



Rôles des interactions enseignant-élèves dans l'intégration d'un logiciel de géométrie dynamique: le cas d'un enseignant du primaire en Tunisie

Faten Khalloufi-Mouha¹  · Mohamed Brini²

Accepted: 8 December 2022 / Published online: 8 January 2023
© Ontario Institute for Studies in Education (OISE) 2022

Abstract In this paper, we investigate how teacher-student interactions taking place while using a technological resource inform teaching practices and how these interactions subsequently influence the integration of the resource into teaching. Using the documentational approach and the theory of instrumental orchestration as a framework, we look at this issue from a documentational genesis perspective. In our study, we examine the documentational work of a primary teacher who is using the technological resource GeoGebra to introduce the properties of parallelograms to grade 6 primary students (age 11–12). Our research reveals the importance of the adjustments the teacher makes to the lesson plan during in-class implementation. New practices begin to take shape, as shown through the emergence of two types of instrumental orchestrations, translating into more precise guidance of the students' work and stemming from the interactions between the students and the teacher. Such interactions then become a resource for the teacher who is developing in-class practices.

Résumé Dans cet article, nous explorons la façon dont l'interaction entre l'enseignant et les élèves en classe façonne les pratiques enseignantes dans le cas de l'utilisation d'une ressource technologique et façonne ainsi l'intégration de cette ressource dans l'enseignement. En se plaçant dans le cadre de l'approche documentaire et en utilisant la notion d'orchestration instrumentale, nous abordons cette problématique du point de vue de la genèse documentaire, à travers l'étude du travail documentaire d'un enseignant du primaire utilisant la ressource technologique GeoGebra pour introduire les propriétés des parallélogrammes à des élèves de 6^{ème} année primaire (11–12 ans). Les résultats des analyses font apparaître l'importance des adaptations apportées par l'enseignant lors de la mise en œuvre en classe, aux documents de préparation de la leçon. Ainsi que l'émergence de nouvelles pratiques, manifestées

✉ Faten Khalloufi-Mouha
faten.khalloufi@fsb.u-carthage.tn; fkhalloufi@yahoo.fr

Mohamed Brini
brinimohamed83@gmail.com

¹ Faculté des Sciences de Bizerte, Université de Carthage, Carthage, Tunisie

² Institut Supérieur de l'Éducation et de la Formation Continue, Université Virtuelle de Tunis, Tunis, Tunisia

par deux types émergents d'orchestrations instrumentales qui traduisent une guidance étroite du travail des élèves et qui résultent du fonctionnement de l'interaction entre les élèves et l'enseignant comme une ressource pour l'activité de l'enseignant qui façonne ses pratiques en classe.

Mots-clefs L'approche documentaire · Travail documentaire · ressource technologique · orchestration instrumentale · pratiques de l'enseignant

INTRODUCTION

Lors des dernières années, l'importante évolution au niveau du nombre et des types de ressources disponibles pour l'enseignant en général et pour l'enseignant des mathématiques en particulier, a soulevé la question de leurs utilisations et de leurs appropriations, notamment lorsqu'il s'agit d'une ressource technologique comme les logiciels (Trgalova et Rousson, 2017). Le terme ressource est utilisé selon la définition de Adler (2000) comme tout ce qui peut re-sourcer l'activité de l'enseignant. Adler (2000) propose “think of a resource as the verb resource, to source again or differently” (p. 207). La problématique de l'intégration des ressources technologiques dans l'enseignement des mathématiques, n'est pas récente, mais elle reste centrale dans les travaux de recherche en didactique des mathématiques (Pepin, Guedet et Trouche, 2013). Ces travaux s'accordent sur l'importance de l'impact des ressources technologiques sur les activités choisies ou élaborées lors de la préparation du cours, sur les pratiques de l'enseignant lors de leur mise en œuvre en classe, sur le contenu mathématique proposé et sur l'apprentissage des élèves (Khalloufi-Mouha, 2014, 2022). Monaghan (2004) explique que « the integration of technology into mathematics teachers' classroom practice is a complex undertaking, regardless of whether teachers find this an “easy” transformation of practices or not” (Monaghan, 2004, p.352). La complexité des pratiques enseignantes intégrant les technologies, a été abordée dans plusieurs travaux selon différents points de vue en faisant appel à des cadres théoriques différents. Trouche (2005) a mis en évidence la complexité du rôle de l'enseignant utilisant les nouvelles technologies en classe, comme conséquence de la complexité de la construction et de la conduite des instruments. Il a ainsi introduit la notion d'orchestration instrumentale en se basant sur l'approche instrumentale de Rabardel (1995). Considérée comme une extension de l'approche instrumentale, l'approche documentaire du didactique (Guedet et Trouche 2008, 2009, Guedet 2019) a abordé le travail de l'enseignant à travers ses interactions avec les différentes ressources pour et pendant l'enseignement. Dans notre travail, nous nous plaçons dans la lignée des travaux explorant la dimension professionnelle du travail de l'enseignant en lien avec l'évolution rapide des nouvelles technologies et la disponibilité de différents types de ressources. Nous cherchons ainsi, à apporter une contribution à l'ensemble des travaux abordant la problématique des pratiques des enseignants dans le cas de l'intégration des ressources technologiques. Cela, à travers l'exploration de l'impact des ressources technologiques sur les pratiques de l'enseignant et inversement, de la manière dont ces pratiques façonnent l'utilisation de cette ressource. À cette fin, en adoptant le cadre de l'approche documentaire du didactique (ADD) et en s'appuyant sur la notion d'orchestration instrumentale, nous cherchons à comprendre comment les interactions entre l'enseignant et les élèves façonnent l'intégration d'une ressource technologique dans l'enseignement. En particulier, nous cherchons à explorer comment ces interactions façonnent les pratiques de l'enseignant du point de vue de son interaction avec la ressource technologique utilisée, lors des différentes phases de son travail.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons les concepts de base de l'ADD utilisée dans cet article ainsi que la notion d'orchestration instrumentale. Puis, nous précisons les questions de recherche qui ont guidé notre travail.

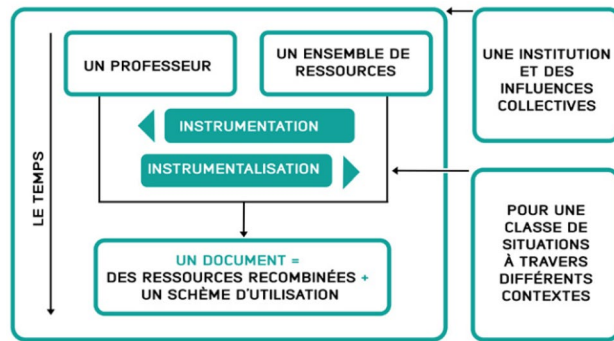
LES PRINCIPAUX CONCEPTS DE L'APPROCHE DOCUMENTAIRE DU DIDACTIQUE

Prenant ses racines dans la didactique française, l'ADD est un cadre théorique récent qui a émergé à travers les travaux de Trouche et Gueudet (Gueudet et Trouche 2008, 2009; Gueudet 2019). Il est essentiellement basé sur l'approche instrumentale de Rabardel (1995) et sur une perspective socio-culturelle, incluant notamment la notion de médiation (Vygotsky 1978) comme composante de tout processus cognitif (Trouche et al., 2018). L'objet principal de cette approche est d'explorer le travail de l'enseignant et l'apprentissage professionnel à travers son interaction avec les ressources curriculaires. « Elle propose ainsi d'analyser le travail des professeurs en se centrant sur les « ressources » pour et dans l'enseignement: ce qu'elles préparent pour nourrir leurs pratiques de classe, et ce qui est continuellement renouvelé par ces pratiques. » (Trouche et al., 2018, p.3). Pepin et al. (2013) définissent “mathematics teaching resources as all the resources which are developed and used by teachers (and pupils) in their interaction with mathematics in/for teaching and learning, inside and outside the classroom” (p. 929). Les ressources curriculaires incluent les manuels scolaires, les programmes officiels ainsi que les productions des élèves. Les ressources numériques et technologiques comportent les textes sur internet ainsi que les logiciels. Le concept de système de ressources introduit par Ruthven (2009) et Gueudet et al. (2012) est défini comme étant l'ensemble de toutes les ressources utilisées par l'enseignant et structurées selon les objectifs de son activité.

Considérée comme une extension de l'approche instrumentale (Rabardel, 1995), l'ADD s'appuie sur la distinction entre artefact et instrument pour introduire la distinction entre ressource et document. Les ressources comportent tous les types de ressources numériques ou traditionnelles (non-numériques: manuels, guides, ...) développées et utilisées par l'enseignant et les élèves dans la classe et en dehors de la classe (Gueudet et Trouche, 2008). Le document est défini comme étant une entité mixte composée des ressources et de leurs schèmes d'usage. “Each document comprises a mathematical and a didactical component, strongly intertwined.” (Artigue et Trouche, 2021, p.11). Ainsi, deux enseignants utilisant une même ressource, développent des documents différents du fait que chacun développe ses propres schèmes d'usage. La notion de schème est utilisée en accord avec la définition de Vergnaud (1996), comme une organisation invariante de l'activité. Cette organisation se caractérise par un objectif, des règles d'action et elle est structurée par des invariants opératoires. Les règles d'action sont les actions stables et reproductibles qui organisent l'activité et représentent les interactions de l'enseignant avec la ressource dans un objectif déterminé. Les invariants opératoires comportent d'une part, les théorèmes en acte, définis comme étant des propositions pouvant être vraies ou fausses (Vergnaud, 1996) et d'autre part, les concepts en acte, définis comme étant des fonctions propositionnelles nécessaires pour l'élaboration des propositions. Ces concepts en acte ne sont pas susceptibles d'être vrais ou faux. Le processus d'élaboration et de développement d'un document est désigné par la genèse documentaire (Gueudet et Trouche, 2009). Dans la description de ce processus, l'ADD met l'accent sur la dialectique instrumentation/instrumentalisation. Il s'agit d'un double mouvement où la ressource (ou l'ensemble de ressources) d'une part, agit et façonne l'activité de l'enseignant (instrumentation) et d'autre part, c'est l'enseignant qui adopte et adapte cette ressource (ou ensemble de ressources) au contexte de son usage et selon ses projets didactiques (instrumentalisation) (Fig. 1).

