جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم ظهر المهراز فاس
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MAHRAZ FES

N° d'ordre : 79 / 2024

Centre des Etudes : ***Sciences et Techniques et Sciences Médicales***
Formation Doctorale : ***Didactique des Sciences et Ingénierie Pédagogique (DSIP)***
Discipline : ***Sciences Physiques***
Spécialité : ***Didactique des Sciences Physiques***
Laboratoire : ***Informatique, Signaux, Automatisme et Cognitivisme (LISAC)***

THÈSE DE DOCTORAT

Enjeux didactiques et pédagogiques de la mathématisation des sciences physiques : étude empirique au secondaire qualifiant marocain

Présentée par :

EL AZZOUZI Abdelwahab

Soutenue le 24/12/ 2024 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
EL YAZIDI Mohamed	PES	FS-USMBA Fès	Président
MADRANE Mourad	PES	ENS- UAE Tétouan	Rapporteur
BENNIS Nezha	PES	FS-USMBA Fès	Rapporteur
GUENNOUN Btissam	MCH	CRMEF Fès-Meknès	Rapporteur
CHAIBI Noreddine	PES	FS-USMBA Fès	Examinateur
ELACHQAR Abdelrhani	PES	USMBA	Co-Directeur de thèse
KADDARI Fatiha	PES	FSDM-USMBA	Directrice de thèse

Année Universitaire : 2023-2024

Dédicaces

À la mémoire de mon père, *Abdellah El Azzouzi*,

Qui a toujours cru en moi et m'a soutenu tout au long de sa vie. Nos souvenirs restent une source inépuisable de force et d'inspiration.

Et à ma mère, *Aicha El Mahjoubi*,

Pour son amour inconditionnel et son soutien sans faille, qui ont été des piliers tout au long de ce voyage.

Je vous dédie ce travail avec tout mon amour et ma gratitude.

Remerciements

A Dieu tout puissant qui m'a donné la santé et la volonté de terminer cette thèse.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir lieu sans l'aide de ma directrice de thèse, Madame *Kaddari Fatiha*, Professeur d'enseignement supérieur de l'université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès. Je ne saurai jamais remercier Madame *Kaddari Fatiha* de m'avoir accompagné tout au long de cette aventure. Son expérience, ses connaissances et son appétence dans le domaine de recherche ont très fortement contribué à la réussite de ma thèse.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur *Elachqar Abdelrhani,* Vice-Président de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès, chargé des Affaires Académiques et Pédagogiques qui m'a fait l'honneur d'être mon Co-directeur de thèse. Son expérience, sa rigueur et ses connaissances scientifiques dont il m'a fait profiter, ses encouragements prodigués et sa patience tout au long de ces années de recherche m'ont été d'un grand secours.

Je remercie chaleureusement tous les membres du jury d'avoir accepté de lire, de juger et de consacrer leur précieux temps à évaluer mon travail. En particulier, je tiens à adresser mes remerciements respectueux à Monsieur *El Yazidi Mohamed*, Professeur d'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès, pour son rôle de Président du jury et pour avoir dirigé les échanges avec rigueur et bienveillance. Ses remarques pertinentes et son expertise ont permis d'orienter et de renforcer cette recherche.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur *Madrane Mourad*, Professeur d'Enseignement Supérieur à l'École Normale Supérieure de l'Université Abdelmalek Essaâdi de Tétouan, pour son expertise et ses conseils enrichissants qui ont grandement contribué à l'amélioration de cette thèse. Madame *Guennoun Btissam*, Professeur Habilité au Centre Régional des Métiers de l'Éducation et de la Formation de Fès-Meknès, dont sa perspective en sciences de l'éducation et son expérience pédagogique ont apporté des remarques pertinentes et constructives qui ont contribué à enrichir cette recherche. Madame *Bennis Nezha*, Professeur d'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès, pour son regard scientifique et ses commentaires constructifs qui ont apporté un éclairage précieux et original à cette recherche. Monsieur *Chaibi Noreddine*, Professeur d'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de l'Université Sidi

Mohamed Ben Abdellah de Fès, en tant qu'examinateur, pour son analyse minutieuse, ses observations enrichissantes et ses conseils avisés qui ont contribué à l'approfondissement des conclusions de cette thèse.

Je suis profondément reconnaissant à toute l'équipe du Laboratoire Informatique, Signaux, Automatique et Cognitivisme (LISAC), spécialement de la formation de Didactique des Sciences et Ingénierie Pédagogique (DSIP), faculté des Sciences Dhar El Mahraz de Fès.

Résumé de la thèse

Au cours des deux dernières décennies les efforts déployés pour la compréhension didactique et pédagogique de la relation entre les mathématiques et les sciences physiques n'ont cessé de croître, vue l'importance des mathématiques dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques. Généralement, les méthodes physiques reposent sur la description mathématique de la réalité, pourtant les représentations mathématiques doivent être prises en compte dans la perspective de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences physiques elles-mêmes. Donc, les mathématiques sont indispensables aux sciences physiques et à ses méthodes.

Le travail de cette thèse est consacré à rendre la mathématisation des sciences physiques plus claire et compréhensible, non seulement pour les apprenants, mais aussi pour les enseignants et tous les contributeurs dans ce champ disciplinaire. Outre ces considérations fondamentales, il existe des aspects pratiques concernant les apprenants et les enseignants de secondaire des sciences physiques de la région de Fès-Meknès au Maroc qui se plaignent de plus en plus des difficultés à appliquer les mathématiques à des situations physiques. La question se pose donc de savoir quelles sont les raisons profondes de ces difficultés et ce que l'on peut faire pour y remédier au cours de l'enseignement et l'apprentissage secondaire.

Le domaine de recherche abordé dans cette thèse couvre un large éventail. C'est pourquoi le rapport est divisé en trois parties, chacune se concentrant sur un axe spécifique. Dans la première partie, *"Cadre théorique : Modèles théoriques pour la Mathématisation des Sciences Physiques"*, éclaire l'interaction entre les sciences physiques et les mathématiques. Dans cette partie, nous éclairons non seulement les sciences physiques et les mathématiques autant que deux champs disciplinaires historiquement interreliés, mais aussi les aspects de l'apprentissage des apprenants et la méthodologie d'enseignement, dans la mesure où ils peuvent contribuer au bon déroulement de l'apprentissage et l'enseignement de la mathématisation des sciences physique en classe. Dans la deuxième partie, "*Problématique et Méthodologie de recherche*", met en valeur les difficultés liées à l'interaction entre les sciences physiques et les mathématiques du point de vue apprenant et enseignant dans le contexte Marocain. Elle met l'accent également sur toutes les méthodes et les méthodologies utilisées pour les expérimentations répondant à notre problématique de recherche. La dernière partie, "*Résultats et Discussion*", examine les résultats des expérimentations empiriques sur la mathématisation des sciences physiques. Cette analyse se fait d'abord du point de vue des enseignants, en explorant les méthodes pédagogiques utilisées pour intégrer la mathématisation en classe. Ensuite, elle s'intéresse au point de vue des apprenants, en utilisant la Technique du Groupe Nominal (TGN) pour identifier les difficultés qu'ils rencontrent dans ce domaine disciplinaire.

Cette thèse est l'aboutissement des résultats empiriques les plus importants sur l'enseignement et l'apprentissage de la mathématisation des sciences physiques. Dans sa première partie théorique, elle rassemble les résultats des travaux de recherche existants dans la littérature. Constatant un manque de recherches dans ce domaine au Maroc, cette thèse se propose de combler ce vide en apportant un éclairage sur la mathématisation des sciences dans le contexte Marocain.

Mots clés : Mathématisation ; Sciences physiques ; Enseignement secondaire ; Difficultés d'apprentissage ; Contexte marocain.

Abstract

Over the past two decades, efforts to understand the didactic and pedagogical relationship between mathematics and physics have steadily increased, given the importance of mathematics in physics teaching and learning. Generally, physical methods rely on the mathematical description of reality, yet mathematical representations must be considered from the physics teaching and learning perspective. Therefore, mathematics is indispensable to physical sciences and their methods.

This thesis is dedicated to making physics mathematization clearer and more understandable for students, teachers, and all contributors. In addition to these fundamental considerations, there are practical aspects concerning secondary school physics teachers and students in the Fes-Meknes region of Morocco, who increasingly report difficulties applying mathematics to physical situations. This raises the question of the underlying reasons for these difficulties and what can be done to resolve them in secondary education.

The research area covered in this thesis is broad. For this reason, the report is divided into three parts, each focusing on a specific axis. The first part, *"Theoretical Framework: Theoretical Models for Physics Mathematization "*, sheds light on the interaction between physics and mathematics. This section not only highlights physics and mathematics as two historically interconnected disciplines but also explores aspects of students' understanding and teaching methodologies, insofar as they contribute to the effective implementation of mathematization in the classroom. The second part, *"Research Problem and Methodology"*, emphasizes the challenges related to the interaction between physics and mathematics from both student and teacher perspectives within the Moroccan context. It also details the methods and methodologies used for the experiments addressing the research problem. The final part, *"Results and Discussion"* examines the outcomes of empirical experiments on physics mathematization. This analysis first considers the teachers' perspective, exploring the pedagogical methods employed to integrate mathematization in the classroom. Then, it focuses on the students' perspective, utilizing the Nominal Group Technique (NGT) to identify the difficulties they encounter in this disciplinary domain.

This thesis culminates in the most significant empirical results on the teaching and learning of the mathematization of physical sciences. Its first theoretical part compiles the results of existing research in the literature. Noting a lack of research in this area in Morocco, this thesis aims to fill this gap by shedding light on the mathematization of sciences in the Moroccan context.

Keywords: Mathematization; Physics; Secondary education; Learning difficulties; Moroccan context.

Liste des abréviations

A : D'accord *(Agree)*.

CNRST : Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique.

D : Désaccord (*Disagree).*

E : Electricité.

ESE : Encyclopedia of Science Education

KI : Knowledge Integration. Intégration des Connaissances

M : Mécanique.

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques.

PC : Physique et Chimie.

PCK : Pedagogical Content Knowledge.

PISA : Programme International pour le Suivi des Acquis des apprenants.

RR : Round Robin.

SA : Tout à fait d'accord (*Strongly Agree).*

SD : Tout à fait Désaccord (*Strongly Disagree*).

STEM : Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques.

SVT : Sciences de la Vie et de la Terre.

TGN : Technique de Groupe Nominale.

TIC : Techniques d'Information et de Communication.

TICE : Techniques d'Information et de Communication appliquées à l'Enseignement.

TR : Transformations Nucléaires.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemple des représentations selon Bruner (1974). 25
Tableau 2 : Différentes parties des sciences physiques impliquant les mathématiques. 65
Tableau 3 : Exemples des études sur la mathématisation des sciences physiques. 66
Tableau 4 : Objectifs et Élaboration des différentes questions de l'expérimentation 1.1. 68
Tableau 5 : Elaboration des différentes questions de l'expérimentation 1.2. 69
Tableau 6 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant les parties du cours qui nécessitent plus la mathématisation. 80
Tableau 7 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant les problèmes les plus couramment rencontrés dans l'enseignement des physiques au terminal. 82
Tableau 8 : Difficultés liées aux réponses des apprenants en classant selon le Σpi décroissant. 108

Liste des figures

Figure 1 : Triade de Peirce, (1960) : " Relation entre Signe, Objet et Interprétant" selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019). 21
Figure 2 : Les classifications des représentations selon Bruner (1974). 23
Figure 3 : Représentations objectives selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019). 28
Figure 4 : Représentations picturales selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019). 29
Figure 5 : Représentations verbales selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019). 30
Figure 6 : Représentations mathématiques pures selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019). 32
Figure 7 : Les différentes représentations et aspects de notion "Temps de demi-vie" selon Linder et al., (2014). 37
Figure 8 : Modèle de base de la mathématisation des sciences physiques. (Modifié d'après (E. F. Redish, 2005)). 42
Figure 9 : Les composantes du domaine de la culture mathématique selon Programme for International Student Assessment & Organisation for Economic Co-operation and Development, (2006). 44
Figure 10 : Modèle d'Adu-Gyamfi et al., (2012) de changement entre les représentations mathématiques et les sciences physiques. 45
Figure 11 : Modèle de Docktor et al., (2016) de la mathématisation des sciences physiques en termes de résolution des problèmes. 46
Figure 12 : Le modèle de Jensen et al (2017) pour la mathématisation et la physicalisation des sciences physiques. 47
Figure 13 : Les expérimentations de point de vue enseignant. 67
Figure 14 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la complémentarité de la physiques et les mathématiques. 83
Figure 15 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants à l'intégration des mathématiques dans l'interprétation des phénomènes physiques. 84
Figure 16 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants à la difficulté de la mathématisation dans l'apprentissage des sciences physiques. 85
Figure 17 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants aux difficultés liées à la mathématisation des sciences physiques chez les apprenants. 86
Figure 18 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la mathématisation des sciences physiques. 94

Figure 19 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la relation entre la mathématisation et les problèmes en sciences physiques. 94
Figure 20 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant l'importance de la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques. 95
Figure 21 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la place de la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques. 96
Figure 22 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la difficulté liée à la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques. 96
Figure 23 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant les types des difficultés trouvées dans la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques. 97
Figure 24 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la relation de l'intérêt des apprenants avec la mathématisation des problèmes en sciences physiques. ... 98
Figure 25 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant l'influence de la mathématisation de la résolution des problèmes sur les attitudes des apprenants. 99
Figure 26 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant le rappel mathématique dans la résolution des problèmes en sciences physiques. 99
Figure 27 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant l'impact des rappels mathématiques sur l'intérêt et les attitudes des apprenants pour la résolution des problèmes en sciences physiques. 100
Figure 28 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la pédagogie d'enseignement unifiée pour la mathématisation des sciences physiques. 101
Figure 29 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant le projet d'enseignement et d'apprentissage de la mathématisation des sciences physiques. 101

Liste des annexes

Annexe 1 : Questionnaire de l'enseignant..... 125
Annexe 2 : Nombre des enseignants selon l'académie régionale d'éducation e de formation de Fès-Meknès. 130

Note de présentation

Projet :

Intérêt des jeunes marocains pour les sciences et les technologies : Réalités et Perspectives

Programme Ibn Khaldoun d'appui à la recherche Scientifique dans le domaine des Sciences Humaines et Sociales

Dans la société contemporaine totalement sous l'emprise des sciences et technologies, la demande en compétences scientifiques est omniprésente. Cela fait de la formation scientifique une préoccupation majeure de tout système éducatif car sans formation scientifique de qualité, la société serait privée de ressources humaines capables de contribuer au développement scientifique, technique, économique et social du pays.

Au Maroc, en tant que pays émergent, la demande en compétences scientifiques et technologiques susceptibles d'accompagner efficacement les mises en œuvre des projets et stratégies gouvernementales en matière de développement est encore plus pressante. Cependant, les constats nationaux (Rapports CSE, PNEA 2008, 2016 …) et internationaux (TIMSS, 2003, 2007, 2011) mettent en évidence que l'école marocaine n'a pas encore pu atteindre, ni en qualité ni en quantité, l'objectif de satisfaire cette demande sociétale et ce en dépit des différentes réformes éducatives engagées depuis plus de deux décennies.

Cet état de fait devrait faire de l'enseignement des sciences un projet de société au Maroc et c'est cette conviction qui est à l'origine de ce projet intitulé : Intérêt des jeunes marocains pour les sciences et les technologies, Réalités et Perspectives

Dans la quête internationale de cerner les enjeux de l'enseignement/Apprentissage des sciences, le zoom est mis sur la relation qu'entretiennent les apprenants avec les Sciences et technologies et qui peut se décliner en termes de Motivation, Intérêt, Attitude. Dans ce projet,

le focus est mis plus particulièrement sur le concept de l'intérêt défini par les chercheures comme le concept permettant de décrire la relation des sujets avec un objet spécifique (les ST ou les disciplines qui les composent).

Selon différents chercheurs, on peut distinguer deux grandes catégories de facteurs influençant l'intérêt des élèves à l'égard des ST et des carrières qui leur sont associées (Hasni, 2007) : facteurs externes à l'école et facteurs liés à l'institution scolaire.

L'analyse de cette problématique nécessite donc la prise en considération de plusieurs niveaux (individuel, familial, scolaire, social …). Dans ce projet, tout en tenant compte de ces différentes variables, l'axe directeur de la recherche serait le postulat suivant :

Un enseignement scientifique et technologique de qualité est le garant de l'augmentation de l'intérêt des élèves pour ces filières et les métiers qui leur sont associés.

A cet égard, le projet est structuré autour de trois volets principaux :

- ***Le volet d'éducation en Sciences Physiques ;***
- ***Le volet d'éducation en Sciences de la Vie et de la Terre (SVT) ;***
- ***Le volet d'éducation sociale.***

Mon sujet de recherche, intitulé "Enjeux didactiques et pédagogiques de la mathématisation des sciences physiques : étude empirique au secondaire qualifiant marocain", s'inscrit pleinement dans le premier volet, relatif à l'éducation en sciences physiques. Cette étude vise à analyser le rôle et l'impact des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques, en examinant les mécanismes d'apprentissage et les difficultés rencontrées par les élèves. Elle cherche à identifier les stratégies didactiques permettant d'améliorer la compréhension et la maîtrise des concepts scientifiques à travers une approche mathématisée des sciences physiques et par la suite l'augmentation de l'intérêt des élèves pour cette discipline.

Table de matière

Dédicaces II

Remerciements VI

Résumé de la thèse VIII

Abstract IX

Liste des abréviations X

Liste des tableaux XI

Liste des figures XII

Liste des annexes.....XIV

Note de présentation ……...XV

Introduction générale..... 1

Partie I : Cadre théorique : Modèles théoriques pour la Mathématisation des Sciences Physiques 5

Chapitre 1 : Interaction sciences physiques et mathématiques……..……6

Introduction 7

I. Sciences physiques et Mathématiques…….7

I.1. Aperçu historique de la relation entre les mathématiques et les sciences physiques ……7

I.2. Sciences physiques et Mathématiques en tant que disciplines scolaires 9

I.2.1. Qu'est-ce que les sciences physiques ?..... 11

I.2.2. Qu'est-ce que les mathématiques ?..... 12

II. Interaction entre les mathématiques et les sciences physiques……15

II.1. Définition de la mathématisation des sciences physiques 15

II.2. Mathématisation en didactique des sciences physiques..... 16

II.3. Complexité de la mathématisation des sciences physiques 17

II.3.1. Interrelation profonde entre la physique et les mathématiques..... 17

II.3.2. Différents niveaux et phases de mathématisation 17
II.3.3. Rôle épistémologique des mathématiques en physique 18
II.3.4. Différences de traitement entre les disciplines 18
II.3.5. Stratégies pédagogiques variées 18
II.3.6. Symboles mathématiques et le sens physique 19
III. Représentations ……...……...19
III.1. Définition des représentations 19
III.2. Triangle de Peirce, (1960) : Une théorie pour comprendre les représentations en sciences ……21
III.3. Représentations selon Bruner (1974) 22
IV. Représentations en sciences physiques ;…….26
IV.1. Classification des représentations dans les cours des sciences physiques 27
IV.1.1. Représentations objectives 27
IV.1.2. Représentations picturales 29
IV.1.3. Représentations verbales 30
IV.1.4. Représentations mathématiques 32
IV.2. Usage approprié des représentations mathématiques en sciences physiques 35
V.Représentations mathématiques pour l'apprentissage et la compréhension des sciences physiques 36
V.1. Acquisition et application des représentations mathématiques par les apprenants 36
V.2. Impact des représentations mathématiques sur la compréhension des apprenants 38
Conclusion 39
Chapitre 2 : La mathématisation des sciences physiques……..40
Introduction 41
I. Processus de la mathématisation des sciences physiques……..41
II. Modèles théoriques pour la mathématisation des sciences physiques…….42
II.1. Modèle de Redish, (2005) 42
II.2. Modèle de l'OCDE (2006) 43

II.3. Modèle d'Adu-Gyamfi et al (2012) 44
II.4. Modèle de Docktor et al (2016) 46
II.5. Modèle de Jensen et al (2017) 47
III. Modèle théorique adapté pour la présente recherche……..48
Conclusion..... 48
Partie II: Problématique, Méthodologie et méthodes de recherche……..50
Chapitre 1 : Problématique et Questions de recherche…….51
Introduction 52
I. Problématique de recherche……...52
I.1. Enseignement/apprentissage des sciences physiques dans le contexte marocain.. 53
I.2. La mathématisation des sciences physiques 54
I.3. Questions de recherche 55
II. Hypothèses de recherche……..58
II.1. Hypothèse du volet enseignant..... 59
II.2. Hypothèse du volet apprenant..... 59
III. Objectifs de la recherche…….59
III.2. Objectif du volet enseignant 60
III.3. Objectif du volet apprenant..... 60
IV. Justification du choix d'hypothèse et d'objectifs……60
Conclusion..... 61
Chapitre 2 : Méthodologie et Méthodes de recherche……..63
Introduction 64
I.Expérimentation 1 : la mathématisation des sciences physiques du volet enseignant 64
I.1. Méthodologie et Méthodes de l'expérimentation 1 65
I.2.1. Analyse des manuels scolaires 65
I.2.2. Etudes bibliographiques pour l'expérimentation 1 66
I.2.3. Elaboration des questionnaires..... 66

