Revue Sciences & Education
Sciences & Education Journal
https://scienceseducation.org/

Orchestration et genèse instrumentale dans une formation GeoGebra d'enseignants du lycée

Instrumental orchestration and instrumental genesis in a GeoGebra training program for high school teachers

Franklin ELION, Fernand Alfred MALONGA MOUNGABIO

École Normale Supérieure, Université Marien Ngouabi, République du Congo
elionfranck@gmail.com, malongaf@gmail.com

DOI : 10.5281/zenodo.23249224

Revue Sciences & Education, Vol.3, N° 2, 2026

https://scienceseducation.org/

Reçu le : 10/07/2026 | Accepté le : 30/09/2026 | Publié le : 08/10/2026

Comment citer cet article :

ELION, F., & MALONGA MOUNGABIO, F. A. (2026). Orchestration et genèse instrumentale dans une formation GeoGebra d'enseignants du lycée. Sciences & Education, 3(2), 36–53. https://doi.org/10.5281/zenodo.23249224

ISSN: 3119-6527 | **Licence CC BY 4.0 / CC BY 4.0 License**

Orchestration et genèse instrumentale dans une formation GeoGebra d'enseignants du lycée

Instrumental orchestration and instrumental genesis in a GeoGebra training program for high school teachers

Franklin ELION, Fernand Alfred MALONGA MOUNGABIO

École Normale Supérieure, Université Marien Ngouabi, République du Congo
elionfranck@gmail.com, malongaf@gmail.com

DOI : 10.5281/zenodo.23249224

RESUME

Cette étude analyse les transformations des pratiques et conceptions d'enseignants de mathématiques du secondaire formés à l'usage de GeoGebra pour l'enseignement de la démonstration géométrique. Elle s'intéresse à la tension didactique entre validation perceptive et démonstration déductive, fréquemment observée dans les pratiques de classe. À partir d'un dispositif de formation articulant manipulation dynamique, conception de scénarios et réflexion didactique, cette recherche qualitative examine les processus de genèse instrumentale et les formes d'orchestration instrumentale développées par les enseignants. Les données, recueillies par questionnaires, carnets de bord, observations, entretiens semi-directifs, productions numériques et scénarios didactiques, ont fait l'objet d'une analyse interprétative et triangulée. Les résultats mettent en évidence la transformation progressive de GeoGebra en instrument didactique, l'évolution des pratiques enseignantes et une meilleure articulation entre exploration, conjecture et démonstration. Ils suggèrent que la tension entre visualisation dynamique et preuve mathématique peut constituer un levier didactique lorsqu'elle est explicitement intégrée à la formation des enseignants.

Mots-clés: GeoGebra, démonstration géométrique, genèse instrumentale, orchestration instrumentale, formation des enseignants.

ABSTRACT

This study analyzes transformations in the practices and conceptions of secondary school mathematics teachers who participated in a training program on the use of GeoGebra for teaching geometric proof. It focuses on the didactical tension between perceptual validation and deductive proof, which is frequently observed in classroom practices. Based on a training design combining dynamic manipulation, instructional scenario development, and didactical reflection, this qualitative study examines the processes of instrumental genesis and the forms of instrumental orchestration developed by teachers. Data were collected through questionnaires, teachers' logbooks, observations, semi-structured interviews, digital productions, and didactical scenarios, and were subjected to interpretative and triangulated analysis. The findings highlight the progresSsive transformation of GeoGebra into a didactical instrument, changes in teachers' practices, and a stronger articulation between exploration, conjecture, and proof. They suggest that the tension between dynamic visualization and mathematical proof can become a didactical resource when explicitly addressed in teacher training.

Keywords: GeoGebra, geometric proof, instrumental genesis, instrumental orchestration, teacher training.

1) INTRODUCTION

L'enseignement de la démonstration géométrique constitue un enjeu majeur de la formation mathématique au lycée. En classe de Seconde C, les élèves doivent passer progressivement d'une approche intuitive des figures à un raisonnement fondé sur la justification et la déduction. De nombreuses recherches soulignent la persistance de difficultés dans l'apprentissage de la démonstration, notamment pour identifier les propriétés pertinentes, organiser les étapes du raisonnement et distinguer l'observation de la preuve (Balacheff, 1988 ; Hanna, 2000).

Dans le contexte éducatif congolais, ces difficultés sont accentuées par des pratiques d'enseignement encore largement centrées sur la transmission des connaissances. Les démonstrations sont souvent présentées comme des procédures achevées, limitant l'engagement des élèves dans les activités d'exploration, de conjecture et de justification qui fondent l'activité mathématique.

Face à ces constats, l'intégration du numérique apparaît comme une voie prometteuse pour renouveler les pratiques pédagogiques. Parmi les outils disponibles, GeoGebra offre des possibilités de manipulation dynamique et de visualisation favorisant l'exploration et la formulation de conjectures (Artigue, 2002 ; Hoyles & Lagrange, 2010).

Toutefois, la technologie seule ne garantit pas l'amélioration des apprentissages. Ses effets didactiques dépendent des usages développés par les enseignants et des dispositifs pédagogiques mis en œuvre (Artigue, 2002 ; Gueudet & Trouche, 2010).

Par ailleurs, l'introduction de la géométrie dynamique soulève une difficulté particulière : la stabilité apparente des propriétés lors du déplacement des figures peut être interprétée comme une preuve, conduisant à une confusion entre validation perceptive et démonstration déductive (Balacheff, 1988). Dès lors, l'enjeu n'est pas seulement de maîtriser l'outil, mais de l'intégrer dans des situations favorisant le passage de la conjecture à la démonstration.