Ce travail se place dans le cadre de l'ADD afin d'étudier les caractéristiques des pratiques enseignantes lors de l'utilisation d'une ressource technologique du point de vue du travail documentaire. Dans cette étude, nous focalisons notre attention sur comment les interactions enseignant-élèves façonnent les pratiques de l'enseignant dans le cas de l'intégration de la ressource GeoGebra et leur rôle dans le développement de l'ensemble des documents élaborés. Cela nous amène à adopter un ensemble de principes méthodologiques spécifiques qui prennent en considération la variété des ressources utilisées et produites par l'enseignant, la diversité des interactions pouvant influencer le travail documentaire ainsi que la durée nécessaire pour la genèse documentaire. Dans cet objectif, l'ADD propose la méthodologie de *l'investigation réflexive du travail documentaire des enseignants* (Trouche, Gueudet et Pepin, 2018) que nous décrivons dans la partie Méthodologie.

Fig. 1 Une modélisation d'une genèse documentaire (Trouche, Gueudet et Pepin, 2012, p. 26)



LA NOTION D'ORCHESTRATION

Afin d'éclairer l'impact de l'interaction enseignant-élèves sur la genèse documentaire de la ressource technologique GeoGebra, nous avons choisi de faire appel à la notion d'orchestration instrumentale (Trouche, 2005). L'apport de cette notion à notre travail revient à éclairer la façon dont l'enseignant exploite les potentialités de la ressource technologique et l'articule avec les autres ressources disponibles, pour mettre en œuvre son projet d'enseignement relatif à un contenu mathématique. L'orchestration instrumentale (Trouche, 2005) est l'organisation didactique à travers laquelle l'enseignant utilise les différents instruments présents dans la situation pour guider le processus de la genèse instrumentale¹ des élèves (Rabardel, 1995). Comme exemple d'orchestration, Trouche a introduit et étudié le mode Sherpa qui correspond à la configuration où un élève prend en charge de piloter un artefact devant toute la classe, ce qui permet à l'enseignant d'identifier l'état des genèses instrumentales dans la classe. Drijvers (2011) a étendu les travaux de Trouche pour définir une typologie des orchestrations instrumentales. Drijvers et al. (2013) ont répertorié les types d'orchestration en deux catégories: les orchestrations individuelles ou en binômes et les orchestrations collectives. Les orchestrations individuelles ou en binômes comportent essentiellement l'orchestration *work and walk* introduite par Drijvers (2011). Dans cette orchestration les élèves manipulent la technologie individuellement ou en petits groupes et l'enseignant circule entre les élèves, contrôle leurs travaux et fournit des aides en cas de besoin. Les orchestrations collectives comportent les configurations suivantes:

- L'orchestration *Technical-demo*: configuration relative à l'explication du mode de fonctionnement de la ressource technologique ou certains outils de cette ressource par l'enseignant. Dans cette orchestration, l'enseignant guide le processus d'enseignement alors que les élèves observent et appliquent ses consignes.
- L'orchestration *Explain-the-screen*: configuration qui correspond à la manipulation du logiciel par l'enseignant et l'explication à toute la classe de ce qui se passe sur l'écran. L'explication ne concerne pas seulement les techniques mais elle implique également les contenus mathématiques.
- L'orchestration *Link-screen-board*: la mise en relation entre les représentations des objets mathématiques dans les environnements numériques et leurs représentations dans l'environnement classique dans le tableau ou dans le manuel, etc.
- L'orchestration *Discuss-the-screen*: discussion entre les élèves, guidée par des questions de l'enseignant qui peut intervenir pour apporter de l'aide en cas de besoin. Cette orchestration a pour objectif de renforcer la genèse instrumentale collective.

¹ Le processus de la genèse instrumentale est défini par Rabardel (1995) comme étant le processus par lequel un artefact se transforme en instrument résultant de l'interaction entre l'artefact et le sujet. Au cours de cette interaction émergent et se développent des schèmes d'usage.

- L'orchestration *spot and show*: configuration où l'enseignant met l'accent sur le raisonnement adopté par un élève pour accomplir une tâche. Cette configuration est similaire à celle de « discuss the screen ».
- L'orchestration *Sherpa-at-work* décrite plus haut.

Cette typologie a été reprise par Tabach (2011) qui a ajouté le type d'orchestration *Not-use-tech*, correspondant à l'orchestration du travail avec la classe entière, par l'enseignant, sans utiliser la technologie.

Dans notre travail, nous considérons que l'étude des types d'orchestrations utilisées, nous permet d'identifier certaines caractéristiques des schèmes d'usage de la ressource technologique développée par l'enseignant et d'éclairer ainsi la genèse documentaire en cours. Dans nos analyses, les orchestrations sont considérées comme la partie perceptible du document qui correspond aux ressources utilisées et aux règles d'action. Ainsi, comme le précise Besnier (2019) « ces orchestrations permettent d'inférer la part cachée du schème et donc du document, les invariants opératoires. [...] la mise en place régulière de certaines orchestrations témoigne de règles d'action, pilotées par des invariants opératoires. » (Besnier, 2019, p.122).

Adopter l'ADD, nous amène à admettre l'hypothèse que l'utilisation d'une ressource pour un objectif d'enseignement, engendre l'élaboration d'un ensemble de documents et de ressources dont l'étude permet d'éclairer les pratiques de l'enseignant. Dans notre travail, nous explorons les caractéristiques des pratiques d'un enseignant du primaire utilisant pour la première fois la ressource technologique GeoGebra, à travers l'étude de la genèse documentaire. Nous focalisons notre attention sur l'utilisation de cette ressource lors de l'élaboration des activités proposées aux élèves et sur les pratiques de l'enseignant lors de la mise en œuvre en classe, en cherchant à identifier le fonctionnement de l'interaction enseignant-élèves comme une ressource pour l'activité de l'enseignant qui influence la façon dont il adapte la ressource technologique selon son projet d'enseignement. Notre travail est guidé par les questions de recherche suivantes:

Comment l'enseignant intègre-t-il la nouvelle ressource dans son système de ressource habituel et comment cela influence-t-il ses pratiques pour et pendant l'enseignement en classe ?

Quelles sont les caractéristiques des documents développés par l'enseignant lors de la phase de préparation de la leçon et comment évoluent ces documents lors de la mise en œuvre en classe influencés par l'interaction entre les élèves et l'enseignant ?

Afin d'apporter des éléments de réponses à ces questions, nous avons élaboré une étude expérimentale basée sur l'étude du cas d'un enseignant du primaire ayant choisi d'utiliser pour la première fois GeoGebra dans une classe de 6^{ème} année de l'enseignement primaire tunisien (dernière année de l'enseignement primaire. Elèves de 11–12 ans) pour introduire les propriétés des parallélogrammes. Notre étude est basée sur une forme adaptée de la méthodologie de l'investigation réflexive proposée par l'ADD.

Dans ce qui suit, nous commençons par décrire les spécificités du contexte tunisien et en particulier l'enseignement primaire tunisien où se déroule notre expérimentation. Par la suite, nous décrivons le profil de l'enseignant ayant participé à l'expérimentation ainsi que la méthodologie de collecte des données avant d'entamer la présentation des résultats de cette étude.

LA SPECIFICITE DU CONTEXTE TUNISIEN

Dans cette section, nous proposons un aperçu sur les principales caractéristiques du système d'enseignement tunisien, susceptibles d'influencer les pratiques des enseignants en lien avec l'utilisation des ressources technologiques. A cette fin, nous commençons par décrire les ressources officielles relatives à l'enseignement des mathématiques au niveau de la 6^{ème}, qui constituent une partie essentielle des systèmes de ressources de tous les enseignants du primaire. Par la suite, nous donnons un aperçu sur la place accordée par le système éducatif tunisien à l'utilisation des ressources technologiques dans l'enseignement des mathématiques.

Les ressources curriculaires officielles d'un enseignant des mathématiques de la 6^{ème} année du primaire dans le contexte tunisien

En Tunisie, l'enseignement primaire s'étale sur six années pendant lesquelles l'enseignement est dispensé en langue arabe dans les écoles primaires par des instituteurs ou des professeurs des écoles (pluridisciplinaires). Cet enseignement adopte comme orientation pédagogique de référence « l'approche par compétences » fondée sur le paradigme socioconstructiviste. Les enseignants du primaire disposent essentiellement de trois ressources curriculaires officielles: les programmes officiels, le livre de l'enseignant et le manuel scolaire. Au niveau de la 6^{ème} année de l'enseignement primaire, le programme officiel des mathématiques comporte les directives générales qui traduisent l'orientation et la politique de l'enseignement tunisien en général et celui des mathématiques en particulier. Ces programmes traduisent les compétences générales visées par l'enseignement des mathématiques et précisent le contenu scientifique à proposer aux élèves.