I.2.3.1. Questionnaire de l'expérimentation 1.1 67
I.2.3.1. Questionnaire de l'expérimentation 1.2 69
I.2.4. Échelle des questionnaires 71
I.2.5. Participants 71
I.2.6. Passation du questionnaire 71
I.2.7. Traitements des données 72
II.Expérimentation 2 : La mathématisation des sciences physiques du volet apprenant 73
II.1. Méthodologies et Méthodes pour l'expérimentation 2 74
II.2.1. Définition du temps de demi-vie 74
II.2.2. Technique de Groupe Nominale (NGT) 74
II.2.3. Participants 75
II.2.4. Collecte des données 75
Partie V: Résultats et Discussions……78
Chapitre 1 : Expérimentation 1 : La mathématisation des sciences physiques du volet enseignant 79
Introduction 80
I.Expérimentation 1.1 : Perceptions des enseignants du secondaire sur la mathématisation des sciences physiques 80
II.1. Résultats de l'Expérimentation 1.1……...80
II.2. Discussion de l'Expérimentation 1.1……87
I.2.1. Identification des parties du cours nécessitant la mathématisation (*Question Q1*) 87
I.2.2. Nature des problèmes fréquemment rencontrés (*Question Q2*) 89
I.2.3. Complémentarité durable entre mathématiques et sciences physiques (Question Q3) ……90
I.2.4. Intégration des mathématiques dans l'étude des phénomènes physiques (*Question Q4*)…… 91
I.2.5. Difficulté de la mathématisation dans l'enseignement des sciences physiques (*Question Q5*) 91

I.2.6. Difficultés des apprenants avec la mathématisation des sciences physiques (*Question Q6*) 92

II.3. Résultats de l'Expérimentation 1……..93

I.3.1. Axe 1 : Avis des enseignants sur la mathématisation des problèmes physiques.... 93

I.3.2. Axe 2 : Avis des enseignants sur la difficulté de la mathématisation dans la résolution des problèmes. 96

I.3.3. Axe 3 : Avis des enseignants sur l'intérêt des apprenants pour la résolution des problèmes. 98

I.3.4. Axe 4 : Avis des enseignants sur les processus de mathématisation des problèmes physiques. 100

II.4. Discussion de l'Expérimentation 1.2……...102

I.4.1. Axe 1 : Avis des enseignants sur la mathématisation des problèmes physiques.. 102

I.4.2. Axe 2 : Avis des enseignants sur la difficulté de la mathématisation dans la résolution des problèmes 103

I.4.3. Axe 3 : Avis des enseignants sur l'intérêt des apprenants pour la résolution des problèmes 103

I.4.4. Axe 4 : Avis des enseignants sur les processus de mathématisation des problèmes physiques 103

II.5.Vers une réforme de la mathématisation des sciences physiques dans le contexte marocain 104

II.6. Synthèse des résultats des expérimentations 1.1 et 1.2……...105

II.6.1. Validation des hypothèses de recherche 105

II.6.2. Confirmation des objectifs de recherche 106

Conclusion..... 106

Chapitre 2 107 Expérimentation 2 : La mathématisation des sciences physiques du volet apprenant 107

I.Expérimentation 2 : La compréhension de la mathématisation des sciences physiques par des apprenants..... 108

I.1. Discussion de l'Expérimentation 2……...108

I.1.1. Difficultés identifiées dans l'intégration des mathématiques en sciences physiques… 108
I.1.2. Difficultés dans la Compréhension des Concepts Physiques 110
I.1.3. Nécessité d'une Approche Interdisciplinaire et d'Innovations Pédagogiques 111
I.1.4. Synthèse des résultats de l'Expérimentation 2 113
I.1.4.1. Validation des hypothèses de recherche 113
I.1.4.2. Confirmation des objectifs de recherche 114
Conclusion 114
Conclusion générale 115
Perceptives de recherche 119
Limites de la Recherche 122
Annexes 124
Références bibliographiques 131
Productions Scientifiques 146
Publication Scopus 146
Communications Orales 147

Introduction générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre des recherches menées dans le projet Ik-18-34, financé par le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST) dans le cadre du programme Ibn Khaldoun pour la recherche en sciences humaines et sociales. Ce projet, intitulé "*Intérêt des élèves marocains pour les sciences et les technologies : réalités et perspectives*", part de l'hypothèse que le développement d'une culture et de compétences scientifiques se base sur un enseignement réfléchi et structuré des différentes disciplines scientifiques. Il aborde donc plusieurs thématiques liées à l'enseignement et à l'apprentissage des disciplines scientifiques. C'est dans ce contexte que cette thèse se concentre spécifiquement sur une problématique relative à l'enseignement et à l'apprentissage des sciences physiques.

> *Qui dit société moderne dit une culture scientifique et technologique chez tous les citoyens.*
>
> (Hasni & Patrice Potvin, 2015)

Pour leur rôle fondamental dans le développement technologique et scientifique, les sciences physiques occupent une place fondamentale dans la société moderne. Elles sont à la base de nombreuses innovations qui ont transformé nos vies, notamment dans des domaines comme l'énergie, les communications, la médecine, etc. De ce fait, la compréhension des lois physiques permet de résoudre des problèmes complexes et de répondre aux défis actuels. Cependant, l'enseignement de la physique rencontre plusieurs obstacles majeurs tels que : la complexité des concepts physiques, souvent perçus comme ardues, abstraits et difficiles à comprendre par les apprenants, les méthodes pédagogiques non adaptées au contexte, …

Les recherches sur l'impact des approches pédagogiques sont de plus en plus nombreuses, ce travail en fait partie. Adhérant à l'hypothèse de nombreux chercheurs en didactique des sciences qui disent qu'il faut relativiser l'idée des disciplines totalement indépendantes et privilégier des disciplines scientifiques interreliées (Hasni & Potvin, 2015; Potvin et al., 2018) pour favoriser l'apprentissage, nous avons entamé cette recherche sur l'interaction des mathématiques et de la physique.

La relation entre les sciences physiques et les mathématiques est l'une des formes les plus représentatives de l'interrelation entre les disciplines scientifiques (Bicalho & Oliveira, 2011; Pastuchow, 2011; Reverdy, 2016). En effet, ces deux disciplines sont étroitement liées, et

donc les enseignants et les apprenants doivent savoir utiliser leurs connaissances et compétences en mathématiques pour comprendre les phénomènes physiques (Krey, 2019; Pospiech, 2019; Steinberg et al., 1997).

Ce travail de recherche qui se focalise sur l'interaction sciences physiques/mathématiques et plus particulièrement la mathématisation des sciences physiques s'intitule :

Enjeux didactiques et pédagogiques de la mathématisation des sciences physiques : étude empirique au secondaire qualifiant marocain

Il est structuré en trois parties :

Partie I : Cadre théorique : Modèles théoriques pour la Mathématisation des Sciences Physiques.

La partie I se compose de deux chapitres :

Le premier chapitre **Interaction sciences physiques et mathématiques** s'articule autour de la relation entre ces deux disciplines. Il décrit les caractéristiques spécifiques à chacune d'elle et cela pour mettre en exergue leurs convergence et divergence.

Dans le deuxième chapitre, **La mathématisation des sciences physiques**, nous avons essayé de présenter le concept de la mathématisation des sciences physiques en illustrant la définition, le processus et les différents modèles relevés dans la littérature.

Partie II : Problématique, méthodologie et méthode de recherche.

La partie II se divise en deux chapitres :

Dans le premier chapitre **Problématique et Questions de recherche** nous détaillons la problématique à l'origine de la recherche. Il faut souligner que cette problématique a été élaborée sur la base de nos observations en tant que professeur au secondaire qualifiant et la synthèse bibliographique effectuée. A l'issu de la problématique, nous exposons la question générale, les sous questions de recherche ainsi que les hypothèses qui ont orienté les différentes investigations.

Le deuxième chapitre **Méthodologie et méthodes de recherche**, présente la méthodologie adoptée et décrit les démarches et les méthodes suivies pour apporter des

éléments de réponses aux questions soulevées. Les différentes expérimentations menées sont également décrites dans ce chapitre.

Partie III : Résultats et Discussions.

Dans cette dernière partie seront présentés les résultats obtenus au terme des deux expérimentations réalisées. En effet, les données de l'**Expérimentation 1** sur le rapport de l'enseignant à la mathématisation ont été discutés et interprétés. Le même traitement a été réalisés pour l'**Expérimentation 2** ayant pour objectif l'analyse du rapport apprenant /mathématisation.

Partie I

Cadre théorique : Modèles théoriques pour la Mathématisation des Sciences Physiques

Chapitre 1

Interaction sciences physiques et mathématiques

Introduction

L'histoire des sciences physiques est intimement liée à celle des mathématiques. Cette relation privilégiée, qui s'est construite au fil des siècles, a profondément façonné notre compréhension du monde naturel. La mathématisation des sciences physiques, c'est-à-dire l'utilisation des mathématiques comme langage et outil fondamental pour décrire et comprendre les phénomènes physiques, constitue l'une des plus importantes révolutions épistémologiques de l'histoire des sciences.

Ce premier chapitre examine plusieurs caractéristiques qui définissent les sciences physiques et les mathématiques dans le contexte éducatif. Il met en lumière comment les représentations mathématiques, telles que les équations, les graphiques et les modèles jouent un rôle crucial dans la compréhension des phénomènes physiques. Ces outils permettent non seulement de formaliser des concepts complexes, mais aussi d'effectuer des prédictions et de vérifier des théories.

Le chapitre aborde également le cadre théorique qui régit l'interaction entre mathématiques et sciences physiques. Cette interaction ne se limite pas à une simple utilisation des mathématiques comme outil de calcul ; elle implique une symbiose où les avancées dans l'un des domaines entraînent des innovations dans l'autre.

Ce chapitre pose les bases d'une exploration approfondie de la manière dont les mathématiques et les sciences physiques s'entrelacent, et comment cette relation influence l'éducation et la recherche dans ces disciplines. La maîtrise des représentations mathématiques apparaît comme essentielle pour les apprenants en sciences physiques et pour quiconque s'intéresse à la modélisation et à l'analyse des phénomènes naturels.

I. Sciences physiques et Mathématiques

I.1. Aperçu historique de la relation entre les mathématiques et les sciences physiques

La différenciation des disciplines scolaires scientifiques est le résultat d'un long processus historique de développement des connaissances et de leur structuration en disciplines distinctes. Jusqu'au XVII^{ème} siècle, la différence entre les sciences et l'étude des phénomènes naturels était généralement désignée par le terme "*Philosophia Naturalis*", signifiant "*La*

Philosophie Naturelle". En particulier, l'affirmation des mathématiques et des sciences physiques en tant que matières indépendantes et autonomes n'a pas été le résultat d'un événement précis mais l'aboutissement d'un processus évolutif marqué par des étapes clés.

- **Antiquité :** les mathématiques servaient d'outil au service de la philosophie et des sciences naturelles. Par exemple, les théories géométriques et algébriques Euclide (325-265 av. J.-C.) et Pythagore (580-495 av. J.-C.) étaient liées à des concepts physiques et métaphysiques (Heath, 1981; Kirk et al., 1983).
- **Moyen Âge :** au cours de cette période, les mathématiques ont continué d'être associées à la philosophie et à l'astronomie, tout en s'intégrant dans les études des arts libéraux, notamment la logique et la grammaire (Grant, 1996).
- **Renaissance :** grâce aux travaux de Galilée (1564-1642) et de Kepler (1571-1630), les mathématiques ont commencé à être appliquées de manière plus explicite aux sciences physiques (Drake, 1978).
- **XVII^{ème} siècle** : le développement du calcul différentiel et intégral par les savants tels que Isaac Newton (1643-1727) a montré que les mathématiques peuvent être utilisées pour décrire des phénomènes naturels de manière systématique et rigoureuse. Dans son ouvrage "*Philosophiae naturalis principia mathematica*" publié en 1687 et paru en 1833, Newton a souligné l'importance des avancées mathématiques pour la formulation des lois de la physique (Newton, 1833).
- **XVIII^{ème} siècle :** les travaux d'Euler (1707-1783) et de Lagrange (1766–1769) ont contribué à formaliser les mathématiques en tant que discipline autonome. Le calcul et la mécanique analytique sont devenus des domaines d'étude reconnus, même si les mathématiques étaient encore souvent perçues comme subordonnées aux sciences physiques (Truesdell & Euler, 1960).

Le développement de théories telles que l'algèbre abstraite, la géométrie non euclidienne et la théorie des ensembles a distingué les mathématiques des autres sciences, en les établissant comme une discipline autonome.

- **XIX^{ème} siècle** : cette période a été marquée par la professionnalisation de l'enseignement des sciences et des mathématiques, avec l'émergence d'une structuration plus formelle de ces disciplines dans les écoles et universités (Chappey, 2020).
- **XX^{ème} siècle** : les mathématiques modernes et les sciences physiques ont été définies comme deux disciplines distinctes chacune avec ses propres structures et méthodes (Archibald et al., 2005; C. Williams et al., 2003; C. A. Williams & Zumbansen, 2011).

Tout au long de l'évolution historique des mathématiques et des sciences physiques, l'interaction entre ces deux domaines a été à la fois étroite et complexe. L'impact réciproque de leur évolution a conduit chaque discipline à explorer de nouveaux horizons. Les mathématiques ont fourni les outils analytiques nécessaires pour développer et tester les théories physiques, tandis que les découvertes en physique ont inspiré de nouveaux défis et concepts mathématiques. Cette relation symbiotique se manifeste encore dans l'émergence de nouveaux domaines, tels que la physique des particules, où des méthodes mathématiques sophistiquées sont employées pour explorer les mystères de l'univers.

I.2. Sciences physiques et Mathématiques en tant que disciplines scolaires

Dans le domaine de l'éducation, les sciences physiques et les mathématiques sont considérées comme deux disciplines distinctes, chacune ayant ses propres méthodes et caractéristiques spécifiques (Pincock, 2007). L'histoire de l'enseignement et de l'apprentissage de ces deux domaines révèle généralement une différence dans les objectifs pédagogiques (E. F. Redish, 2005). Cependant, comme mentionné précédemment, les mathématiques et la physique sont des domaines profondément imbriqués tout le long de l'histoire des sciences (Başkan et al., 2010).

La relation entre les mathématiques et les sciences physiques est loin d'être négligeable, car ces deux disciplines sont fortement interconnectées dans le cadre de l'éducation scientifique. Elles partagent de nombreuses notions, connaissances et compétences communes (TaúkÕn et al., 2005; Temel & Durmus, 2007; Wallance & Ellerton, 2004).

Cette dichotomie dans le savoir à enseigner influence les apprenants. Ainsi, (Tinker & Thomson, 2003) ont montré qu'en Angleterre les sciences physiques et les mathématiques

sont perçus par les apprenants de 16 à 19 ans comme deux cours d'apprentissage différents et sans lien entre eux. La distinction entre ces deux contenus d'apprentissage suggère des variations substantielles dans les objectifs éducatifs et dans les perceptions de l'enseignement des sciences physiques et des mathématiques (Chen & Mu, 2010).

Les sciences physiques, qui incluent la physique et la chimie, mettent l'accent sur la compréhension des phénomènes naturels et des méthodes expérimentales, favorisant ainsi la curiosité et la pensée critique à travers l'observation et l'expérimentation. En revanche, les mathématiques se concentrent sur l'abstraction et le raisonnement logique, visant à développer des compétences en résolution de problèmes et en raisonnement quantitatif (Pal & Rinki, 2022). Ces différences influencent les approches pédagogiques : l'enseignement des sciences physiques est souvent perçu comme plus concret et applicable tandis que l'enseignement des mathématiques est vu comme plus abstrait.

De ce fait, les enseignants des sciences physiques sont généralement perçus comme des facilitateurs de découverte, guidant les apprenants à travers des explorations pratiques, tandis que les enseignants de mathématiques agissent comme des mentors aidant à maîtriser un langage symbolique complexe (Başkan et al., 2010; Chen & Mu, 2010). Sur la base de ces constatations :

> *Cette dichotomie apparente des deux disciplines scolaires sciences physique et mathématiques laisse penser que l'interaction mathématique et sciences physiques prouvée tout le long de l'histoire des sciences n'est pas prise en considération dans le savoir à enseigner.*

Pour répondre à cette question, il nous a semblé indispensable, dans un premier temps, de s'interroger sur les propriétés intrinsèques de chacune des deux disciplines scolaires : définitions, nature, caractéristiques, etc. Cela nous permettra de déduire les points communs et les différences. Toutefois, définir les sciences physiques et les mathématiques n'est pas une tâche aisée, car il n'existe pas un point de vue unique dans la littérature scientifique sur la question "*Qu'est-ce que les sciences physiques ?*" et "*Qu'est-ce que les mathématiques ?*".

I.2.1. Qu'est-ce que les sciences physiques ?

Cette question n'est pas aussi simple et évidente qu'elle pourrait le sembler. En fait, il ne s'agit pas du domaine de la physique en tant que sciences mais plutôt de la physique en tant que discipline à enseigner et à prendre, ce qui implique plusieurs paramètres à apprendre en considération. Pour éviter de s'enliser dans les vastes définitions de la littérature scientifique, nous avons adopté la définition suivante pour encadrer ce travail :

> "*Les sciences physiques sont les sciences des processus naturels qui sont accessibles à l'exploration expérimentale, à la saisie par la mesure et à la représentation mathématique et qui sont soumises à des lois généralement valables*."
>
> (Krey, 2019)

Cette définition stipule que les sciences physiques représentent un domaine qui cherche à comprendre, à modéliser et à expliquer les phénomènes et les processus naturels de l'univers (Gustafsson et al., 2015). Elle précise également que les mesures expérimentales constituent une partie intégrante qui rend les sciences physiques essentielles dans le domaine de l'éducation et de la formation scientifique (Kabil, 2015). Cette caractéristique fondamentale à savoir le caractère expérimental des sciences physiques repose sur l'exigence que les processus naturels étudiés soient accessibles à une représentation mathématique. Cela vise à montrer que les lois physiques traduisent mathématiquement les phénomènes et les processus naturels (Kugler & Turvey, 2015).

(Hacking, 1996) insiste sur la complexité liée aux observations objectives des phénomènes naturels, aux processus qui leurs sont associés et à leurs implications théoriques en matière d'enseignement et d'apprentissage. En effet, ce chercheur précise que l'un des défis majeurs de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences physiques réside dans la difficulté d'interpréter les observations naturelles. Ce constat est corroboré par (Krey, 2012, 2019) qui souligne que les sciences physiques ne doivent pas être perçues uniquement comme un ensemble de connaissances statiques mais également comme un domaine dynamique et évolutif.

L'enseignement des sciences physiques doit donc surmonter divers obstacles liés à l'interprétation des phénomènes afin de clarifier la nature complexe de cette discipline.

(Anchordoqui et al., 2022) soulignent qu'il est crucial de formuler une définition des sciences physiques qui intègre cette complexité, tout en tenant compte de sa nature en tant que discipline scolaire. L'usage des mathématiques dans cette discipline constitue également une difficulté majeure à surmonter.

Même si les mathématiques jouent un rôle essentiel dans la modélisation et la compréhension des phénomènes naturels, leur complexité peut constituer des obstacles importants pour l'enseignement et l'apprentissage de la discipline. Comme le souligne (E. F. Redish, 2005), enseigner les sciences physiques ne se limite pas à l'application des équations et de formules mathématiques, mais implique l'intégration des concepts mathématiques pour enseigner ces sciences. En effet, l'enseignement doit être conçu de manière à combiner l'observation, l'expérimentation et la mathématisation.

Sur la base de ces constatations, nous avons formulé une définition simple des sciences physiques :

> *"Les sciences physiques sont une discipline qui étudie les phénomènes naturels à travers l'observation, l'expérimentation et l'utilisation des mathématiques".*

Cette définition met en évidence l'importance des mathématiques comme outil fondamental pour modéliser et appréhender les sciences physiques. Dans ce contexte, il est crucial de se pencher sur la question "*Qu'est-ce que les mathématiques ?*".

I.2.2. Qu'est-ce que les mathématiques ?

Comme il a déjà été mentionné, la présente recherche se focalise sur l'interaction entre les sciences physiques et les mathématiques d'où l'importance de la question suivante : *"Qu'est-ce que les mathématiques ?"* En répondant à cette question, nous visons à délimiter la définition appropriée à ce travail.

Selon le dictionnaire (*Oxford Languages*, 2024), les mathématiques sont définies comme suit :

"La science de la structure, de l'ordre, et de la relation qui a évolué à partir de pratiques élémentaires de comptage, de mesure et de description des formes des objets. Elle traite de l'étude logique des relations quantitatives et de l'utilisation de ces relations pour résoudre des problèmes dans divers domaines."

(*Oxford Languages*, 2024)

D'après cette définition, les mathématiques mettent l'accent sur leur rôle fondamental dans l'organisation et la compréhension des relations quantitatives. Elles ont décrit les mathématiques comme une science centrée sur la structure et l'ordre ayant évolué à partir des pratiques simples telles que le comptage et la mesure des formes. En fait, cette définition met en lumière la dimension logique des mathématiques, soulignant leur capacité à modéliser et à résoudre des problèmes complexes à travers une approche systématique des relations quantitatives. Dans cette perspective, les mathématiques sont perçues comme un outil essentiel pour la description et l'analyse des phénomènes du monde réel.

Dans le même sens, les mathématiques se définissent selon (Atiyah, 1988) :

"*Les mathématiques sont beaucoup trop vastes et complexes pour être couvertes de manière adéquate d'un seul point de vue. Elles ont beaucoup d'angles, beaucoup d'échelles, beaucoup de philosophies, un peu à la manière d'une mappemonde moderne construite à l'aide de nombreuses pages avec différentes parties du globe et différents types d'informations [. . .]*"

(Atiyah, 1988)

Cette définition de (Atiyah, 1988) stipule que les mathématiques exigent une approche multimodale, car elles dévoilent une diversité d'angles, d'échelles et de philosophie. Chaque aspect apporte son lot d'informations distinctes, et donc elles ne peuvent pas être décrites de manière adéquate en adoptant un seul point de vue.