Plusieurs travaux récents soulignent l'intérêt des environnements de géométrie dynamique dans l'enseignement de la démonstration. Baccaglini-Frank (2021) montre que les environnements dynamiques interactifs favorisent l'exploration et la participation au discours mathématique. Borba et al. (2017) mettent en évidence le rôle des technologies numériques dans le développement de nouvelles formes d'activité mathématique, tandis que Brunetto et Dello Iacono (2023) soulignent l'importance des pratiques enseignantes dans leur intégration pédagogique. Santos-Trigo (2024) montre que les environnements numériques dynamiques renforcent les capacités de conjecture, d'argumentation et de validation des apprenants.

Dans cette perspective, la formation des enseignants apparaît comme une condition essentielle d'une intégration didactique pertinente de GeoGebra. Au-delà de la maîtrise technique de GeoGebra, l'enjeu est de concevoir des dispositifs articulant exploration, conjecture et démonstration.

Cette recherche a pour objectif d'analyser les transformations des pratiques et des conceptions d'enseignants engagés dans une formation centrée sur l'utilisation de GeoGebra pour l'enseignement de la démonstration géométrique. Plus précisément, il s'agit d'étudier les processus de genèse instrumentale et les formes d'orchestration instrumentale qui émergent au cours de cette formation.

L'originalité de ce travail réside dans l'analyse conjointe de la genèse instrumentale et de l'orchestration instrumentale, appliquée à la formation des enseignants et à la production de scénarios didactiques directement exploitables en classe. Cette recherche montre notamment comment une formation d'enseignants peut transformer la tension entre visualisation et preuve en un levier didactique, en structurant le passage de la conjecture visuelle à la démonstration déductive.

La problématique peut ainsi être formulée comme suit : comment une formation structurée à l'usage de GeoGebra favorise-t-elle la genèse instrumentale des enseignants et le développement d'orchestrations instrumentales susceptibles de soutenir le passage de l'exploration dynamique à la démonstration géométrique au lycée ?

2) CADRE THEORIQUE

2-1) L'approche instrumentale

L'approche instrumentale de Rabardel (1995) distingue l'artefact de l'instrument : l'artefact est un objet matériel ou symbolique mis à la disposition de l'utilisateur, tandis que l'instrument résulte de son appropriation dans l'activité. Cette transformation, appelée genèse instrumentale, repose sur deux processus complémentaires : l'instrumentalisation, qui concerne les transformations de l'artefact, et l'instrumentation, relative à l'évolution des schèmes d'utilisation.

Dans cette recherche, GeoGebra est considéré comme un artefact susceptible de devenir un instrument didactique à travers son appropriation par les enseignants, notamment pour explorer, conjecturer et résoudre des problèmes de géométrie.

2-2) L'orchestration instrumentale

L'approche instrumentale est complétée par le concept d'orchestration instrumentale de Trouche (2004), qui permet d'analyser la manière dont les enseignants organisent les interactions entre outils numériques, élèves et savoirs mathématiques. Dans un environnement de géométrie dynamique, l'efficacité de GeoGebra dépen de ses potentialités techniques, mais aussi des choix didactiques de l'enseignant et de la manière dont il organise l'activité mathématique (Drijvers et al., 2010).

L'orchestration instrumentale constitue ainsi un niveau complémentaire d'analyse : après l'appropriation de GeoGebra, il s'agit d'examiner comment les enseignants organisent son usage pour conduire les élèves de l'exploration d'une figure à la formulation de conjectures et à leur justification.

2-3) L'Espace de Travail Mathématique

L'Espace de Travail Mathématique (ETM) (Kuzniak, 2011 ; Kuzniak & Richard, 2014) analyse l'activité mathématique à travers l'articulation des dimensions sémiotique, instrumentale et discursive dans la structuration du raisonnement géométrique. Il distingue un plan épistémologique, relatif aux objets mathématiques, représentations et artefacts, et un plan cognitif, associé aux processus de visualisation, de construction et de preuve. En géométrie dynamique, l'ETM permet ainsi d'étudier la coordination entre manipulation, visualisation, identification d'invariants, formulation de conjectures et justification. Il offre un cadre pour analyser le passage de l'exploration instrumentée à la démonstration.

Dans un environnement de géométrie dynamique, l'élève peut manipuler une figure, observer des invariants, formuler une conjecture, construire des objets géométriques et rechercher les propriétés permettant de justifier cette conjecture. L'ETM permet ainsi d'analyser la coordination entre visualisation, construction et preuve, notamment dans le passage de l'exploration et de la conjecture à la production d'une preuve avec GeoGebra.

2-4) Articulation des cadres théoriques

Les trois cadres sont complémentaires. L'approche instrumentale rend compte de l'appropriation de GeoGebra et de sa transformation en instrument ; l'orchestration instrumentale analyse sa mise en œuvre dans les situations d'apprentissage ; l'ETM examine les formes de travail mathématique qui en résultent, notamment l'articulation entre exploration, conjecture et démonstration. Leur articulation permet ainsi d'analyser le passage de l'appropriation de l'outil à son intégration didactique et à la construction du raisonnement démonstratif.

3) METHODOLOGIE

3-1) Type de recherche

Cette étude s'inscrit dans une démarche qualitative visant à analyser les transformations des pratiques et des conceptions d'enseignants de mathématiques engagés dans une formation centrée sur l'utilisation de GeoGebra pour l'enseignement de la démonstration géométrique. Cette démarche a été retenue pour sa capacité à rendre compte des processus d'appropriation, des changements de représentations et des évolutions professionnelles des participants au cours de la formation.