La deuxième ressource officielle est « le manuel de l'enseignant » pour les mathématiques qui vise l'accompagnement et la formation scientifique et pédagogique de l'enseignant. Ce manuel comporte trois parties: la partie théorique pédagogique, la partie scientifique et la partie pratique. La partie théorique pédagogique comporte des concepts théoriques tels que l'évaluation, les conflits sociocognitifs, etc. La partie scientifique comporte quatre dossiers relatifs aux nouveaux contenus mathématiques abordés en 6^{ème} année: les nombres rationnels, l'échelle, le pourcentage et les solides. L'objectif de cette partie est de reprendre les connaissances scientifiques nécessaires pour l'enseignement des mathématiques à ce niveau scolaire. Le manuel de l'enseignant considéré comme un guide pour l'enseignant, propose dans la partie pratique, des exemples de réalisations de la répartition annuelle du programme, des projets d'organisations semestrielles, la répartition du programme du calcul mental, des activités d'évaluation des compétences des élèves à la fin de chaque trimestre ainsi que des exemples de scénarios d'enseignement de certaines notions clés. Cette ressource est très importante pour les enseignants du primaire qui se trouvent généralement amenés à enseigner des notions mathématiques qui n'ont pas été reprises dans leur formation initiale de spécialité.

La troisième ressource est le manuel officiel des mathématiques pour la 6^{ème} année. En fait, en Tunisie, il existe un seul manuel scolaire de mathématiques pour chaque niveau scolaire. Ce manuel traduit une lecture du programme des mathématiques et exprime les organisations proposées pour introduire les notions mathématiques visées. Ce manuel constitue en même temps un outil de travail pour l'élève et une ressource pour l'enseignant (Khalloufi-Mouha, 2021).

Les ressources numériques

Le système éducatif tunisien stipule la valorisation de l'intégration des nouvelles technologies dans l'enseignement. Cette volonté institutionnelle se manifeste dans la loi d'orientation de 2002 (République Tunisienne, 2002a) qui exige que l'école assure aux élèves « La maîtrise des technologies de l'information et de la communication et à les doter de la capacité d'en faire usage dans tous les domaines » et exige que « les programmes accordent l'intérêt qui se doit à l'entraînement des apprenants à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication comme moyen d'accès au savoir et outil d'auto-formation. » (République tunisienne, 2002a, Journal officiel de la république tunisienne. Loi d'orientation, 2002, p.1739) Outre la loi d'orientation de 2002, les programmes officiels des écoles primaires (République tunisienne, 2002b) considèrent aussi l'intégration des ressources numériques comme compétence transversale que les mathématiques contribuent à réaliser. Cependant, ces intentions ne s'accompagnent pas par des formations adaptées des enseignants (ni initiales, ni continues).

MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

L'étude de la genèse documentaire relative à l'utilisation de la ressource technologique GeoGebra, nécessite la collecte de plusieurs types de données en utilisant la méthodologie de l'investigation réflexive du travail

documentaire des enseignants. Dans cette section, nous commençons par présenter le profil de l'enseignant participant à cette recherche ainsi qu'un aperçu sur les ressources qu'il utilise pour l'élaboration de ses cours de mathématiques. Nous précisons également le contexte de l'expérimentation et le dispositif de suivi du travail documentaire de l'enseignant, ainsi que l'ensemble des données recueillies pour l'analyse.

Présentation de l'enseignant:

L'enseignant participant à l'expérimentation est un professeur des écoles primaires ayant 31 ans de service. Il a enseigné tous les niveaux du cycle primaire, de la première année à la sixième année. En septembre 2001, il a intégré son école actuelle où il enseigne essentiellement les mathématiques, l'éveil scientifique (sciences naturelles et physiques) et l'éducation technologique pour la 6^{ème} année. Concernant son rapport au numérique, l'enseignant maîtrise bien l'outil informatique. Il a suivi une formation en 2008 sur l'utilisation des logiciels bureautiques (Word, PPT et Excel). Il utilise ces logiciels fréquemment pour préparer ses cours (ses fiches de préparation, son cahier journal), ses examens et les affiches pour la classe. Il utilise principalement les ressources numériques et technologiques avec ses élèves dans les activités de l'éveil scientifique, essentiellement pour visionner des vidéos, en se servant d'un ordinateur portable et d'un vidéoprojecteur. Il assure également des cours de l'éducation technologique dans une salle d'informatique équipée de sept ordinateurs.

Lors du premier entretien, l'enseignant a déclaré que les ressources consultées pour l'élaboration de ses cours de mathématiques sont limitées. Il s'appuie essentiellement sur sa longue expérience pour la sélection des activités à proposer aux élèves. Ces activités sont essentiellement extraites du manuel scolaire, du guide du maître et des livres parascolaires. Il accède rarement aux sites internet pour télécharger des situations d'apprentissage pour sa classe. Il n'a jamais utilisé une ressource numérique en classe pour enseigner les mathématiques. L'enseignant a découvert le logiciel de géométrie dynamique GeoGebra à travers les discussions avec son collègue (second auteur) qui est plus expérimenté dans l'utilisation des ressources numériques pour l'enseignement des mathématiques. Convaincu par ses apports (la manipulation directe, la visualisation, l'expérimentation...) et dans l'objectif de développer ses pratiques professionnelles, il a accepté de s'engager dans cette expérimentation pour expérimenter l'intégration de ce logiciel dans sa classe tout en étant assisté par son collègue (second auteur). Dans l'entretien post-expérimentation, l'enseignant conçoit sa participation à cette expérimentation comme un moment de formation où il a pu interagir et discuter avec son collègue à propos de l'utilisation de la ressource dans les différentes étapes de son travail. Concernant la collaboration entre l'enseignant et le chercheur (second auteur), nous précisons que la contribution du chercheur à la conception et à la mise en œuvre de ce travail se limite à la participation aux séances d'initiation des élèves et à la collaboration avec l'enseignant lors de l'élaboration de son projet d'enseignement. Cette collaboration se manifeste par la proposition d'une phase de travail par binôme suivie d'une phase du travail collectif faisant appel à la configuration de l'élève sherpa. Cependant, il faut préciser que c'est l'enseignant qui a choisi l'activité et qui lui a apporté les modifications qu'il a jugé nécessaires pour l'adapter à ses objectifs.

Le contexte de notre expérimentation

Dans le cas de notre expérimentation, les élèves n'ont jamais utilisé le logiciel. Pour cela, une phase d'initiation à l'utilisation des fonctionnalités de base et des outils du logiciel GeoGebra a été mise en place à travers trois séances en salle d'informatique. L'objectif étant l'initiation et le développement du processus de la genèse instrumentale de certains outils du logiciel. Lors de ces séances, les élèves ont été amené à réaliser des constructions de figures, d'expérimenter les différents types de déplacements dans GeoGebra ainsi que certaines commandes qui permettent d'identifier les relations entre deux objets construits (parallélisme, orthogonalité, ...). Ces trois séances d'initiation ne font pas l'objet

d'une analyse dans cet article, mais elles sont considérées comme une ressource pour l'enseignant et un moment pour expérimenter l'utilisation du logiciel par les élèves en classe. Les séances d'initiation n'ont pas comporté des types différents d'orchestrations collectives. Les élèves ont été placés par deux et ont été aidés et encadrés par l'enseignant et le chercheur (second auteur) qui a participé à ces séances.

Dispositif de suivi dans le cadre de la méthodologie d'investigation réflexive

Dans notre travail, nous avons adopté la méthodologie de *l'investigation réflexive du travail documentaire des enseignants* (Trouche et al., 2018), proposée par l'ADD. Cette méthodologie est basée sur les cinq principes suivants:

- une collecte large des ressources matérielles utilisées et produites au cours du travail documentaire;
- un suivi sur le long terme, permettant d'identifier des évolutions et des stabilités, correspondant au temps long des genèses et du développement des schèmes;
- un suivi en classe et hors classe. Le travail documentaire inclut la préparation de classe (qui prend place dans différents lieux), mais aussi ce qui se déroule en classe et peut amener des adaptations, influencer des modifications ultérieures;
- un suivi réflexif du travail documentaire, où le regard du professeur sur son propre travail est largement sollicité;
- une confrontation du point de vue (subjectif) du professeur avec des éléments objectifs: les ressources utilisées et conçues, et les déroulements de classe.

L'enseignant a été suivi pendant cinq semaines non-consécutives, étalées sur une période de trois mois (Tableau 1). La première semaine a comporté une rencontre avec l'enseignant ainsi que la mise en place de la première séance d'initiation des élèves. La première rencontre a comporté un entretien avec l'enseignant à propos des ressources qu'il utilise pour élaborer ses cours de mathématiques et son lien avec les ressources technologiques. Pendant cette rencontre, le dispositif de suivi a été décrit et le contrat méthodologique² mis en place. La deuxième rencontre constitue la première séance d'initiation des élèves à l'utilisation du logiciel par l'enseignant et le chercheur. La deuxième semaine a comporté deux séances d'initiation des élèves à l'utilisation du logiciel par l'enseignant et le chercheur. La troisième semaine a comporté un entretien (entretien pré-mise en œuvre) avec l'enseignant à propos du chapitre en jeu. L'objectif de cet entretien est le suivi de la préparation de la leçon à travers l'étude du choix des activités ainsi que la méthodologie prévue pour la mise en œuvre en classe. La quatrième semaine a comporté une séance d'observation de la mise en œuvre de la leçon en classe à travers un enregistrement vidéo de la séance. La deuxième rencontre qui a eu lieu pendant cette quatrième semaine avait pour objet un entretien post-mise en œuvre ainsi que le suivi de la préparation de la leçon. Cette rencontre a comporté la visualisation de la vidéo de la leçon, ce qui a permis à l'enseignant d'expliquer et de justifier ses pratiques. La cinquième semaine est espacée de plus qu'un mois pendant lequel l'enseignant a avancé dans le chapitre en question dans un environnement classique. Elle a comporté une séance d'observation de la mise en œuvre d'une séance de synthèse à la fin de la leçon en utilisant GeoGebra. La séance a été enregistrée à travers un enregistrement vidéo. La dernière rencontre de suivi, a comporté un entretien sur la leçon observée et sur l'expérience de l'utilisation de la nouvelle ressource avec une visualisation de l'enregistrement vidéo de la séance.