Alors, la question : "*Qu'est-ce que les mathématiques ?*" amène à un éventail de questionnements. Comme ce travail s'articulent autour des aspects liés à l'enseignement des sciences physiques, cette question peut être reformulée ainsi :

> *"Le savoir mathématique est-il comparable au savoir physique, dans la mesure où les deux contribuent à développer une réflexion rigoureuse sur les phénomènes naturels ?"*

La nature des connaissances en sciences physiques et en mathématiques présente des différences notables. Les sciences physiques, basées sur l'observation, l'expérimentation et la modélisation, produisent des théories susceptibles d'être révisées avec de nouvelles découvertes ou méthodes. Ainsi, leur savoir est considéré comme provisoire. En revanche, les mathématiques reposent sur des axiomes et des preuves logiques, offrant des résultats perçus comme plus certains et stables. Ces deux domaines sont complémentaires : les mathématiques fournissent des outils pour affiner les théories scientifiques, renforçant ainsi la précision des modèles.

Par ailleurs, l'application des mathématiques dans les sciences physiques met en évidence la nature dynamique de l'exploration scientifique (Kabil, 2015). Les physiciens traduisent les structures physiques en modèles mathématiques, interprètent les résultats et évaluent leur cohérence avec le système physique choisi. Même si cette traduction peut être difficile, elle détient la clé pour favoriser une compréhension des concepts, des notions ou des théories physiques (Krey, 2012, 2019), ainsi que de la modélisation et la résolution de problèmes physiques (Pincock, 2007).

II. Interaction entre les mathématiques et les sciences physiques

II.1. Définition de la mathématisation des sciences physiques

Comme il a déjà été précisé, les mathématiques sont omniprésentes en sciences physiques. Elles se manifestent comme un langage et un outil de raisonnement indissociable d'une logique(Castiblanco Abril & Vizcaino Arevalo, 2024; Docktor et al., 2016; Docktor & Mestre, 2014; Paty, 2007). Cependant, il convient de noter que la gestion simultanée des deux champs disciplinaires (mathématiques et physique) n'est pas aisée car les physiciens ont tendance à confondre les concepts de la physique avec le symbolisme mathématique, ce qui peut affecter profondément l'interprétation des phénomènes physiques.

En effet, des didacticiens de la physique ont montré que dans un cours d'introduction à la physique basé sur l'algèbre, il existe un *"fossé"* entre ce que les apprenant pensent devoir faire et ce qui est réellement attendu d'eux (E. F. Redish, 2005). (E. F. Redish, 2005) a également précisé que même les apprenants très performants en mathématiques dans les classes correspondants à la discipline peuvent se montrer d'un niveau faible en mathématiques dans les cours de physique. En fait, le langage mathématique utilisé en physique n'est pas le même que celui utilisé dans l'étude des mathématiques pures, et il existe de multiples différences. De ce fait, il semble que, même si les chercheurs sont unanimes sur l'importance des mathématiques dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques, ils divergent sur la manière dont elles doivent être utilisées dans cette discipline. D'où la question :

Comment peut-on utiliser les mathématiques efficacement dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques ?



L'usage obligatoire des mathématiques en sciences physiques et le questionnement qu'il engendre ont conduit à l'émergence du concept de mathématisation. Selon les dictionnaires et dans le langage courant, ce terme désigne le fait d'introduire des principes et des méthodes propres aux mathématiques dans un domaine de connaissance qui ne leur relevait pas auparavant, comme par exemple : l'ingénierie, l'économie, la biologie, et même les sciences sociales.

Enfin, ce terme qui n'est pas spécifiquement défini dans la littérature scientifique, désigne généralement l'application des mathématiques pour décrire et comprendre les phénomènes.

II.2. Mathématisation en didactique des sciences physiques

Dans le contexte éducatif, et plus spécifiquement en didactique de la physique, le concept de la mathématisation se réfère à la manière dont les concepts physiques sont traduits en termes mathématiques dans le cadre de l'enseignement et de l'apprentissage. Autrement dit, pour analyser, comprendre, et/ou résoudre des phénomènes naturels, on modélise ces phénomènes physiques en utilisant les outils et le langage des mathématiques.

La mathématisation en sciences physiques présente plusieurs avantages : Elle permet de découvrir des relations sous-jacentes qui ne sont pas immédiatement évidentes à partir des observations seules. En effet, la traduction des phénomènes complexes en termes mathématiques permet de simplifier et de clarifier les problèmes, de faire des prévisions et de tester des hypothèses de manière plus rigoureuse.

Dans le contexte de l'enseignement et l'apprentissage, le processus de mathématisation débute par l'observation de phénomènes physiques et la formulation de questions ou d'hypothèses. La seconde étape est celle de modélisation, qui consiste à construire des modèles mathématiques pour représenter ces phénomènes. La phase qui suit la modélisation est celle de la résolution et de l'analyse, où les apprenants résolvent les équations mathématiques issues des modèles et interprètent les résultats en termes de concepts physiques. Selon leur niveau académique, les apprenants utilisent diverses manipulations mathématiques, telles que le calcul différentiel et intégral, les statistiques ou l'algèbre linéaire. Enfin, pour vérifier la précision, les modèles mathématiques sont validés par des expériences et/ou des observations. Ce processus de mathématisation permet de générer des modèles pour prédire et/ou expliquer des phénomènes physiques, renforçant ainsi leur compréhension des concepts étudiés.

Selon (Castiblanco Abril & Vizcaino Arevalo, 2024), en plus de clarifier des phénomènes complexes, la mathématisation aide à développer la pensée critique, ce qui permet d'analyser les phénomènes et de proposer des explications rigoureuses.

Enfin, le processus de mathématisation présente de nombreux avantages. Cependant, il est important de noter qu'il ne s'agit pas d'un processus facile d'application, mais d'un processus présentant plusieurs défis, ce que nous allons explorer dans la section suivante.

II.3. Complexité de la mathématisation des sciences physiques

La complexité de la mathématisation des sciences physiques se manifeste dans l'interaction entre ces deux disciplines. En effet, la mathématisation des sciences physiques s'avère très complexe pour plusieurs raisons :

II.3.1. Interrelation profonde entre la physique et les mathématiques

En sciences physiques, il est souvent difficile de distinguer les connaissances physiques des connaissances mathématiques, car la compréhension des concepts physiques requiert une interprétation mathématique précise. Cela implique que les concepts physiques et les structures mathématiques sont indissociables pour formuler des modèles physiques-mathématiques (Blomhoj, 2003; Carrejo & Marshall, 2007). De ce fait, la mathématisation en sciences physiques ne se limite pas uniquement à l'utilisation des représentations mathématiques, mais elle exige une intégration profonde et une réciprocité dans l'interprétation des concepts physiques à travers des cadres mathématiques.

II.3.2. Différents niveaux et phases de mathématisation

Les études montrent qu'il existe plusieurs niveaux et phases de mathématisation dans la compréhension des concepts physiques. Par exemple, les mathématiques peuvent être utilisées pour relier des objets et phénomènes physiques du monde réel à des structures abstraites idéalisées (Pal & Rinki, 2022). Cela se fait dans les deux sens : on peut partir :

- D'une situation physique pour aller vers les mathématiques (Jensen et al., 2017) ;
- Des mathématiques pour interpréter un phénomène physique (Pospiech, 2019).

II.3.3. Rôle épistémologique des mathématiques en physique

La mathématisation en physique ne se limite pas à l'utilisation d'outils mathématiques, mais englobe également la formation des connaissances en physique, guidée par des structures mathématiques. Les perceptions épistémiques des apprenants influencent leur manière d'aborder les problèmes de physique, notamment en termes de stratégies de résolution de problèmes (Blomhoj, 2003; Gustafsson et al., 2015; Pal & Rinki, 2022).

II.3.4. Différences de traitement entre les disciplines

Les travaux de (A. D. Redish, 2016) stipulent que la mathématisation en sciences physiques diffère de celle en mathématiques pures. En sciences physiques, les mathématiques sont utilisées principalement pour modéliser, interpréter et prédire des phénomènes naturels à partir d'observations et d'expériences, tandis que les mathématiques pures se concentrent sur l'exploration de concepts abstraits. Cette abstraction augmente la complexité de la mathématisation des sciences physiques. (Pospiech, 2019) corroborent ce constat en précisant que les mathématiques pures et les mathématiques appliquées à la physique divergent considérablement, rendant difficile l'application des compétences mathématiques à la physique de manière directe. Cette divergence explique pourquoi les compétences mathématiques des apprenants ne se traduisent pas toujours en succès dans les cours de physique. Dans ce sens, (Galili, 2018) souligne que la capacité à appliquer les mathématiques dans les sciences physiques nécessite la maîtrise des deux disciplines car chacune des disciplines aborde les concepts de manière différente.

II.3.5. Stratégies pédagogiques variées

Les enseignants peuvent aborder la relation entre physique et mathématiques de diverses manières, que ce soit en présentant d'abord les concepts physiques ou en introduisant directement les formulations mathématiques. Cela peut ajouter à la complexité, car chaque approche influence la manière dont les apprenants appréhendent et intègrent les deux disciplines (Ceuppens et al., 2019; De Cock, 2012).

II.3.6. Symboles mathématiques et le sens physique

(Kabil, 2015) souligne que les symboles mathématiques utilisés en physique ne sont pas arbitraires ; ils portent des significations spécifiques et doivent être interprétés dans leur contexte physique. En effet, l'interprétation des mathématiques dans un cadre physique nécessite une compréhension simultanée des significations mathématiques et physiques (Hu et al., 2019).

En résumé, la complexité de la mathématisation des sciences physiques réside dans l'interdépendance étroite entre les connaissances mathématiques et physiques, les défis épistémologiques associés, et les différences de méthodologie qui peuvent varier selon les stratégies pédagogiques adoptées. Plus particulièrement, les représentations mathématiques engendrent des difficultés de compréhension des sciences physiques et renforcent la complexité de l'interaction Maths-Physiques. Pour cela, il semble crucial de décrire et de maîtriser les diverses représentations mathématiques couramment utilisées en sciences physiques. C'est ce que nous explorerons dans la section suivante.

III. Représentations

Dans cette section, nous nous focaliserons sur les représentations utilisées en sciences physiques, la manière dont elles sont employées pour représenter les concepts physiques, les difficultés qu'elles induisent et leur impact sur l'apprentissage et l'application en sciences physiques.

III.1. Définition des représentations

D'une manière générale, les représentations jouent un rôle central dans l'enseignement/Apprentissage des sciences physiques, elles établissent un pont entre les concepts abstraits et les phénomènes concrets observés de l'univers (Adu-Gyamfi et al., 2012; Bakir et al., 2016; Ibrahim & Rebello, 2013). La littérature scientifique regorge de définitions décrivant les représentations, nous retenons celle de *L'Encyclopédie de l'Éducation Scientifique* : représentations comme :

"Des notions ou des signes ou des symboles qui représentent quelque chose en l'absence de cette chose, chose qui peut être un phénomène ou un objet dans le monde extérieur ou simplement dans notre imagination."

(Dolin & Evans, 2018)

Cette définition met en évidence une distinction entre le monde extérieur (visible) et notre imagination (pensée interne), ce qui induit deux types de représentations :

- **Représentations internes :** sont des images mentales ou des modèles cognitifs que nous formons dans notre esprit à partir de notre univers. Elles sont construites par notre cerveau pour donner un sens personnel au monde extérieur. Les représentations internes sont subjectives et varient d'un individu à l'autre, car elles dépendent de notre expérience, de nos connaissances antérieures et de notre façon unique de percevoir le monde (Geyer & Kuske-Janßen, 2019).
- **Représentations Externes :** se réfèrent aux objets, aux symboles, et aux modèles tangibles qui existent dans le monde physique. Ces représentations sont essentielles pour communiquer des idées complexes de manière accessible et compréhensible. Par exemple, des diagrammes, des graphiques, ou des formules mathématiques constituent des représentations externes de concepts abstraits. Elles permettent de matérialiser des idées, ce qui facilite leur partage et leur compréhension. Selon (Gilbert & Justi, 2016), les représentations externes jouent un rôle crucial car elles sont directement observables et manipulables, offrant ainsi un support visuel pour le raisonnement et l'apprentissage.

Dans ce travail, l'intérêt est porté principalement sur les représentations mathématiques qui sont des représentations externes.

III.2. Triangle de Peirce, (1960) : Une théorie pour comprendre les représentations en sciences

Les acteurs de l'éducation sont unanimes sur le fait que les observations faites au niveau macro des interactions pédagogiques constituent une base essentielle pour une compréhension plus approfondie des processus d'apprentissage individuels. Comme il a déjà été dit, les représentations sont fondamentales dans l'enseignement des sciences. En sciences physiques, plus particulièrement, les représentations externes notamment les représentations mathématiques sont incontournables, ce qui fait de leur étude une étape fondamentale dans les actions d'amélioration de l'enseignement apprentissage de la discipline. En effet, il est crucial de comprendre comment les enseignants introduisent et utilisent ces représentations, et comment les apprenants manipulent leurs différentes formes.

Les études des représentations externes en sciences physiques se sont inspirées des travaux de Charles Sanders Peirce (1839-1914). Ce philosophe qui est l'un des fondateurs du pragmatisme a produit une qu'on retrouve dans toutes les théories modernes sur la connaissance. En effet, Peirce (1960), stipule que chaque représentation externe est constituée d'un signe qui se réfère à un objet et produit une interprétation, ou interprétant.

La *Figure 1* illustre la triade de Peirce (1960), telles qu'elles sont définies par (Geyer & Kuske-Janßen, 2019).

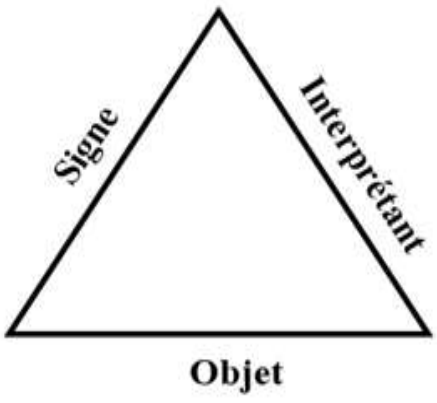


Figure 1 : Triade de Peirce, (1960) : " Relation entre Signe, Objet et Interprétant" selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019).

Ces trois éléments sont : *l'objet, le signe et l'interprétant*. Chaque élément est positionné dans une relation dynamique avec les autres, formant une triade :

- **Signe :** C'est la représentation ou l'expression matérielle (par exemple, un mot, une image, un symbole) qui mobilise une information.
- **Objet :** C'est la réalité ou le phénomène auquel le signe fait référence. Il peut être un objet tangible ou un concept abstrait. L'*objet* est donc ce que le signe cherche à représenter ou à signifier.
- **Interprétant :** C'est l'interprétation qui émerge dans l'esprit de celui qui perçoit le signe. C'est la signification attribuée au signe dans un contexte particulier.

En se basant les travaux de Peirce, les penseurs disent que chaque signe externe (quelque chose, son ou objet) est relié à un objet externe et à un interprétant interne : « Un signe s'adresse à quelqu'un, c'est-à-dire qu'il crée dans l'esprit de cette personne un signe équivalent ou, peut-être, un signe plus développé. Le signe créé est dit l'interprétant du premier signe. L'interprétant dépend toujours de la personne qui intercepte le signe et de ses connaissances individuelles.

Enfin, cette triade s'est avérée cruciale dans l'éducation car elle facilite l'assimilation de notions complexes en les reliant à des objets concrets ou à des concepts plus accessibles.

III.3. Représentations selon Bruner (1974)

Une autre théorie va dans le même sens que le triangle de Peirce ; il s'agit de la théorie de Bruner (1974) qui propose une classification des représentations externes. En effet, (Bruner, 1974) propose une perspective développementale des représentations externes, il distingue trois types qui apparaissent à différentes étapes du développement de l'être humain (*Figure 2*) :

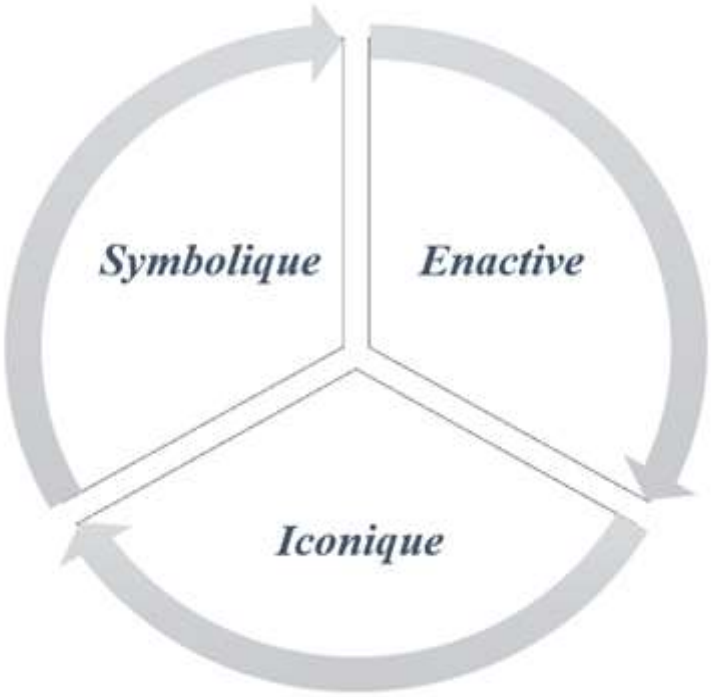


Figure 2 : Les classifications des représentations selon Bruner (1974).

- **Représentation Enactive (Enactive)** : Ce mode de représentation se base sur l'action physique et les sensations. Dans ce contexte, les interactions directes avec les objets constituent le fondement de la représentation enactive.

- **Représentation Iconique (Iconic)** : Ce mode de représentation se manifeste par des images mentales ou des représentations visuelles, telles que les photos ou les dessins, qui sont moins abstraites que les mots. Il représente une étape intermédiaire qui relie l'expérience concrète à une compréhension plus abstraite. Cela renforce le lien entre les différentes idées tout en conservant le sens original.

- **Représentation Symbolique (Symbolic)** : Ce mode de représentation apparaît généralement plus tard dans le développement cognitif et se caractérise par l'utilisation de symboles et de langages abstraits, comme les manipulations mathématiques, pour représenter des idées complexes. À ce stade, les individus peuvent manipuler des concepts de manière abstraite sans avoir besoin de s'appuyer sur des représentations visuelles ou des actions physiques directes.

Dans les leçons de physique, les trois catégories des représentations, enactive, iconique et symbolique, occupent une place essentielle. En effet, la réalisation d'expériences permet aux apprenants de créer des représentations enactives. Le fait de dessiner un croquis implique des représentations iconiques et l'utilisation des mathématiques (*Formules, Équations…*), fait référence aux représentations symboliques.

Dans la plupart des leçons de physique, on retrouve les trois types de représentations. Examinons le cas du pendule :

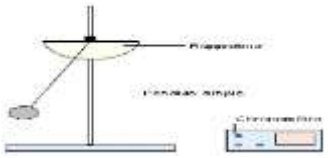
Ainsi, par exemple le pendule :

Définition

> *"Un pendule simple est un système physique classique constitué d'une masse suspendue à un fil ou une tige fixe qui oscille sous l'influence de la gravité. Il est souvent utilisé pour illustrer des concepts de base en mécanique."*
>
> (*Pendule Simple*, 2018)

Les représentations mises en évidence dans cet exemple sont illustrées dans le *Tableau 1* :

Tableau 1 : Exemple des représentations selon Bruner (1974).

Représentation enactive	***Expérience pratique :*** Au laboratoire, les apprenants manipulent un pendule simple pour observer directement son mouvement.  En ajustant la longueur du fil ou en modifiant la masse, ils peuvent voir comment ces changements affectent la période de l'oscillation. Cette manipulation physique avec le pendule consiste en une représentation enactive du phénomène.
Représentation iconique	***Croquis :*** Les apprenants dessinent des schémas du pendule montrant la position de la masse à différents moments de son oscillation.  Un croquis peut inclure des vecteurs représentant les forces, telles que la tension du fil et la force de gravité. Ces dessins aident à visualiser et comprendre les relations du système.
Représentation symbolique	***Équations mathématiques :*** Le mouvement du pendule peut être décrit par l'équation $$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$ où T est la période de l'oscillation, L est la longueur du fil, et g est l'accélération due à la gravité. Les apprenants utilisent cette équation pour calculer la période théorique du pendule et la comparent avec les mesures expérimentales. Les symboles dans l'équation sont des concepts abstraits qui décrivent le comportement du pendule.

Le pendule simple illustre comment les différentes représentations : enactive, iconique et symbolique sont reliées et peuvent être utilisées pour faciliter une compréhension approfondie des concepts, notions, et théories physiques.

Ces représentations sont fondamentales pour la compréhension des concepts et notions relatives au (*Pendule Simple*, 2018) :

- **Représentations enactives :** en manipulant physiquement le pendule, les apprenants développent une compréhension intuitive des concepts de force et de mouvement.

- **Représentations iconiques :** les croquis aident à renforcer la compréhension visuelle des concepts et à établir des liens entre les phénomènes et les théories observées.

- **Représentations symboliques** *:* L'utilisation des équations permet aux apprenants de quantifier leurs observations et de prédire le comportement du système dans différentes conditions, illustrant ainsi l'aspect abstrait et symbolique des mathématiques en sciences physiques.

Enfin, par la combinaison de ces représentations, les enseignants et les apprenants développent une pratique pédagogique et didactique plus riche et plus complète des phénomènes physiques (Berger & Hänze, 2009; Docktor et al., 2016; Docktor & Mestre, 2014; Leone, 2014; Sherin, 2001).

