

Analyse didactique de l'enseignement de l'incertitude de mesure à l'université

JAMILA MIMOUNI¹, FATMA FAKHFAKH², CHIRAZ KILANI³

¹*Institut Supérieur de l'Éducation et de la Formation continue (ISEFC)
Université Virtuelle de Tunis
Tunisie
mimouni_djamyla@yahoo.fr*

²*Laboratoire de chimie de matériaux et catalyse
Faculté des sciences de Tunis
Université de Tunis El Manar
Tunisie
fatma.fakhfakh@fst.utm.tn*

³*Laboratoire de Recherche en Science de l'Information
Université de la Manouba
Tunisie
chiraz.kilani@yahoo.fr*

ABSTRACT

Within the framework of Anthropological Theory of Didactics (TAD), the concept of praxeology provides a framework for analysing teaching practices in the classroom and allows us to explain the logic underlying these practices. This article analyses the effect of professional training in metrology on the development of teaching practices in chemistry. The study is based on a comparison of the praxeologies used in two distinct contexts for the implementation of the same subject matter: on the one hand, those of the trainer within a training firm, considered as reference praxeologies for teaching metrology, in this case measurement uncertainty. On the other hand, those implemented by a university lecturer in practical chemistry classes, after having followed this training. The aim is to identify the differences and similarities in terms of the tasks proposed, the techniques used and the justifications provided, in order to better understand how training influences actual classroom practices. The analysis is based on teaching materials, video recordings of training sessions and practical work, and an interview. This work thus aims to shed light on certain aspects of professional development in the light of professional didactics, through the transformations observed in teaching praxeologies.

KEYWORDS

TAD, Disciplinary Praxeology, DP, measurement uncertainty, university teaching

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la Théorie Anthropologique du Didactique (TAD), la notion de praxéologie offre un cadre pour analyser les pratiques enseignantes en classe et permet d'explicitier les logiques qui sous-tendent ces pratiques. Cet article propose d'analyser l'effet d'une formation professionnelle en métrologie sur le développement des pratiques enseignantes en chimie.

L'étude s'appuie sur une comparaison des praxéologies mobilisées dans deux contextes distincts pour la mise en œuvre d'un même objet de savoir : d'une part, celles du formateur au sein d'un cabinet de formation, considérées comme praxéologies de référence pour l'enseignement de la métrologie, l'incertitude de mesure en l'occurrence. D'autre part, celles mises en œuvre par une enseignante universitaire en travaux pratiques (TP) de chimie, après avoir suivi cette formation. L'objectif est d'identifier les différences et les similitudes en termes de tâches proposées, des techniques utilisées et des justifications apportées, afin de mieux comprendre comment la formation influence les pratiques effectives en classe. L'analyse repose sur des documents pédagogiques, des enregistrements vidéo de séances de formation et de TP et d'un entretien. Ce travail vise ainsi à éclairer certains aspects du développement professionnel à la lumière de la didactique professionnelle, à travers les transformations observées dans les praxéologies enseignantes.

MOTS CLÉS

TAD, Praxéologie disciplinaire, DP, incertitude de mesure, enseignement universitaire

INTRODUCTION

L'amélioration des systèmes éducatifs dans les pays en développement reste un défi à surmonter pour assurer une éducation de qualité (Alladatin et al., 2024). Dans cette perspective, la formation continue des enseignants constitue une voie recommandée pour adapter les systèmes éducatifs aux changements, aux développements technologiques, aux réalités locales et internationales soit pour l'éducation soit pour répondre aux besoins du marché de l'emploi. En particulier, la formation des enseignants universitaires en sciences expérimentales, notamment en chimie, joue un rôle clé dans l'amélioration des pratiques pédagogiques et la transmission des savoirs scientifiques (Robardet, 2013). Des recherches récentes mettent en évidence l'importance des formations professionnelles de courte durée, à condition qu'elles soient fortement ancrées dans les pratiques concrètes. Ainsi, Bélisle et ses collègues (2024) ont indiqué que les dispositifs qui allient l'analyse de l'activité à des études de cas contextualisées sont celles qui produisent les effets les plus durables en salle de classe. À cet égard, la métrologie, science à la fois transdisciplinaire et interdisciplinaire, représente un exemple pertinent à l'étude. Cependant, de nombreuses recherches ont souligné que l'apprentissage et l'enseignement de concepts tels que la mesure, la grandeur et l'incertitude de mesure constituent des enjeux majeurs. D'une part, cette complexité tient au caractère polysémique de notions comme « grandeur » et « mesure », dont les définitions ne font pas l'objet d'un consensus au sein de la communauté scientifique (Munier & Passelaigue, 2012). D'autre part, elle découle de la manière dont ces concepts sont introduits dans les programmes scolaires (Munier & Passelaigue, 2012). Une difficulté supplémentaire réside dans le fait que l'enseignement et l'apprentissage de la métrologie requièrent la maîtrise de notions mathématiques et scientifiques avancées, rendant parfois leur appropriation difficile pour certains apprenants. Pour cela, leur intégration dans l'enseignement universitaire demeure complexe, nécessitant non seulement une transformation des pratiques pédagogiques, mais aussi la mise en place de dispositifs didactiques adaptés à l'expérimentation. Dans cet intérêt, Mimouni et Ben Kilani (2023, p. 189) ont signalé que « l'enseignement de la métrologie nécessite une expertise technique et des connaissances spécifiques de la part des enseignants, un lien très fort et indispensable à l'expérimentation ».