² La notion de contrat méthodologique est utilisée selon Sabra (2016) qui l'introduit en tant qu'un ensemble de règles méthodologiques liant un professeur et un chercheur et visant à clarifier pour le professeur, et dans la mesure du possible, ce que le chercheur demande et dans quel but.

Tableau 1 Dispositif de suivi de l'enseignant et l'ensemble des données recueillies

	Semaine 1		Semaine 2		Semaine 3		Semaine 4		Semaine 5	
	Entretien 1	Séance 1	Séance 2	Séance 3	Entretien 2	Entretien 3	Séance en classe	Entretien 4	Séance en classe	Entretien 5
	Activités	Dispositif et contrat méthodologique	Première séance d'initiation des élèves	Deuxième séance d'initiation des élèves	Troisième séance d'initiation	Entretien pré-mise en œuvre: Entretien sur le chapitre en jeu	Entretien post-mise en œuvre: Entretien sur la leçon observée et suivi de la préparation	Séance d'observation de la mise en œuvre de la leçon en classe	Entretien post-mise en œuvre: Entretien sur la leçon observée et sur l'expérience de l'utilisation de la nouvelle ressource	Deuxième observation de la mise en œuvre d'une séance de synthèse
Données recueillies	Réponse au questionnaire Enregistrement audio	Rapport d'activités	Rapport d'activités	Rapport d'activités	Activités élaborées Rapport sur la méthodologie de la mise en œuvre prévue Enregistrement audio	Grille de l'entretien Enregistrement audio	Documents-élèves Enregistrement vidéo de la séance Grille d'observation Le journal de classe de l'enseignant	Documents-élèves Enregistrement vidéo de la séance Grille d'observation Journal de classe de l'enseignant	Documents-élèves Enregistrement vidéo de la séance Grille d'observation Journal de classe de l'enseignant	Grille de l'entretien Enregistrement audio

Les données collectées

Les données collectées lors de l'expérimentation comportent les rapports relatifs aux séances d'initiation, les réponses de l'enseignant au questionnaire de départ qui a permis un premier aperçu sur le profil de l'enseignant, les grilles des différents entretiens avec l'enseignant, les enregistrements vidéos des deux séances en classe, les fiches des activités proposées aux élèves, les productions des élèves ainsi que le journal de classe de l'enseignant (Tableau 1).

Les entretiens pré-mise en œuvre et ceux post-mise en œuvre ont eu lieu à l'école. Les entretiens pré-mise en œuvre visent l'identification des objectifs du projet de l'enseignant pour la séance en classe, les ressources mobilisées ainsi que la ou les configurations prévues lors de la mise en œuvre. Les entretiens post-mise en œuvre comportent des questions à propos du déroulement de la séance ainsi qu'une discussion à la suite de la visualisation de l'enregistrement vidéo de la séance. Tous les entretiens ont été enregistrés à travers un enregistrement audio puis transcrits. Les séances d'initiation et les séances de mise en œuvre de la leçon ont eu lieu dans la salle d'informatique, équipée de sept ordinateurs, d'un vidéoprojecteur et d'un tableau blanc. Les ordinateurs sont placés en forme de U afin de faciliter les discussions et le contrôle du travail par l'enseignant. Les deux séances en classe ont été enregistrées à travers des enregistrements vidéos par deux caméras. L'une a été placée en avant de la salle et orientée vers les élèves et la deuxième au fond de la salle et permet de voir l'ordinateur utilisé lors de la phase collective (manipulé par l'élève Sherpa) ainsi que la projection et le tableau. Les élèves travaillent par binômes. L'enseignant a fourni aux élèves des supports papiers qui comportent les activités proposées et qui seront utilisés pour écrire les conjectures. Un fichier GeoGebra contenant une figure géométrique correspondant à l'activité, a été ouvert dans chaque ordinateur.

METHODOLOGIE DE L'ANALYSE DES DONNEES RECUEILLIES

Selon l'ADD, étudier la genèse documentaire nécessite l'exploration des schèmes d'usage de la ressource et par conséquent l'identification de leurs quatre composantes: objectifs, règles d'action, invariants opératoires ainsi que les inférences. Comme les observations s'étalent sur une courte période permettant d'étudier que la première mise en œuvre en classe d'un projet d'enseignement intégrant la ressource GeoGebra, il est difficile de caractériser des actions stables (dans la durée) dans la façon d'utiliser la ressource, ni d'identifier comment l'enseignant adapte les schèmes élaborés lors de nouvelles situations (inférences). Ainsi, afin de caractériser les documents élaborés, nos analyses portent sur les objectifs prévus par l'enseignant lors de la phase de préparation de la leçon, et sur les objectifs identifiés lors de la phase de mise en œuvre en classe. Nous avons également analysé la façon de réaliser ces objectifs à travers les actions prévues par l'enseignant et les actions mises en place en classe, relatives à l'usage de la ressource technologique. Nous identifions également les connaissances professionnelles qui justifient ces actions d'usage de la ressource GeoGebra. Selon Rezat (2010), ces connaissances professionnelles de l'enseignant correspondent aux invariants opératoires. L'identification et la formulation des objectifs, des actions prévues et mises en œuvre ainsi que des invariants opératoires a été réalisée essentiellement à partir des déclarations de l'enseignant lors des entretiens pré et post-mise en œuvre et des enregistrements vidéos des deux séances observées. Les entretiens et les séances en classe se sont déroulés en langue arabe puis ont été traduits lors de la transcription en langue française. La formulation des objectifs, des actions et des invariants opératoires a été élaborée par les chercheurs à partir des données recueillies et par la suite présentée et approuvée ou précisée par l'enseignant.

Ce travail nous a amené à concevoir une version adaptée des tableaux documents introduits par Guedet (2017) qui permettent de caractériser les différents documents élaborés par l'enseignant. Chaque document correspond à un objectif de l'enseignant et il est caractérisé par les ressources mises en œuvre, les actions relatives à leurs usages ainsi que les invariants opératoires qui guident ces actions.

Dans l'objectif d'explorer la genèse documentaire de la ressource GeoGebra, nous avons exploré le développement des documents avant la mise en œuvre de la séance et lors de la mise en œuvre en classe. Pour cette raison, nous avons distingué pour un même objectif, entre le document avant la mise en œuvre que nous désignons par « document de préparation » et le développement du document lors de la mise en œuvre en classe que nous avons désigné par « document mis en œuvre ». Pour un même objectif, il ne s'agit pas de deux documents différents mais de deux états différents du même document correspondant à l'objectif de l'enseignant. Dans cet article, la confrontation entre les deux états des documents élaborés par l'enseignant, permet d'explorer le fonctionnement de l'interaction entre les élèves et l'enseignant en lien avec l'usage de la ressource technologique, comme une ressource pour l'activité de l'enseignant qui influence ses pratiques en classe.

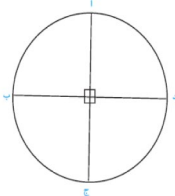
Dans la section suivante, nous commençons par présenter séparément l'analyse relative à la phase d'élaboration de la leçon, puis, celle relative à la phase de la mise en œuvre en classe. Ces analyses sont proposées en termes d'orchestration et de documents élaborés. Par la suite, nous passons à une confrontation entre les deux types de documents, afin d'identifier le développement de la genèse des documents et apporter des éléments de réponses aux questions de recherche.

ANALYSE DES DONNEES

Analyse de la phase d'élaboration de la leçon

La leçon suivie a pour objectif d'introduire les propriétés du parallélogramme ainsi que celles des parallélogrammes particuliers: rectangle, losange et carré. Pour amener les élèves à identifier ces propriétés, l'enseignant déclare dans l'entretien qu'il avait l'habitude d'utiliser une activité extraite du manuel scolaire qui propose un ensemble de quadrilatères de différents types et demande aux élèves d'identifier la nature de chacun de ces quadrilatères puis de mesurer ses côtés, ses diagonales et ses angles. Cela devrait permettre aux élèves d'avancer des conjectures sur lesquelles l'enseignant s'appuie pour énoncer les propriétés visées. L'enseignant considère que le champ d'expérimentation est très réduit et que les élèves sont amenés à faire des généralisations à partir d'un ou de deux cas. Dans le cadre de l'utilisation du logiciel GeoGebra, l'enseignant est convaincu de la nécessité d'élaborer une nouvelle activité puisqu'il considère que la transposition de l'activité précédente dans le cadre de l'utilisation du logiciel n'apporte rien de plus par rapport à l'environnement papier-crayon et ne permet pas d'exploiter les potentialités du logiciel et son aspect dynamique. L'enseignant déclare lors de la première rencontre, qu'il cherche une activité permettant aux élèves, à travers l'utilisation de l'outil déplacement, de généraliser les propriétés des côtés, des diagonales et des angles dans un parallélogramme, à tous les parallélogrammes, mais également aux parallélogrammes particuliers (rectangle, carré et losange). Pour cela, l'enseignant a choisi une autre activité extraite du même manuel scolaire (Fig. 2). Il lui a apporté des modifications afin de l'adapter aux objectifs de la leçon et aux objectifs de l'utilisation du logiciel. L'activité telle qu'elle est proposée dans le manuel vise l'introduction des propriétés du losange et nécessite la réalisation de plusieurs constructions afin de généraliser les propriétés identifiées. L'enseignant propose d'apporter des modifications pour l'exploiter dans l'identification des propriétés des parallélogrammes et des parallélogrammes particuliers, en utilisant les potentialités de l'outil déplacement de GeoGebra.