IV. Représentations en sciences physiques

Dans la suite de ce document, nous allons nous focaliser sur les représentations en sciences physiques. En se basant sur la triade de Peirce (1960) et la catégorisation de Bruner (1974). (Geyer & Kuske-Janßen, 2019) proposent une classification claire et précise des représentations utilisées dans les cours de sciences physiques permettant d'aborder de manière approfondie leur rôle dans la modélisation, la description et la compréhension des phénomènes physiques.

IV.1. Classification des représentations dans les cours des sciences physiques

Les cours de sciences physiques intègrent généralement des représentations variées pour la description, la compréhension et la modélisation des phénomènes physiques. Par conséquent, la classification des représentations dans les cours des sciences physiques nous permet non seulement de distinguer les diverses formes de représentations, mais également d'évaluer leurs avantages et leurs limites en fonction de l'objectif pédagogique et du niveau de maturité cognitive des apprenants.

En effet, les représentations sont de quatre types ; Selon (Geyer & Kuske-Janßen, 2019) :

- Représentations objectives ;
- Représentations picturales (images, schémas) ;
- Représentations verbales ;
- Représentations mathématiques.

Pour mieux comprendre l'importance des représentations mathématiques dans les cours des sciences physiques, nous allons étudier chacune de ces catégories séparément.

IV.1.1. Représentations objectives

Cette catégorie se rapporte aux représentations enactives selon (Bruner, 1974), décrites dans la section III. Elle inclut des représentations d'objets ou de concepts physiques qui existent sous forme d'objets. Ces objets peuvent être vus, touchés ou déplacés (Geyer & Kuske-Janßen, 2019).

Par exemple :

> *"Dans un cours de sciences physiques, les enseignants peuvent utiliser un modèle en mouvement du système solaire pour montrer comment les planètes tournent autour du soleil. Ce modèle est un outil didactique qui rend visible un concept physique (la rotation des planètes) difficile à appréhender sans visualisation."*

Selon (Geyer & Kuske-Janßen, 2019), ce type de représentations comporte deux sous-catégories :

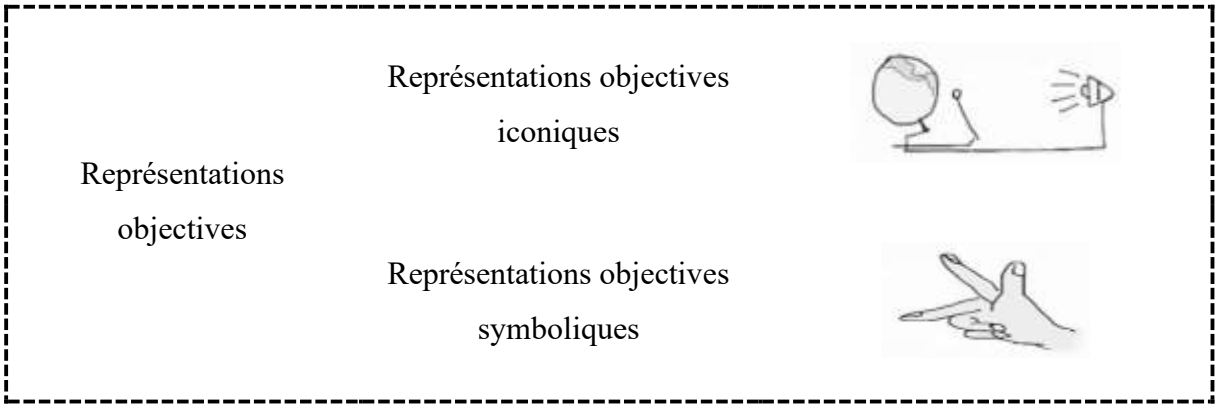


Figure 3 : Représentations objectives selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019).

- **Représentations objectives iconiques :** sont des modèles physiques qui associent directement à ce qu'ils représentent.

  Par exemple :

  "Un modèle réduit d'un moteur à combustion interne utilisé dans une voiture. Ce modèle montre exactement où se trouvent les pistons, comment ils se déplacent, et comment l'énergie est générée, ce qui permet aux étudiants de comprendre le fonctionnement d'un moteur en voyant une version tangible (Figure 3)."

- **Représentations objectives symboliques :** nécessitent une compréhension préalable de certains symboles ou conventions pour être comprises.

  Par exemple :

  "Un enseignant peut utiliser un modèle physique pour montrer les trois axes d'un système de coordonnées tridimensionnel (x, y, z). Pour mieux visualiser cela, l'enseignant peut également utiliser ses doigts pour représenter chaque axe (un doigt pour x, un autre pour y, et un troisième pour z). Sans comprendre le système de coordonnées, ce modèle n'aurait pas de sens (Figure 3)."

IV.1.2. Représentations picturales

Les représentations picturales servent à illustrer ou simplifier des idées complexes (Geyer & Kuske-Janßen, 2019). Elles consistent en des représentations visuelles d'objets, d'expériences ou de concepts physiques qui peuvent prendre diverses formes, telles que des photographies, des dessins ou des croquis. (Geyer & Kuske-Janßen, 2019), ce type de représentations se décline en deux sous-catégories :

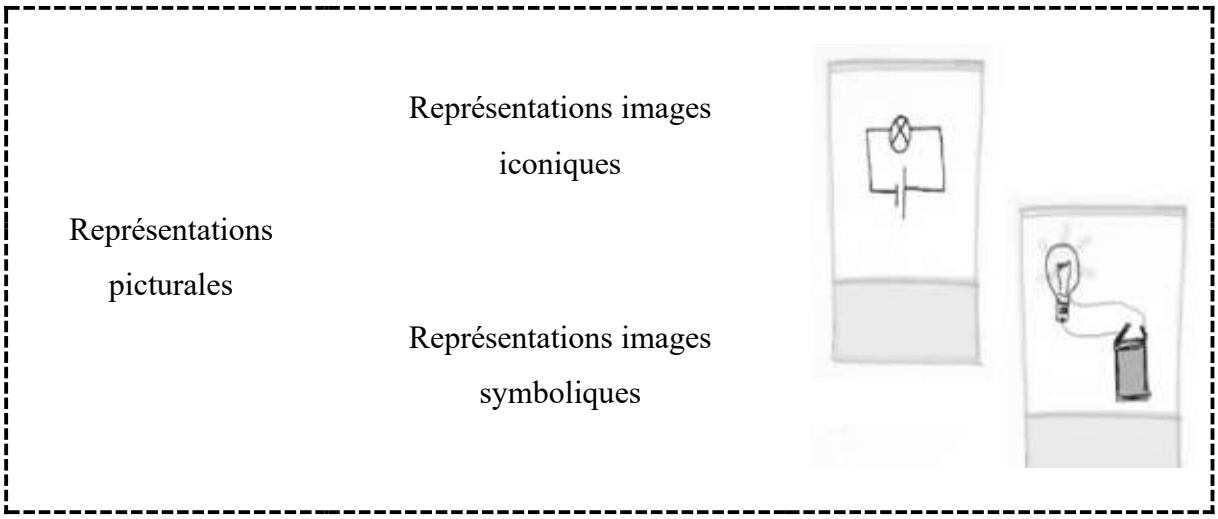


Figure 4 : Représentations picturales selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019).

- **Les images iconiques :** sont des représentations visuelles qui ressemblent directement à l'objet ou au concept qu'elles représentent.

  Par exemple :

  " Une photographie d'un circuit électrique en fonctionnement est une image iconique. Elle montre exactement comment les composants, comme la lampe et la pile, sont connectés dans une expérience pratique de circuit. Cette ressemblance directe aide les apprenants à faire le lien entre l'image et le concept physique. (Figure 4)".

Cette ressemblance directe aide les apprenants à faire le lien entre l'image et le concept physique.

- **Les images symboliques :** Les images symboliques sont des représentations dans lesquelles l'objet ou le concept n'est pas directement visible ou identifiable sans une compréhension préalable des symboles employés.

  Par exemple :

  "Le circuit électrique pourrait être représenté par un schéma où une ligne droite représente les fils, un cercle avec une croix représente l'ampoule, et un symbole pour la pile indique la source d'alimentation (Figure 4)."

Le schéma ne montre pas le circuit tel qu'il apparaît dans la réalité, mais il illustre de manière abstraite les éléments essentiels du circuit. Pour interpréter correctement le contenu, les apprenants doivent comprendre la signification de chaque symbole utilisé.

IV.1.3. Représentations verbales

Cette catégorie comprend la langue écrite et parlée. Selon (Geyer & Kuske-Janßen, 2019) trois niveaux sans frontières claires sont distingués :

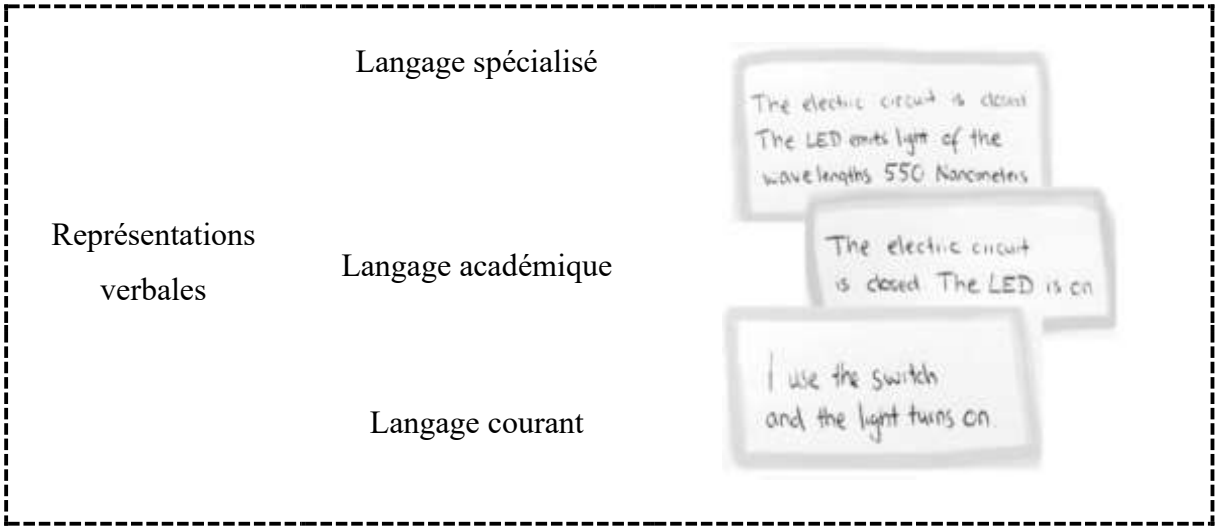


Figure 5 : Représentations verbales selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019).

- **Langage courant :** Il inclut principalement des expressions de la langue parlée et manque souvent de précision.

  Par exemple :

  "J'utilise l'interrupteur. La lumière s'allume (Figure 5)."

  Ce type de langage reflète une compréhension basique et intuitive des phénomènes, souvent utilisée dans des conversations quotidiennes.

- **Langage académique :** Ce niveau comprend principalement des expressions de la langue écrite, avec une grammaire plus complexe et un style impersonnel. Il peut inclure des termes spécialisés.

  Par exemple :

  "Le circuit électrique est fermé. La LED est allumée (Figure 5)."

  Ce type de langage est couramment utilisé dans des contextes éducatifs ou scientifiques pour transmettre des informations avec plus de rigueur et de précision.

- **Langage spécialisé :** Caractérisé par une grande précision, concision, clarté et une forte présence de terminologie spécialisée, ce langage est optimisé pour l'efficacité et la clarté.

  Par exemple :

  "Le circuit électrique est fermé. La LED émet une lumière de longueur d'onde de 550 nanomètres (Figure 5)."

  Ce niveau de langage est typiquement utilisé par des experts pour communiquer de manière précise et sans ambiguïté, souvent dans des documents techniques ou des recherches avancées.

D'autres représentations, comme les formules dans un texte écrit ou les gestes dans un discours, peuvent apparaître au sein de ces trois types de langages. Contrairement à (Prediger & Wessel, 2013), nous considérons cela comme une fusion ou un lien croisé entre différents types de représentations, et non comme faisant partie des catégories verbales.

IV.1.4. Représentations mathématiques

Dans ce travail, le focus est principalement mis sur les représentations mathématiques. Ces dernières peuvent être déclinés en trois catégories

- Représentations numériques ;
- Représentations graphiques ;
- Représentations algébriques.

En sciences physiques, les objets et les phénomènes étudiés sont souvent complexes et abstraits, ce qui nécessite l'utilisation de représentations mathématiques pures pour les comprendre et les décrire de manière précise (Prediger & Wessel, 2013).

Selon (Geyer & Kuske-Janßen, 2019) trois catégories sont distinguées :

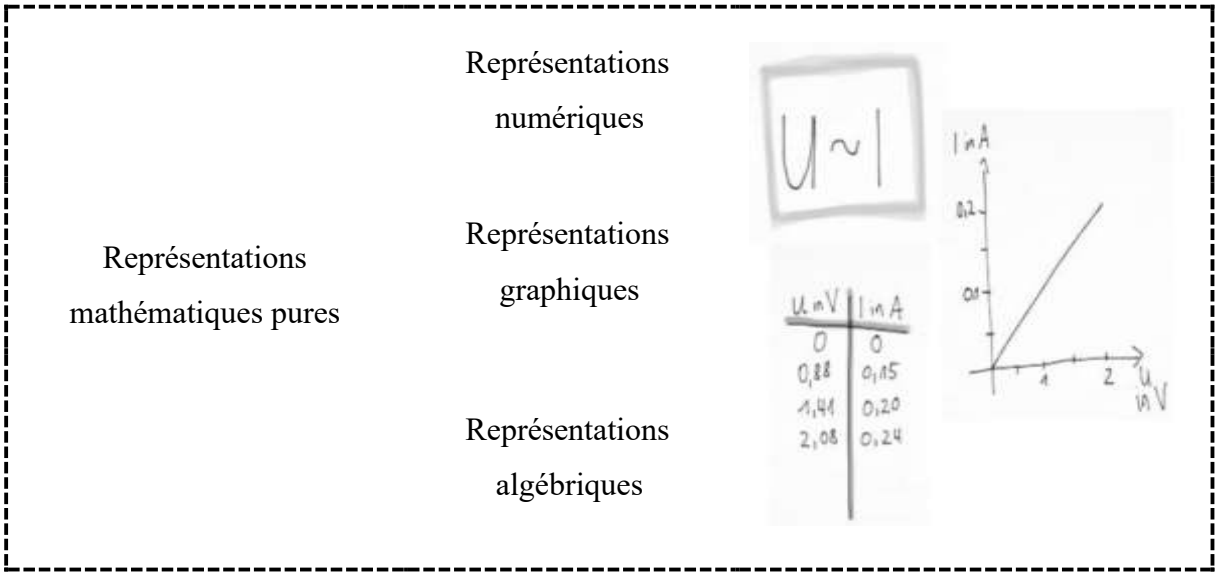


Figure 6 : Représentations mathématiques pures selon Geyer & Kuske-Janßen, (2019).

- **Représentation numérique :** Les données mesurées lors d'une expérience sont organisées sous forme de tableau.

Par exemple :

"Si l'on mesure la tension électrique (U) en fonction de l'intensité du courant (I) dans un circuit, les valeurs obtenues peuvent être disposées dans un tableau (Figure 6)."

Ce type de représentation permet de structurer les informations de manière claire et facilite l'analyse des données, bien que ce soit une abstraction qui ne montre pas directement les variations physiques.

- **Représentation graphique :** Pour mieux comprendre la relation entre la tension électrique et l'intensité du courant, on peut tracer un diagramme.

  Par exemple :

  "On peut représenter un graphique où l'axe des abscisses représente l'intensité du courant (I) et l'axe des ordonnées représente la tension (U) (Figure 6)."

Ce type de représentation visuelle permet de voir comment la tension varie en fonction du courant, souvent révélée par une droite (pour une résistance ohmique), montrant la proportionnalité entre ces deux grandeurs selon la *"loi d'Ohm"*.

- **Représentation algébrique :** Les termes mathématiques, équations et formules sont utilisés pour décrire des phénomènes physiques ou résoudre des problèmes.

  Par exemple :

  "La relation entre la tension (U), l'intensité du courant (I), et la résistance (R) dans un circuit peut être exprimée par la "loi d'Ohm", formulée algébriquement comme $\boldsymbol{U = R \times I}$*. Cette équation permet de résumer les résultats expérimentaux et d'exprimer une relation générale entre ces quantités physiques (Figure 6)."*

Les considérations théoriques que nous avons décrites ci-dessus montrent que les représentations peuvent avoir un impact sur l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques. (Bauer et al., 2015) citent plusieurs études qui semblent faire état de ces effets, notamment les travaux de :

- (Schnotz & Bannert, 2003) ont exploré comment les images et les schémas peuvent compléter les explications verbales ou textuelles. Ils ont montré que les représentations visuelles aident les apprenants à structurer leurs connaissances et à mieux mémoriser les informations.

- (Berger & Hänze, 2009) ont montré que l'utilisation de représentations variées peut améliorer la compréhension des apprenants en rendant les concepts abstraits plus concrets.

- (Waldrip et al., 2010) ont mis en avant que les représentations, lorsqu'elles sont utilisées de manière interactive en classe, favorisent l'engagement des apprenants, ce qui conduit à une meilleure assimilation des concepts.

- (Hammoumi et al., 2020) ont souligné l'importance des représentations adaptées au contexte culturel et éducatif des apprenants. Leur travail indique que l'utilisation de méthodes contextualisées facilite l'apprentissage des sciences.

Dans le même contexte, (Pospiech, 2019) précise ce que les apprenants doivent savoir pour réussir à apprendre en utilisant des représentations. Ils doivent comprendre :

- La forme d'une représentation (par exemple, comment lire un graphique)
- La relation entre la représentation et le domaine (par exemple, ce que signifient les symboles d'une formule dans un contexte physiques donné)
- Comment sélectionner une représentation appropriée (par exemple, quelle représentation peut aider à résoudre un problème spécifique)
- Comment construire une représentation appropriée (par exemple, comment dessiner un graphique ou concevoir un tableau)
- Comment relier les représentations (par exemple, comment relier un graphique à une formule)

Une étude similaire peut être trouvée dans le travail de (diSessa et al., 2004). Il a développé le concept de compétence méta représentative (CMR) pour décrire les niveaux supérieurs de compétence représentative et souligne l'importance d'enseigner explicitement la CMR. Le concept de CMR aide à comprendre comment les étudiants conçoivent de nouvelles représentations, discutent de l'adéquation et de la pertinence des représentations, comprennent les objectifs des représentations.

(Lemke, 2004) souligne l'importance non seulement d'utiliser différentes représentations pour l'enseignement et l'apprentissage, mais aussi d'apprendre aux apprenants à connaître les différentes représentations (leurs caractéristiques, leur signification, etc).

Les enseignants utilisent des représentations différentes pour leur travail, soit objectives, picturales, verbales ou mathématiques pures. Ces représentations constituent donc une partie importante dans les méthodes et les techniques physiques auxquelles les apprenants doivent être initiés (Prediger & Wessel, 2013). Les enseignants peuvent utiliser une approche multidisciplinaire dans leurs cours de sciences physiques (Bărboianu & Romanian Academy - Iasi Branch, 2022; Trouche, 2019).

Parmi toutes les formes de représentations déjà citées ci-dessus, notre travail s'est concentré sur les représentations mathématiques. Nous avons cherché à comprendre l'usage approprié de ce type de représentation pour faciliter l'apprentissage et l'enseignement des sciences physiques.

IV.2. Usage approprié des représentations mathématiques en sciences physiques

Les représentations mathématiques sont généralement interprétées comme :

> *"Des productions visibles ou tangibles, telles que des diagrammes, des lignes numériques, des graphiques, des dispositions d'objets concrets ou de manipulateurs, des modèles physiques, des expressions mathématiques, des formules et des équations."*
>
> (Pospiech et al., 2019)

L’usage à bon escient des représentations mathématiques en sciences physiques est tributaire de la capacité des apprenants à associer les concepts physiques (tels que les forces, les énergies ou les mouvements) à des outils mathématiques (comme les équations et les formules). Ces outils permettent de modéliser et d’exprimer de manière précise et quantifiable les observations issues de la réalité et donc de comprendre les phénomènes physiques.

L’usage approprié des représentations mathématiques implique également une maîtrise des relations entre les différentes formes de celles-ci comme par exemple, la capacité de passer d'une équation algébrique à un graphique qui est une compétence essentielle dans la résolution des problèmes en sciences physiques. En fait, les apprenants doivent être en mesure de lier les symboles et les expressions mathématiques à des phénomènes concrets et donc aptes à renforcer leur capacité de conceptualiser des idées abstraites. Par ailleurs, (Sherin, 2001) souligne que l'utilisation de représentations multimodales enrichit l'apprentissage car elle offre une diversité de points de vue sur un même phénomène, ce qui favorise une compréhension plus profonde (Pospiech et al., 2019).

V. Représentations mathématiques pour l'apprentissage et la compréhension des sciences physiques

V.1. Acquisition et application des représentations mathématiques par les apprenants

Pour souligner l’acquisition des représentations mathématiques par les apprenants et leur permettre de comprendre et de travailler sur des sujets physiques. Cette section présente la manière dont les apprenants devraient non seulement apprendre à utiliser et à interpréter les représentations mathématiques en sciences physiques, mais aussi acquérir des connaissances et des compétences mathématiques et les appliquer favorablement dans leurs cours en sciences physiques.

