l'institutionnalisation, qu'elle reprend un rôle de médiation, facilitant ainsi le passage des signes aux connaissances mathématiques.

2.3. Objectif

Bien que nous n'ayons pas commencé par ce pôle, il est évident qu'il est présent dans toutes les réflexions précédentes. Si le matériel didactique ne permet pas d'atteindre l'objectif mathématique visé, issu d'une problématique rencontrée sur le terrain, c'est qu'il n'est momentanément pas adéquat ou que la mise en scène n'est pas la plus pertinente.

L'atteinte de l'objectif d'apprentissage permet de valider la pertinence du design de l'artefact, des schèmes qui y sont associés et de la mise en scène choisie.

Avant de présenter le dispositif de formation, utilisant ce modèle, dispensé aux corps étudiants de la HEP et enseignant.e.s vaudois.e.s, il faut garder à l'esprit l'objectif durant toute la conception de matériel didactique. Lors de son élaboration, la conceptrice ou le concepteur fait des hypothèses sur les schèmes qui seront développés par les élèves dans l'appréhension de l'objet matériel. Il est nécessaire d'y penser lors de sa création, notamment pour apporter des perturbations cognitives.

La démarche qui permet d'aboutir au matériel didactique le plus adéquat, doit inclure une phase d'expérimentation et d'observation contextuelle afin de juger de sa pertinence. Cette phase nous a également permis de développer le dispositif de formation qui suit.

V - UN DISPOSITIF DE FORMATION QUI INCLUT LE MODÈLE POUR PENSER LE MATÉRIEL DIDACTIQUE

Depuis deux ans, nous proposons des formations autour de la construction de matériels pédagogiques à des groupes enseignant en fonction depuis quelques années et à des groupes étudiants intéressés par ce processus (comme rapporté dans la partie III). Ces derniers viennent avec une problématique disciplinaire qui leur est propre. Ils souhaitent y répondre par le processus du *making*.

La structure a donc été éprouvée à plusieurs reprises ; ses fondements semblent s'être stabilisés. Néanmoins, cette formation reste, et cela est notre désir, réellement adaptable aux besoins des différents groupes.

Notre dispositif se décline de la façon suivante (figure 10). Au départ, les groupes participant à la formation conçoivent de petits objets en bois et en PLA⁵ pour développer des compétences sur les logiciels et les machines présentes dans notre espace (logiciels de conception 2D et 3D, découpeuse laser et imprimante 3D). Cette première phase leur permet d'envisager le champ des possibles de production. Ensuite, ils doivent déterminer ou affiner leur problématique, souvent orientée sur les erreurs d'élèves rencontrées, sur les notions complexes à enseigner ou encore sur la création de matériel à destination d'élèves dits en difficulté. Puis, s'aidant de leur problématique, ils énoncent l'objectif d'apprentissage du modèle (figure 8) pour penser le matériel didactique. Enfin, ils entament le processus de conception en gardant en tête que le prototype doit servir de médiateur à l'élève pour atteindre l'objectif d'apprentissage.

La première phase, *low-tech*, du processus de conception, s'opère avec du matériel varié : carton, papier, aimants, pâte à modeler. Il leur est ainsi possible de cibler les dimensions de l'artefact, de réfléchir aux schèmes associés, d'effectuer un premier test d'utilisation.

La deuxième phase du processus de conception est la réalisation qui s'accomplit souvent au travers de nombreux ajustements.

La troisième phase du processus de conception permet de produire le premier prototype. Ce prototype sera ensuite soumis aux élèves pour des tests. Ces tests permettront d'apporter encore des modifications pour obtenir un objet matériel plus adapté à l'objectif d'apprentissage visé.

Si ce dernier n'est pas atteint, il faudrait alors modifier la mise en scène ou alors le design de l'objet en ayant préalablement discriminé qui, des schèmes ou des affordances, ne sont pas efficaces. Par ailleurs, les affordances ne seraient pas non plus celles déterminées par la conceptrice ou le concepteur.