Le choix de cette activité par l'enseignant, fait apparaître d'une part, un grand attachement à l'utilisation du manuel scolaire comme ressource fondamentale pour l'élaboration du cours. Cela lui permet de maintenir une certaine continuité dans ses pratiques et d'articuler entre la nouvelle ressource et son système de ressources routinier, notamment le manuel scolaire, sa propre expérience d'enseignement et ses cours des années précédentes. D'autre part, le choix de l'activité fait apparaître un développement au niveau du processus d'appropriation de la ressource par l'enseignant. En fait, l'enseignant déclare lors de l'entretien que cette activité constitue une occasion pour utiliser les outils déplacements et les



8) أنماط قوسم
 ■ انقله على ورقة بيضاء.
 ■ أرسم أ ب ج د.
 - ما نوع الشكل الذي تحصلت عليه؟
 أنقل إجابتي.

■ أعين على [أ ج] نقطتين «س» و «ص»
 متناظرتين حسب المستقيم (د ب).
 ■ أرسم س ب ص د.
 - ما نوع الشكل الذي تحصلت عليه؟
 أنقل إجابتي.

■ أعيد نفس العمل عدة مرات
 - ماذا تمثل القطعتان [ب د] و [س ص]
 بالنسبة إلى الزوايا التي تحصلت عليها؟
 - هل هما متتامتان؟
 - هل هما متعامدتان؟
 ■ أصوغ مع رفاقي في المجموعة ما توصلنا إليه من استنتاجات.

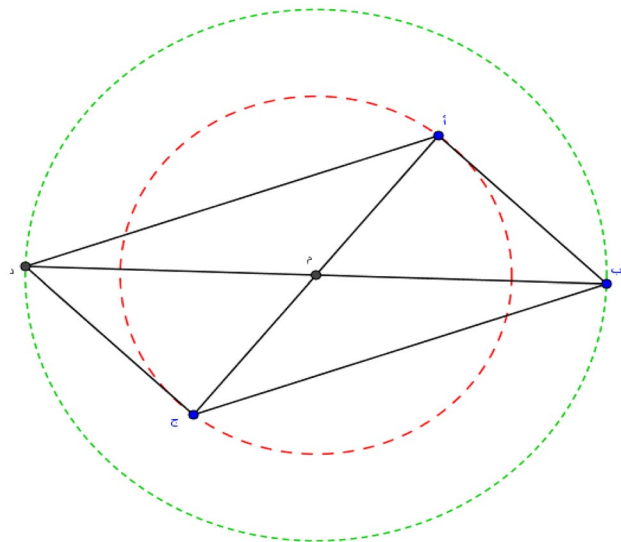
J'observe la figure suivante

- Recopie le dessin sur une feuille blanche
- Je construis ABCD
- Quelle est la nature du quadrilatère obtenu?
- Je place sur le segment [AB] deux point S et T symétriques par rapport à (BD)
- Je construis SBTD. Quelle est la nature du quadrilatère obtenu? Je justifie ma réponse
- Je refais le travail plusieurs fois.
- Que représente les deux segments [BD] et [ST] pour les quadrilatères obtenus? Sont-ils isométriques? Sont-ils perpendiculaires?
- Je rédige avec mes collègues les conclusions obtenus.

Fig. 2 Activité 8 p.44 du manuel scolaire de 6^{ème} année de l'enseignement primaire tunisien (République tunisienne, 2020)

commandes de mesure de GeoGebra, afin d'amener les élèves à identifier les propriétés visées. Les adaptations et les modifications de l'activité ont consisté à proposer une figure géométrique qui présente au départ un parallélogramme dont les diagonales sont respectivement les diamètres des deux cercles concentriques C et C' . L'obtention des autres parallélogrammes se fait par le déplacement de deux points, le point A qui appartient au cercle C et le point B qui appartient au cercle C' . L'utilisation de l'outil déplacement devrait permettre de généraliser les propriétés identifiées pour un quadrilatère donné, à tous les quadrilatères du même type. Le choix de l'outil déplacement favorise la mise en relation entre les parallélogrammes et les parallélogrammes particuliers et permet d'introduire le rectangle comme un parallélogramme qui a des diagonales isométriques. La figure associée à l'activité (Fig. 3), offre également, une manipulation facile à travers les deux cercles concentriques et par la position relative

Fig. 3 Figure géométrique correspondant à l'activité et proposée dans le fichier Geogebra



des deux diagonales. En fait, pour obtenir un rectangle, il suffit de confondre les deux cercles alors que pour obtenir un losange, il faut garder les deux cercles non superposés et les diagonales perpendiculaires.

Énoncé de l'activité proposée aux élèves:

Activité n°1

Ouvrez le fichier GeoGebra « les quadrilatères fiche élève »

1- Soient le cercle C de centre O et de diamètre $[AC]$ et le cercle C' de centre O et de diamètre $[BD]$.

2- Tracez le quadrilatère $ABCD$.

3- Quelle est la position relative des côtés opposés ? Quel outil avez-vous utilisé ?

4- Affichez la longueur de ses côtés.

$AB = \dots / BC = \dots / CD = \dots / DA = \dots$. Que remarquez-vous ?

5- Affichez les mesures des angles du quadrilatère $ABCD$.

$\widehat{ADC} = \dots / \widehat{DCB} = \dots / \widehat{CBA} = \dots / \widehat{BAD} = \dots$. Que remarquez-vous ?

6- Tracez les diagonales du quadrilatère $ABCD$.

7- Complétez la phrase suivante par : perpendiculaires / sécantes / ont la même longueur / n'ont pas la même longueur.

Les diagonales du quadrilatère $ABCD$ sont et

8- Vérifiez que O est le milieu de $[AC]$ et $[BD]$. Que pouvez-vous déduire ?

9- Déplacez le point A ou B de manière que les deux cercles ne soient pas confondus et les deux droites ne soient pas perpendiculaires.

Les propriétés des côtés, des angles, des diagonales du quadrilatère $ABCD$ ont-elles changées ?

Activité n°2

1- Déplacez le point A ou B pour obtenir les deux cercles confondus et les diagonales non perpendiculaires.

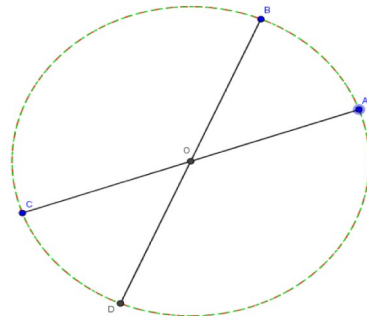
2 - Quelles sont les propriétés des côtés du quadrilatère $ABCD$?

3- Quelles sont les propriétés des angles du quadrilatère $ABCD$?

4- Quelles sont les propriétés des diagonales du quadrilatère $ABCD$?

5- Déplacez le point A ou B de manière que les deux cercles restent toujours confondus et les deux droites ne soient pas perpendiculaires.

Les propriétés des côtés, des angles, des diagonales du quadrilatère $ABCD$ ont-elles changées ?



L'activité élaborée constitue une étape importante de la genèse documentaire de la ressource technologique GeoGebra. En fait, l'analyse de cette activité, du scénario de sa mise en œuvre en classe, ainsi que du compte rendu de l'entretien pré-mise œuvre, ont permis de repérer les objectifs relatifs à l'usage de la ressource GeoGebra dans l'élaboration de la leçon, les ressources mises en jeu ainsi que les actions prévues et les invariants opératoires qui les commandent. Cela a permis de caractériser un document de préparation associé à chacun des objectifs.

L'enseignant propose d'initier la séance en annonçant l'objectif mathématique, considérant qu'il est important que les élèves sachent dès le départ le contenu et l'objectif de la séance. Cela constitue une habitude dans ses pratiques en classe.

L'analyse des actions prévues par l'enseignant dans son projet du point de vue des orchestrations, nous a permis d'identifier trois types d'orchestrations, puis de caractériser les différents documents de préparation. Ces orchestrations sont « Walk and work » lors de la phase de travail par binôme, l'orchestration de l'élève sherpa lors de la phase de travail collectif et l'orchestration « not-use-tech » au niveau de la phase d'institutionnalisation du contenu mathématique visé.