La compréhension des applications physiques par les apprenants qui connaissent les concepts, théories, structures et méthodes physiques et qu'ils les appliquent de manière appropriée (*par exemple pour étudier, décrire et expliquer un phénomène physique*). Cela signifie selon (Linder et al., 2014) que :

"*Les apprenants doivent avoir accès à un mode structuré de concepts, d'idées, et de théories, etc… qui a été développé pour expliquer les phénomènes observés dans une discipline.*"

(Linder et al., 2014)

Si l'on parle, par exemple, de notion de *"Temps de demi-vie"* d'une substance radioactive dans les physiques nucléaire. Le mode de connaissance associé comprend, entre autres, les concepts d'énergie, de chaleur et de quantités physiques telles que la température et la pression… Selon (Linder et al., 2014), ces différents aspects du mode de connaissance sont représentés par les différentes arêtes dans la figure suivante (*Figure 7*).

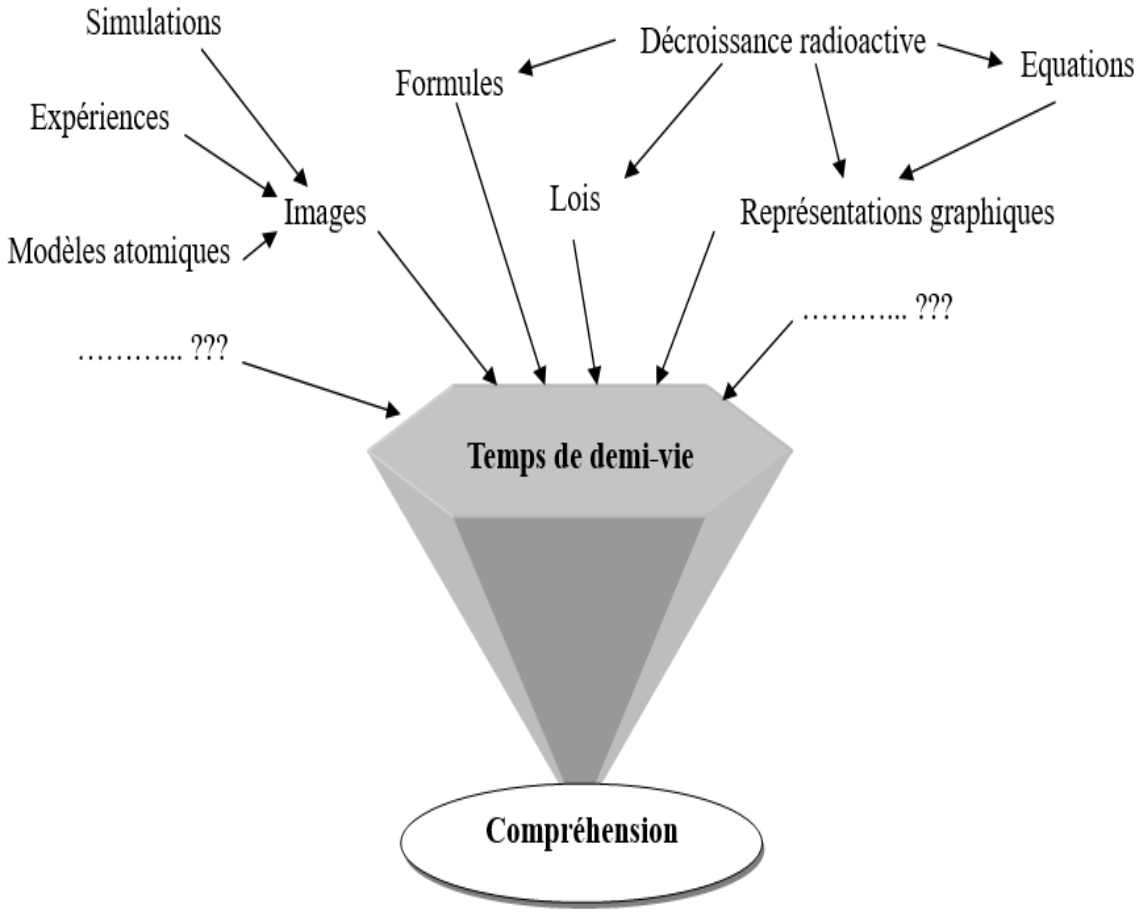


Figure 7 : Les différentes représentations et aspects de notion "Temps de demi-vie" selon Linder et al., (2014).

Les représentations peuvent se "*chevaucher*" et être interconnectées, offrant ainsi une vision plus complète du phénomène étudié. Une compréhension approfondie d'un objet ou d'un concept en physique exige souvent la combinaison de plusieurs types de représentations (Geyer & Kuske-Janßen, 2019). Par conséquent, il est essentiel que les apprenants soient capables de passer aisément d'une représentation à une autre pour une compréhension intégrée du sujet (Kabil, 2015).

L'accès aux divers aspects d'un mode de connaissance peut être facilité par l'utilisation de différentes représentations, telles que les images et les formules... Ces représentations, qui varient en type et en caractéristique, sont essentielles pour une compréhension approfondie de la discipline (Pospiech et al., 2019). Elles offrent des perspectives spécifiques pour explorer et découvrir divers aspects du phénomène étudié. En particulier, les représentations mathématiques jouent un rôle crucial dans le mode de connaissance, car elles permettent de formaliser et de quantifier les concepts physiques (Linder et al., 2014).

V.2. Impact des représentations mathématiques sur la compréhension des apprenants

Les représentations mathématiques sont particulièrement cruciales car elles permettent de formaliser et de quantifier les concepts physiques. Cependant, il est crucial de ne pas se contenter d'imiter l'utilisation de ces différentes représentations sans explorer les aspects sous-jacents du mode de connaissance (Linder et al., 2014). Une compréhension efficace des sciences physiques implique la maîtrise des diverses représentations, notamment les représentations mathématiques, et leur utilisation correcte. Ces différentes représentations soulignent l'importance des approches multimodales, qui favorisent une compréhension plus efficace de la discipline. (Linder et al. 2014) notent que :

> *"Un ensemble de représentations multimodales soigneusement sélectionnées, chacune ayant ses propres caractéristiques (uniques, supplémentaires ou complémentaires) est nécessaire pour générer une affordance disciplinaire collective."*
>
> (Linder et al., 2014)

Les recherches bibliographiques sur la mathématisation des sciences physiques révèlent que les apprenants rencontrent des difficultés avec les représentations mathématiques (Bresson, 1973; Kvasz, 2012; López-Gay et al., 2015; Okoye et al., 2023). (Hattikudur et al., 2012) notent que les apprenants de secondaire éprouvent des difficultés à interpréter et construire des graphiques, tandis que (Malle, 1993) indique des problèmes similaires avec les représentations algébriques.

Les difficultés dans la manipulation des représentations mathématiques peuvent varier selon les types de représentations et leur interconnexion. Des études montrent que même des apprenants avec des compétences mathématiques élevées peuvent rencontrer des obstacles dans l'application de ces compétences dans des contextes physiques spécifiques (Hu et al., 2019; Hu & Rebello, 2013; Planinic et al., 2013).

Conclusion

Pour soutenir la mathématisation des sciences physiques, il est essentiel d'adopter des modèles pédagogiques qui favorisent la transition entre les représentations mathématiques et les notions et les concepts des sciences physiques.

Ces approches pédagogiques permettent de structurer l'enseignement et l'apprentissage de la mathématisation des sciences physiques de manière à soutenir une compréhension approfondie et intégrée des concepts scientifiques. Elles offrent des stratégies pour aider les apprenants à développer les compétences nécessaires pour manipuler et interpréter les représentations mathématiques et physiques, favorisant ainsi une meilleure compréhension des phénomènes étudiés.

Chapitre 2

La mathématisation des sciences physiques

Introduction

Après avoir examiné en détail le cadre théorique de la mathématisation des sciences physiques, ce chapitre a pour objectif de fournir un cadre théorique qui permet aux enseignants et aux apprenants de mobiliser les mathématiques de manière efficace pour interpréter et analyser la complexité des phénomènes physiques. Cet objectif repose sur une compréhension approfondie des processus de modélisation, de traduction et de validation des représentations mathématiques dans le contexte des sciences physiques.

I. Processus de la mathématisation des sciences physiques

La mathématisation en sciences physiques est un processus structuré, composé d'étapes interdépendantes, qui permet de construire une compréhension profonde des phénomènes physiques à travers l'utilisation appropriée des mathématiques.

(Kraus & Krause, 2020) identifient plusieurs étapes essentielles de ce processus :

- **Modélisation du phénomène physique :** La première étape consiste à élaborer un modèle mathématique qui représente le phénomène physique étudié. Cette étape requiert de traduire une situation complexe en un ensemble de représentations mathématiques simplifiées, comme des équations ou des diagrammes. (Kraus & Krause, 2020) soulignent l'importance de cette compétence pour naviguer parmi les différents aspects des sciences physiques.

- **Transition entre représentations :** Une fois le modèle élaboré, il devient souvent nécessaire de passer d'une représentation à une autre (graphique, algébrique, numérique, etc). (Duval, 2006) souligne l'importance de la flexibilité cognitive dans la navigation entre ces différentes formes de représentation.

- **Interprétation des résultats :** Après avoir manipulé et traduit les représentations, les apprenants doivent interpréter les résultats obtenus pour les relier au phénomène physique étudié. (Galili, 2018) montre que cette interprétation peut transformer la compréhension des phénomènes physiques en permettant de voir comment les résultats mathématiques se traduisent dans la réalité physique.

- **Validation du modèle :** La dernière étape consiste à valider le modèle en le comparant à des données empiriques ou à d'autres caractéristiques du phénomène. Cette étape est indispensable pour s'assurer que le modèle reflète fidèlement les propriétés du phénomène observé. Selon (Blomhøj ; 2003), la validation garantit la fiabilité des modèles et leur pertinence, et elle permet de rectifier des approximations lorsque nécessaire.

En conclusion, le processus de mathématisation, tel que décrit par (Blomhoj, 2003), offre un cadre théorique robuste qui permet aux apprenants de développer une compétence en mathématisation.

II. Modèles théoriques pour la mathématisation des sciences physiques

II.1. Modèle de Redish, (2005)

Dans la littérature scientifique, le modèle qui traite la mathématisation des sciences physiques est celui de (Redish, 2005). Ce modèle de base illustre le processus de mathématisation, qui implique le passage des situations physiques vers les mathématiques et inversement, il comprend des processus d'interprétation ou/et de validation.

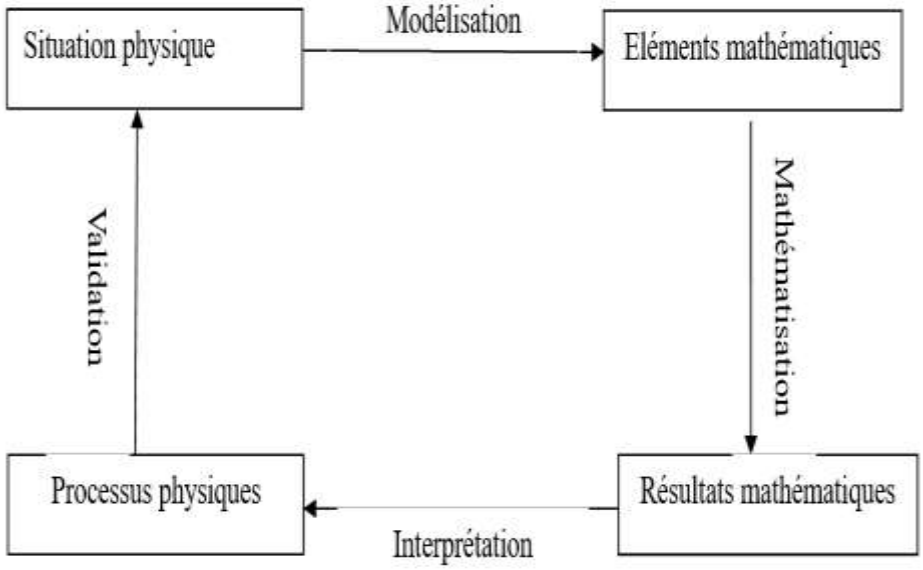


Figure 8 : Modèle de base de la mathématisation des sciences physiques. (Modifié d'après (E. F. Redish, 2005)).

(Redish, 2005) montre que la mathématisation des sciences physiques commence toujours par une définition de la situation physique qu'un scientifique veut décrire. Et puis vient la première étape, la planification de la structure physique dans un modèle mathématique (*modélisation*). La deuxième étape de ce modèle est la transformation de la description initiale en appliquant certains éléments mathématiques (*mathématisation*). Dans le troisième, une interprétation des résultats en termes physiques à nouveau (*interprétation*) et enfin une évaluation est requise pour vérifier si les résultats correspondent à la situation physique choisie au début (*validation*).

En effet, on peut conclure que cela nécessite de comprendre le contenu physique des représentations mathématiques et de parvenir à une compréhension conceptuelle en mathématiques et en sciences physiques. Cependant, de nombreux apprenants semblent avoir des difficultés à prendre conscience de la signification des formules et ont tendance à appliquer par cœur les techniques mathématiques (Kabil, 2015).

II.2. Modèle de l'OCDE (2006)

La littérature scientifique a également décrit des modèles pour l'utilisation des mathématiques en sciences. Parmi ces modèles nous trouvons celui de (OCDE, 2005, 2006) "*Organisation de coopération et de développement économiques*", qui a défini les fondements théoriques et la nature de l'évaluation mise en œuvre pour déterminer dans quelle mesure les apprenants de 15 ans sont capables d'utiliser les mathématiques.

Pour décrire ce modèle la PISA *"le Programme International pour le Suivi des Acquis des apprenants"* distingue trois composantes :

- **La première composante :** est les situations et les contextes où se placent les problèmes scientifiques que les apprenants doivent résoudre *(Figure 9)* ;
- **La deuxième composante :** est le contenu mathématique qui doit être utilisé pour résoudre ces problèmes, organisé autour d'un certain nombre d'idées majeures *(Figure 9)* ;
- **La troisième composante :** est les compétences à activer au cours du processus de mise en relation entre le monde réel, qui donne naissance aux problèmes, et les mathématiques pour aboutir à leur résolution *(Figure 9)*.



Figure 9 : Les composantes du domaine de la culture mathématique selon Programme for International Student Assessment & Organisation for Economic Co-operation and Development, (2006).

II.3. Modèle d'Adu-Gyamfi et al (2012)

Dans le même contexte, afin de décrire le processus de la mathématisation des sciences physiques, un modèle a été développé (*Figure 10*). Il est dérivé d'un modèle utilisé dans l'enseignement des mathématiques de (Adu-Gyamfi et al., 2012) qui caractérise le changement entre les représentations mathématiques, c'est-à-dire qu'il ne couvre que les représentations numériques, les représentations graphiques et les représentations algébriques en tant que représentations source ou cible.

Au cours d'une traduction des représentations sources vers des représentations cibles, (Adu-Gyamfi et al., 2012) soulignent trois catégories d'activités. Notons qu'il n'est pas nécessaire que toutes les catégories soient présentes et l'ordre d'application de ces catégories ne sont pas fixes.

- **L'activités de réalisation :** L'origine de cette catégorie est la vérification de la mise en œuvre des représentations. Selon (Adu-Gyamfi et al., 2012) cette activité met en évidence l'utilisation des étapes précises lors du processus de la représentation source vers la représentation cible.

Par exemple :

"*En sciences physiques, cela pourrait impliquer le calcul des valeurs pour un graphique à partir d'une équation donnée, ou la construction d'un diagramme de forces en utilisant des valeurs calculées.*"

- **L'activités d'utilisation :** Cette activité selon (Adu-Gyamfi et al., 2012) se concentrent sur l'utilisation des caractéristiques clés pour la traduction des représentations sources vers des représentations cibles.

Par exemple :

" *l'utilisation de la pente d'une courbe dans un graphique pour déterminer la relation entre deux variables physiques, comme la vitesse et le temps.*"

- **L'activité de vérification :** Cette activité est similaire à celle d'utilisation, selon (Adu-Gyamfi et al., 2012) elle concerne la vérification de la cohérence de la représentation source et de la représentation cible. Les deux doivent transmettre des informations cohérentes.

Par exemple :

"A*près avoir dérivé une formule à partir d'un graphique, un apprenant pourrait vérifier si les résultats obtenus en utilisant cette formule correspondent bien aux points du graphique initial.*"

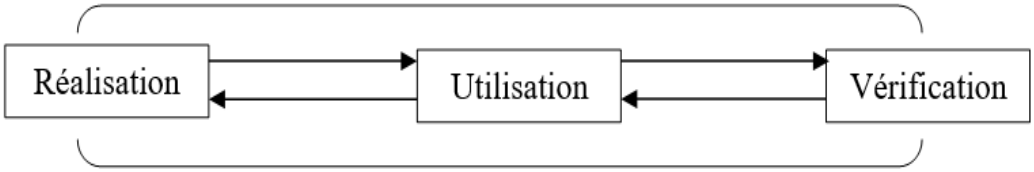


Figure 10 : Modèle d'Adu-Gyamfi et al., (2012) de changement entre les représentations mathématiques et les sciences physiques.

II.4.Modèle de Docktor et al (2016)

Dans le même sens, les modèles scientifiques en termes de résolution des problèmes sont très variés, tout dépend du contexte de la recherche effectuée. D'une part, (Docktor et al., 2016) ont développé un cadre bien connu en matière de résolution de problèmes. Il comprend cinq étapes axées sur les sciences en générale et les sciences physiques en particulier :

1) Une description utile du problème ;

2) Une approche physiques appropriée basée sur des principes ;

3) Une application spécifique du concept physique adaptable aux conditions de la situation ;

4) Une application de la procédure mathématique particulière ;

5) Une progression logique organisée et orientée vers un but qui guide le processus de solution.

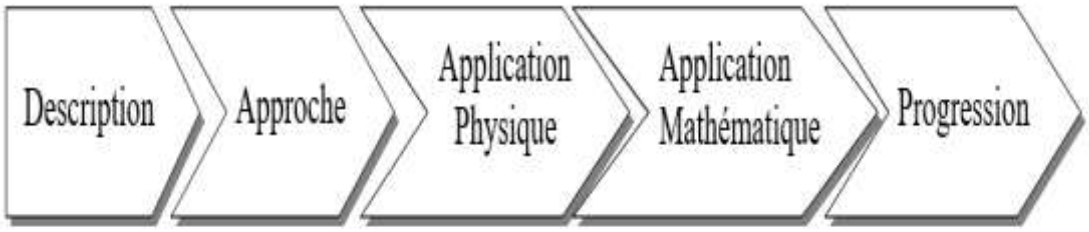


Figure 11 : Modèle de Docktor et al., (2016) de la mathématisation des sciences physiques en termes de résolution des problèmes.

Le modèle de (Docktor et al., 2016) a laissé l'étape de la mathématisation en avant dernière étape de la résolution des problèmes. Cette situation nous mène à deux propositions à peu près semblables :

- La première est l'interprétation et l'application des concepts, des lois et/ou des notions physiques qui sont les étapes cruciales de la résolution des problèmes en sciences physiques.
- La deuxième est que la mathématisation n'est qu'un outil d'aide pour la résolution de problèmes et non pas l'objectif final.

II.5. Modèle de Jensen et al (2017)

La relation entre les mathématiques et les sciences physiques dans la résolution des problèmes (Jensen et al., 2017) ont montré que la résolution des problèmes est une compétence qui doit être développée et entraînée autour de deux phases importantes :

- La première est la physicalisation,
- La deuxième est la mathématisation.

Selon (Jensen et al., 2017), la mathématisation est un objectif clé dans la résolution de problèmes en sciences physiques. Le modèle proposé par ces chercheurs commence par la capacité des apprenants à résoudre des problèmes concrets du monde réel, qui ne sont pas encore formalisés. Ensuite, les apprenants doivent développer la compétence de formalisation, c'est-à-dire transformer ces problèmes concrets en problèmes formels.

L'expérience de (Jensen et al., 2017) montrent que cette étape de formalisation est cruciale pour les apprenants, peu importe le type de formalisation nécessaire. Cependant, dans certains cas, c'est la phase de "*physicalisation*" qui peut être difficile. Malgré cela, les apprenants parviennent souvent à décrire qualitativement ce qui se passe dans un système physique, mais ont du mal à effectuer la "*mathématisation*" nécessaire pour résoudre le problème.

Par conséquent, (Jensen et al., 2017) ont affirmé que les problèmes de physiques non formalisés peuvent souvent être utilisés comme un terrain d'entraînement pour la mathématisation. (Jensen et al., 2017) ont résumé leur modèle comme suite :

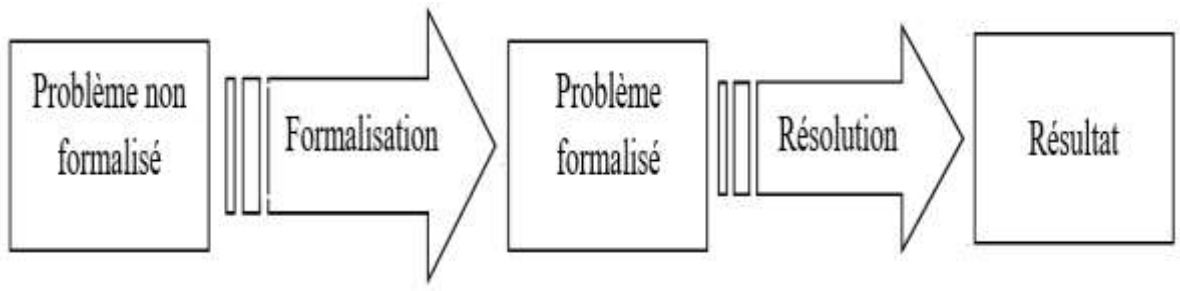


Figure 12 : Le modèle de Jensen et al (2017) pour la mathématisation et la physicalisation des sciences physiques.