Dans ce cadre, une bonne formation ne doit pas se limiter à l'organisation de cycles de formation, mais doit également s'accompagner d'une analyse des retombées concrètes de cette formation sur les pratiques effectives en classe. Alors, l'analyse des pratiques enseignantes

apparaît comme une bonne entrée pour la recherche sur cette question. En effet, cette analyse invite à interroger les routines établies ainsi que les acquis issus de la formation. Elle permet également d'examiner les rapports que les institutions et des enseignants entretiennent avec un objet de savoir bien défini. L'enjeu est de susciter de nouvelles réflexions pouvant conduire à une transformation des pratiques, à une réorganisation des savoirs et à une évolution des compétences. L'objectif final est d'ajuster ces éléments aux réalités du terrain, ainsi qu'aux transformations constantes du système éducatif, de la formation et du monde de travail.

Cet article se propose d'analyser l'enseignement de l'incertitude de mesure à l'université sous un angle didactique. L'étude s'inscrit dans le cadre de la Théorie Anthropologique du Didactique (TAD) (Chevallard, 1999) qui offre un cadre conceptuel pour étudier les rapports et pratiques mobilisées à cet égard. Une attention particulière est portée aux enjeux rencontrés par l'enseignante dans ses pratiques de classe à l'université, afin de mieux comprendre les facteurs qui influencent son enseignement, notamment lorsqu'il s'agit de traiter des notions complexes comme l'incertitude de mesure. Nous visons à analyser l'effet d'une formation professionnelle en métrologie sur les transformations des pratiques pédagogiques des enseignants universitaires en chimie.

PROBLÉMATIQUE

Bien que la formation continue des enseignants universitaires en métrologie, comme dans l'ensemble des sciences expérimentales, soit reconnue comme un levier essentiel pour améliorer les systèmes éducatifs dans les pays en développement, garantir une éducation de qualité et adapter l'enseignement aux exigences scientifiques actuelles (Alladin et al., 2024; Robardet, 2013), il demeure essentiel d'en évaluer les effets concrets sur les pratiques enseignantes. Le développement professionnel des enseignants constitue un processus continu et dynamique, qui dépasse l'acquisition de nouvelles connaissances pour inclure la transformation durable des pratiques pédagogiques, des postures professionnelles et des rapports aux savoirs (Day, 1999; Lessard, 2021). Dans l'enseignement supérieur, ce développement s'appuie sur l'articulation entre formation continue, analyse des pratiques réelles et adaptations aux évolutions des savoirs disciplinaires et des exigences institutionnelles (Darling-Hammond et al., 2017; Lessard, 2021). Les recherches montrent que les dispositifs de formation qui s'ancrent dans les situations réelles de travail et favorisent la réflexion critique sur l'action sont particulièrement efficaces pour susciter des changements durables dans les pratiques (Desimone, 2009; Pastré, 2011; Lessard, 2021). Ainsi, évaluer l'effet d'une formation professionnelle sur les pratiques enseignantes permet non seulement d'identifier les acquis, mais aussi de déterminer les conditions qui soutiennent un développement professionnel effectif et contextualisé.

De nombreuses recherches ont souligné que l'intégration de concepts métrologiques fondamentaux, tels que l'incertitude de mesure, constitue un enjeu majeur, mais complexe, dans l'enseignement scientifique (Munier & Passelaigue, 2012; Munier et al., 2018; Mimouni et al., 2025). L'incertitude de mesure ne se limite pas aux seules sciences physiques, elle concerne également les sciences biologiques, comme le rappellent Paulin et Charlat (2020), qui plaident pour une approche épistémologique visant à considérer l'incertitude non comme obstacle, mais comme une opportunité pédagogique. Cette perspective souligne la nécessité, pour les enseignants, d'amener les étudiants à mieux comprendre la nature des savoirs scientifiques à développer leur pensée critique et à saisir le lien entre données expérimentales et production de connaissances (Maisch, 2024). Dans ce contexte, la maîtrise du concept de l'incertitude de mesure devient un enjeu fondamental pour l'ensemble des disciplines scientifiques

expérimentales. Elle est essentielle pour interpréter et comparer les résultats, orienter les décisions, et comprendre la portée des preuves scientifiques.

Pour enseigner cette notion, une transformation des pratiques pédagogiques appuyée par des dispositifs didactiques adaptés s'avèrent indispensables. Or, à l'université, son enseignement reste un défi tant pour les enseignants que pour les étudiants, en particulier dans les disciplines comme la chimie (Chesnais & Munier, 2016; Munier & al., 2018).