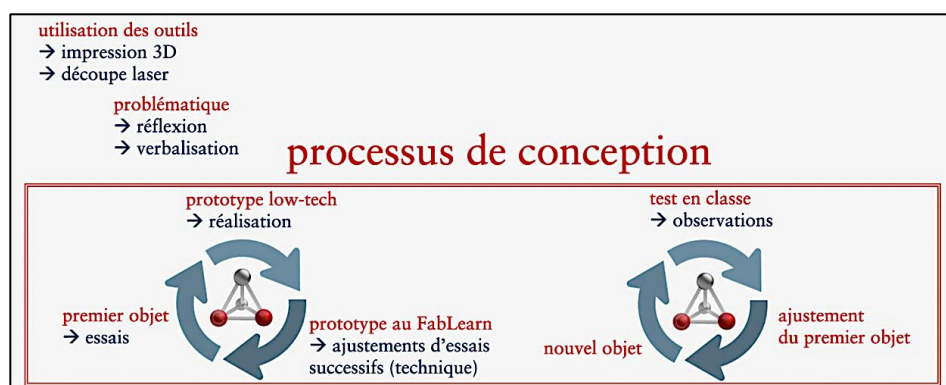


Figure 10. Processus de conception

Comme tout processus, celui-ci prend du temps. En revanche, c'est une démarche qui, par les compétences et les savoirs qu'elle développe, permet de modifier la posture enseignante. Cette formation propose également un modèle d'analyse d'objets matériels orienté sur l'outil médiateur.

VI. EXPÉRIENCES VÉCUES À LA COPIRELEM

L'atelier de la Copirelem s'est exclusivement centré sur la phase de conception *low-tech*. Nous avons proposé trois problématiques, pour que les participant.e.s puissent se focaliser essentiellement sur cette phase de conception. Voici les problématiques proposées :

1. *Comment, sur une droite graduée, donner du sens au passage de la fraction représentant la mesure de la longueur d'un intervalle à une position symbolisée par une graduation ?*

⁵ Le PLA est un matériau pour les imprimantes 3D (filament en acide polylactique).

2. *Comment donner du sens aux conversions d'unités ? (problématique en lien avec des erreurs récurrentes chez nos élèves malgré un outil existant, le tableau de conversion)*
3. *Comment sensibiliser les élèves au périmètre du cercle et à son lien avec π ?*

Deux groupes ont souhaité réfléchir à la première problématique. Un troisième groupe s'est consacré à la deuxième problématique. La troisième problématique n'a pas été retenue. En revanche, l'artefact créé à la HEP sur cette thématique a été présenté en conclusion de l'atelier. Il est décrit à la fin de cette partie.

Le matériel créatif mis à disposition des groupes était : carton, carton ondulé, papier de couleurs (A3 - A4) et quadrillé, papier - mousse, scotch, colle, agrafeuse, ficelle, cure-pipe, pique à brochette, gomme, crayon, stylo-feutre, cutter, ciseaux...

1. Autour de « Comment, sur une droite graduée, donner du sens au passage de la fraction représentant la longueur d'un intervalle à une position symbolisée par une graduation ? »

Deux groupes que nous nommerons A et B (A : 3 personnes / B : 3 personnes) ont décidé de travailler sur cette problématique.

1.1. Synthèse du travail du groupe A

Le premier quart d'heure a permis aux personnes de ce groupe d'échanger sur les savoirs théoriques, leur connaissances personnelles sur le sujet et leur compréhension de la consigne. Les notions *fraction d'un tout* et *fractions unités* ont émergé. Ce premier temps d'échange met l'accent sur la nécessité de construire progressivement un univers commun dans lequel elles et ils vont évoluer durant le temps que durera l'atelier.

Rapidement, de premières idées d'objets ont été proposées et dessinées. Ces illustrations ont permis de poursuivre cette analyse de la problématique et d'étendre les réflexions aux pratiques et aux exemples rencontrés de difficultés. Ces premières idées sont toujours sujettes à évoluer, mais elles constituent un point de départ à une réflexion plus approfondie des dilemmes induits par les propositions d'objets (figure 11), à savoir comment faire accepter le passage de la mesure d'une aire (ici les surfaces sont des rectangles) à la mesure d'une longueur (ici, représentée par un segment inclus dans la droite graduée) pour aboutir au marquage d'un point de cette même droite graduée (abscisse), alors que ce ne sont pas les mêmes grandeurs.