Dans la mathématisation des sciences physiques, il est crucial de relier les concepts théoriques à des applications concrètes pour aider les apprenants à mieux comprendre les situations physiques et à améliorer leur apprentissage et leur pratique des sciences physiques.

Ce chapitre présente des modèles théoriques de mathématisation en sciences physiques, qui impliquent le transfert de phénomènes physiques en structures mathématiques. En effet, chaque modèle est spécifique à un cadre de recherche ou à un objectif pédagogique particulier.

III. Modèle théorique adapté pour la présente recherche

Parmi les modèles théoriques ci-dessus, le modèle de (Redish ; 2005) pourrait s'avérer particulièrement pertinent pour la présente recherche. Ce modèle met en lumière le processus de mathématisation dans les sciences physiques car il intègre non seulement la représentation mathématique de phénomènes physiques, mais aussi l'interprétation et la validation des résultats obtenus, ce qui est crucial pour comprendre comment les apprenants associent les concepts mathématiques à la réalité physique.

Ce modèle va nous permettre de consolider la compréhension des concepts physiques en les inscrivant dans un contexte mathématique rigoureux, tout en développant des compétences essentielles de validation et d'interprétation des résultats. Par conséquent, le modèle de (E. F. Redish, 2005) contribue à une vision plus cohérente et intégrée de la science, en renforçant chez les apprenants des compétences analytiques et critiques indispensables à l'application des sciences physiques dans des situations concrètes.

Conclusion

En conclusion, il est essentiel que les chercheurs portent une attention particulière aux représentations mathématiques dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques. Ces représentations jouent un double rôle : elles sont cruciales pour les processus de communication propres à la discipline et elles ont le potentiel d'améliorer l'apprentissage en offrant une vision plus approfondie et nuancée sur un sujet. Par conséquent, les enseignants doivent choisir soigneusement les types de représentations qu'ils utilisent pour enseigner un sujet spécifique, en veillant à ce qu'elles correspondent aux objectifs pédagogiques visés. De plus, ils devraient réfléchir à la manière d'établir des liens entre différentes représentations et

intégrer des moments de discussion en classe pour examiner avec les apprenants les caractéristiques, les avantages et les limites de chaque type de représentation.

L'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques représente un domaine riche et complexe qui mérite une attention particulière. La compréhension de la mathématisation des sciences physiques favorise une compréhension approfondie des concepts scientifiques et développe des compétences analytiques chez les apprenants, elle pose également des défis importants. En particulier, la diversité des niveaux de compétence mathématique parmi les apprenants peut compliquer l'enseignement et l'apprentissage, nécessitant des ressources pédagogiques spécifiques et une formation adéquate pour les enseignants. Aborder ces défis de manière efficace est crucial pour optimiser l'impact de la mathématisation sur l'enseignement des sciences physiques, en particulier dans des contextes éducatifs variés comme celui du Maroc.

Partie II

Problématique, Méthodologie et méthodes de recherche

Chapitre 1

Problématique et Questions de recherche

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la problématique à l'origine de ce travail qui s'articule autour de l'intégration des mathématiques dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques : la mathématisation des sciences physiques. Celle-ci, bien que riche en opportunités pédagogiques, engendre des défis et des obstacles tant pour les apprenants que pour les enseignants.

L'intégration des mathématiques dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques est indispensable car la compréhension des phénomènes physiques est souvent tributaire d'une modélisation mathématique. Cependant, la recherche bibliographique est effectuée a montré que l'usage des mathématiques d'une manière cohérente favorisant l'apprentissage des sciences physique est loin d'être une tâche aisée. En effet, la synthèse bibliographique a bien mis en lumière les difficultés spécifiques qu'affrontent les enseignants et les apprenants dans leurs manipulations mathématiques en sciences physiques.

Dans ce travail, il s'agit de comprendre les obstacles auxquels les enseignants sont confrontés lorsqu'ils tentent d'introduire les mathématiques de manière cohérente et significative dans leurs cours de sciences physiques.

I. Problématique de recherche

Depuis mon intégration dans l'enseignement secondaire qualifiant, j'ai constaté que de nombreux apprenants rencontrent des difficultés notables dans l'assimilation des sciences physiques. Ces obstacles ne sont pas isolés, car mes collègues partagent des observations similaires. Nous avons ainsi observé une compréhension limitée des concepts fondamentaux, un désintérêt croissant et un manque d'engagement actif de la part des apprenants. De plus, ils éprouvent des difficultés persistantes à faire le lien entre les notions théoriques et leurs applications pratiques, et se montrent souvent incapables de modéliser les phénomènes étudiés de manière adéquate. Cet état de fait est l'origine de ce travail.

I.1. Enseignement/apprentissage des sciences physiques dans le contexte marocain

D'une manière générale, on peut constater que la problématique de l'enseignement-apprentissage des sciences physiques a été abordée par les chercheurs dans le contexte marocain. Ces recherches ont mis en exergue que l'enseignement des sciences physiques dans le système éducatif marocain est confronté à des défis complexes et diversifiés susceptibles d'affecter la qualité de l'enseignement et la motivation des apprenants. Ces défis concernent les aspects didactiques, pédagogiques, structurels, conceptuels, ...

Les méthodes d'enseignement traditionnelles, encore dominantes dans les établissements secondaires marocains, privilégient une approche transmissive centrée sur l'enseignant. Cette méthode, qui limite l'implication active des apprenants dans le processus d'apprentissage, a été critiquée pour son incapacité à développer des compétences analytiques et une pensée critique chez les apprenants. En effet, les programmes scolaires, bien que riches en contenu, sont souvent jugés trop denses et peu adaptés aux besoins réels des apprenants. L'accent mis sur les savoirs théoriques au détriment des applications pratiques et des liens avec le quotidien des apprenants réduit leur capacité à percevoir la pertinence des sciences physiques dans leur environnement (Omar & Benjelloun, 2013).

Sur le plan des infrastructures, les établissements scolaires marocains souffrent d'un manque criant de ressources adaptées. Les laboratoires de sciences, lorsqu'ils existent, sont souvent mal équipés ou sous-utilisés en raison de contraintes budgétaires ou organisationnelles. Cette situation limite les opportunités des apprenants de réaliser des expériences pratiques, pourtant essentielles pour comprendre et assimiler les concepts scientifiques (Benjelloun, 2023; Ouahab et al., 2024).

les enseignants peinent souvent à adapter leur enseignement aux besoins des apprenants ayant des niveaux hétérogènes, aggravant ainsi les inégalités en classe (Mostefa, 2002). En outre, les enseignants jouent un rôle clé dans ce contexte, mais ils sont eux-mêmes confrontés à plusieurs défis. En particulier, leur formation initiale et continue reste insuffisante pour leur permettre d'intégrer des approches pédagogiques modernes, telles que l'apprentissage par problème, les simulations numériques ou les représentations multimodales (Madrane et al.,

2009). Quant aux difficultés conceptuelles, plusieurs concepts et notions ont été identifiées comme sources de difficultés. Ainsi, par exemple : le concept de la force (Bouzid et al., 2024).

Dans ce travail, nous pointons la mathématisation des sciences physiques comme un problème crucial. Ce processus, qui consiste à utiliser les outils mathématiques pour modéliser, analyser et résoudre des phénomènes physiques semble ne pas être abordé par la recherche dans le contexte marocain et nécessite donc une attention particulière. Pour ce, le focus sera mis, dans cette thèse, sur le concept de la mathématisation des sciences physiques qui s'avère un concept sources d'obstacles dans différents systèmes éducatifs.

I.2. La mathématisation des sciences physiques

Comme il a été précisé auparavant, plusieurs chercheurs confirment qu'un des obstacles majeurs entravant l'apprentissage des concepts et notions physiques au secondaire qualifiant est le manque de cohérence scientifique, plus particulièrement, dans leur rapport avec les mathématiques (Kabil, 2015). Selon le physicien (E. F. Redish, 2005), les enseignants constatent fréquemment que, malgré leur excellence dans les cours de mathématiques, les apprenants en sciences physiques montrent une maîtrise limitée des compétences mathématiques.

La difficulté rencontrée par les apprenants dans les sciences physiques peut être attribuée à l'utilisation de symboles pour représenter les entités physiques, chaque symbole ayant une signification spécifique. Ainsi, les étudiants éprouvent des difficultés à relier ces symboles aux implications physiques qu'ils représentent dans les équations et formules (Dolin & Evans, 2018; Geyer & Kuske-Janßen, 2019; Sherin, 2001). En effet, les apprenants peinent à associer les symboles des équations à leurs interprétations physiques correspondantes, ce qui crée un décalage significatif dans leur compréhension (Bruner, 1974). Le même constat a été souligné dans d'autres études (Smigiel & Sonntag, 2013). Ces chercheurs ont mis en évidence que certains enseignants privilégient les calculs mathématiques au détriment d'une véritable compréhension scientifique.

Il semble donc que la difficulté de concilier les représentations mathématiques et l'interprétation des phénomènes physiques pointe un défi majeur dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques (Bing & Redish, 2007, 2009, 2012).

I.3. Questions de recherche

La mathématisation en sciences physiques ne se limite pas à une simple application des mathématiques, mais elle implique une interaction profonde et complexe entre les connaissances mathématiques (comme les formules et les symboles) et les concepts physiques (comme les lois et les principes de la physique). Cette interaction est analysée et structurée à travers des modèles théoriques qui aident à encadrer les deux domaines dans le cadre de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences physiques. En effet, ces modèles théoriques mettent en évidence que la mathématisation ne consiste pas uniquement à traduire des phénomènes physiques en langage mathématique, mais nécessite également de guider les apprenants dans l'interprétation de ces connaissances mathématiques en termes physiques. De ce fait, les apprenants sont censés comprendre non seulement comment utiliser les outils mathématiques, mais également pourquoi et dans quel contexte ils s'appliquent.

De ce fait, le processus de la mathématisation est donc essentiel pour renforcer la capacité des apprenants à établir des liens entre les concepts abstraits des mathématiques et les réalités concrètes des phénomènes physiques. En d'autres termes, il s'agit d'un double mouvement : d'une part, transformer des situations physiques en représentations mathématiques (modélisation), et d'autre part, interpréter ces représentations pour en extraire des significations physiques pertinentes (Pospiech et al., 2019; Vinitsky-Pinsky & Galili, 2014).

Enfin, Il semble que la capacité des apprenants à utiliser les mathématiques pour comprendre et modéliser des phénomènes physiques représente un défi pédagogique majeur. Les apprenants rencontrent souvent des difficultés à appliquer les outils mathématiques aux sciences physiques de manière efficace, ce qui entrave la compréhension conceptuelle. Cela nous amène à formuler la question de recherche ayant pour objectif l'exploration de la question dans le contexte marocain.

- ***Question générale de la recherche :***

Dans quelle mesure la mathématisation des sciences physiques au secondaire marocain influence la compréhension conceptuelle des apprenants, et engendre les obstacles dans le processus de l'enseignement et d'apprentissage de la discipline ?



Afin de structurer cette analyse sur la mathématisation des sciences physiques, de manière approfondie, il nous a paru nécessaire de s'intéresser aux deux pôles déterminants de l'action éducative concernés par la thématique et qui sont l'enseignant et l'apprenant. Pour ce, nous avons scindé la question générale en deux sous-questions :

- **Volet Enseignant :**

De par sa fonction, l'enseignant des sciences physiques ne peut contourner l'usage des mathématiques et la bibliographie effectuée semble confirmer que cet usage génère des difficultés et des obstacles. L'enseignant doit donc tenir compte de ces obstacles recourir à des approches pédagogiques adaptées pour favoriser les apprentissages. Cependant, on peut se demander si la formation des enseignants dote des outils nécessaires pour gérer la mathématisation des sciences physiques. Ce questionnement nous a amené à formuler la sous-question suivante :

Comment les enseignants de sciences physiques au secondaire marocain procèdent-t-ils lorsqu'ils utilisent les représentations mathématiques pour expliquer les concepts physiques ?



- **Volet apprenant**

Les constats en classe et les données de la littérature mettent bien en évidence que l'interprétation des phénomènes physiques via les représentations mathématiques n'est pas une tâche aisée pour les apprenants. Ceci nous amène à se demander si l'apprenant marocain est bien dans ce cas :

Quels sont alors les obstacles qu'ils rencontrent lors de l'intégration des outils mathématiques dans l'apprentissage des sciences physiques ?



Cette sous-question se concentre donc sur les difficultés spécifiques rencontrées par les apprenants dans la compréhension et l'application des mathématiques aux sciences physiques, on peut la formuler comme suit :

Dans quelle mesure les apprenants du secondaire marocain maîtrisent-ils les compétences mathématiques nécessaires pour comprendre les sciences physiques ?



La problématique de la présente recherche se concentre sur :

- La manière dont on peut gérer efficacement l'utilisation des représentations mathématiques dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques, en minimisant ses difficultés, tout en garantissant les bonnes pratiques en classe avec des compétences mathématiques et scientifiques solides.

- La maîtrise des représentations mathématiques en sciences physiques repose sur le développement de compétences spécifiques chez les apprenants. Ces compétences incluent la capacité à utiliser de manière flexible et appropriée les diverses formes de représentations. Cependant, une compréhension conceptuelle solide nécessite que les apprenants puissent non seulement appliquer ces représentations, mais aussi en saisir leurs implications profondes dans l'éducation de la discipline.

Pour promouvoir cette compréhension conceptuelle, il est essentiel d'adopter des stratégies pédagogiques qui guident les apprenants à développer une réflexion métacognitive sur les différentes représentations mathématiques. Cela inclut l'exploration critique de leur portée, leur pertinence, et leurs limites dans des contextes physiques spécifiques, renforçant ainsi l'aptitude des apprenants à appliquer les représentations mathématiques de manière éclairée et pertinente dans des situations concrètes des sciences physiques

.

En fait, la question spécifique de cette recherche est :

L'interaction entre les mathématiques et les sciences physiques est-elle prise en considération dans le système éducatif marocain ?



En explorant cette question, cette étude vise à fournir des connaissances approfondies sur les difficultés des apprenants avec les représentations mathématiques en sciences physiques, ainsi que des recommandations pédagogiques pour améliorer l'enseignement et l'apprentissage de la mathématisation des sciences physiques spécialement au niveau secondaire marocain.

La mathématisation est largement reconnue dans la littérature comme une composante essentielle de l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques. De nombreux travaux internationaux mettent en évidence les effets positifs de la mathématisation sur le développement de la pensée critique et des compétences analytiques chez les apprenants, ainsi que sur leur capacité à aborder des problèmes complexes de manière rigoureuse.

Cependant, malgré cette reconnaissance, les recherches portant sur la mathématisation des sciences physiques dans le contexte marocain restent peu développées. Peu d'études ont exploré comment les spécificités culturelles et pédagogiques influencent l'intégration de la mathématisation dans les programmes scolaires de sciences physiques au Maroc. Cette lacune dans la littérature justifie l'intérêt de la présente étude, qui vise à approfondir la compréhension de la mathématisation en sciences physiques dans le contexte marocain et à proposer des pistes pédagogiques adaptées pour renforcer l'enseignement de cette discipline clé.

II. Hypothèses de recherche

Afin de guider cette recherche, deux hypothèses principales ont été formulées, chacune explorant un aspect spécifique de la mathématisation dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques, du point de vue enseignant et apprenant.

II.1. Hypothèse du volet enseignant

Les enseignants qui favorisent une réflexion profonde des représentations mathématiques en sciences physiques amélioreront la compréhension scientifique de leurs apprenants.

Cette hypothèse repose sur l'idée que les enseignants peuvent jouer un rôle crucial dans l'amélioration de la compréhension des apprenants en favorisant une réflexion métacognitive de la mathématisation des sciences physiques. En mettant l'accent sur la signification des représentations mathématiques et en guidant les apprenants à réfléchir sur la façon dont elles sont utilisées dans des contextes réels, les enseignants peuvent aider les apprenants à développer une compréhension plus profonde de l'interaction entre les sciences physiques et les mathématiques.

II.2. Hypothèse du volet apprenant

Les apprenants ayant plus des compétences mathématiques auront moins de difficultés en apprentissage des sciences physiques.

Cette hypothèse est basée sur l'idée que la compréhension de la mathématisation des sciences physiques est cruciale pour la manipulation efficace des représentations mathématiques de la discipline. Les apprenants qui ont des connaissances en mathématiques peuvent être plus enclins à saisir l'interrelation entre les sciences physiques et les mathématiques, ce qui pourrait les aider à la bonne compréhension des deux disciplines.

III. Objectifs de la recherche

Cette recherche scientifique s'engage dans une exploration en profondeur de la question complexe relative à l'intégration des mathématiques dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques. Les objectifs spécifiques de cette étude sont variés et interconnectés, chacun contribuant à une compréhension approfondie de l'intégration des mathématiques dans le contexte des sciences physiques.

III.2. Objectif du volet enseignant

Améliorer l'utilisation des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques, afin de favoriser la compréhension scientifique des apprenants tout en tenant compte de leurs niveaux de compétence.

Cet objectif vise à fournir aux enseignants des outils pratiques pour enseigner efficacement la mathématisation des sciences physiques. Il permettra de répondre aux besoins variés des apprenants en adaptant les approches pédagogiques en conséquence. La formation des enseignants et le développement de ressources pédagogiques spécifiques aideront à améliorer la qualité de l'enseignement dans ce domaine complexe.

III.3. Objectif du volet apprenant

Étudier l'impact des représentations mathématiques en sciences physiques sur l'intérêt des apprenants et leurs besoins pour une meilleure intégration des mathématiques.

Cet objectif permettra de mieux comprendre comment les apprenants réagissent à l'introduction des représentations mathématiques dans les sciences physiques et comment cela peut affecter leur motivation et leur engagement dans l'apprentissage de ces disciplines. Il aidera également à identifier les besoins spécifiques des différents types d'apprenants pour optimiser l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques.

IV. Justification du choix d'hypothèse et d'objectifs

Cette recherche vise à analyser les avantages et les défis de l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques. Elle explore comment cette intégration peut renforcer la compréhension conceptuelle et promouvoir la pensée analytique.

L'étude se concentre sur les défis auxquels les enseignants et les apprenants sont confrontés, en examinant les enjeux didactiques et pédagogiques liés à l'utilisation des

représentations mathématiques dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques. Elle cherche à identifier les compétences nécessaires pour enseigner efficacement cette intégration et à comprendre les besoins spécifiques des apprenants.

En outre, la recherche examine l'impact de cette intégration sur l'intérêt des apprenants envers les sciences physiques. Elle cherche à comprendre comment la complexité mathématique est perçue par différents types d'apprenants et comment elle peut influencer leur engagement dans ces disciplines.

La recherche prévoit également l'amélioration des ressources pédagogiques pour enseigner la mathématisation de manière efficace. De ce fait, l'étude met en avant deux objectifs principaux :

- Clarifier le rôle des mathématiques dans l'apprentissage des sciences physiques à travers deux études de cas spécifiques, l'une du point de vue des enseignants et l'autre du point de vue des apprenants.
- Attirer l'attention sur le fait que l'apprentissage du rôle des mathématiques en sciences physiques se produit souvent de manière implicite, influençant les perceptions des apprenants sur la nature de l'apprentissage dans ces disciplines.

En résumé, cette recherche vise à mieux comprendre comment la mathématisation peut enrichir l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques tout en surmontant les défis associés. L'objectif ultime est d'améliorer les pratiques pédagogiques et l'apprentissage des apprenants, en renforçant leurs compétences dans ces deux domaines cruciaux pour la formation scientifique. Ce processus de recherche rigoureux générera des informations essentielles pour l'amélioration continue de l'éducation en sciences physiques, soulignant l'importance de l'intégration judicieuse des mathématiques dans ce contexte.

Conclusion

La complexité de la mathématisation des sciences physiques est un sujet essentiel à explorer pour améliorer l'enseignement et l'apprentissage de ces disciplines. En effet, la mathématisation des sciences physiques présente à la fois des avantages substantiels en termes de compréhension conceptuelle et de développement de la pensée analytique, ainsi que des défis dus à la complexité des interactions entre les mathématiques et la physique.

Cette complexité exige des approches pédagogiques adaptées, une formation ciblée des enseignants, et des ressources pédagogiques appropriées. L'intégration réussie des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques peut non seulement favoriser une meilleure compréhension des concepts scientifiques, mais aussi susciter un intérêt accru pour ces disciplines. Cette recherche vise à contribuer à cette compréhension et à améliorer l'enseignement des sciences physiques, en particulier dans le contexte éducatif marocain.

Chapitre 2

Méthodologie et Méthodes de recherche

Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée et les méthodes utilisées pour apporter des éléments de réponse aux questions de recherche formulées dans le cadre de cette étude sur la mathématisation des sciences physiques. Comme il a été précisé dans la problématique, cette recherche se focalise sur les deux acteurs principaux de la relation Enseignement/Apprentissage à savoir l'apprenant et l'enseignant. Ainsi, deux expérimentations phares ont été menée : la première auprès des enseignants et la deuxième auprès des apprenants qui sont les élèves du deuxième année baccalauréat marocain. Nous présentons également dans ce chapitre les méthodes utilisés et qui se sont révélées parfaitement adaptées à la recherche effectuée.

Enfin, les investigations menées sont pour les deux pôles : enseignant et apprenant ayant chacun des caractéristiques et prérogatives. Alor, pour être plus explicite et claire séparément, nous présentons la méthodologie relative à chaque expérimentation.