Cette étude s'inscrit dans cette problématique. Elle vise à évaluer les effets d'une formation professionnelle en métrologie sur le développement des pratiques d'une enseignante universitaire de chimie, notamment dans son enseignement de l'incertitude de mesure en travaux pratiques aux étudiants de niveau master. Ceci en analysant les ressources mobilisées, les choix didactiques effectués et les évolutions observables après la formation. Nous cherchons à comprendre dans quelle mesure cette formation a pu transformer les pratiques de l'enseignante et contribuer à un développement professionnel effectif. La production proposée se donne pour objectif d'analyser le travail enseignant dans une double perspective en nous appuyant sur le modèle praxéologique issu de la théorie anthropologique du didactique (Chevallard, 1999). Tout d'abord, nous cherchons à comprendre, décrire et modéliser les pratiques enseignantes ainsi que les pratiques du formateur mise en œuvre pour enseigner l'incertitude de mesure. La théorie anthropologique du didactique permet de modéliser les pratiques humaines en deux blocs distincts : un bloc pratico-technique qui décrit les tâches accomplies à l'aide de techniques, et un bloc technologico-théorique, qui regroupe les justifications de ces techniques à travers des éléments de technologie (discours explicatif) et de théorie ou cadre conceptuel. La seconde perspective correspond à la mobilisation des organisations praxéologiques dans le but de comprendre les enjeux et les facteurs de développement professionnel. Nous retenons la praxéologie (Chevallard, 1999) comme cadre d'analyse des pratiques, en formulant l'hypothèse que son évolution constitue l'un des marqueurs du développement professionnel de cette enseignante, considéré ici sous l'angle de la didactique professionnelle (Pastré, 2011). Pour cela, nous cherchons à répondre aux questions de recherche suivantes :

- Quelles sont les praxéologies mobilisées par le formateur lors de la formation pour la mise en œuvre de l'incertitude de mesure ?
- Quelles sont les praxéologies mobilisées par cette enseignante en classe après la formation ?
- En quoi la comparaison entre les praxéologies du formateur et celles de l'enseignante après formation permet-elle de mettre en évidence un développement des pratiques enseignantes ?
- Quels facteurs favorisent ou limitent l'intégration des notions de métrologie dans ses pratiques d'enseignement ?

MÉTHODOLOGIE

Pour répondre à nos questions de recherche, nous avons adopté une approche qualitative comparative structurée comme suit :

Dans un premier temps, nous avons analysé les pratiques du formateur mobilisées lors d'une séance de formation professionnelle portant sur l'estimation de l'incertitude de mesure pour un dosage acido-basique. Puis, nous avons analysé les pratiques mobilisées par une enseignante universitaire ayant déjà suivi cette formation. Par la suite nous avons comparé les pratiques de l'enseignante en situation de classe à celles du formateur. Dans cette comparaison, les pratiques du formateur ont été considérées comme référentielles, c'est-à-dire comme un modèle de référence pour l'enseignement de l'incertitude de mesure. Ce protocole ne permet

pas d'identifier directement les évolutions dans les pratiques de l'enseignante, mais il constitue un point d'appui pour repérer les écarts entre ses pratiques et celles attendues, et ainsi mettre en évidence les évolutions restant à mettre en place.

Pour ce faire, nous nous sommes appuyées sur l'analyse des supports de formation et de TP. Nous avons ensuite analysé des enregistrements vidéo réalisés dans deux contextes distincts. Le premier concerne une séance de formation en métrologie, dispensée dans un cabinet privé par un formateur expert. Le second correspond à une séance de travaux pratiques à l'université, animée par une enseignante après qu'elle a suivi cette formation. Cette double observation nous a permis de comprendre puis de comparer les pratiques du formateur et celles de l'enseignante dans un cadre réel d'enseignement, afin d'analyser les effets potentiels de la formation sur son intervention pédagogique.

Dans notre dispositif méthodologique, un entretien avec l'enseignante a également été réalisé en complément de l'observation de séance post-formation. L'analyse de cet entretien sera développée dans un autre travail, mais il importe de préciser ici qu'il occupe une place centrale : c'est lui qui permet d'appréhender l'évolution des pratiques de l'enseignante, en l'absence de données filmées disponible pour la période précédant la formation. Les questions posées portaient directement sur ses pratiques effectives (par exemple : avant la formation, comment faisiez-vous pour aborder cette notion ou cette activité ?), ce qui permet d'ancrer ses réponses dans son expérience professionnelle réelle.

Traitement des données

L'échantillon de notre étude se compose d'une enseignante universitaire expérimentée, spécialisée en chimie, ainsi que d'un formateur, ingénieur chimiste et expert en métrologie, doté d'une longue expérience à la fois dans le travail en laboratoire de chimie et dans l'enseignement universitaire. La formation est structurée dans sa totalité en huit séances de 4 à 5 h chacune, réparties sur quatre mois. Elle a été menée auprès d'un groupe de douze personnes, dont deux enseignantes universitaires. Dans cette contribution, nous nous limitons à l'analyse d'un extrait vidéo d'une durée de 45 minutes. Cet extrait a été sélectionné en raison de sa pertinence par rapport à notre objectif de recherche, qui consiste à modéliser les pratiques du formateur lors de la mise en œuvre d'un savoir portant sur l'incertitude de mesure. Au début de cette séquence, le formateur a précisé qu'il vise à la fois la construction de connaissances disciplinaires sur les concepts métrologiques ainsi que le développement de stratégies permettant leur mise en application dans des contextes professionnels concrets.