3-2) Participants

L'étude a été menée auprès de six enseignants de mathématiques du secondaire exerçant dans différents lycées de la République du Congo. Ils ont été sélectionnés selon un échantillonnage raisonné fondé sur le volontariat, la disponibilité et l'intérêt manifesté pour l'intégration du numérique dans leurs pratiques pédagogiques. Cet effectif ne visait pas une représentativité statistique, mais une analyse approfondie des processus de genèse et d'orchestration instrumentales au cours de la formation. Il répondait également

aux contraintes matérielles des établissements, dont l'équipement informatique limité ne permettait pas une manipulation individuelle du logiciel par un groupe plus important. Ce choix a ainsi permis un accompagnement rapproché des enseignants et un suivi régulier de leurs productions et expérimentations en classe.

La caractérisation des participants reposait sur les informations professionnelles recueillies avant la formation et les données du questionnaire diagnostique. Le tableau 1 présente leurs principales caractéristiques.

Tableau 1. Caractéristiques des six enseignants participants

Enseignant	Sexe	Âge	Formation initiale	Ancienneté	Établissement	Niveau	Usage antérieur de GeoGebra	Expérience numérique initiale déclarée au pré-test
E1	M	30-39	Master	10 ans	Public	Seconde C	Occasionnel	Moyen
E2	M	50+	Licence	22 ans	Privé	Seconde C	Occasionnel	Faible
E3	F	25-30	Licence	3 ans	Privé	Seconde C	Rare	Nul
E4	M	50+	CAPES	25 ans	Public	Seconde C	Jamais utilisé	Nul
E5	F	30-39	Master	9 ans	Public	Seconde C	Rare	Faible
E6	M	30-39	Master	8 ans	Public	Seconde C	Jamais utilisé	Nul

Tous les participants, désignés E1 à E6 afin de préserver leur anonymat, ont été informés des objectifs de la recherche et ont donné leur consentement à la collecte et à l'utilisation scientifique des données recueillies.

3-3) Dispositif de formation

Le dispositif a comporté seize séances de trois heures, soit 48 heures, réparties sur deux mois à raison de deux séances hebdomadaires. Les séances portaient sur l'appropriation technique de GeoGebra, la conception de scénarios didactiques intégrant la démonstration géométrique et les conditions d'orchestration des activités instrumentées.

Les scénarios ont porté notamment sur les notions suivantes : médiatrices, triangles particuliers, perpendicularité, théorème de Thalès, quadrilatères, droite d'Euler, angles inscrits et au centre. Ils suivaient une progression comprenant un problème déclencheur, une exploration dynamique avec GeoGebra, la formulation d'une conjecture, sa démonstration en environnement papier-crayon et l'institutionnalisation des savoirs. Cette organisation visait le passage de la validation perceptive à la validation déductive. Le travail en binômes favorisait les échanges professionnels et la co-construction des scénarios, avec un accent sur l'usage didactique de GeoGebra au service du raisonnement démonstratif plutôt que sur sa seule fonction illustrative.

3-4) Instruments de collecte des données

Les données ont été recueillies à l'aide de plusieurs instruments :

- **les carnets de bord des enseignants** consignant les activités réalisées, les difficultés rencontrées, les ajustements opérés ainsi que les réflexions sur l'intégration future en classe ;
- **les observations directes du chercheur** permettant de documenter les interactions, les éventuelles résistances, les évolutions dans les usages et les transformations des discours professionnels ;
- **les scénarios pédagogiques produits** permettant d'analyser l'évolution des pratiques de conception des enseignants et leur capacité à intégrer GeoGebra dans des situations d'apprentissage favorisant l'exploration, la conjecture et la démonstration ;
- **les fichiers GeoGebra réalisés durant la formation** servant à apprécier le développement des compétences instrumentales des participants ainsi que leur appropriation des fonctionnalités du logiciel à des fins didactiques.
- **les entretiens semi-directifs** réalisés avant et après la formation permettant de recueillir les conceptions des enseignants, leurs perceptions de l'usage de GeoGebra et les transformations qu'ils attribuaient à la formation.
- **le questionnaire diagnostique (pré-test)** visant à identifier les représentations des enseignants concernant le numérique, leur niveau de maîtrise technique de GeoGebra, leurs usages antérieurs ainsi que leurs conceptions de la démonstration géométrique. Ce questionnaire, combinant des questions fermées et ouvertes, a permis d'établir un état initial des pratiques et de disposer d'un point de référence pour l'analyse des évolutions ultérieures;
- **le questionnaire final (post-test)** administré à l'issue de la formation, visait à apprécier les transformations relatives à la maîtrise de GeoGebra, aux conceptions de la démonstration, à ses usages pédagogiques et à la conception de scénarios intégrant exploration, conjecture et preuve. De structure comparable au questionnaire diagnostique, il reprenait certains items du pré-test afin de permettre la comparaison des états initial et final, tandis que d'autres portaient sur les acquis, les difficultés persistantes et les perspectives de réinvestissement en classe. La correspondance entre les deux questionnaires est présentée dans le tableau 2 et ces questionnaires figurent en annexe.