Selon le projet élaboré, le premier « document de préparation » identifié est celui relatif à la mise en place d'une phase de travail par binômes. En fait, le projet propose une phase de recherche par binômes pendant laquelle les élèves travaillent d'une façon autonome, guidés par une fiche détaillée comportant l'activité et les différentes consignes. La configuration prévue lors de cette phase correspond à l'orchestration « Work and walk ». Les élèves sont supposés être capables de manipuler le logiciel, d'utiliser les outils adéquats et d'identifier les différentes propriétés du parallélogramme. Les interventions de l'enseignant devraient se limiter à apporter une aide de type instrumentale en cas de difficulté. Ces pratiques sont associées à des invariants opératoires exprimés par l'enseignant lors de l'entretien pré-mise en œuvre, qui se manifestent par les théorème-en-acte suivants « Le travail par binômes permet de développer l'autonomie des élèves et favorise l'apprentissage. », « Il faut intervenir lorsque les élèves ont des difficultés d'ordre instrumental. » et « Les élèves sont capables de réaliser des généralisations en s'appuyant sur un contrôle perceptif de la figure. »

Le deuxième « document de préparation » identifié dans le projet de l'enseignant, correspondant à l'objectif de la mise en place d'une phase collective, organisée avec le principe de l'élève-Sherpa. L'objectif de cette phase est de revenir sur les manipulations effectuées avec GeoGebra et de confronter les différentes stratégies et solutions élaborées par les élèves. Dans cette phase, le rôle prévu de l'enseignant est de gérer les interactions entre les élèves et de faire évoluer leurs formulations personnelles, susceptibles d'être contextualisées et liées à leurs activités avec le logiciel, vers une formulation experte basée sur un vocabulaire mathématique. Nous considérons que cette pratique est guidée par le théorème en acte « La confrontation entre les différentes significations et les différentes stratégies élaborées par les élèves favorise le processus de la genèse instrumentale et l'apprentissage des élèves. »

Selon le projet de l'enseignant, la séance devrait se terminer par une phase d'institutionnalisation des connaissances mathématiques qui correspond à l'utilisation de la configuration « not-use-tech ». Cette phase qui permet de caractériser le troisième « document de préparation », devrait être basée sur l'ensemble des ressources formées par l'activité réalisée avec le logiciel ainsi que les propositions des élèves concernant les différentes propriétés des parallélogrammes. Ainsi, cette phase vise à proposer aux élèves une interprétation mathématique de l'activité avec l'artefact et d'aider les élèves qui trouvent des difficultés à généraliser les résultats identifiés. Cette phase vise également l'institutionnalisation des propriétés en utilisant le vocabulaire mathématique approprié. Nous considérons que les invariants opératoires qui guident ses actions sont essentiellement les théorèmes en actes « Les élèves peuvent avoir des difficultés à généraliser les résultats identifiés lors de l'utilisation de l'artefact. » et « Les différentes caractéristiques du parallélogramme doivent être formulées dans la forme d'un savoir à connaître. »

Analyse de la phase de mise en œuvre en classe

Au début de la séance qui a duré 1 h et 5 min, l'enseignant a fourni à chaque élève un support papier qui comporte l'énoncé de l'activité et qui leur sert également pour écrire les conjectures. Sur chacun des ordinateurs est ouvert un fichier GeoGebra correspondant à l'activité. L'enseignant entame la séance par la présentation de l'objectif de la leçon. Par la suite, il présente l'activité, la figure proposée dans le fichier GeoGebra et demande aux élèves de travailler par deux.

L'analyse des actions de l'enseignant lors de la séance du point de vue des orchestrations, nous a permis d'identifier pour chaque type d'orchestration, le nombre de fois où il a été utilisé, ainsi que la durée. Nous avons ainsi décrit les actions de l'enseignant correspondant à ces orchestrations ce qui a servi par la suite à caractériser les différents documents mis en œuvre identifiés. Cinq types d'orchestrations parmi les huit types proposés par Drijvers (2011) et Tabach (2011) ont été utilisés. L'enseignant a utilisé dix fois les orchestrations du type « explain the screen » et « link-screen-board » avec une durée de 17 min. Ces orchestrations sont essentiellement centrées sur l'enseignant. La place centrale qu'occupe l'enseignant dans le processus d'enseignement s'avère très claire dans l'organisation « link-screen-board ». L'enseignant exploite ce qui est affiché sur l'écran pour faire le lien avec les propriétés en jeu. Il guide les élèves dans l'élaboration des conclusions puis les écrit au tableau. Dans la configuration « explain the screen », l'enseignant essaye de guider les élèves dans l'instrumentalisation de l'outil « relation » en expliquant comment l'utiliser pour afficher le résultat visé. Dans ces deux types d'orchestration l'enseignant est dominant au niveau des échanges. L'analyse des actions de l'enseignant lors de la séance, fait également apparaître neuf utilisations de l'orchestration « work and walk » pendant une durée de 28 min. Drijvers (2011) classe cette orchestration parmi les orchestrations individuelles et considère que l'accompagnement qui en résulte est principalement individuel. Cependant, dans notre expérimentation, nous avons repéré que l'enseignant fait appel à cette orchestration avec une modification au niveau de son mode d'accompagnement. Ce changement consiste à circuler entre les binômes qui travaillent avec leurs ordinateurs et à intervenir publiquement pour lire la consigne, expliquer le mode de fonctionnement d'un outil ou orienter les élèves vers une stratégie précise de résolution. Nous considérons qu'il s'agit d'une nouvelle orchestration émergente ayant un caractère hybride puisqu'elle combine le collectif et le travail en binôme. Le mode d'exploitation de cette orchestration fait apparaître que l'enseignant guide d'une façon étroite le travail des élèves en imposant des stratégies spécifiques de résolution, ce qui limite les interactions qui se trouvent restreintes aux questions de l'enseignant et aux réponses des élèves. Ces actions adoptées par l'enseignant ne permettent pas aux élèves de travailler en autonomie et de prendre l'initiative de proposer l'utilisation d'outils différents du logiciel ou des stratégies différentes de celle proposée par l'enseignant. Nous considérons que l'enseignant cherche à réduire l'aspect nouveau de la situation et à éviter des situations imprévues au niveau de la manipulation du logiciel ainsi qu'au niveau des procédures de résolution utilisant le logiciel. Nous considérons que cela témoigne du fonctionnement de l'interaction enseignant-élèves comme une ressource pour l'activité de l'enseignant qui influence ses pratiques en lien avec l'usage de la ressource technologique et par conséquence influence la genèse documentaire.

Outre les types d'orchestration précédents, l'enseignant a utilisé quatre fois l'organisation « Sherpa at work » durant la séance, dans l'objectif de mettre en commun les stratégies visées. Les interactions lors de cette organisation font apparaître un niveau d'appropriation élevé pour les différents outils utilisés, sauf l'outil « relation » qui est associé à une faible instrumentation chez les élèves et même chez l'enseignant. Néanmoins, l'orchestration Sherpa a contribué à développer la genèse instrumentale de cet outil à partir du travail du premier élève qui a joué le rôle de Sherpa. Cet élève a proposé de déterminer la position relative des deux droites à travers l'utilisation de l'outil « relation » alors que les autres binômes ont mis en œuvre un simple contrôle perceptif pour déduire que ces droites sont parallèles. L'enseignant, cherchant toujours à dominer les échanges, prend en charge la verbalisation des actions de l'élève Sherpa. Dans l'analyse de la séance, nous avons identifié un autre type d'orchestration émergente qui consiste à une combinaison entre la configuration « Sherpa at work » et la configuration « explain the screen ». En fait, il s'agit de l'utilisation de la configuration Sherpa où un élève joue le rôle de Sherpa. Il manipule un ordinateur lié à un vidéoprojecteur pour refaire la résolution de la tâche devant toute la classe. Cependant, c'est l'enseignant qui verbalise ses actions et qui prend en charge l'explication de la stratégie proposée par l'élève.

L'analyse de la séance, fait apparaître un écart entre les orchestrations prévues par l'enseignant avant l'expérimentation et celles effectivement réalisées. En fait, ce qui était prévu est que la séance comporte en plus de la phase d'introduction, une phase de travail par binômes, suivie par une phase de travail collectif mettant en œuvre la configuration de l'élève-Sherpa. Par la suite, passer à une phase de synthèse qui se termine par une institutionnalisation des propriétés visées. Cependant, lors de la mise en œuvre en classe, l'enseignant a remarqué l'hétérogénéité au niveau de l'évolution des travaux des binômes. Pour cette raison et afin de mettre en place une cohérence dans l'avancement de l'accomplissement de l'activité demandée, il a alterné des phases de travail par binômes, travail collectif et phase de conclusion pour chaque question de l'activité. Cela peut être vu comme un éclatement de la séance en plusieurs modèles réduits de l'organisation prévue. Cet éclatement permet à l'enseignant de réduire la durée et l'objectif des phases de travail par binômes et les phases collectives en des phases ponctuelles autour d'un contenu mathématique réduit et très pointu. Cela lui permet de suivre de plus près le travail des élèves et d'avoir un contrôle étroit de la genèse instrumentale et du processus de construction des connaissances mathématiques visées. Ces pratiques constituent une adaptation réalisée par l'enseignant influencée par son interaction avec les élèves et reflètent sa volonté de dominer les échanges et de guider étroitement le travail des élèves. Cependant, ces pratiques n'ont pas permis d'exploiter les potentialités de l'environnement de géométrie dynamique utilisé pour favoriser le travail autonome des élèves. Nous expliquons ces pratiques de l'enseignant, par le manque de familiarité avec ce type de ressource. Du fait qu'il s'agit de sa première séance d'enseignement en utilisant GeoGebra, l'enseignant ne dispose pas de pratiques habituelles relatives à l'usage et à l'organisation d'un enseignement intégrant cette ressource. Ce qui l'amène à trop guider le travail des élèves afin d'éviter l'émergence de situations imprévues avec lesquelles il serait en difficulté. A titre d'exemple, pour répondre à la huitième question et montrer que les diagonales sont sécantes et égales, deux stratégies sont possibles. Soit l'utilisation de l'outil « relation » ce qui permet de donner directement la réponse. Soit l'utilisation des outils « Distance » et « mesure angle ». Lors de la séance, l'enseignant ne laisse pas l'initiative aux élèves pour faire le choix entre les deux méthodes et impose l'utilisation de la deuxième méthode. Lors de l'entretien post-mise en œuvre et à la suite de la visualisation de la vidéo de la séance, l'enseignant admet qu'il a trop guidé les élèves lors de cette phase en justifiant ses pratiques par la variation au niveau du rythme de travail des élèves et la maîtrise de l'utilisation du logiciel. Il déclare lors de l'entretien « Pendant la séance, j'étais vraiment gêné par le fait que le travail des élèves n'avance pas à un même rythme. Il y a des élèves plus rapides que d'autres et le niveau de maîtrise de l'utilisation du logiciel diffère d'un élève à l'autre. Ceci m'a obligé de faire plusieurs interventions pour faire avancer leur travail et gagner du temps. En plus, les manipulations fausses des élèves entraînent parfois un blocage du travail à cause des problèmes techniques comme la perte de la figure géométrique et dans certains cas, je n'arrive pas à corriger ces problèmes. » Cela est en accord avec l'idée de Drijvers (2011) qui souligne l'importance de disposer de compétences élevées de diagnostic pour identifier les difficultés des élèves lors de ce type d'orchestration et ce qui n'est pas le cas de notre enseignant qui utilise cette ressource technologique pour la première fois en classe.