À la suite de ces ébauches, les personnes du groupe A sont revenues sur les termes utilisés dans la problématique ; la formulation ne leur paraissait plus adéquate. Cette nouvelle investigation leur a permis d'établir que les élèves savent ce qu'est le « marquage », qu'ils savent également reporter. C'est à partir de ce constat que le groupe poursuivra vers une mesure de longueur comme le report d'unités.

Une vingtaine de minutes après le début de l'atelier, nous les avons invités à utiliser leur matériel. Cette demande est en réalité une relance pour permettre au groupe de concrétiser physiquement les discussions et faire évoluer encore le prototypage.

Par la suite, les termes de « bande » et de « ficelle », qui mettent évidemment l'accent sur différentes grandeurs, à savoir l'aire ou la longueur, ont été passablement discutés et surtout manipulés (figure 11).

L'utilisation de leur artefact a été expliquée lors de la rapide présentation de fin d'atelier. La longueur du cadre (en carton gris sur la figure 11) constitue l'unité. Les bandes de couleurs, des parties simples de l'étalon associé à l'unité, représentent soit un demi (en rouge), un tiers (en jaune), un quart (en bleu). Il s'agit ensuite de prendre le cordon vert pour le tirer jusqu'à la valeur à atteindre (par exemple : trois parties rouges sur la figure 11). Ce mouvement s'arrête et une marque au crayon est inscrite sur la bande jaune clair : la valeur est ensuite indiquée : trois quarts.

Nous pouvons constater que le temps à disposition pour la réalisation d'un artefact et la réflexion des schèmes d'utilisation était insuffisant. Ce prototype demande, comme les suivants, encore un temps de réflexion et de manipulation.



Figure 11. Passage de la mesure d'une surface à la mesure d'une longueur

1.2. Synthèse du travail du groupe B

Dans le second groupe, le point de départ des discussions a été marqué par la bande que l'on plie pour obtenir des fractions simples (demi, quart, tiers), situation où la fraction est vue comme « partie d'un tout ». Les membres du groupe se questionnent sur la bande de papier qui peut être vue comme une surface et non une bande que l'on plie, afin de l'utiliser comme élément de mesures à reporter.

Après une demi-heure d'échanges, les artefacts ont évolué de la bande de papier que l'on plie à la ficelle qui se déroule (figure 12). Mais le groupe a essayé tout de même de gérer le passage d'une aire à une longueur.

Le matériel choisi a permis d'imaginer une « roue » qui déroule une ficelle sur plusieurs tours et se déploie sur une demi-droite. L'idée de la demi-droite pour définir l'origine avait préalablement été débattue par le groupe. En effet, l'origine associée au zéro appartenant bien à la droite graduée est nécessaire pour la construction d'une droite numérique.

Les disques posés sur le dérouleur permettent d'identifier des surfaces (les habituelles tranches de pizzas) familières aux élèves. Ainsi le passage des aires aux longueurs, puis au marquage d'un point est pris en charge par l'objet imaginé par les personnes du groupe B.

L'utilisation de la machine est décrite ainsi :

1. D'abord, on déroule la ficelle sur un tour pour marquer une unité.
2. Ensuite, on place sur le disque initial un nouveau disque avec des marques (par exemple : des quarts)
3. Puis, on déroule à nouveau la ficelle depuis la même origine pour graduer le segment unité en quarts.
4. Et ainsi de suite ; on peut répéter cette situation avec autant de surfaces fractionnées que créées.

L'objectif de cet artefact étant de transposer un tiers du périmètre du disque construit, déterminé par un tiers de l'aire du disque, sur une demi-droite et ainsi la graduer en tiers, donc passer à une fraction unité que l'on reporte.

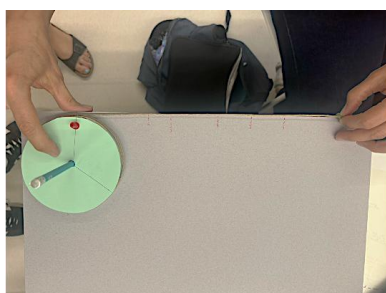


Figure 12. Démonstration du dérouleur de ficelle comme marqueur de fractions unités.