Tableau 2. Correspondance entre les questionnaires pré-test et post-test

Dimension étudiée	Pré-test	Post-test	Fonction de la comparaison
Fréquence des activités géométriques	Q4	Q1	Évolution de la fréquence déclarée
Types d'activités proposées	Q5	Q2	Évolution des activités proposées
Supports d'enseignement	Q6	Q3	Évolution des supports mobilisés
Démarche d'enseignement	Q7	Q4	Évolution des démarches déclarées
Justification des raisonnements	Q8	Q5	Évolution de la place accordée à la justification
Enseignement de la démonstration	Q9	Q6	Évolution des pratiques de guidage de la preuve
Types de tâches géométriques	Q10	Q7	Évolution des tâches proposées
Usages pédagogiques du numérique	Q11	Q8	Évolution des usages pédagogiques du numérique
Activité autonome des élèves	Q12	Q9	Évolution de l'autonomie accordée aux élèves
Fonctions de la démonstration	Q13	Q10	Évolution des conceptions de la démonstration
Caractéristiques d'une bonne démonstration	Q14	Q11	Évolution des critères de qualité
Difficulté de la démonstration	Q15	Q12	Évolution de la perception des difficultés
Difficultés rencontrées par les élèves	Q16	Q13	Évolution des difficultés perçues
Méthodes d'enseignement de la démonstration	Q17	Q14	Évolution des méthodes déclarées
Niveau de compétence perçu des élèves	Q18	Q15	Évolution de l'appréciation des compétences
Activités favorisant la compréhension	Q19	Q16	Évolution des représentations des tâches efficaces
Complexité de la démonstration	Q20	Q17	Évolution des représentations de la complexité
Utilisation de GeoGebra	Q21	Q18	Évolution de la fréquence d'utilisation
Activités réalisées avec GeoGebra	Q22	Q19	Évolution des usages du logiciel
Maîtrise déclarée de GeoGebra	Q23	Q20	Évolution du niveau de maîtrise
Ressources disponibles	Q24	Q21	Évolution des conditions matérielles
Difficultés liées au numérique	Q25	Q22	Évolution des obstacles déclarés
Utilité perçue de GeoGebra	Q26	Q23	Évolution de l'utilité perçue
Fonctions didactiques attribuées à GeoGebra	Q27	Q24	Évolution des fonctions attribuées à l'outil
Compétences instrumentales GeoGebra	Q28	Q25	Évolution des compétences instrumentales
Attentes de formation et acquis	Q29–Q32	Q26–Q28	Passage des attentes initiales aux acquis déclarés
Attitude face au numérique	Q33	Q29	Évolution de la posture professionnelle
Soutien institutionnel	Q34	Q32	Évolution des besoins de soutien

Dimension étudiée	Pré-test	Post-test	Fonction de la comparaison
Conditions de réussite	Q35	Q33	Évolution des conditions jugées nécessaires
Obstacles à l'intégration	Q36	Q34	Évolution des obstacles perçus
Gestion du temps et du programme	Q37	Q35	Évolution des perceptions relatives à l'intégration dans le temps scolaire

Dimensions spécifiques au post-test

Dimension étudiée	Post-test	Fonction
Organisation des activités d'exploration, conjecture, démonstration et institutionnalisation	Q27	Analyse des pratiques développées après la formation
Capacité à concevoir un scénario complet	Q30	Évaluation du réinvestissement professionnel
Transformations professionnelles perçues	Q31 et Q36	Analyse des transformations professionnelles perçues
Difficultés persistantes après la formation	Q37	Identification des besoins résiduels
Intention de poursuite de l'utilisation de GeoGebra	Q38	Analyse de la pérennisation des pratiques
Conditions d'utilisation durable	Q39	Analyse des perspectives de généralisation

La comparaison pré-test/post-test repose sur la correspondance des dimensions et indicateurs évalués, plutôt que sur l'identité du nombre d'items. Les questions communes ont été conservées avec une formulation identique ou proche, tandis que les attentes initiales ont été remplacées par des questions portant sur les acquis, les transformations perçues et le réinvestissement des compétences. Des items spécifiques ont complété le post-test pour documenter les transformations professionnelles et les perspectives d'intégration de GeoGebra.

3-5) Critères d'analyse des données

L'analyse des données a été menée à partir d'une grille élaborée en référence aux travaux de Rabardel (1995) et de Trouche (2004) respectivement sur la genèse instrumentale et orchestration instrumentale. Cette grille a permis d'analyser les productions des enseignants, les observations de séances, les carnets de bord et les entretiens réalisés avant et après la formation. Les principaux indicateurs retenus sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Indicateurs retenus pour l'analyse

Dimension	Indicateurs observés
Genèse instrumentale	Construction dynamique, déplacement des objets, utilisation des mesures, recherche d'invariants, formulation de conjectures
Orchestration instrumentale	Organisation du travail des élèves, gestion des phases d'exploration, mise en commun, institutionnalisation
Démonstration géométrique	Formulation d'hypothèses, justification des propriétés, articulation conjecture-preuve

Dimension	Indicateurs observés
Intégration pédagogique	Conception de scénarios, place accordée aux élèves, rôle du logiciel dans l'activité mathématique

Les catégories retenues ont été progressivement stabilisées au cours de l'analyse afin de permettre une triangulation entre les différentes sources de données recueillies.

3-6) Méthode d'analyse de données

3-6-1) Stratégie d'analyse

Les indicateurs retenus ont servi de cadre à une analyse qualitative fondée sur l'analyse thématique et la triangulation des sources. L'analyse a porté sur l'appropriation de GeoGebra, les conceptions de la démonstration, les activités de conjecture, l'orchestration instrumentale et la conception de scénarios pédagogiques. La triangulation a permis de confronter les déclarations des enseignants, les données issues des questionnaires, des observations, des carnets de bord, des scénarios pédagogiques et des fichiers GeoGebra afin de renforcer la crédibilité des résultats.

L'analyse itérative a permis d'identifier les principales transformations au cours de la formation. L'articulation entre diagnostic initial, formation accompagnée, production réflexive et évaluation finale a ainsi permis d'examiner le rôle de GeoGebra dans le passage de l'exploration dynamique à la démonstration géométrique

3-6-2) Protocole de codage des données

Les dix indicateurs du tableau 3 ont été élaborés à partir de la genèse instrumentale (Rabardel, 1995), de l'orchestration instrumentale (Trouche, 2004) et de l'Espace de Travail Mathématique (Kuzniak, 2011). Les indicateurs relatifs à l'exploration, à la formulation de conjectures et à l'articulation conjecture-démonstration renvoient aux composantes de l'ETM, tandis que ceux portant sur les usages de GeoGebra et l'organisation des situations d'enseignement relèvent de la genèse instrumentale et de l'orchestration instrumentale. Le codage a été réalisé à partir de l'analyse croisée des questionnaires pré et post-formation, des scénarios pédagogiques, des fichiers GeoGebra, des observations de séances, des carnets de bord et des entretiens. Pour chaque enseignant, la présence ou l'absence de chaque indicateur a été enregistrée avant et après la formation selon une logique binaire : **1** lorsque l'indicateur était explicitement identifié dans les données et **0** dans le cas contraire.