La séance de TP a été animée par une enseignante universitaire qui a déjà suivi la formation. D'une durée de deux heures, cette séance portait sur l'estimation de l'incertitude de mesure appliquée à la détermination de la concentration d'une solution. Elle a été menée avec un groupe de 16 étudiants de master professionnel en physique chimie environnement. Les enregistrements vidéo ont été transcrits, puis découpés en séquences correspondant aux différentes tâches proposées aux étudiants, en suivant le déroulement chronologique de la séance. L'enseignante observée a été sélectionnée en fonction de la problématique de recherche, de sa formation initiale en chimie, et son parcours professionnel. Son implication dans un dispositif de formation en métrologie, ainsi que son expérience en enseignement à l'université, en faisaient un profil pertinent pour étudier l'évolution des pratiques d'enseignement liées à l'incertitude de mesure. Le formateur a été sélectionné en fonction de son expertise reconnue en métrologie, (c'est un expert métrologue auprès du conseil national d'accréditation en Tunisie (TUNAC)), ainsi que son expérience pédagogique, puisqu'il assure des cours, des travaux dirigés et des travaux pratiques en métrologie à l'université. Il contribue également à l'élaboration et l'animation de dispositifs de formation professionnelle destinés à divers organismes publics et privés, dont celui observé dans le cadre de cette recherche.

Conformément à la Théorie anthropologique du Didactique (Chevallard, 1999), une praxéologie est un modèle qui permet l'analyse des pratiques humaines en les décomposant en quatre éléments articulés : Une tâche à accomplir, une technique pour la résoudre, une technologie qui justifie cette technique, et une théorie plus générale qui fonde cette justification. Dans cette recherche, les éléments praxéologiques ont été extraits, d'une part, du support utilisé lors de la formation ainsi que des interactions entre le formateur et les participants autour de la mise en œuvre d'un objet de savoir portant sur l'incertitude de mesure, et, d'autre part, du support du cours universitaire (TP) et des échanges entre l'enseignante et ses étudiants, lors de la séance où elle a mis en application les connaissances et compétences acquises durant la formation.

Nous faisons l'hypothèse que les pratiques mobilisées par le formateur pour enseigner l'estimation de l'incertitude de mesure constituent une référence normative à partir de laquelle il est possible d'évaluer le développement professionnel de l'enseignante. Dans cette perspective, l'évolution des praxéologies qu'elle mobilise est considérée comme un indicateur pertinent de ce développement, entendu ici dans le cadre de la didactique professionnelle (Pastré, 2011) comme un processus de transformation des savoirs et des compétences en lien avec la situation de travail (Suau, 2019).

Afin d'identifier les tâches, les techniques, les technologies et les théories mobilisées, nous avons choisi de recourir au tableau suivant :

TABLE 1

Praxéologies disciplinaires observées en formation et en TP

Tâches	Techniques	Technologies
Que doit-faire le formateur (ou l'enseignante) pour résoudre la situation proposée ? (les verbes d'actions identifiés)	Quels sont les outils et les moyens utilisés	Pourquoi accomplir cette tâche de cette manière ? (conformément à quelle référence ?)

Nous n'avons pas relevé des éléments appartenant à la catégorie « théorie » dans le propos du formateur, pour cela, nous avons fait le choix de présenter la praxéologie sous forme de trois colonnes.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Par rapport à la formation professionnelle

Lors de la séance de formation, le formateur avait mobilisé principalement sept tâches pour estimer l'incertitude de mesure liée à la concentration de la solution titrée.

1. Identification de la grandeur à mesurer (la concentration de la solution HCl)
2. Identification des sources d'erreurs sur la variable V_A
3. Identification des sources d'erreur sur la variable V_B
4. Identification des sources d'erreurs sur C_B
5. Estimation des incertitudes-types, respectivement, sur les variables V_A , V_B puis sur C_B
6. Estimation de l'incertitude-type composée totale sur la somme de V_A , V_B et C_B
7. Détermination de l'incertitude élargie noté U sur la concentration C_A

Les praxéologies mobilisées par le formateur pour estimer l'incertitude de mesure sont présentées dans l'ordre dans le tableau en annexe (Voir Annexe 1, Tableau A1).

Par rapport à la séance de travaux pratiques à l'université

L'enseignante a débuté la séance en fixant les règles d'action. Elle a annoncé que la manipulation serait divisée en deux parties : la première consacrée à la préparation de la solution, et la seconde au dosage de la solution d'étalonnage. Elle a précisé que la préparation s'effectue en deux étapes ; d'abord la pesée de la masse d'EDTA, suivie de la dissolution dans une fiole jaugée pour obtenir la solution finale.

Les praxéologies mobilisées par l'enseignante lors du TP pour estimer l'incertitude de mesure sont présentées dans l'ordre dans le tableau ci-dessus (Voir Annexe 2, Tableau A2).