Confrontation entre un document de préparation et un document mis en œuvre: genèse d'un document

La confrontation entre les tableaux documents de préparation et les tableaux documents de mise en œuvre, nous a permis d'élaborer pour chacun des documents, un tableau caractérisant l'évolution de sa genèse, en précisant l'objectif visé, les ressources utilisées et en distinguant entre les actions prévues dans le projet d'enseignement et les actions mises en œuvre en classe (Tableau 2). En faisant apparaître l'écart entre les deux états d'un document, ces tableaux permettent d'identifier le fonctionnement de l'interaction enseignant-élèves comme une ressource pour l'activité de l'enseignant. A titre d'exemple,

Tableau 2 Développement du document relatif à la mise en place d'une phase de travail collectif**Objectif visé par l'enseignant**

Mettre en place une phase de travail collectif, organisée avec le principe de l'élève Sherpa.

Ressources utilisées

- La ressource technologique GeoGebra.
- Le vidéoprojecteur.
- La stratégie proposée par l'élève sherpa.
- Les stratégies élaborées par les différents binômes.
- Les connaissances professionnelles et instrumentales de l'enseignant.

Actions prévues

- Utilisation de la configuration de « l'élève Sherpa»
- Donner aux élèves la possibilité de décrire leurs procédures et leurs conclusions et de les confronter avec la stratégie proposée par l'élève Sherpa.
- Faire évoluer les formulations personnelles des élèves vers une formulation experte.

Actions mises en œuvre en classe

- Utilisation de la configuration de « l'élève Sherpa» ainsi que la nouvelle orchestration qui combine les orchestrations « élève Sherpa» et « explain the screen».
- L'enseignant s'adresse à toute la classe pour expliquer une stratégie de résolution ou pour apporter une interprétation mathématique de l'activité avec l'artefact. Même lors du travail par binôme.
- Utilisation de la configuration « explain the screen» où l'enseignant s'adresse à toute la classe. Il explique, en utilisant comme support la projection de l'écran d'ordinateur, des aspects techniques (le mode de fonctionnement de l'outil « relation») ou un contenu mathématique (la somme des angles complémentaires).

Invariants opératoires

- La confrontation entre les différentes significations et les différentes stratégies élaborées par les élèves favorise le processus de la genèse instrumentale et l'apprentissage des élèves.
- Le travail collectif en classe entière permet de s'accorder sur une stratégie commune et d'apprendre le même contenu mathématique.

pour étudier le développement du document relatif à l'objectif de mettre en place une phase de travail collectif, nous avons élaboré le tableau suivant (Tableau 2):

L'analyse de ce tableau permet de faire apparaître que le document relatif à l'objectif de mettre en place une phase de travail collectif a connu plusieurs modifications lors de la mise en œuvre en classe. Cela s'est traduit à travers des pratiques spécifiques qui ont émergé lorsque l'enseignant s'est adressé à toute la classe pour expliquer une stratégie de résolution ou pour apporter une interprétation mathématique à l'activité avec l'artefact. Ces actions ont été identifiées essentiellement lors de l'utilisation de l'orchestration émergente qui combine la configuration de « l'élève Sherpa» avec celle de « explain the screen». En plus de cette configuration, l'objectif de mettre en place une phase de travail collectif s'est traduit lors de la séance, à travers l'utilisation des orchestrations « explain the screen» et « link screen board» où l'enseignant s'adresse à toute la classe. Il explique, en utilisant comme support la projection de l'écran d'ordinateur, des aspects techniques (le mode de fonctionnement de l'outil « relation») ou un contenu mathématique (la somme des angles complémentaires). Nous avons considéré que ces différentes pratiques sont guidées par l'invariant opératoire « le travail collectif en classe entière permet de s'accorder sur une même stratégie et d'apprendre le même contenu mathématique.». Dans l'analyse de la séance, nous avons noté l'impact des interventions des élèves sur le développement du document relatif à l'objectif de mettre en place une phase de travail collectif. Ces interventions jouent un rôle important à travers l'orientation des outils utilisés pour accomplir les tâches demandées. Cela s'est manifesté essentiellement à travers l'introduction de la nouvelle stratégie basée sur l'utilisation de l'outils « relation» par le premier élève qui a joué le rôle de l'élève Sherpa alors que la stratégie proposée au début par l'enseignant et utilisée par tous les autres binômes était basée sur l'utilisation des outils mesure de segments et mesure des angles. D'ailleurs, lors de l'entretien post-mise en œuvre, l'enseignant a déclaré

que bien qu'il connaisse l'outil « relation » il n'a pas songé à son utilisation au niveau de cette question en faveur de l'utilisation des deux outils de mesure (mesure de segments et mesure des angles) et que c'est grâce à l'intervention de l'élève, qu'il a identifié son utilité lui permettant d'avoir directement la réponse. Il précise ainsi « Bien que j'aie participé aux séances d'initiation du logiciel GeoGebra et que je l'aie expérimenté plusieurs fois chez moi, j'étais surpris pendant la séance que mon niveau maîtrise soit insuffisant. Je ne me suis pas rendu-compte de l'utilité de quelques outils du logiciel qui paraissent très pertinents dans certaines questions de l'activité. Comme le cas de l'outil « relation » que j'ai découvert son utilité grâce à mon élève pendant la séance. » Cette déclaration de l'enseignant constitue également, une manifestation du fonctionnement de l'interaction entre les élèves et l'enseignant en classe comme une ressource pour l'activité de l'enseignant qui exerce une influence importante sur l'usage de la ressource technologique GeoGebra et sur ses pratiques en classe.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans l'objectif d'explorer la façon dont l'interaction entre l'enseignant et les élèves en classe façonne les pratiques enseignantes dans le cas de l'utilisation d'une ressource technologique et façonne ainsi l'intégration de cette ressource dans l'enseignement, ce travail adopte le cadre de l'ADD et aborde cette problématique à travers l'étude du travail documentaire d'un enseignant du primaire utilisant pour la première fois la ressource GeoGebra. Le travail a été guidé par les questions suivantes:

Comment l'enseignant intègre-t-il la nouvelle ressource dans son système de ressource habituel et comment cela influence-t-il ses pratiques pour et pendant l'enseignement en classe ?

Quelles sont les caractéristiques des documents développés par l'enseignant lors de la phase de préparation de la leçon et comment évoluent ces documents lors de la mise en œuvre en classe influencés par l'interaction entre les élèves et l'enseignant ?

Pour apporter des éléments de réponse à la première question, les analyses des ressources utilisées et élaborées par l'enseignant, font apparaître sa volonté pour un alignement et une conformité avec les programmes des mathématiques notamment pour cette année de concours qui s'achève par un examen national permettant le passage au collège. Nous considérons que cette contrainte exerce une influence importante sur le travail documentaire de l'enseignant qui est amené à couvrir tous les objectifs imposés par les programmes dont le manuel scolaire constitue une application officielle. Cela explique l'attachement de l'enseignant au manuel officiel et met en évidence l'importance de son rôle dans l'enseignement des mathématiques. Outre les ressources officielles, les analyses font apparaître le fonctionnement de l'interaction entre les élèves et l'enseignant comme une ressource pour l'activité de l'enseignant qui influence sa façon d'utiliser la ressource GeoGebra et par conséquent influence la genèse des documents. L'étude de l'impact de cette ressource sur la genèse documentaire est guidée par notre deuxième question relative aux caractéristiques des documents développés par l'enseignant lors de la phase de préparation de la leçon et à leurs évolutions lors de la mise en œuvre en classe. Une version adaptée de l'outil tableau document introduit par Gueudet (2017), permet de suivre la genèse de chacun des documents identifiés à travers l'étude du décalage entre ce qui était prévu et ce qui a été mis en œuvre. Ainsi, nous avons introduit la notion de « document de préparation » et celle de « document mis en œuvre ». La confrontation entre ces deux états de chacun des documents identifiés, a permis de repérer l'importance des adaptations apportées par l'enseignant lors de la mise en œuvre en classe en lien avec l'utilisation de la ressource GeoGebra lors des différentes phases de travail avec les élèves. Ces adaptations marquent une volonté d'accompagner étroitement le travail des élèves à travers l'éclatement du scénario prévu au départ en des scénarios locaux relatifs à un contenu mathématique très pointu, ainsi que l'émergence de deux nouveaux types d'orchestrations. Ces modifications au niveau de l'usage de la ressource GeoGebra

résultent de l'interaction entre l'enseignant et les élèves qui a permis à l'enseignant d'identifier les différentes stratégies élaborées par les élèves, leurs difficultés d'ordre instrumental et conceptuel ainsi que leurs façons d'interpréter leur travail avec GeoGebra. Ces adaptations attestent des limites au niveau de la genèse documentaire de l'enseignant et font apparaître l'instabilité des pratiques de l'enseignant et le faible degré de sa familiarité avec la ressource. Cela explique son passage à une guidance totale du travail des élèves en imposant les procédures et les outils à utiliser pour accomplir les tâches demandées lors de la phase de travail par binôme et en les guidant à travers des questions fermées orientant les élèves vers la réponse visée. Nos résultats constituent d'une part, un exemple du fonctionnement de l'interaction enseignant-élèves comme une ressource susceptible de façonner les pratiques de l'enseignant en lien avec l'usage d'une ressource technologique et d'autre part, confirment des résultats identifiés dans des travaux de recherches antérieurs. Monaghan (2004) souligne que lors des séances intégrant la technologie, les enseignants ont tendance à guider de plus en plus le travail des élèves. Le phénomène d'attachement aux pratiques traditionnelles lors de la mise en œuvre de la séance que nous avons identifié dans nos analyses, a été relevé également dans plusieurs travaux antérieurs. Ruthven et Hennessy (2002) soulignent également que les enseignants lors des premières utilisations de la technologie, réduisent son intégration dans leurs pratiques habituelles. Abboud-Blanchard (2014) considère que l'enseignant débutant dans l'utilisation de la technologie en classe ne dispose pas d'automatismes et de routines pour l'usage ni de vision globale sur l'organisation de l'enseignement intégrant cet outil, ce qui l'amène à faire recours aux pratiques traditionnelles.