Par exemple, l'exploration de propriétés était codée 1 lorsqu'une activité mobilisait GeoGebra pour examiner une propriété par manipulation dynamique ; la formulation de conjectures lorsqu'une propriété générale était énoncée à partir de l'exploration ; l'articulation conjecture-démonstration lorsqu'une justification déductive prolongeait la conjecture ; et les indicateurs d'orchestration lorsqu'une organisation explicite des interactions entre enseignant, élèves, outil et savoir apparaissait dans les scénarios ou les observations. Les données codées ont ensuite été regroupées par catégories afin d'identifier les évolutions observées au cours de la formation. Les pourcentages du

tableau 5 correspondent à la proportion d'enseignants (n = 6) ayant manifesté l'indicateur considéré avant et après la formation.

Le codage ayant été réalisé par un seul chercheur, aucun double codage inter-juges n'a été effectué. La crédibilité de l'analyse a été renforcée par une triangulation des sources de données.

4) RESULTATS

4-1) Un diagnostic initial révélateur d'un déséquilibre didactique

L'analyse des questionnaires diagnostiques révèle un écart entre les conceptions déclarées des enseignants et leurs pratiques effectives. Tous reconnaissent l'importance de la démonstration géométrique pour le développement du raisonnement mathématique, mais les pratiques décrites demeurent majoritairement centrées sur la transmission des connaissances et la reproduction de démonstrations. Une dissociation apparaît ainsi entre les intentions affichées et les pratiques observées. Certains enseignants (E1, E5) privilégient une démarche « théorème–démonstration–application », tandis que d'autres (E3, E6) recourent davantage à l'observation empirique et à des validations peu structurées.

Les difficultés des élèves sont principalement attribuées à la maîtrise des propriétés géométriques, à l'enchaînement des étapes du raisonnement et à l'articulation entre figure et texte. Peu d'enseignants questionnent les dispositifs pédagogiques, ce qui tend à reporter les difficultés sur les élèves.

Tous reconnaissent l'intérêt de GeoGebra, mais son usage reste limité au tracé et à l'illustration. Plusieurs enseignants (E1, E2, E4, E6) déclarent ne pas savoir l'utiliser pour construire une démonstration, ce qui témoigne d'une faible exploitation de son potentiel didactique.

Ces résultats mettent en évidence une dissociation entre visualisation et démonstration. Avant la formation, GeoGebra apparaît davantage comme un artefact de représentation que comme un instrument au service du raisonnement géométrique.

4-2) Une appropriation progressive de GeoGebra

Les premières séances sont marquées par des difficultés techniques : confusion entre outils, sélection des fonctions appropriées, lenteur d'exécution, déplacement dynamique des objets, construction de figures, exploitation des outils de mesure et interprétation des phénomènes observés. Ces difficultés diminuent progressivement. Le caractère dynamique des figures suscite rapidement l'intérêt des participants, qui découvrent la possibilité d'observer des propriétés invariantes malgré les transformations, rompant ainsi avec une conception de la géométrie fondée sur des figures statiques.

Les carnets de bord témoignent de ces ajustements. Un enseignant note : *« Au début, je me concentrais davantage sur les commandes du logiciel que sur les situations*

mathématiques à construire. » Un autre souligne : *« Je découvre que déplacer une figure peut permettre de vérifier si une propriété reste toujours vraie. »*

4-3) De l'observation à la formulation de conjectures

Dès la deuxième séance, une évolution apparaît dans les discours des enseignants. Les formulations relevées chez les enseignants E1 et E2 : *« Cela reste toujours vrai* », *« Quel que soit le triangle obtenu »* ou *« Cette propriété semble se conserver », « On dirait que ça marche toujours, même quand on bouge les points»,* témoignent du passage d'une perception locale à une tentative de généralisation, encore fondée sur une validation perceptive. GeoGebra devient progressivement un outil d'exploration permettant de tester, mais aussi d'invalider des conjectures.

Une difficulté persiste toutefois : certains enseignants assimilent encore la stabilité visuelle à une preuve. Cette confusion entre constater et démontrer, discutée au cours de la formation, constitue un point de tension central et un levier d'évolution des pratiques.

4-3-1) Illustration d'une activité de formulation de conjectures

La figure 1 illustre cette activité consacrée à l'exploration dynamique de la médiatrice d'un segment.

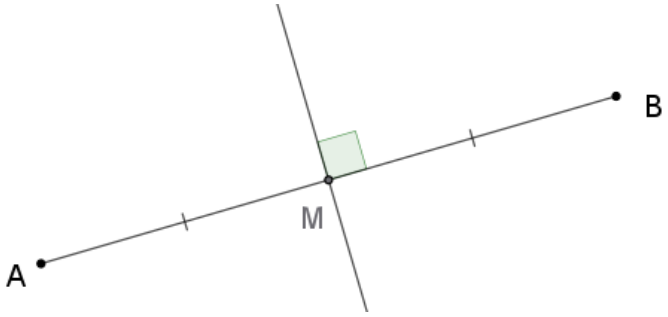

Figure 1. Exploration dynamique de la médiatrice d'un segment

Au cours de cette activité, les enseignants construisent un segment [AB], déterminent son milieu M puis tracent sa médiatrice. Le déplacement dynamique des points A et B leur permet d'observer que tout point de la médiatrice reste équidistant de A et B, conduisant à une conjecture qui sera ensuite démontrée.