Au terme de l'atelier

Nous avons constaté une approche différente pour une problématique similaire. Les questionnements communs rappellent la complexité de la représentation des fractions, plus spécifiquement du passage des surfaces (ici rectangulaire ou circulaire) à la symbolisation de la coordonnée sur une droite numérique. Des prototypes d'objets pour aider les élèves à la représentation et la compréhension de ce passage ont été élaborés durant cet atelier. Ils méritent d'être encore requestionnés, mais ils ont également été au service des personnes des différents groupes pour débattre, entrer par une autre porte dans la notion de fractions, sans tenir pour acquises certaines évidences qui éloignent parfois d'une investigation pertinente des difficultés d'élèves.

2. Autour de « Comment donner du sens aux conversions d'unités ? (lien avec des erreurs récurrentes et avec un outil existant insatisfaisant, car ne donnant pas de sens) »

Le groupe formé de quatre personnes s'est d'abord interrogé sur l'utilisation contextuelle du terme « unité » ; s'agit-il de réfléchir à un instrument pour permettre des conversions entre unités de numération ou entre unités de mesure ? Puis, dans le cas d'unités de mesure, s'agit-il de concevoir un prototype qui permette de manipuler les relations entre unités de mesure d'une même grandeur (par exemple : L, dL, cL, mL...) ou un prototype qui permette de multiplier ou diviser par 10, 100, 1000... quelle que soit l'unité de mesure ?

Pour prendre une décision, les personnes de ce groupe ont discuté de l'éventail des artefacts déjà existants (par exemple : le glisse-nombre) et des biais d'utilisation dans l'enseignement. Les discussions se sont ensuite centrées sur les difficultés des élèves. Et force de constater que si les élèves ne font pas de lien entre les différentes unités d'une même grandeur, c'est que :

- la grandeur *longueur* se prête bien à la manipulation (100 centimètres ou 10 décimètres sur la règle d'un mètre) et les artefacts sont déjà très présents dans les classes ;
- l'abstraction pose un problème ce qui est le cas pour le tableau de conversion, le glisse-mesure ;
- il est nécessaire de percevoir et manipuler chaque unité ;
- il est nécessaire de percevoir et manipuler le report des plus petites unités (par exemple les 10 dL dans 1 L) ;
- le sens du report d'unité pour les grandeurs masse, volume/capacité sont compliquées à matérialiser ;
- le matériel de manipulation doit être proche du quotidien des élèves.

Au bout d'un quart d'heure, le groupe s'est donc positionné sur la création d'un prototype cylindre-litre avec des anneaux (figure 13) représentant le contenant mais en différentes unités. Le prototypage a été réalisé à l'aide d'une bouteille en PET (figure 13). Les anneaux ont été réalisés avec du papier calque.



Figure 13. Prise de note du prototype cylindre-litre et anneaux

Les réflexions de conception ont porté sur :

- le choix des matériaux et la couleur des matériaux : matériaux imperméables, glissants, incolores et transparents pour voir le liquide mais aussi pour mieux appréhender et acquérir le sens des différentes unités de mesure ;
- l'anticipation des schèmes d'utilisation : superposer dix anneaux pour obtenir le contenu ;
- la mise en scène : est-il possible de gérer l'utilisation du liquide en classe ? Est-ce que tous les liquides permettent de faire comprendre le sens de l'unité ? Faut-il proposer de comparer différents liquides ? À capacités égales, les élèves remettraient-ils en doute leur mesure en fonction de la forme du récipient (bouteille vs bol vs bassine) ?

À la suite de ce temps créatif, les réflexions ont porté sur la visée de l'objectif d'apprentissage : est-ce que l'objet permet de manipuler les unités et d'effectuer les conversions aisément ? L'avis soutenu par le groupe est qu'enseigner les conversions n'a pas de sens, en revanche c'est la manipulation de l'objet qui permettra d'induire les différentes unités et de permettre aux élèves d'incarner le sens de ces unités.