I. Expérimentation 1 : la mathématisation des sciences physiques du volet enseignant

Cette expérimentation explore la mathématisation des sciences physiques au niveau secondaire au Maroc en se concentrant sur les perceptions des enseignants du secondaire sur la mathématisation des sciences physiques. Les avancées en sciences et en technologie soulignent l'interrelation entre les disciplines, notamment entre la physique et les mathématiques (Bicalho & Oliveira, 2011; Trouche, 2019). Historiquement, ces domaines sont profondément liés, nécessitant le transfert de compétences mathématiques pour résoudre des problèmes physiques (Başkan et al., 2010; Gustafsson et al., 2015; Meli et al., 2016). Cependant, cette relation est souvent mal reflétée dans l'enseignement, malgré des objectifs distincts dans les programmes scolaires. L'intégration des concepts communs et des compétences partagées entre physique et mathématiques est cruciale pour une compréhension approfondie des deux disciplines (Daher et al., 2018; West et al., 2007).

I.1. Méthodologie et Méthodes de l'expérimentation 1

Dans l'objectif d'apporter des éléments de réponses à nos questions de recherche, nous avons adopté la méthodologie suivante :

- Identifier les parties du programme du niveau concerné à savoir 2ème année baccalauréat exigeant des connaissances mathématiques, en précisant la nature de ces connaissances.
- Mettre en exergue les difficultés liées à la mathématisation dans les articles les plus récents.
- Élaborer des questionnaires qui seront l'outil de mesure dans ce travail et cela sur la base, d'une part, d'une analyse des manuels scolaire de 2ème année baccalauréat. D'autre part, une analyse de la littérature scientifique dans la mathématisation des sciences physiques.

I.2.1. Analyse des manuels scolaires

Pour voir le degré de la mathématisation dans les programmes des sciences physiques de 2ème année de baccalauréat, nous avons mené une analyse qualitative de deux manuels de la physiques utilisés actuellement dans les écoles secondaires et qui sont édités en 2007 : *Manuel* Al Wadhih /Al Massar *(Option SVT) et Manuel* Al Wadhih / Al Massar *(Option PC)*.

Le premier point noté de cette lecture approfondie des deux manuels est que chaque partie fait appel à des compétences et/ou des notions mathématiques (***Tableau 2)*** *:*

Tableau 2 : Différentes parties des sciences physiques impliquant les mathématiques.

Parties du programme	***Connaissances mathématiques demandées***
Transformations nucléaires	Fonctions népériennes Fonctions exponentielles
Electricité	Equations différentielles
Mécanique	Intégrale Primitive

Autres	Ondes	Chimie
	Fonction linéaire & Fonction affine	Dérivabilité

En fait, toutes les parties traitées du programme des sciences physiques impliquent des connaissances mathématiques, ce qui confirme la place importante de la mathématisation dans le programme de 2ème année de baccalauréat marocain.

I.2.2. Etudes bibliographiques pour l'expérimentation 1

L'importance de la mathématisation dans les sciences physiques interpelle de plus en plus les chercheurs en éducation. Ces derniers, dans les deux dernières décennies, se sont focalisés soit sur la pratique de la mathématisation, soit sur l'usage des mathématiques dans la résolution des problèmes en physiques (***Tableau 3)***.

Tableau 3 : Exemples des études sur la mathématisation des sciences physiques.

		Articles	***Thématiques***
Sciences Physiques	***Physiques***	(Hu et al., 2019)	***Résolution des problèmes***
		(Meli et al., 2016)	
		(Zhang et al., 2022)	***Pratique de la mathématisation***
		(Kim et al., 2018)	
		(Kabil, 2015)	
	Chimie	(Bain et al., 2018)	***Résolution des problèmes***
		(Jensen et al., 2017)	
		(Bain et al., 2019a)	***Pratique de la mathématisation***

La recherche bibliographique affirme le constat stipulant que les mathématiques et les sciences physiques sont interreliées et que pour comprendre les phénomènes des sciences physiques, on ne peut pas contourner les mathématiques.

I.2.3. Elaboration des questionnaires

A l'issue des analyses des manuels scolaires et de la recherche bibliographique et pour répondre à nos objectifs de recherche, nous avons bâti un questionnaire papier-crayon structuré selon une sous-expérimentation distincte (*Annexe 1*).

L'expérimentation portant sur la perception des enseignants quant à la mathématisation des sciences physiques est structurée en deux sous expérimentations, comme illustré dans la *Figure 13*, ci-dessous :

- La première explore l'importance et les difficultés de l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques. Elle analyse également la perception des enseignants sur l'utilité des mathématiques pour comprendre et résoudre les problèmes physiques.
- La seconde examine plus spécifiquement les obstacles que les enseignants identifient dans l'application des mathématiques en sciences physiques, en se concentrant sur les défis auxquels font face les apprenants.

Cette structure vise à fournir une compréhension globale de la manière dont les enseignants perçoivent et intègrent les mathématiques dans leurs pratiques pédagogiques, en tenant compte des compétences et des besoins des apprenants.

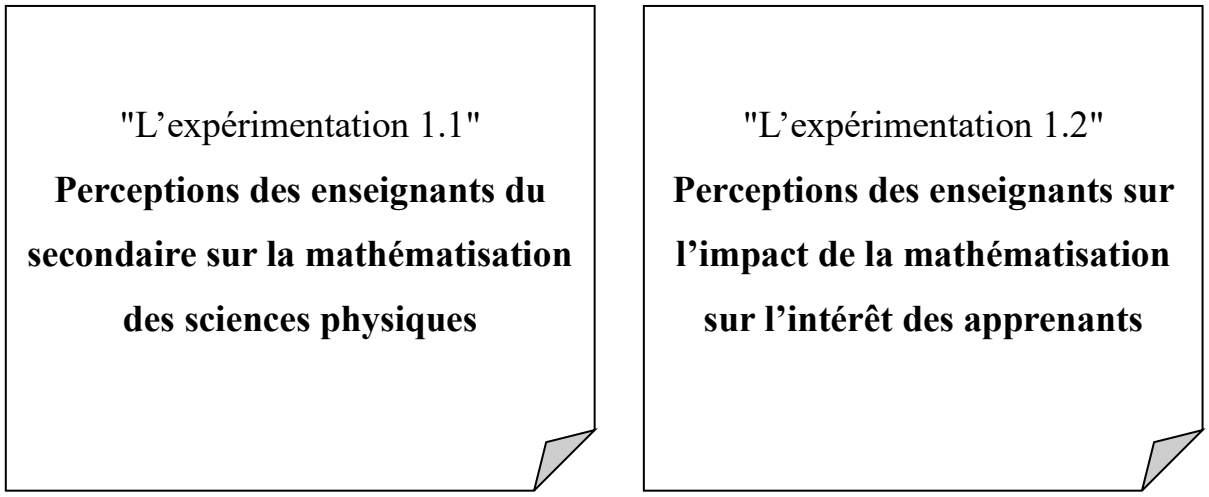


Figure 13 : Les expérimentations de point de vue enseignant.

I.2.3.1. Questionnaire de l'expérimentation 1.1

La première partie du questionnaire *(Expérimentation 1.1)* vise à identifier les perceptions des enseignants sur divers aspects de la mathématisation des problèmes physiques (*Tableau 4*). Les questions incluent des éléments sur les parties du programme nécessitant la mathématisation, les problèmes rencontrés par les apprenants, et l'impact des mathématiques sur l'enseignement et l'apprentissage (*Tableau 4).*

Tableau 4 : Objectifs et Élaboration des différentes questions de l'expérimentation 1.1.

	Question	***Objectif de la question***
Q 1	***Selon vous, quelle est la partie (ou les parties) du cours qui nécessite plus la mathématisation dans le programme du terminal.***	Identifier les perceptions des enseignants sur les parties du programme des sciences physiques en terminale.
Q2	***Selon vous, les problèmes les plus couramment rencontrés dans l'apprentissage des sciences physiques au terminal.***	Identifier les perceptions des enseignants sur les problèmes les plus rencontrés en physique.
Q 3	***Les mathématiques et les sciences physiques sont complémentaires d'une manière durable et continue.***	Identifier les perceptions des enseignants sur la relation entre les sciences physiques et les mathématiques.
Q 4	***Pour étudier un phénomène physique on a toujours recours à une intégration des mathématiques.***	Identifier les perceptions des enseignants sur l'intégration des mathématiques dans l'explication des phénomènes physiques ou chimiques.
Q 5	***La mathématisation représente une difficulté pour l'enseignement et l'apprentissage des sciences physiques.***	Identifier les perceptions des enseignants sur la difficulté de la mathématisation des sciences physiques dans le terminal.
Q 6	***Vos apprenants trouvent-ils des difficultés au niveau de la mathématisation des problèmes en physique.***	Identifier les perceptions des enseignants sur les types de difficultés liées à la mathématisation des sciences physiques.

Les questions de cette partie visent à comprendre les perceptions des enseignants sur la complémentarité entre mathématiques et sciences physiques et les défis liés à la mathématisation dans l'enseignement du secondaire.

I.2.3.1. Questionnaire de l'expérimentation 1.2

La seconde partie du questionnaire (*Expérimentation 1.2*) repose sur la même méthodologie et aborde un ensemble plus large de 12 questions (*Tableau 5*). Elle se concentre spécifiquement sur les perceptions des enseignants concernant la mathématisation des problèmes physiques, sa difficulté dans l'enseignement, son impact sur l'intérêt des apprenants, ainsi que sur la nécessité d'une pédagogie unifiée pour intégrer efficacement la mathématisation dans l'enseignement des sciences physiques. Cette deuxième enquête vise à approfondir la compréhension des processus de mathématisation et de leur influence sur la pédagogie de l'enseignement des sciences physiques (*Tableau 5*).

Tableau 5 : Elaboration des différentes questions de l'expérimentation 1.2.

	Question	***Objectif***
QQ1	***La mathématisation est une tentative de reconstruction des savoirs physiques.***	Identifier les perceptions des enseignants sur la mathématisation des problèmes physiques.
QQ2	***La mathématisation en sciences physiques dépend généralement du problème étudié.***	
QQ3	***La mathématisation des sciences physiques est la partie importante dans la résolution des problèmes.***	
QQ4	***La mathématisation n'est qu'une méthode de résolution de problèmes physiques.***	
QQ5	***La mathématisation est une vraie difficulté pour la résolution des problèmes en sciences physiques.***	Identifier les perceptions des enseignants sur la difficulté de la mathématisation dans la résolution des problèmes.
QQ6	***Vos apprenants trouvent-ils des difficultés au niveau de la mathématisation des problèmes en sciences physiques (oui ou non).***	

QQ7	***L'intérêt des apprenants se développe au cours de la mathématisation des problèmes.***	Identifier les perceptions des enseignants sur l'intérêt des apprenants pour la résolution des problèmes.
QQ8	***La mathématisation des problèmes peut influencer les attitudes des apprenants.***	
QQ9	***D'après votre expérience, un rappel mathématique est obligatoire pour résoudre un problème en sciences physiques.***	
QQ10	***Les rappels mathématiques peuvent influencer l'intérêt et les attitudes des apprenants pour la résolution des problèmes en sciences physiques.***	
QQ11	***La réussite dans l'enseignement des sciences physiques nécessite une pédagogie d'enseignement unifiée pour la mathématisation des sciences physiques.***	Identifier les perceptions des enseignants sur les processus de mathématisation des problèmes physiques.
QQ12	***La mathématisation des sciences physiques devient essentiellement un projet d'enseignement et d'apprentissage de la discipline.***	

Nous avons principalement élaboré des questions à choix multiples visant à déterminer les perceptions des enseignants concernant la difficulté de la résolution des problèmes physiques, notamment lorsque ces derniers nécessitent une plus grande utilisation des mathématiques. En effet, le questionnaire s'intéresse également à l'impact de la mathématisation sur l'intérêt des apprenants et sur la pédagogie de l'enseignement des sciences physiques.

I.2.4. Échelle des questionnaires

Dans les deux parties du questionnaire (*Annexe 1*), nous avons adopté une échelle Likert en quatre points :

- Tout à fait désaccord (*Strongly Disagree* (SD)) ;
- Désaccord (*Disagree* (D)) ;
- D'accord (*Agree* (A)) ;
- Tout à fait d'accord (*Strongly Agree* (SA)).

Pour les autres questions sont des items à choix multiple où les enseignants peuvent choisir une ou plusieurs cases en même temps avec une place pour d'autres commentaires ou suggestions.

I.2.5. Participants

Dans le présent travail, nous avons mené une étude empirique avec les enseignants de physique, notamment dans les écoles secondaires marocaines de la région de Fès-Meknès (*Annexe 2*). Cette enquête a pour finalité le diagnostic des perceptions des enseignants du secondaire qualifiants relatives à la mathématisation des sciences physiques. La population cible était les enseignant(e)s de l'enseignement secondaire qualifiant de la région de Fès-Meknès (*Annexe 2*). Elle se composait de 141 enseignants des sciences physiques, ce qui représente 17.11% de l'ensemble des enseignants de la région selon l'académie régionale de l'éducation et de formation de Fès-Meknès (*Annexe 2*).

I.2.6. Passation du questionnaire

Le questionnaire a été administré à un groupe de 141 enseignant(e)s de l'enseignement secondaire qualifiant de la région de Fès-Meknès, Maroc. Lors des réponses au questionnaire, les enseignants ont pris entre 10 à 20 minutes pour renseigner tout le questionnaire (*Annexe 1*). Nous avons par ailleurs précisé aux enseignants que le questionnaire est anonyme et qu'il n'a aucune relation avec leur pratique enseignante.

I.2.7. Traitements des données

Les résultats des données collectées ont été traités par le logiciel Microsoft Excel.

Afin de vérifier la cohérence interne et donc garantir la fiabilité de l'outil de mesure qui est le questionnaire, nous avons eu recours au test Alpha de Cronbach. La valeur obtenue est de l'ordre 0,85. Il faut noter que c'est une valeur supérieure au seuil recommandé (Bagozzi & Yi, 1988). En effet, une valeur alpha de Cronbach comprise entre 0,73 et 0,94 indique la validité d'un questionnaire. (Manis & Choi, 2019 ; Peterson, 1994 ; Schweizer, 2011).

Simpson, (1949) dans son paradoxe applique un indice qui s'appelle l'indice de Simpson. Cet indice représente la dominance ou la diversité d'un échantillonnage lorsque les choix des participants sélectionnés sont combinés. La formule originelle de Simpson, (1949) est :

$$\mathbf{C=\sum}(\boldsymbol{f_{relative}})^{\mathbf{2}} \qquad \textit{(E1)}$$

*Avec **f** est la fréquence relative pour chaque choix.*

Également, la littérature scientifique utilise fréquemment un second indice, qui est indice de diversité, correspondant à l'indice de Simpson (Huisman et al., 2015; McLaughlin et al., 2015, 2016). Cet indice de diversité est tout d'abord plus intuitif de lecture que l'indice de Simpson. Sa formule correspond à :

$$\mathbf{D=1-}\frac{\boldsymbol{\sum f.(f-1)}}{\boldsymbol{n.(n-1)}} \qquad \textit{(E2)}$$

*Avec **f** la fréquence de chaque choix et **n** le nombre total des participants (141 enseignants).*

Cette expérimentation nous a permis de mettre en lumière l'importance de la mathématisation dans l'enseignement des sciences physiques au niveau du baccalauréat

Marocain. Elle souligne également l'importance de la mathématisation des sciences physiques, afin d'améliorer l'enseignement de la discipline dans l'école marocaine.

II. Expérimentation 2 : La mathématisation des sciences physiques du volet apprenant

L'intégration des mathématiques dans l'apprentissage des sciences physiques est une composante essentielle du curriculum éducatif, particulièrement au niveau du secondaire (Huisman et al., 2015; Stillman & Brown, 2014; Vinitsky-Pinsky & Galili, 2014). Cependant, cette intégration pose souvent des défis significatifs aux apprenants, notamment lorsqu'il s'agit de mathématiser des concepts physiques complexes (Gustafsson et al., 2015; Wolff, 2020; Zaher & Damaj, 2018). Ces difficultés sont dues à des compétences mathématiques souvent insuffisantes et à une compréhension limitée des liens entre les modèles mathématiques et les phénomènes physiques qu'ils décrivent (Tuminaro, 2004; Tuminaro & Redish, 2007). Notons les mathématiques utilisées en sciences physiques, et les mathématiques pures, ont des objectifs distincts car le but des sciences physiques est la description et la compréhension d'un système physiques, et non la résolution d'équations (Hu et al., 2019; López-Gay et al., 2015).

Pour explorer ces enjeux, il est crucial de comprendre non seulement comment les apprenants perçoivent la mathématisation des concepts en sciences physiques, mais aussi comment cette perception influence leur capacité à maîtriser ces concepts. Afin de répondre à ces questions, nous avons adopté une approche méthodologique axée sur la Technique de Groupe Nominal (TGN), une méthode qualitative qui permet de recueillir et de structurer les perceptions individuelles dans un cadre de discussion collective (Claxton et al., 1980; Foth et al., 2016; Grenier & Lagarde, 2000; Hiligsmann et al., 2013; McLaughlin et al., 2015; McMillan et al., 2016) .

Cette technique est particulièrement adaptée à notre étude, car elle offre un moyen structuré d'examiner les différentes difficultés rencontrées par les apprenants lors de l'apprentissage du concept de *temps de demi-vie* d'une substance radioactive, tout en permettant une analyse des compétences mathématiques impliquées.

II.1. Méthodologies et Méthodes pour l'expérimentation 2

Cette expérimentation vise de dégager une compréhension claire des obstacles liés à la mathématisation en sciences physique et de proposer des pistes pour améliorer l'enseignement de ces concepts dans le contexte éducatif marocain.

Dans cette expérimentation, le concept retenu pour évaluer la compréhension et l'application des mathématiques en sciences physiques est le temps de demi-vie. Ce choix est motivé par la complexité et la pertinence de ce concept, qui nécessite une bonne maîtrise des notions mathématiques pour être correctement compris et appliqué. En sélectionnant ce concept, nous visons à observer comment les enseignants intègrent les mathématiques pour expliquer et approfondir ce phénomène auprès des apprenants, tout en identifiant les difficultés spécifiques que ce sujet peut poser dans un contexte éducatif.

II.2.1. Définition du temps de demi-vie

Le temps de demi-vie radioactive dans le programme marocain de secondaire est un concept de description des taux de substances radioactives par rapport au temps requis pour que la substance radioactive diminue à la moitié de sa valeur initiale. Ainsi, la demi-vie est le temps requis pour que la substance radioactive diminue son activité radioactivité A_0 à $A_0 / 2$. A savoir, la demi-vie est un concept fondamental incontournable de la radioactivité. Son importance se manifeste également par le fait qu'il soit utilisé dans plusieurs domaines disciplinaires totalement distincts (Bain et al., 2018, 2019b; Meyer & Vivier, 2007; Prather, 2005).

II.2.2. Technique de Groupe Nominale (NGT)

La Technique du Groupe Nominale (NGT) (Foth et al., 2016; Grenier & Lagarde, 2000; McMillan et al., 2016) ou la technique de Round Robine (Elmougy et al., 2017), est une technique de prélèvement de perceptions d'un groupe d'individus qui vise à obtenir un accord général ou une convergence d'opinion sur un sujet particulier (McMillan et al., 2014).

En effet, la Technique du Groupe Nominal (TGN) est une description optimale, objective, systématique et quantitative du contenu manifestant des communications. Le point fort de technique réside dans le fait qu'elle combine et alterne le travail individuel et la discussion du groupe (Hsu & Sandford, 2007).

En revanche, la TGN est une méthode très adaptable et généralement elle suit un nombre des étapes bien définies (Claxton et al., 1980). Ces étapes peuvent être influencées par, d'une part, le temps disponible pour la recherche et les participants, ou par le niveau de clarification, de généralisation requis pour le sujet (McMillan et al., 2014). D'autre part, la TGN peut être variée dans le processus de génération d'idées qui consiste à combiner les étapes avec clarification optimale (McMillan et al., 2016). Alors, la manière dont NGT est définie et opérationnalisé varie d'une étude à l'autre, en fonction des objectifs de chaque recherche (Black et al., 1999; Hiligsmann et al., 2013; Hutchings et al., 2010; Hutchins et al., 2020).

II.2.3. Participants

La population cible de cette recherche était les apprenants du dernier niveau de l'enseignement secondaire marocain. En effet, ce niveau d'enseignement est le terminal de l'enseignement secondaire marocain qui s'ouvre par un premier cycle d'enseignement secondaire collégial de trois ans, après les apprenants s'engagent dans l'enseignement secondaire qualifiant (lycée) qui comprend lui aussi trois ans : une année tronc commun et deux ans du baccalauréat. L'étude est faite avec les apprenants de la deuxième année du baccalauréat (le terminal) de la filière d'enseignement général option physiques.

L'échantillon de la recherche se compose d'une classe de la deuxième année du baccalauréat, option sciences physiques, de 17 à 19 ans (18 apprenants), au cours du semestre d'automne de l'année scolaire 2021-2022.

II.2.4. Collecte des données

Après l'apprentissage des apprenants la partie des transformations nucléaires : La partie sciences physiques qui contient le concept de temps de demi-vie. Nous avons rassemblé dans une classe un groupe de 18 apprenants de deuxième année baccalauréat option physiques.

Nous avons amené notre groupe à s'exprimer librement et nous leurs avons posé la question nominale suivante :

Quelles sont les difficultés que vous avez rencontrées lors de l'apprentissage du concept de temps de demi-vie ?