Cette activité mobilise plusieurs indicateurs du tableau 3 : exploration dynamique d'une propriété, déplacement des objets, repérage d'un invariant et formulation d'une conjecture avant sa justification. Elle illustre ainsi une phase de genèse instrumentale dans laquelle GeoGebra dépasse sa fonction de représentation pour devenir un instrument d'exploration des propriétés géométriques. Le repérage de l'équidistance à travers les manipulations relève du processus d'instrumentation, tandis que l'organisation de l'exploration suivie d'une mise en commun des conjectures témoigne d'une évolution de l'orchestration instrumentale. La démonstration qui suit permet enfin d'articuler exploration et validation déductive.

4-3-2) Illustration d'une activité sur les diagonales d'un parallélogramme

La figure 2 illustre l'exploration dynamique des diagonales d'un parallélogramme

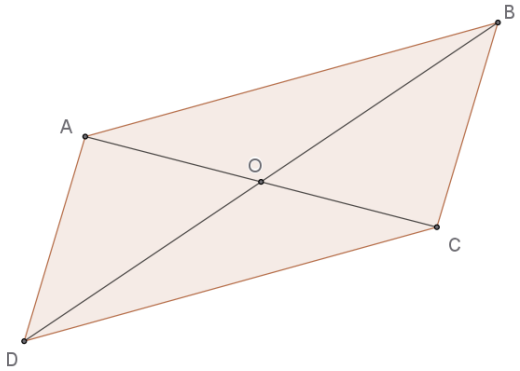

Figure 2. Exploration dynamique des diagonales d'un parallélogramme

Les enseignants construisent un parallélogramme puis déplacent librement ses sommets.

Ils observent que ses diagonales semblent toujours se couper en leur milieu, ce qui conduit à la conjecture : *« Les diagonales d'un parallélogramme se coupent en leur milieu. »* La propriété est ensuite démontrée à partir des propriétés du parallélogramme.

Cette activité mobilise les indicateurs d'exploration dynamique, d'identification d'invariants et de formulation de conjectures. Elle illustre l'articulation entre visualisation et démonstration. Dans la perspective de la genèse instrumentale, GeoGebra devient un instrument d'exploration des propriétés géométriques. Du point de vue de l'orchestration instrumentale, l'activité organise le passage de l'exploration à la validation des conjectures par la démonstration, traduisant le passage d'une validation perceptive à une justification mathématique.

4-4) Une prise de conscience progressive du rôle de la démonstration

À partir de la troisième séance, les enseignants prennent progressivement conscience des limites de la validation perceptive.

Plusieurs déclarent : *« GeoGebra m'aide à comprendre mais je dois encore démontrer sur papier. »*. Cette affirmation traduit un changement important dans leur manière de concevoir le rôle du logiciel. GeoGebra n'est plus considéré comme un outil permettant de prouver mais comme un outil permettant : d'explorer, de comprendre et de formuler des conjectures.

La démonstration apparaît désormais comme une étape indispensable de validation.

Les entretiens réalisés à l'issue de la formation confirment cette évolution. Plusieurs enseignants déclarent avoir modifié leur perception du rôle de GeoGebra dans l'enseignement de la géométrie. Ainsi, l'un d'eux souligne : *« Je pensais que le logiciel servait surtout à représenter les figures. Aujourd'hui, je l'utilise pour faire émerger des questions mathématiques chez les élèves »*. Un autre participant explique : *« Les*

déplacements m'aident à mettre en évidence ce qui reste invariant et à préparer la démonstration ».

4-5) Transformation des pratiques et développement de l'orchestration instrumentale

Les dernières séances de formation révèlent une transformation progressive des pratiques professionnelles des enseignants. Au fil des activités, ceux-ci élaborent des scénarios pédagogiques davantage structurés, intégrant des phases d'exploration, de formulation de conjectures, de démonstration et d'institutionnalisation. L'évolution des principales pratiques observées au cours de la formation est présentée dans le tableau 4.

Tableau 4. Évolution des pratiques observées au cours de la formation

Dimensions analysées	Situation initiale	Situation finale
Utilisation de GeoGebra	Représentation, dessin et illustration	Exploration, visualisation et soutien au raisonnement
Conception de l'enseignement de la démonstration	Présentation d'une démonstration aboutie	Construction progressive de la démonstration
Place des conjectures	Faible ou peu explicitée	Importante et intégrée au processus de recherche
Anticipation des difficultés des élèves	Faible prise en compte	Forte prise en compte dans la conception des activités
Structuration des activités	Organisation principalement linéaire	Organisée en phases : exploration, conjecture, recherche, démonstration et institutionnalisation
Orchestration instrumentale	Peu développée ou structurée	Développée : plus structurée et orientée vers les interactions entre instrument, enseignant et élèves

Les scénarios pédagogiques des six enseignants ont été codés à l'aide d'une grille de dix indicateurs relatifs à la genèse instrumentale et à l'orchestration des situations d'apprentissage. Chaque indicateur a été codé **1** lorsqu'il était présent et **0** lorsqu'il était absent. Sa fréquence a été calculée à partir du nombre d'enseignants concernés sur six.

Le questionnaire renseigne les pratiques, conceptions et compétences perçues, tandis que, l'analyse des scénarios porte sur la présence effective d'éléments liés à l'exploration instrumentée, formulation de conjectures, démonstration et à l'orchestration instrumentale. Le croisement de ces sources permet ainsi de confronter les transformations déclarées aux transformations observables.

Le tableau 5 présente l'évolution des indicateurs identifiés dans les scénarios au début et à la fin de la formation. Les pourcentages sont des multiples de 16,7% correspondant à un enseignant sur six, et les variations sont exprimées en points de pourcentage.