Communément, le groupe a donc estimé que l'élève pourrait ancrer l'apprentissage des conversions d'unités de capacité grâce à l'objet à manipuler. Après avoir permis aux élèves de se construire des référents (ici, les anneaux – figure 13) des différentes unités et de s'être assuré de la bonne compréhension des liens existants entre ces unités, il sera possible de faire des conversions de manière abstraite. Voici un verbatim du groupe : « ils ont à la fois un référent pour chaque sous-unité et ils auront vécu... Mais visuellement, il faut qu'ils aient visuellement l'objet, pour pouvoir faire, parce qu'au début tu as l'action, après tu peux enlever l'action de transvaser mais tu as toujours l'objet. »

Les derniers échanges ont porté sur les tâches existantes dans les moyens d'enseignement et leur potentiel didactique. Est-ce que « le cylindre-litre et ses anneaux » peut devenir un outil innovant ?

3. Autour de « Comment sensibiliser les élèves au périmètre du cercle et à son lien avec π ? »

À la fin de la séance, nous avons présenté quelques objets⁶. Nous parlerons ici uniquement de l'objet qui permet une approche de π . En Suisse, il figure au programme du cycle 3 (12-15 ans), mais nous faisons une sensibilisation auprès des élèves de 10-11 ans. L'intérêt réside dans le fait que le nombre π n'est pas parachuté comme une valeur constante sans unité mais émerge progressivement par l'utilisation du matériel. La volonté de travailler à l'aide de mesure non conventionnelle pour appréhender et donner du sens à ce nombre nous paraissait importante.

Dans le matériel visible plus bas (figure 14.a), on aperçoit des polygones dont le nombre de côtés augmente progressivement, tous inscriptibles dans un cercle de 10 cm de diamètre, pour finalement obtenir le cercle complet. À l'extérieur des cercles, tangents à ces derniers (figure 14.a), on retrouve la représentation courante de ces polygones qui progressent également vers le cercle. On remarque également une longueur-unité, celle d'une petite baguette en bois de 10 cm.

Sur l'image de droite (figure 14.b), on trouve une feuille A3 qui permet la mesure du périmètre de chaque polygone.

Les consignes données aux élèves sont les suivantes :

- *Compare les longueurs des périmètres de chaque figure et classe-les de la plus petite à la plus grande.*
- *Reporte le périmètre de chaque polygone sur les demi-droites adéquates.*
- *Que peux-tu observer ?*

⁶ À retrouver sur le site : labomath.hepl.ch

- *Utilise la longueur-unité (celle de la baguette en bois), afin de mesurer la longueur de ces périmètres.*

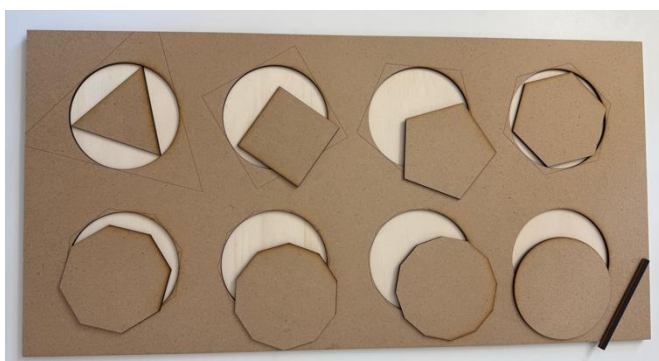


Figure 14.a

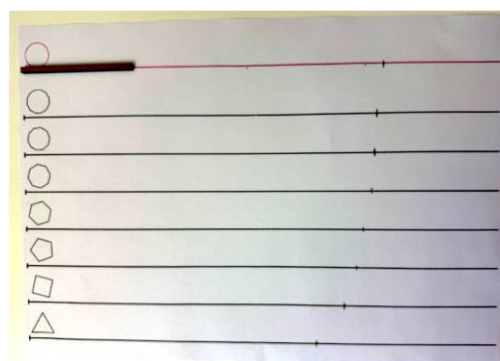


Figure 14.b

La première question incite l'élève à la recherche : trouver une procédure qui lui permette d'effectuer le classement attendu. Elle ou il n'a pas droit aux instruments conventionnels de mesure de longueur.