Analyse comparative des praxéologies du formateur et de l'enseignante

L'analyse des praxéologies mobilisées par le formateur en contexte de formation professionnelle et celles mobilisées par l'enseignante dans un cours de travaux pratiques en chimie, met en évidence à la fois des convergences structurelles et des différences fonctionnelles. Ainsi, les deux organisations articulent leurs démarches autour d'un objectif commun : estimer l'incertitude de mesure dans un dosage de solution, à travers des tâches centrées sur la détermination d'un mesurande, la modélisation mathématique, et l'analyse du processus de mesure en utilisant des représentations graphiques reliant les causes aux effets. Cependant, si le formateur adopte une approche théorique structurée autour des normes et des guides professionnels (tels que le GUM ou les standards ISO), son objectif est de transmettre des méthodes d'estimation de l'incertitude de mesure transférables à divers contextes professionnels, notamment industriels. Ces praxéologies, de portée générale, constituent une référence disciplinaire robuste. De son côté, l'enseignante transpose ces concepts dans une logique d'enseignement expérimental propre au laboratoire universitaire. Elle mobilise des techniques contextualisées, directement liées aux manipulations qu'elle réalise avec ses étudiants au laboratoire (pesée, préparation de solution, dosage, justification par le calcul, etc.). Ainsi, si les pratiques de l'enseignante sont cohérentes et pertinentes pour le contexte d'apprentissage, celle du formateur ont une portée plus large, visant l'opérationnalisation dans des milieux professionnels variés. Sur le plan du logos, les deux praxéologies reposent sur des savoirs métrologiques solides tel que la loi de propagation des incertitudes et les lois de probabilités. Les éléments technologiques mobilisés par le formateur relèvent principalement de références normatives et scientifiques reconnues dans le domaine professionnel de la métrologie. Ces éléments justifient les techniques proposées pour estimer l'incertitude dans des contextes industriels ou de laboratoires accrédités. Quant à l'enseignante, les éléments technologiques mobilisés, sont ancrés dans le contexte didactique et expérimental de l'enseignement universitaire. Elle privilégie des formulations bien adaptées au niveau des étudiants, favorisant la compréhension concrète et l'appropriation des concepts en situation de classe.

Cette comparaison met en évidence l'impact positif de la formation suivie par l'enseignante. L'introduction, par l'enseignante, du diagramme 5M et de la modélisation mathématique explicite témoigne d'un prolongement du bloc technologique qui est associé à l'estimation de l'incertitude présentés en formation, désormais intégrés dans ses pratiques. Lors d'un entretien mené après la séance de TP, l'enseignante a précisé qu'elle ne mobilisait pas ces outils auparavant, ce qui permet d'attribuer leur présence à l'influence directe de la formation suivie. Dans une perspective guidée par la Théorie Anthropologique du Didactique (TAD), ce changement peut être perçu comme un déplacement du centre de gravité de la praxéologie (formulation opératoire élaborée par nous-mêmes). En d'autres termes, nous avons remarqué que l'enseignante, au départ focalisée sur l'exécution technique des activités ($[T/\tau]$), fait de plus en plus appel à des aspects du bloc technico-théorique ($[\theta/\Theta]$), surtout avec l'introduction du diagramme des 5M et la modélisation mathématique explicite. Cette transition montre un

changement dans la nature de sa relation au savoir, évoluant d'une compétence pratique vers une connaissance théorisée, ce qui correspond à une professionnalisation progressive observable à travers l'évolution de ses praxéologies.

De même, Sánchez (2024) montre que les formations centrées sur l'incertitude de mesure conduisent les enseignants de chimie à adopter systématiquement des outils graphiques, tel que des diagrammes pour cartographier les sources d'erreurs. Dans notre corpus, cette adoption se manifeste lorsque l'enseignante fait construire le diagramme d'Ishikawa avec les étudiants avant de passer au calcul. Lors d'un entretien mené après la séance (ses questions et son analyse détaillée feront l'objet d'une prochaine publication), elle a indiqué qu'elle ne mobilisait pas cet outil avant la formation, ce qui permet d'interpréter cette pratique comme signe d'une appropriation durable du schème appris en formation. Par ailleurs, les transformations observées relèvent d'un processus de conceptualisation dans l'action (Pastré, 2011). Ainsi, l'enseignante mobilise de nouveaux invariants opératoires – définis, selon Pastré (1999), comme des éléments stables de connaissances intégrés dans l'action, qui guident et organisent l'activité dans des situations professionnelles - tels que la traçabilité, la propagation, le facteur d'élargissement K. Elle précise ne pas les avoir explicitement mobilisés dans son enseignement avant la formation.

Son développement se manifeste par l'intégration de techniques avancées telles que le diagramme des 5M, une plus grande rigueur dans la présentation des concepts et une capacité à relier les savoirs théoriques aux pratiques pédagogiques. Sa praxéologie évolue vers une structuration plus scientifique de l'enseignement de l'incertitude, tout en respectant les exigences d'un cadre didactique. Cette évolution est bien confirmée par ses propos lors de l'entretien : « *Avant la formation, j'étais un peu confuse sur l'origine des erreurs systématiques. Le diagramme des 5M m'a permis de clarifier les causes et d'aider les étudiants à y réfléchir dès le départ* ».

Ce changement dans sa manière d'enseigner l'incertitude se traduit clairement dans ses pratiques en classe. Au cours du TP, pour estimer l'incertitude de mesure, elle mobilise une approche par modélisation, introduit le diagramme des 5M et accompagne les étudiants dans l'identification des sources d'incertitude relatives à chaque variable du système étudié. Ce contenu, abordé en profondeur lors de la formation, est réinvesti dans ses séances malgré son absence dans le programme officiel de chimie analytique.

En effet, l'enseignante compense les limites matérielles des laboratoires universitaires (absence de micropipettes étalonnées, de masses de référence, etc.) par des stratégies didactiques alternatives : recours à des plateformes numériques (Google Class room), partage de vidéos de simulation, explications différées en ligne. Ces pratiques traduisent une volonté manifeste de dépassement des contraintes institutionnelles, et confirment une forme d'appropriation personnelle et professionnelle du savoir.

L'adaptation de ses pratiques pédagogiques témoigne de sa capacité à articuler les praxéologies acquises en formation avec les exigences de son environnement d'enseignement, révélant une dynamique de développement professionnel.