Tableau 5. Évolution des indicateurs de genèse instrumentale et d'orchestration dans les scénarios pédagogiques

Catégories	Indicateurs de genèse instrumentale et d'orchestration	Début de la formation (%)	Fin de la formation (%)	Évolution (points de pourcentage)
Genèse instrumentale	Utilisation de GeoGebra pour explorer une propriété	33,3	100	+66,7
	Utilisation du déplacement dynamique	16,7	100	+83,3
	Recherche invariants géométriques	16,7	83,3	+66,6
	Formulation de conjectures avant la démonstration	16,7	83,3	+66,6
	Utilisation des mesures pour soutenir une conjecture	33,3	83,3	+50
Orchestration de la situation	Passage explicite conjecture → démonstration/preuve	0	66,7	+66,7
	Organisation de débats mathématiques	0	50	+50
	Mise en commun des productions	16,7	50	+33,3
	Institutionnalisation finale des résultats	16,7	50	+33,3
Intégration pédagogique	Élaboration d'un scénario complet intégrant GeoGebra	0	33,3	+33,3

Les résultats du tableau 5 suggèrent une évolution progressive des pratiques enseignantes au cours de la formation. L'exploration des propriétés avec GeoGebra passe de 33,3 % à 100 % des enseignants et le recours au déplacement dynamique de 16,7 % à 100 %. L'articulation entre conjecture et démonstration, absente des scénarios initiaux, apparaît dans 66,7 % des scénarios finaux. Les débats mathématiques, la mise en commun et l'institutionnalisation témoignent également d'une évolution de l'orchestration instrumentale.

Cette évolution apparaît dans les carnets de bord. Un enseignant indique : *« J'interviens moins rapidement qu'avant. Les élèves disposent d'un temps de recherche avant la discussion collective. »* Un autre souligne : *« La démonstration vient plus naturellement lorsque les élèves ont déjà identifié une régularité. »* Ces témoignages confirment les transformations observées dans les scénarios.

La convergence des données issues des questionnaires, scénarios, observations et carnets de bord soutient l'interprétation d'une évolution de la genèse et orchestration instrumentales.

5) ANALYSE ET DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence une transformation progressive des pratiques et des conceptions des enseignants au cours de la formation. L'appropriation de GeoGebra dépasse progressivement la maîtrise technique pour s'inscrire dans des usages orientés

vers l'exploration, la formulation de conjectures et la préparation de la démonstration. Cette évolution correspond au processus de genèse instrumentale décrit par Rabardel (1995), dans lequel l'artefact devient un instrument à travers la construction de schèmes d'utilisation.

Les conceptions de la démonstration évoluent également. Initialement envisagée comme la restitution d'un raisonnement formalisé, elle est progressivement perçue comme l'aboutissement d'un processus associant exploration, observation, conjecture et justification. Cette évolution rejoint les analyses de Balacheff (1988) et Hanna (2000) sur les fonctions heuristiques et explicatives de la démonstration, ainsi que les travaux d'Artigue (2002) et de Gueudet et Trouche (2010) sur l'importance des usages développés par les enseignants et de leur intégration aux ressources pédagogiques.

L'étude révèle par ailleurs l'émergence de formes d'orchestration instrumentale plus élaborées. Les enseignants développent leur capacité à structurer les activités, anticiper les difficultés des élèves et articuler les interactions entre apprenants, outils numériques et savoirs mathématiques. Les scénarios finaux accordent davantage de place à l'exploration, mise en commun, formulation de conjectures et démonstration. Cette évolution rejoint les travaux de Trouche (2004) et de Drijvers et al. (2010). Elle est étayée par les données du tableau 5 : les débats mathématiques passent de 0 % à 50 % des scénarios, la mise en commun des productions de 16,7 % à 50 %, tandis que l'articulation explicite entre conjecture et démonstration, absente au début de la formation, apparaît dans 66,7 % des scénarios finaux.

À la lumière de l'Espace de Travail Mathématique (Kuzniak, 2011 ; Kuzniak & Richard, 2014), ces évolutions traduisent une meilleure articulation des dimensions instrumentale, sémiotique et discursive de l'activité géométrique. L'exploration d'une propriété avec GeoGebra passe de 33,3 % à 100 % des enseignants, tandis que la recherche d'invariants et la formulation de conjectures passent chacune de 16,7 % à 83,3 %. GeoGebra n'est plus seulement un support de représentation, mais devient un médiateur entre observations visuelles, conjectures et raisonnements démonstratifs. Cette articulation est notamment observable dans l'activité sur la médiatrice d'un segment, où le déplacement dynamique permet d'identifier l'invariance de l'équidistance avant sa formulation conjecturale et sa justification déductive.

La transformation du rapport entre visualisation et preuve constitue également un résultat important. Au début de la formation, certains enseignants tendent à assimiler la stabilité visuelle d'une propriété à une preuve. Les activités et les échanges les conduisent progressivement à distinguer l'observation issue du déplacement dynamique de la justification mathématique rejoignant ainsi la distinction entre validation empirique et démonstration déductive (Balacheff, 1988 ; Hanna, 2000).

Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Baccaglini-Frank (2021), Brunetto et Dello Iacono (2023), Borba et al. (2017) et Santos-Trigo (2024), qui soulignent le

potentiel des technologies numériques pour renouveler les formes d'activité mathématique, favoriser l'exploration, la formulation de conjectures et le raisonnement.

La convergence des questionnaires, scénarios, observations et carnets de bord suggère une évolution des usages de GeoGebra et des pratiques d'orchestration instrumentale. Toutefois, compte tenu du faible effectif et du caractère qualitatif et partiellement déclaratif des données, ces résultats constituent des indices d'évolution des pratiques, conceptions et scénarios enseignants, plutôt qu'une preuve d'un effet causal de la formation. Le dispositif documente ainsi les transformations professionnelles, sans permettre d'établir directement leurs effets sur les apprentissages des élèves.