En Suisse, les différentes procédures de comparaison sont enseignées entre 4 ans et 11 ans. Les élèves comparent une grandeur grâce à l'approche perceptive, puis la procédure de comparaison directe, ensuite celle de comparaison indirecte. À la suite de cela, c'est le mesurage qui sera mis en avant avec l'utilisation de mesures non conventionnelles, puis conventionnelles.

La plus grande longueur de périmètre peut émerger grâce à la surface plus claire du disque dans lequel le polygone s'inscrit. Néanmoins, le passage à la feuille A₃, où il s'agit d'une manière ou d'une autre de reporter la longueur des périmètres des différentes figures, constitue une étape importante pour la suite (figure 14.b). L'élève expérimente de façon incarnée la longueur du périmètre en le déroulant sur la demi-droite. Une fois tous les périmètres reportés, une courbe émerge en reliant les extrémités des périmètres déroulés qui tend vers la longueur du périmètre du cercle. Cette ultime longueur mesure, grâce à la baguette unité, 3 et un petit peu plus. Pour les élèves de cet âge-là (π est abordé à 12-13 ans en Suisse) nous donnons finalement la valeur attendue. Il s'agit avant tout de créer un lien le cercle et π .

Comme on peut le voir, l'approche reste expérimentale, la précision n'est pas l'objectif de la tâche, mais bien le fait de donner du sens à un nombre très utilisé.

VII - CONCLUSION : ÉCHANGES ET PERSPECTIVES AUTOUR DU MODÈLE

En guise de conclusion, nous avons décidé de mettre l'accent sur les points saillants des discussions durant les ateliers et sur ce que nous avons pu observer lors des formations dans notre institution.

1. Réactions à la suite des ateliers

S'il est vrai que le processus créatif prend du temps, la conception des prototypes a permis d'initier un questionnement plus approfondi des notions mathématiques travaillées.

Lorsque nous faisons ces formations, le corps étudiant bénéficie d'une journée complète afin de réaliser un prototype *low-tech*. Il est évident qu'avec le temps imparti à cet atelier, les groupes ont initié un prototype qui demande à être éprouvé. Les explications rapides de fin de séance sur l'utilisation de leur objet étaient succinctes et demandent des éclaircissements. La roue pour le passage à la droite graduée ou encore la bouteille pour visualiser les unités de capacité ne manquent pas d'intérêt et d'innovation. Néanmoins, les conceptions mentales des notions abordées ne semblent pas avoir changé. Ceci certainement pour deux raisons : le temps à disposition (une heure trente pour enrichir ses conceptions est très court) et les habitudes (il y a toujours des résistances à modifier ses habitudes ou sa

façon de voir les choses). Compte tenu de ce qui précède, ce qui a été proposé en fin d'atelier et un bon début qu'il faut requestionner.

Notre objectif, finalement, était que ces groupes vivent une expérience de conception, donc une approche différente, afin de réfléchir à une notion qu'ils connaissent. En cela, l'atelier a atteint son objectif.

En écoutant les personnes des différents groupes, nous avons pu remarquer que les notions travaillées ont été challengées par la conception et que des va-et-vient fréquents ont eu lieu entre leur connaissance de la notion travaillée et l'artefact réalisé. Ce dernier a été pensé au niveau de sa manipulation, donc au niveau des schèmes d'utilisation.

À la suite des ateliers, l'appréciation d'avoir vécu un atelier peu commun a été relevée. Elles et ils ont perçu le potentiel formatif, du point de vue des connaissances mathématiques pour la formation des étudiantes et des étudiants, mais aussi des capacités transversales que cette formation peut développer, telles que la collaboration, la pensée créative et la démarche réflexive.

Les groupes de l'atelier ont trouvé un intérêt à aborder des notions complexes et des difficultés mathématiques des élèves par le biais de la conception d'objets à manipuler.

Les points d'interrogation ou questionnements concernant l'organisation d'un tel dispositif, des coûts et des ressources humaines ont été soulevés, ce que l'on pourrait interpréter comme un intérêt à la réflexion de la mise sur pied d'une telle formation.