Les résultats de nos analyses mettent en évidence l'importance et la nécessité d'une formation initiale et continue des enseignants du primaire à l'utilisation de ce type de ressources technologiques dans leurs enseignements.

Nous considérons qu'il serait important de suivre la genèse documentaire sur une période plus longue et dans des situations différentes. D'autre part, dans notre travail, l'enseignant participant à l'expérimentation utilise pour la première fois une ressource technologique dans son enseignement. Il serait intéressant de voir le cas d'un enseignant qui a l'habitude d'utiliser d'autres ressources technologiques dans son enseignement des mathématiques et de suivre la genèse documentaire de la nouvelle ressource technologique. Dans notre travail, la collaboration entre l'enseignant et son collègue bien qu'elle ne constitue pas un objectif de notre étude, elle fait apparaître l'importance de la mise en place d'un travail collaboratif entre les enseignants dans le cas de l'intégration des ressources technologiques afin de permettre la production et le développement des ressources et favoriser le développement professionnel.

Declarations

Conflict of Interest On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

Références

- Abboud-Blanchard, M. (2014). Teachers and technologies: shared constraints, common responses. In A. Clark-Wilson, O. Robutti & N. Sinclair (Eds.), *The Mathematics Teacher in the Digital Era: An International Perspective on Technology Focused Professional Development* (pp. 297-318). London: Springer.
- Adler, J. (2000). Conceptualising resources as a theme for teacher education. *Journal of Mathematics Teacher Education*, 3, 205–224. <https://doi.org/10.1023/A:1009903206236>
- Artigue, M., et Trouche, L. (2021). Revisiting the French Didactic Tradition through Technological Lenses. *Mathematics*, 9, 629. <https://doi.org/10.3390/math9060629>
- Besnier, S. (2019). Travail documentaire des professeurs et ressources technologiques : le cas de l'enseignement du nombre à l'école maternelle. *Education didactique*, 13(2), 119-153. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.4206>
- Drijvers P. (2011). Teachers Transforming Resources into Orchestrations. In: Gueudet G., Pepin B., Trouche L. (eds) *From Text to 'Lived' Resources. Mathematics Teacher Education*, vol 7. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1966-8_14

- Drijvers, P., Tacoma, S., Besamusca, A., Doorman, M., & Boon, P. (2013). Digital resources inviting changes in mid-adopting teachers' practices and orchestrations. *ZDM Mathematics Education*, 45, 987–1001 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11858-013-0535-1>
- Gueudet, G. (2017). University Teachers' Resources Systems and Documents. *International Journal of Research in Undergraduate Mathematics Education*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s40753-016-0034-1>
- Gueudet G. (2019) Studying Teachers' Documentation Work: Emergence of a Theoretical Approach. In: Trouche L., Gueudet G., Pepin B. (eds) *The 'Resource' Approach to Mathematics Education. Advances in Mathematics Education*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20393-1_2
- Gueudet, G., & Trouche, L. (2008). Du travail documentaire des enseignants : genèses, collectifs, communautés : Le cas des mathématiques. *Éducation et didactique*, 2(3), 7-33. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.342>
- Gueudet, G., & Trouche, L. (2009). Towards new documentation systems for mathematics teachers ? *Educational Studies in Mathematics*, 71(3), 199-218. <https://doi.org/10.1007/s10649-008-9159-8>.
- Gueudet, G., Pepin, B., et Trouche, L. (Eds.). (2012). *From text to 'lived' resources: Mathematics curriculum materials and teacher development*. New York: Springer
- Khalloufi-Mouha F. (2014). Etude de l'évolution des signes langagiers lors d'une séquence d'enseignement intégrant un artefact technologique -in *Spirale : Revue de recherches en éducation*, n°54, 2014. Langage, apprentissage et enseignement des mathématiques. pp. 49–63. <https://doi.org/10.3406/spira.2014.1036> https://www.persee.fr/doc/spira_0994-3722_2014_num_54_1_1036 consulté le 27/12/2022
- Khalloufi-Mouha, F. (2021). Évolution des routines lors de la transition secondaire postsecondaire : cas de l'enseignement des fonctions trigonométriques et de leurs réciproques. *Revue Québécoise De Didactique Des Mathématiques*, 3, 82-112. <https://rqdm.recherche.usherbrooke.ca/ojs/ojs-3.1.1-4/index.php/rqdm/article/view/22> consulté le 27/12/2022
- Khalloufi-Mouha, F. (2022). Une stratégie de réseautage pour une analyse sémiotique et discursive des pratiques langagières de l'enseignant lors d'une discussion collective dans une séance intégrant un environnement informatique. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s42330-022-00201-w>
- Monaghan, J. (2004). Teachers' Activities in Technology-Based Mathematics Lessons. *Int J Comput Math Learning*, 9, 327 <https://doi.org/10.1007/s10758-004-3467-6>. (2004).
- Pepin, B., Gueudet, G., & Trouche, L. (2013). Re-sourcing teachers' work and interactions: A collective perspective on resources, their use and transformation. *ZDM*, 45(7), 929-943.
- Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies ; approche cognitive des instruments contemporains*. Paris : Armand Colin.
- République tunisienne. (2020). *Mathématiques. Sixième année de l'enseignement de base*. Ministère de l'Éducation. <http://www.cnp.com.tn/cnp.tn/arabic/PDF/102609P00.pdf> consulté le 27/12/2022
- République tunisienne. (2002a). *Journal officiel de la république tunisienne. Loi d'orientation n°2002a-80 du 23 juillet 2002, relative à l'enseignement scolaire*. N°62, pp.1735–1740. <https://www.ilo.org/dyn/natlex/docs/SERIAL/61806/55086/F1183773494/TUN-61806.pdf> consulté le 27/12/2022
- République tunisienne. (2002b). Programmes de mathématiques. Enseignement de base. Ministère de l'Éducation et de la Formation. http://www.edunet.tn/ressources/pedagogie/programmes/sciences/mathematique/math_degre3_3.pdf consulté le 27/12/2022
- Rezat, S. (2010). The utilization of mathematics textbooks as instruments for learning. In V. Durand-Guerrier, S. Soury-Lavergne, & F. Arzarello (Eds.), *Proceedings of the 6th Conference of European Research in Mathematics Education* (pp. 1260–1269). France: INRP Lyon.
- Ruthven, K. (2009). Towards a naturalistic conceptualisation of technology integration in classroom practice: The example of school mathematics. *Éducation et didactique*, (3-1), 131-159.
- Ruthven, K., & Hennessy, S. (2002). A practitioner model of the use of computer-based tools and resources to support mathematics teaching and learning. *Educational Studies in Mathematics*, 49(1), 47-88.
- Sabra, H. (2016). L'étude des rapports entre documentations individuelle et collective : incidents, connaissances et ressources mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 36(1), 49–95. <https://revue-rdm.com/2016/l-etude-des-rapports-entre/> consulté le 27/12/2022
- Tabach, M. (2011). A mathematics teacher's practice in a technological environment: A case study analysis using two complementary theories. *Technology, Knowledge and Learning*, 16(3), 247–265. <https://doi.org/10.1007/s10758-011-9186-x>
- Trgalová, J., et Rousson, L. (2017). Model of appropriation of a curricular resource: A case of a digital game for the teaching of enumeration skills in kindergarten. *ZDM*, 49(5), 769-784. <https://doi.org/10.1007/s11858-017-0877-1>
- Trouche, L. (2005). Des artefacts aux instruments, une approche pour guider et intégrer les usages des outils de calcul dans l'enseignement des mathématiques. In *Le calcul sous toutes ses formes*. Académie de Clermont-Ferrand.
- Trouche, L., Gueudet, G., & Pepin, B. (2012). *From Text to Lived Resources: Mathematics Curriculum Materials and Teacher Development*. Springer.
- Trouche L., Gueudet G., Pepin B. (2018) Documentational Approach to Didactics. In: Lerman S. (eds) *Encyclopedia of Mathematics Education*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77487-9_100011-1

- Vergnaud, G. (1996). Au fond de l'apprentissage, la conceptualisation. Dans R. Noirfalise & M.-J. Perrin Glorian (dir.), *Actes de la VIIIe École d'été de didactique des mathématiques*, (p. 174–185). Clermont-Ferrand: IREM de Clermont-Ferrand.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.