Ces résultats soulignent néanmoins l'intérêt de formations articulant maîtrise technique, réflexion didactique et expérimentation pédagogique (Mahdi et al., 2018), en cohérence avec Raissouni et al. (2023), qui mettent en évidence l'importance de l'engagement des enseignants dans la conception et l'appropriation de nouvelles pratiques. Des recherches complémentaires fondées sur des observations de classes et des données recueillies auprès des élèves permettraient d'examiner les effets de ces transformations sur les apprentissages.

6) CONCLUSION

Cette recherche visait à analyser les transformations des pratiques et des conceptions d'enseignants de mathématiques engagés dans une formation centrée sur l'utilisation de GeoGebra pour l'enseignement de la démonstration géométrique.

Les résultats mettent en évidence une évolution des usages du logiciel, passant d'une fonction principalement illustrative à une utilisation favorisant l'exploration, la formulation de conjectures et la construction du raisonnement démonstratif. Cette évolution s'accompagne d'une orchestration instrumentale plus structurée et d'une meilleure articulation entre visualisation, conjecture et démonstration. Elle suggère également que la tension entre visualisation dynamique et démonstration peut constituer une ressource didactique lorsqu'elle est explicitement prise en compte dans la formation.

Sur le plan théorique, l'étude confirme l'intérêt d'articuler genèse instrumentale, orchestration instrumentale et Espace de Travail Mathématique pour analyser les effets de l'intégration du numérique. Sur le plan pratique, elle souligne l'importance de formations associant maîtrise technique, réflexion didactique et conception de scénarios pédagogiques.

Compte tenu du faible effectif, de la durée limitée de la formation et du caractère principalement déclaratif des données, les résultats doivent être interprétés avec prudence. Ils mettent en évidence des transformations professionnelles sans établir directement leurs effets sur les apprentissages des élèves. Des recherches impliquant un plus grand nombre d'enseignants et des données recueillies auprès des élèves permettraient d'approfondir ces résultats.

RÉFÉRENCES

Artigue, M. (2002). Learning mathematics in a CAS environment: The genesis of a reflection about instrumentation and the dialectics between technical and conceptual work. *International Journal of Computers for Mathematical Learning, 7*(3), 245–274. https://doi.org/10.1023/A:1022103903080

Baccaglini-Frank, A. (2021). To tell a story, you need a protagonist: How dynamic interactive mediators can fulfill this role and foster explorative participation to mathematical discourse. *Educational Studies in Mathematics, 106*(2), 291–312. https://doi.org/10.1007/s10649-020-10009-w

Balacheff, N. (1988). Aspects of proof in pupils' practice of school mathematics. In D. Pimm (Ed.), *Mathematics, teachers and children* (pp. 216–235). Hodder & Stoughton.

Borba, M. C., Askar, P., Engelbrecht, J., Gadanidis, G., Llinares, S., & Sánchez Aguilar, M. (2017). Digital technology in mathematics education: Research over the last decade. In G. Kaiser (Ed.), *Proceedings of the 13th International Congress on Mathematical Education: ICME-13* (pp. 221–233). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62597-3_14

Brunetto, D., & Dello Iacono, U. (2023). Teaching mathematics with digital tools: An Italian high school teachers' perspective. *International Journal for Technology in Mathematics Education, 30*(4), 205–212. https://doi.org/10.1564/tme_v30.4.1

Drijvers, P., Doorman, M., Boon, P., Reed, H., & Gravemeijer, K. (2010). The teacher and the tool: Instrumental orchestrations in the technology-rich mathematics classroom. *Educational Studies in Mathematics, 75*(2), 213–234. https://doi.org/10.1007/s10649-010-9254-5

Gueudet, G., & Trouche, L. (2010). *Ressources vives : Le travail documentaire des professeurs en mathématiques*. Presses Universitaires de Rennes.

Hanna, G. (2000). Proof, explanation and exploration: An overview. *Educational Studies in Mathematics, 44*(1–2), 5–23. https://doi.org/10.1023/A:1012737223465

Hoyles, C., & Lagrange, J.-B. (Eds.). (2010). *Mathematics education and technology: Rethinking the terrain: The 17th ICMI study*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0146-0

Kuzniak, A. (2011). L'espace de travail mathématique et ses genèses. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives, 16*, 9–24.

Kuzniak, A., & Richard, P. R. (2014). *Espaces de travail mathématique et enseignement des mathématiques*. Presses Universitaires de Rennes.

Mahdi, K., Laafou, M., & Idrissi, R. (2018). L'impact des formations continues à distance aux enseignants des sciences physiques dans des logiciels de simulation informatique. *Journal for Educators, Teachers and Trainers, 9*(1), 27–41.

Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies : Approche cognitive des instruments contemporains*. Armand Colin.

Raissouni, M. R., Mahdi, K., Abid, M., Souri, A., & Raissouni, K. (2023). Implementation of a new continuing training framework in physics didactics: Perspectives and recommendations. *Russian Psychological Journal, 20*(4), 274–292. https://doi.org/10.21702/rpj.2023.4.16

Santos-Trigo, M. (2024). Problem solving in mathematics education: Tracing its foundations and current research-practice trends. *ZDM–Mathematics Education, 56*, 211–222. https://doi.org/10.1007/s11858-024-01578-8

Trouche, L. (2004). Managing the complexity of human/machine interactions in computerized learning environments: Guiding students' command process through instrumental orchestrations. *International Journal of Computers for Mathematical Learning, 9*(3), 281–307. https://doi.org/10.1007/s10758-004-3468-5