En effet, ce dispositif nécessite un travail minimum de 20 heures pour un groupe qui expérimente cette formation. À cela, il faut aussi ajouter la disponibilité et présences des collègues qui dispensent la formation. Enfin, tout l'intérêt réside dans les tests du matériel conçu auprès des élèves, afin de pouvoir faire évoluer l'objet. La première utilisation en classe revêt une importance capitale notamment dans l'observation de la part de l'enseignante ou de l'enseignant quant à la manipulation de l'objet par l'élève. Un questionnaire doit émerger tel que : comment l'élève appréhende-t-il l'objet ? La situation imaginée, donc la mise en scène, est-elle pertinente ? Quelle concordance entre ce qui avait été imaginé et ce qui se passe réellement en classe ? L'objectif mathématique est-il atteint ?

On constate que ces questions sont en lien avec le modèle pour penser l'objet didactique et ce sont bien celles-ci qui permettront une version améliorée de l'objet. Ainsi le temps de formation pour ce dispositif ne peut se faire en continu mais de manière échelonnée.

À cela, il s'agit également d'ajouter l'accès à un local comme un FabLab, ainsi que les ressources matérielles qui peuvent engendrer un certain coût.

2. Compétences acquises lors de ce dispositif

À la question de ce que la mise en œuvre d'un tel dispositif peut apporter à la formation, nous avons quelques pistes.

Lors de l'accompagnement et de la discussion avec des groupes en formation sur le *making* à la HEP Vaud, nous avons constaté que la création de matériel pédagogique pour les mathématiques suscite de l'intérêt certes, mais permet également de développer un nombre important de compétences telles que :

- augmenter les connaissances dans la notion disciplinaire choisie pour sa problématique ;
- développer des compétences dans l'utilisation des machines numériques et leur logiciel ;
- travailler à l'intersection de l'analogique et du numérique ;
- entretenir l'intérêt de la collaboration et du partage de pratiques ;
- intégrer le processus itératif du prototype à l'objet final en passant par une phase de test ;
- comprendre que l'artefact est lié à des schèmes d'utilisation et ne pas les négliger ;
- déployer ses compétences dans le processus créatif ;
- travailler la résolution de problèmes et l'argumentation ;
- développer son agentivité et son sentiment d'auto-efficacité ;

- développer un esprit critique

Devant ce tableau presque idyllique qui promeut de multiples compétences, nous pouvons y ajouter quelques bémols qu'il s'agit de dépasser, afin de pouvoir montrer l'intérêt de ce type de dispositif.

Dans son article de 2005, Ertmer met en lumière les obstacles que l'on peut rencontrer dans ce genre de formation. Il explique que le corps enseignant n'adhère pas spontanément à ces pratiques de *making* car il est envahi de croyances limitantes quant à leurs compétences face à la technologie. Cette croyance mise au regard des croyances sur l'enseignement et l'apprentissage, c'est-à-dire leur pratique habituelle, les empêchent d'entrer dans la formation sans réticence. Et de conclure, pertinemment, sur le fait qu'il est difficile de savoir si les croyances précèdent l'usage des technologies ou l'inverse, mais qu'il devient évident qu'un changement doit se faire simultanément. Avec l'espoir qu'une augmentation des compétences techniques et de leur intérêt dans l'enseignement modifiera l'habitude de leurs pratiques enseignantes.

De plus, proposer de telles formations peut redéfinir l'identité même de l'enseignante et l'enseignant, afin d'évoluer au niveau de ses croyances et être ainsi un levier pour un changement de pratiques pédagogiques.

Afin d'anticiper la transformation de l'identité professionnelle à venir, nous devons continuer à prendre en compte la situation des enseignants dans leurs premières années de pratique, où l'influence du contexte – la nature de l'établissement d'enseignement, leurs collègues, la direction de l'établissement, leurs propres élèves et la communauté scolaire au sens large – se fait fortement sentir. Nous devons ensuite nous efforcer d'intégrer nos connaissances sur les contextes et les communautés, ainsi que sur leur influence sur la formation de l'identité enseignante, dans nos programmes de formation des enseignants, afin de préparer les nouveaux enseignants aux défis du développement positif d'une identité professionnelle forte.⁷ (traduit de Beauchamp et Thomas, 2009, p. 186).