CONCLUSION

La comparaison des praxéologies mises en œuvre par le formateur en métrologie avec celles développées par l'enseignante de TP, après sa participation à la formation, permet de mettre en évidence une appropriation partielle mais significative des éléments travaillés durant la formation. Notre étude, fondée sur le cadre de la TAD, révèle des effets concrets de la formation sur les pratiques professionnelles de l'enseignante, en particulier dans la manière d'expliquer la notion de l'incertitude de mesure dans un contexte de travaux pratiques en chimie. L'analyse

a montré des proximités notables au niveau des techniques mobilisées, l'introduction des tâches qui favorisent la réflexivité des étudiants sur les sources d'erreurs. Ces rapprochements suggèrent que la formation a permis un transfert de certains savoirs et savoirs faire du formateur vers l'enseignante. Également, l'analyse a montré des écarts qui subsistent au niveau de la complexité des justifications (θ) et de l'institutionnalisation des savoirs. L'enseignante manifeste bien sa volonté pour mettre en œuvre des tâches proches de la pratique professionnelle, tout en restant contrainte parfois par des conditions matérielles ou institutionnelles qui limitent l'intégration complète des modèles proposés lors de la formation. En croisant les résultats de cette étude avec d'autres travaux, notamment ceux de Salifu et ses collègues (2024) dans le cadre du « Teacher Professional Development Monitor (TPD, 2024) », nous constatons une convergence autour de l'importance d'ancrer le développement professionnel des enseignants dans l'analyse des pratiques réelles en classe. Ces auteurs soulignent la nécessité d'observer le travail concret des enseignants pour en tirer des défis, des problèmes et des enseignements utiles à la conception de dispositifs de formation pertinents, même dans des contextes de ressources limitées. Cette perspective rejoint celle de la didactique professionnelle (Pastré, 2011), qui insiste sur l'importance de partir de l'analyse du travail réel pour concevoir des formations véritablement adaptées aux besoins du terrain. Pour améliorer l'efficacité de la formation, il apparaît donc pertinent de promouvoir des dispositifs basés sur des approches intégrant un accompagnement didactique, notamment par l'analyse des pratiques effectives en lien avec les contenus enseignés. L'observation des gestes professionnels de l'enseignante, en particulier lors de son enseignement de l'incertitude de mesure, constitue à ce titre une ressource précieuse pour ajuster et enrichir les actions de formation. Cette orientation rejoint les travaux de Maisch (2024), qui insiste sur la nécessité d'articuler deux leviers essentiels : d'une part, l'analyse des pratiques enseignantes comme point d'ancrage de la formation, et d'autre part, la co-construction de situations pédagogiques étroitement liées aux spécificités des savoirs à enseigner, notamment en mathématiques et en sciences.

RÉFÉRENCES

- Alladatin, J., Abdoulaye, A., & Al-chikh, I. (2024). Vers une éducation de qualité en Afrique : Pratiques enseignantes, pédagogies et gestion scolaire. *Revue de l'École Supérieure de l'Éducation et de la Formation*, 1(2), i-v. <https://doi.org/10.60481/revue-rise.N2.1>.
- Bélisle, M., Jean, V., & Fernandez, N. (2024). The educational development of university teachers: Mapping the landscape. *Frontiers in Education*, 9, 1376658. <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1376658>.
- Chesnais, A., & Munier, V. (2016). *Mesure, mesurage et incertitudes : Une problématique interdidactique mathématiques / physique*. Séminaire national de l'ARDM, Paris, France. <https://hal.science/hal-01317134v1>.
- Chevallard, Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 19/2(1), 221-266.
- Darling-Hammond, L., Hyler, M. E., & Gardner, M. (2017). *Effective teacher professional development*. Palo Alto, CA: Learning Policy Institute. https://learningpolicyinstitute.org/sites/default/files/product-files/Effective_Teacher_Professional_Development_REPORT.pdf.
- Day, C. (1999). *Developing teachers : The challenges of lifelong learning*. Falmer Press.

- Desimone, L. M. (2009). Improving impact studies of teachers' professional development: Toward better conceptualizations and measures. *Educational Researcher*, 38(3), 181-199. <https://doi.org/10.3102/0013189X08331140>.
- Lessard, C. (2021). *Évaluation des effets du développement professionnel des acteurs de l'éducation*. Paris, Cnesco-Cnam. <https://cnam.hal.science/hal-03245284v1>.
- Maisch, C. (2024). Concepts de grandeur et de mesure. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, à paraître. <https://hal.science/hal-04720536v1>
- Mimouni, J., & Ben Kilani, C. (2023). Analyse d'un dispositif de formation professionnelle en métrologie pour le travail. *Mediterranean Journal of Education*, 3(2), 188-198. <https://doi.org/10.26220/mje.4525>.
- Mimouni, J., Rassaa, K & Kilani, C. (2025). Analyse praxéologique d'une formation professionnalisante en métrologie pour le travail. In V. Munier & M. Bächtold (Éds), *Actes des XIIIe Rencontres scientifiques de l'ARDIST* (pp. 482-489). Éditions de l'ARDIST. https://ardist2024.sciencesconf.org/data/pages/Actes_13e_Rencontres_ARDiST.pdf.
- Munier, V., & Passelaigue, D. (2012). Réflexions sur l'articulation entre didactique et épistémologie dans le domaine des grandeurs et mesures dans l'enseignement primaire et secondaire. *Tréma*, 38, 106-147. <https://doi.org/10.4000/trema.2840>.
- Munier, V., Chesnais, A., & Molvinger, K. (2018). La mesure en mathématiques et en physique : Enjeux épistémologiques et didactiques. In M. Bächtold, V. Durand-Guerrier, & V. Munier (Éds), *Épistémologie & Didactique* (pp. 95-111). Presses Universitaires de Franche-Comté. <https://doi.org/10.4000/books.pufc.11357>.
- Pastré, P. (1999). Travail et compétences : Un point de vue de didacticien. *Formation Emploi*, 67(1), 109-125. <https://doi.org/10.3406/forem.1999.2365>.
- Pastré, P. (2011). *La didactique professionnelle. Approche anthropologique du développement chez les adultes*. Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.faber.2011.01>.
- Paulin, F., & Charlat, S. (2020). L'épistémologie des sciences biologiques et géologiques : Une occasion d'enseigner l'incertitude ? *Raisons Éducatives*, 24(1), 101-126. <https://doi.org/10.3917/raised.024.0101>.
- Robardet, G. (2013). Jean-Marie Boilevin. Rénovation de l'enseignement des sciences physiques et formation des enseignants. *RDST*, 7, 197-199. <https://doi.org/10.4000/rdst.735>.
- Salifu, I., Agyekum, B., & Nketia, D. (2024). Teacher professional development (TPD) in Ghana: Constraints and solutions. *Professional Development in Education*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/19415257.2024.2351947>.
- Sánchez, J. M. (2024). Integrating measurement uncertainty analysis into laboratory education for the development of critical thinking and practical skills. *Journal of Chemical Education*, 101(11), 4783-4789. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00583>.
- Suau, G. (2019). La notion d'organisation praxéologique de la TAD pour analyser le développement professionnel. *La nouvelle revue - Éducation et société inclusives*, 86(2), 93-106. <https://doi.org/10.3917/nresi.086.0093>.

ANNEXE 1

TABLEAU A1
Praxéologies de la séance de formation

Tâches	Techniques	Technologies
Identification de la grandeur à mesurer (C_{HCl})	Se baser sur la formule fournie pour préciser l'objet de mesure	Outils de calcul proportionnel
Identification des sources d'erreurs sur la variable VA	Modéliser mathématiquement le mesurande à partir d'une analyse graphique des relations de cause à effet issues du protocole expérimental	Lois de propagation des incertitudes Diagramme d'Ishikawa
Identification des sources d'erreurs sur la variable VB	Modéliser mathématiquement le mesurande à partir d'une analyse graphique des relations de cause à effet issues du protocole expérimental	Lois de propagation des incertitudes Diagramme d'Ishikawa
Identification des sources d'erreurs sur la variable CB	Modéliser mathématiquement le mesurande à partir d'une analyse graphique des relations de cause à effet issues du protocole expérimental	Lois de propagation des incertitudes Diagramme d'Ishikawa
Estimation des incertitudes-types, respectivement, sur les variables VA, VB puis CB	Repérage et quantification des composantes influençant l'incertitude de mesure relative à chaque variable	Loi de probabilité Lois de propagation des incertitudes
Estimation de l'incertitude-type composée totale sur la somme de VA, VB et CB	Exprimer le résultat d'une mesure dont la valeur est obtenue en additionnant les incertitudes-types associées à chacune des grandeurs d'entrée du modèle de mesure	Loi de propagation des incertitudes
Détermination de l'incertitude élargie noté U sur la concentration CA	Exprimer le résultat final en y associant son incertitude, obtenue en multipliant l'incertitude-type composée par un facteur d'élargissement, noté K	Loi de probabilité Loi de propagation des incertitudes

ANNEXE 2

TABLEAU A2
Praxéologies de la séance de travaux pratiques à l'université

Tâches	Techniques	Logos
Calculer la masse théorique d'EDTA	Justifier la masse théorique à préparer, calculer la masse nécessaire à partir des proportions stœchiométriques	Théorie des proportions stœchiométriques