3. Perspectives

Nous pensons que notre dispositif de formation est relativement stabilisé, ou tout du moins nous permet de mener des formations qui développent des compétences intéressantes en éducation. En ce qui concerne notre modèle théorique en quatre pôles, ce dernier n'est qu'un point de départ que nous sommes en train de développer et d'affiner. Nous nous concentrons notamment sur les schèmes et en particulier sur les invariants opératoires (Vergnaud, 1990b), et nous avons l'intention de préciser notre compréhension des affordances liées à l'artefact, en ce qu'il « invite » à faire, selon une approche écologique de la perception (Gibson, 1979).

⁷ In order to anticipate the reshaping of professional identity that will come, we must continue to consider the situation of teachers in the early years of practice, where the influence of their surrounding context – the nature of the educational institution, teacher colleagues, school administrators, their own students and the wider school community – is strongly felt. We must then try to incorporate what we know about the contexts and communities and their influence on the shaping of teacher identities into our teacher education programmes to prepare new teachers for the challenges of developing strong professional identities in positive ways. (Beauchamp et Thomas, 2009, p. 186)

BIBLIOGRAPHIE

Beauchamp, C. et Thomas, L. (2009). Understanding teacher identity: an overview of issues in the literature and implications for teacher education. *Cambridge Journal of Education*, 39(2), 175–189. <https://doi.org/10.1080/03057640902902252>

Bartolini Bussi, M.-B. et Mariotti, M.-A. (2008). Semiotic mediation in the mathematics classroom: Artifacts and signs after a Vygotskian perspective. *Handbook of international research in mathematics education*, 746.

Ertmer, P. A. (2005). Teacher pedagogical beliefs: The final frontier in our quest for technology integration ? *Educational technology research and development*, 53(4), 25-39.

Gibson, J. J. (1979). *Une approche écologique de la perception visuelle*. Bellevaux : éditions Dehors.

Mariotti, M. A. et Maracci, M. (2010). Les artefacts comme outils de médiation sémiotique : quel cadre pour les ressources de l'enseignant ? Dans G. Gueudet et L. Trouche (éd.), *Ressources vives. Le travail documentaire des professeurs en mathématiques* (91-107). Rennes : Presses Universitaires de Rennes.

https://www.researchgate.net/publication/236477687_Un_artefact_comme_instrument_de_mediation_semiotique_une_ressource_pour_le_professeur

Rabardel, P. (1995). Qu'est-ce qu'un instrument ? *Les dossiers de l'Ingénierie éducative*, 19, 61-65. https://edunum.unige.ch/articles/rabardel_1995_quest-ce_quun_instrument.pdf

Scalisi Neyroud, C., Serment, J., Batteau, V., Epp, S., Trgalova, J. et Vialle, L. (2025). Instaurer un débat mathématique en classe de primaire : récit d'une expérimentation autour des transformations géométriques. *Revue De Mathématiques Pour l'école*, 243.

<https://doi.org/10.26034/vd.rm.2025.6239>

Vergnaud, G. (1990a). Développement et fonctionnement cognitifs dans le champ conceptuel des structures additives. *Développement et fonctionnement cognitifs chez l'enfant* (261-278). Paris : Presses Universitaires de France.

Vergnaud, G. (1990b). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactiques des Mathématiques*, Vol/2.3, 133-170. La Pensée Sauvage.

Vygotsky, L. S. (1981). The genesis of higher mental functions. *The concept of activity in Soviet psychology*, 144-188. Abingdon-on-Thames : Routledge.

Sites

Arts et Métiers. *Qu'est-ce qu'un FabLab ?* Consulté le 19.08.2025. <https://artsetmetiers.fr/fr/quest-ce-quun-fablab>

CIIP. (2023). *Espace des moyens d'enseignement romands. (ESPER)*. <https://www.ciip-esper.ch/#>

CIIP. (2024). *Plan d'études romand*. <https://portail.ciip.ch/per/disciplines/5>

HEP Lausanne. (n.d). *FabLearn*. Consulté le 15.05.2025. <https://fablearn.hepl.ch/>