Peser la masse d'EDTTA déjà calculer	Utiliser un instrument de pesage pour le faire (la balance) et un instrument pour mettre la masse nécessaire d'EDTA (une fiole jaugée)	Théorie de la mesure
Préparer la solution d'EDTA	Mélanger le solvant avec le soluté (c'est-à-dire la masse pesée d'EDTA)	Stœchiométrie, Solubilité
Réaliser l'étalonnage de la solution d'EDTA	Doser la solution d'EDTA par une solution étalon	Théorie des proportions stœchiométriques Équivalence chimique
Déterminer le mesurande	Déterminer l'objet de mesure à l'aide d'un modèle mathématique : $CEDTAx = \frac{C_{\text{ét}} \cdot V_{\text{ét}}}{V_{\text{EDTA}}} = f(C_{\text{ét}}, V_{\text{ét}}, V_{\text{EDTA}})$	Théorie de la mesure (Expliquer le concept de mesurande en métrologie, qui désigne la grandeur physique ou chimique à mesurer)
Identifier les sources d'incertitudes sur CEDTA	Analyser le processus expérimental en utilisant une représentation graphique reliant les causes aux effets Identifier les sources d'incertitudes (Analyse des erreurs liées aux instruments utilisés pour préparer la solution d'EDTA)	Théorie d'erreur et d'incertitude Loi de propagation des incertitudes de mesure Diagramme des 5M
Identifier les incertitude type sur Vét	Analyser le processus expérimental en utilisant une représentation graphique reliant les causes (la Température, la répétabilité, l'erreur indiqué par le fabricant) à l'effet (le volume Vét)	Loi de probabilité Loi de propagation des incertitudes Diagramme des 5M
Estimer les incertitudes types sur Vét	Choisir en fonction des données recueillies la loi qui semble être représentative du phénomène étudié Choix des composantes des incertitudes et estimation de leurs valeurs	Loi de propagation des incertitudes Diagramme des 5M
Déterminer l'incertitude-type composée sur Vét	Exprimer le résultat d'une mesure, sa valeur est égale à la somme des incertitudes-types liées au volume Vét (U_{T° , U_{rep} , U_{fab}). Ces termes étant les incertitudes associées aux grandeurs d'entrées dans le modèle de mesure (5M)	Loi de propagation des incertitudes
Identifier les incertitudes-types sur VEDTA	Analyser le processus expérimental en utilisant une représentation graphique reliant les causes ($U_{C_{\text{ét}}}$, $U_{V_{\text{ét}}}$, $U_{V_{\text{EDTA}}}$) à l'effet U_{CEDTA}	Loi de probabilité Loi de propagation des incertitudes Diagramme des 5M
Estimer les incertitudes-types sur VEDTA	Choisir en fonction des données recueillies la loi qui semble être représentative du phénomène étudié Choix des composantes des incertitudes et estimation de leurs valeurs	Loi de propagation des incertitudes Diagramme des 5M
Déterminer l'incertitude-type composée sur VEDTA	Exprimer le résultat d'une mesure, sa valeur est égale à la somme des incertitudes-types liées au volume Vét. Ces termes étant les incertitudes associées aux grandeurs d'entrées dans le modèle de mesure (5M)	Loi de propagation des incertitudes
Identifier les sources d'incertitudes sue $C_{\text{ét}} = m \cdot P / M \cdot V$	Analyser le processus expérimental en utilisant une représentation graphique reliant les causes à l'effet $U_{C_{\text{ét}}} = f(U_m, U_P, U_V)$	Loi de probabilité Loi de propagation des incertitudes Diagramme des 5M
Identifier les sources d'incertitude sur la masse m	Analyser le processus expérimental en utilisant une représentation graphique reliant les causes (U_{fab} , Résolution, U_{T° à l'effet $U_m = f(U_{\text{fab}}, \text{Résolution}, U_{T^\circ})$	Loi de probabilité Loi de propagation des incertitudes Diagramme des 5M

Estimer les incertitudes-types sur la masse m	Choisir en fonction des données recueillies la loi qui semble être représentative du phénomène étudié Choix des composantes des incertitudes et estimation de leurs valeurs	Loi de propagation des incertitudes Diagramme des 5M
Déterminer l'incertitude-type composée sur la masse m	Exprimer le résultat d'une mesure, sa valeur est égale à la somme des incertitudes-types liées à la masse m. Ces termes étant les incertitudes associées aux grandeurs d'entrées dans le modèle de mesure (5M) $u_c(C_A) = CA \sqrt{\left(\frac{u(C_B)}{C_B}\right)^2 + \left(\frac{u(V_B)}{V_B}\right)^2 + \left(\frac{u(V_A)}{V_A}\right)^2}$	Loi de propagation des incertitudes
Identifier l'incertitude sur la pureté P	Lire la valeur de l'incertitude sur pureté sur la bouteille commerciale	Théorie de l'incertitude de mesure appliquée aux instruments de laboratoire et aux produits (Présenter le concept d'incertitude instrumentale, qui inclut les erreurs potentielles inhérentes à la construction et à la conception des instruments de mesure et des produits et expliquer comment ces incertitudes peuvent affecter le résultat final)
Identifier les incertitudes-types sur le volume V	Analyser le processus expérimental en utilisant une représentation graphique reliant les causes à l'effet	Loi de probabilité Loi de propagation des incertitudes
Estimer les incertitudes-types sur le volume V	Choisir en fonction des données recueillies la loi qui semble être représentative du phénomène étudié (le volume V) Choix des composantes des incertitudes et estimation de leurs valeurs	Loi de propagation des incertitudes Diagramme des 5M
Déterminer l'incertitude-type composée sur le volume V	Exprimer le résultat d'une mesure, sa valeur est égale à la somme des incertitudes-types liées au volume V. Ces termes étant les incertitudes associées aux grandeurs d'entrées dans le modèle de mesure (5M)	Loi de propagation des incertitudes
Déterminer l'incertitude-type composée sur Cét	Exprimer le résultat d'une mesure, sa valeur est égale à la somme des incertitudes-types liées à la concentration Cét. Ces termes étant les incertitudes associées aux grandeurs d'entrées dans le modèle de mesure (5M)	Loi de propagation des incertitudes
Déterminer l'incertitude-type composée de CEDTA	Exprimer le résultat d'une mesure, sa valeur est égale à la somme des incertitudes-types liées à la concentration Cét. Ces termes étant les incertitudes associées aux grandeurs d'entrées dans le modèle de mesure (5M)	Loi de propagation des incertitudes