Pour répondre à cette question en mettant en œuvre la technique de groupe nominal (TGN), l'expérimentation est structurée selon les étapes suivantes :

- **Étape 1 :** Chaque participant écrit les solutions qu'ils jugent réponse à la question nominale. Les participants ont jusqu'à vingt minutes pour réfléchir en écrivant leurs idées individuelles ;

- **Étape 2 :** Recueil des idées produites par les participants dans un format de tour de rôle jusqu'à ce qu'aucune nouvelle réponse n'émerge. Les idées recueillies par l'animateur se partagent et s'exposent devant le groupe : Chaque idée est écrite sur un tableau blanc modifiable. L'animateur demande ensuite à un participant à la fois d'exposer une seule idée au groupe, selon le principe du "*Round Robin*" (*Le Round Robin (RR) décrit une stratégie dite du tourniquet où on procède à un recyclage des processus sur le processeur tant que ceux-ci ne se sont pas terminés. Lorsqu'un processus est élu, on lui attribue une tranche de temps fixe, appelé quantum, pendant laquelle il s'exécute*). Les participants peuvent penser à de nouvelles idées pendant ce processus, mais doivent attendre leur tour avant de pouvoir les partager avec le groupe et les écrire sur le tableau. Cette étape dure autant de temps que nécessaire jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de nouvelles idées ;

- **Étape 3 :** L'animateur veille à clarifier le sens des différentes propositions énoncées. Il peut en annuler certaines si elles sont jugées redondantes ou non pertinentes par rapport à la problématique. L'animateur dans cette étape ne doit pas diriger les participants pendant le processus de clarification, ce qui peut rendre cette étape particulièrement difficile. Cette étape dure jusqu'à trente minutes pour écrire toutes les réponses jugées judicieuses ;

- **Étape 4 :** Discussion de groupe après la présentation des réponses retenues. Toutes les idées doivent être discutées afin de s'assurer de la compréhension des participants, ce qui leur permettra de prendre une décision éclairée au moment de voter sur les idées dans l'étape suivante. L'animateur doit insister sur le fait que les participants ne sont pas obligés d'être d'accord avec toutes les idées énumérées car, à la fin de la phase de clarification, les participants peuvent ignorer les idées en votant sur leurs préférences personnelles dans l'étape qui suit. Cette étape dure jusqu'à trente minutes ;

- **Étape 5 :** Les participants sont invités à voter et à choisir 8 propositions parmi celles présentées et les classer par ordre de priorité. Cette étape dure autant de temps que nécessaire jusqu'à les participants classent 8 propositions les plus importantes. Conscient du fait que les propositions de réponses citées en premier sont les plus significatives, nous avons attribué à chacune des réponses une note de pondération *pi* qui décroît de la première réponse.

Enfin, les données obtenues dans cette expérimentation ont été traitées avec les mêmes outils que dans la première expérimentation, à savoir Excel.

En résumé, la méthodologie adoptée dans cette recherche vise des expérimentations auprès des enseignants et des apprenants du secondaire qualifiant marocain. Par des méthodes d'analyse diverses, alliant analyses qualitatives et quantitatives nous estimons recueillir des données pertinentes pour la problématique de la recherche.

La section suivante présentera les résultats obtenus et proposera une discussion détaillée, mettant en lumière des pistes d'amélioration pour renforcer l'enseignement des sciences physiques à travers l'intégration des mathématiques.

Partie V

Résultats et Discussions

Chapitre 1

Expérimentation 1 : La mathématisation des sciences physiques du volet enseignant

Introduction

Ce chapitre présente et analyse les résultats des expérimentations menées dans la partie méthodologie de cette recherche. Ces expérimentations, articulées autour des perceptions des enseignants sur la mathématisation des sciences physiques, visent à explorer les enjeux pédagogiques, méthodologiques et cognitifs liés à l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques au niveau secondaire.

À travers une analyse croisée des données obtenues, ce chapitre vise à confirmer ou infirmer les hypothèses formulées dans cette recherche, tout en évaluant la pertinence des objectifs poursuivis. Les résultats sont discutés à la lumière des cadres théoriques mobilisés et des pratiques éducatives observées, afin de fournir des pistes concrètes pour améliorer l'enseignement des sciences physiques dans le contexte marocain.

I. Expérimentation 1 : Perceptions des enseignants du secondaire sur la mathématisation des sciences physiques

II.1. Résultats de l'Expérimentation 1.1

Question 1 : Selon vous, quelle est la partie (ou les parties) du cours qui nécessite plus la mathématisation dans le programme du terminal.

La première question a été posée de manière à ce que les enseignants puissent choisir une ou plusieurs réponses en même temps.

Les résultats obtenus ***(Tableau 6)*** :

Tableau 6 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant les parties du cours qui nécessitent plus la mathématisation.

Transformations Nucléaires (TR)	***Electricité (E)***	***Mécanique (M)***	***Autres***	
137	113	131	35	
97,16%	80,14%	92,90%	24,82%	
Total des enseignants				141
Total des réponses				416

Selon le *Tableau 6 :*

- Transformations Nucléaires (TR) : Choisie par 97,16% des enseignants.
- Électricité (E) : Choisie par 80,14% des enseignants.
- Mécanique (M) : Choisie par 92,90% des enseignants.
- Autres : Choisie par 24,82% des enseignants, avec mentions spécifiques pour les ondes (13%) et la cinétique chimique (11%).

Selon ces données, les trois parties : Transformations Nucléaires (TR), Electricité (E) et Mécanique (M) ont été choisies par plus de 80% de la population interrogée. On peut donc dire que plus de 4/5 des enseignants de la région Fès-Meknès estiment que ces trois parties des sciences physiques exigent la mathématisation. Il faut noter que la partie TR est celle qui a le plus recours aux mathématiques puisque le pourcentage des enseignants l'ayant choisie avoisine le 100%.

Question 2 : Selon vous, les problèmes les plus couramment rencontrés dans l'enseignement des sciences physiques au terminal sont :

Pour la question *Q2 -Comme pour la question Q1-* la population interrogée avait le choix de choisir une ou plusieurs propositions parmi les quatre proposées. Ces différentes propositions ont été déduites de la recherche bibliographique. En effet, nous nous sommes basés -entre autres- sur le travail de (Jensen et al., 2017).

Les données obtenues sont présentées dans ***Tableau 7*** *:*

Tableau 7 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant les problèmes les plus couramment rencontrés dans l'enseignement des physiques au terminal.

Les problèmes qui nécessitent peu de physiques et le travail consiste principalement à mathématiser la situation	Les problèmes qui nécessitent une analyse physiques approfondie avant de penser à mathématiser la situation.	Les problèmes qui nécessitent d'effectuer des mathématiques avant les physiques pour intervenir au problème.	Les problèmes qui nécessitent une implication simultanée de la physiques et les mathématiques et non séparément.	
84	97	89	96	
22,95%	26,50%	24,31%	26,22%	
		Total des enseignants		141
		Total des réponses		366

Selon ces données, il semble que :

- 22,95% des enseignants estiment qu'en sciences physiques, les problèmes (activités d'apprentissage) nécessitent peu de fondements physiques, et que le travail consiste principalement à mathématiser la situation.
- 26,50% de la population des enseignants interrogés estiment que les problèmes les plus fréquemment rencontrés sont ceux qui nécessitent une analyse physiques approfondie avant de penser à mathématiser la situation ;
- 24,31% des enseignants pensent que les problèmes nécessitent d'abord d'effectuer la mathématisation de la situation comme une étape primaire avant l'interprétation physiques du problème ;
- 26% des participants estiment que les problèmes en sciences physiques nécessitent une implication simultanée de la physiques et les mathématiques que nous ne pouvons pas séparer pour résoudre une situation physique.

Question 3 : Les mathématiques et les sciences physiques sont complémentaires d'une manière durable et continue.

Les résultats obtenus rassemblés dans la *(***Figure 14***)* *:*

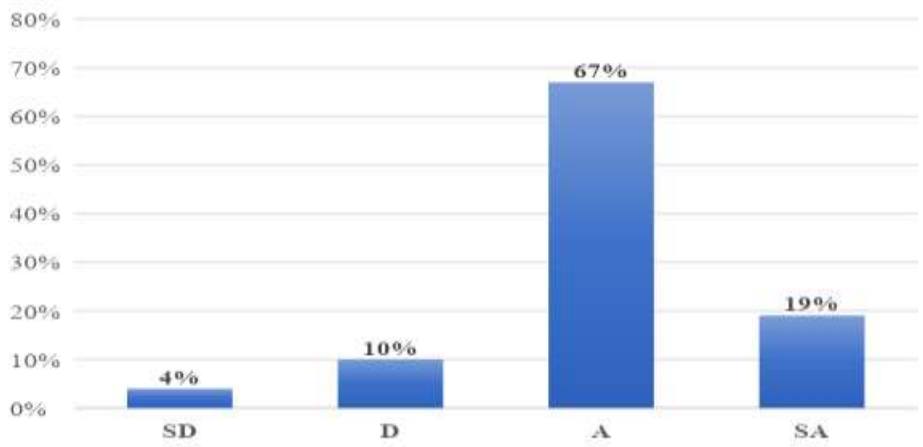


Figure 14 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la complémentarité de la physiques et les mathématiques.

Selon l'histogramme :

- 67% des enseignants interrogés sont d'accord et 19% sont tout à fait d'accord ;
- 14% des enseignants sont en désaccord (10%) et 4% ne sont pas du tout d'accord.

Question 4 : Pour étudier un phénomène physique on fait toujours recours à l'intégration des mathématiques.

Les données obtenues sont illustrées dans l'histogramme ci- dessous :

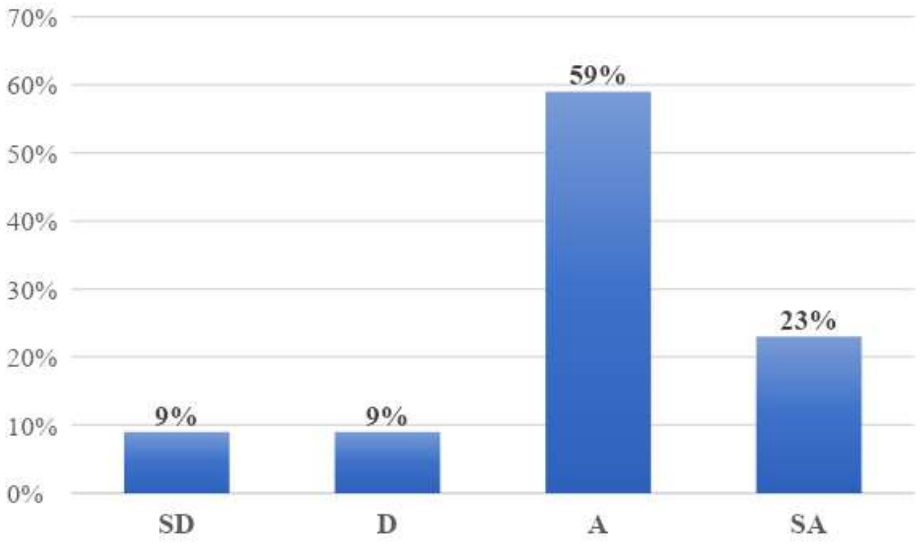


Figure 15 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants à l'intégration des mathématiques dans l'interprétation des phénomènes physiques.

Ces données mettent en évidence :

- La majorité des enseignants de la physiques enquêtées (82%) sont en accord avec le fait que pour étudier un phénomène physique, on est obligé de passer par les mathématiques : 59% ont opté pour le choix d'accord et 23% ont choisi la modalité de réponse fortement d'accord.
- Seul 18% des enseignants ont manifesté le désaccord à cette proposition : désaccord (9%) pas du tout d'accord (9%).

Question 5 : La mathématisation représente une difficulté dans l'enseignement des sciences physiques.

Les pourcentages des réponses de la question (*Q5*) sont présentés dans l'histogramme suivant :

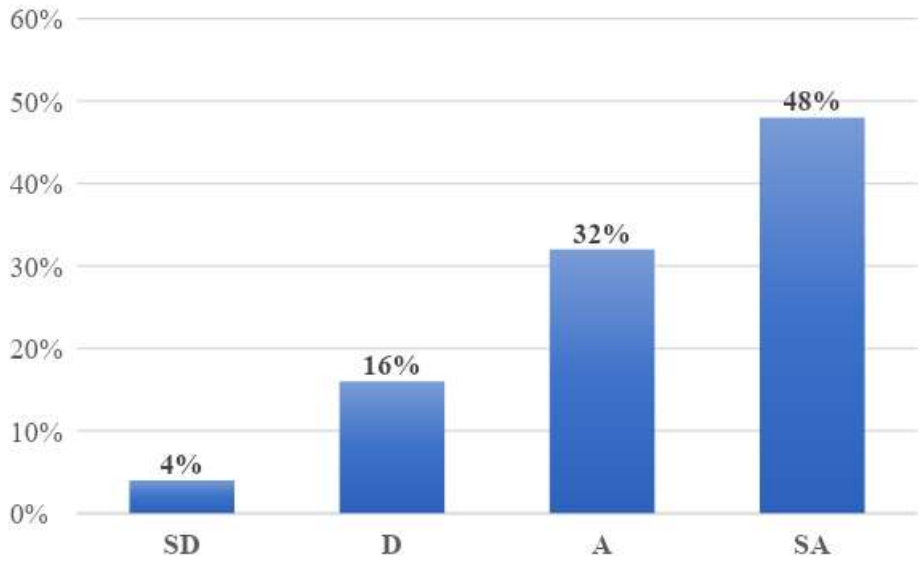


Figure 16 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants à la difficulté de la mathématisation dans l'apprentissage des sciences physiques.

La lecture des données permet de voir que :

- Environ la moitié des enseignants interrogés expriment un accord très prononcé avec la proposition (48% sont tout à fait d'accord) stipulant qu'ils rencontrent des difficultés lorsqu'ils enseignent.
- 32% des enseignants sont d'accord avec cette proposition ;
- Le pourcentage des enseignants exprimant le désaccord se limite à 20% (16% sont en désaccord et 4% sont tout à fait en désaccord).

Question 6 : Vos apprenants trouvent-ils des difficultés au niveau de la mathématisation des sciences physiques.

La question 6 est une question disjonctive et donc le choix ne peut être que oui ou non.

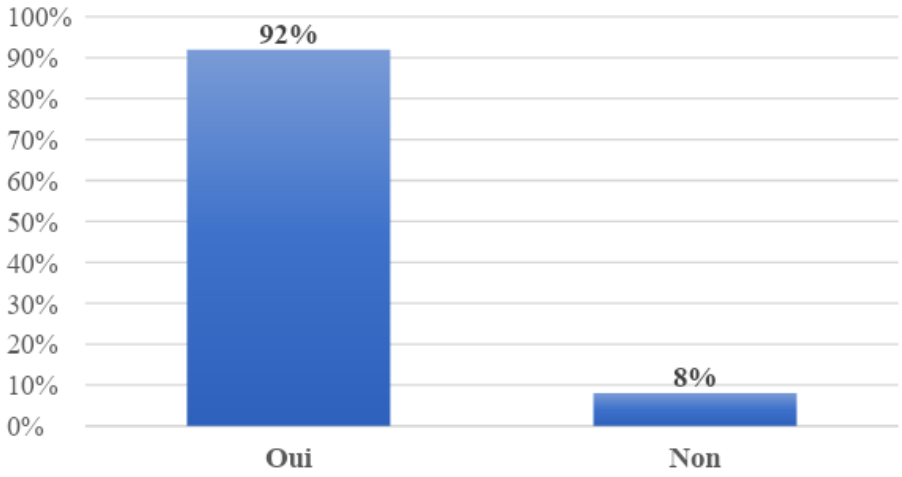


Figure 17 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants aux difficultés liées à la mathématisation des sciences physiques chez les apprenants.

D'après l'histogramme ci-dessus, la quasi-totalité des enseignants semble affirmer que leurs apprenants rencontrent des difficultés avec la mathématisation des sciences physiques. En effet, 92% des enseignants ont répondu par Oui et seuls 8% de la population interrogée ont opté pour la modalité de réponse Non.

Nous avons par la suite demandé aux enseignants qui ont répondu oui de préciser les causes des difficultés. Plusieurs réponses ont été données :

- *Les apprenants n'arrivent pas à comprendre les significations physiques des symboles et/ou des formules mathématiques.*
- *Les apprenants n'arrivent pas à interpréter physiquement les équations mathématiques.*
- *Les enseignants ont cité également que leurs apprenants rencontrent des difficultés avec les processus mathématiques dans la résolution des problèmes physiques.*

II.2. Discussion de l'Expérimentation 1.1

I.2.1. Identification des parties du cours nécessitant la mathématisation (*Question Q1*)

Les résultats de la question *Q1* du ***Tableau 6*** indiquent que la majorité des enseignants identifient les Transformations Nucléaires, l'Électricité, et la Mécanique comme les parties du cours nécessitant plus de mathématisation. Ces choix confirment les études qui montrent la forte dépendance des sciences physiques aux mathématiques pour la résolution de problèmes complexes (Byun & Lee, 2014; Ceuppens et al., 2019; Haeruddin et al., 2020; Tuminaro & Redish, 2007). Afin de voir s'il y a d'autres parties de sciences physiques non citées dans les propositions mentionnées dans le questionnaire, nous avons ajouté la proposition autres (*Annexe 1*). Le pourcentage des enseignants ayant renseigné cette modalité de réponse n'a pas dépassé 24%. Ils ont évoqué deux nouvelles thématiques : les ondes (13%) et la cinétique chimique (11%).

On peut noter que les réponses des enseignants à la question *Q1* vont dans le même sens que les données issues de l'analyse des manuels scolaires ***Tableau 2*** et celles relatées par la littérature ***Tableau 3***. Ainsi, par exemple, dans le cas de la TR, la fonction népérienne et la fonction exponentielle sont nécessaires pour résoudre les problèmes sur les phénomènes de physique nucléaire. Nous affirmons que les systèmes nucléaires offrent aux apprenants et aux enseignants des occasions intéressantes d'intégration des connaissances mathématiques dans le contexte de calcul de temps de demi-vie. Quant à la partie d'Electricité (E), elle ne peut être comprise sans passer les équations différentielles et leurs solutions ***Tableau 2***.

En effet, les équations des dipôles électriques nécessitent obligatoirement une maîtrise de l'intégrale et de la primitive, elles sont obligatoires pour résoudre une situation en électricité. Cela peut ajouter une difficulté supplémentaire comme le précise Leone, (2014) qui dit que les circuits électriques constituent déjà une difficulté conceptuelle pour les apprenants du secondaire et cette relation avec les mathématiques rend la situation encore plus difficile *(Q5)*.

L'intégrale et la primitive sont également indispensables pour résoudre les problèmes en relation avec les équations horaires de mouvement d'un système mécanique (M) comme le projectile. Dans ce contexte, (Kim et al., 2018) dans leurs recherches ont montré que

l'équation en sciences physiques représente des symboles qui modélisent mathématiquement les connaissances conceptuelles de la physique.

En revanche, l'analyse des manuels choisis ***Tableau 2*** nous a montré que les fonctions linéaires et les fonctions affines sont des connaissances mathématiques essentielles pour la lecture graphique de certaines thématiques en sciences physiques comme les ondes. De plus, la dérivabilité semble une connaissance importante dans le calcul de la vitesse de réaction chimique. Dans le même sens, (Rodriguez et al., 2018) ont conclu que la compréhension des problèmes en cinétique chimique nécessite deux caractéristiques principales associées aux équations mathématiques (formes symboliques).

Selon ce qui précède, toutes les parties du programme de sciences physiques destinées aux classes de terminale exigent des manipulations mathématiques (A. El Azzouzi et al., 2023; A. E. El Azzouzi et al., 2022). En effet, les sciences physiques avec ses aspects éducatifs paraît un domaine disciplinaire qui a le pouvoir d'intégrer d'autres disciplines comme les mathématiques en profondeur dans leurs pratiques pédagogiques (Başkan et al., 2010; Kabil, 2015; Pospiech et al., 2019). En conséquence, les données de la littérature stipulent que les sciences physiques représentent la discipline la plus fondamentale dans le domaine des sciences et technologie ayant des implications mathématiques profondes (Haeruddin et al., 2020; Hu et al., 2019; Wolff, 2020).

Pour évaluer s'il existe une dominance particulière parmi les choix effectués par les enseignants concernant les parties du programme de physique nécessitant davantage de mathématisation, nous avons utilisé l'indice de (Simpson, 1949). Cet indice permet de mesurer la dominance (*E1*) ou la diversité (*E2*) des choix. Un indice de Simpson proche de 1 (C_{max} (*E1*)) indique que les choix des enseignants sont homogènes, tandis qu'un indice proche de 0 (C_{min} (*E1*)) révèle une grande diversité de choix. Dans notre étude, l'indice de Simpson obtenu pour la question *Q1* est de 0,3289, indiquant une certaine diversité parmi les réponses des enseignants.

Parallèlement, la valeur de D (indice de diversité (*E2*)) est calculée pour analyser la diversité des choix, en contraste avec la valeur C (indice d'homogénéité (*E1*)). Une valeur de D proche de 1 indique une forte diversité des choix, tandis qu'une valeur proche de 0 signale une homogénéité marquée. Dans cette étude, nous avons obtenu une valeur de D égale à 0,7124, ce qui confirme que les réponses des enseignants à la question *Q1* sont diversifiées. Cette observation corrobore les résultats fournis par l'indice d'homogénéité, indiquant une absence de consensus marqué parmi les enseignants.

En nous basant sur les valeurs de l'indice de dominance et de l'indice de diversité, il apparaît qu'il n'y a pas de consensus parmi les enseignants quant aux parties du programme de physique qui nécessitent plus de mathématisation. Cela reflète probablement une variété d'approches pédagogiques et de perceptions quant à l'importance de la mathématisation dans l'enseignement de la physique. Ainsi, même si une majorité d'enseignants considère que toutes les thématiques étudiées en terminale nécessitent un certain degré de mathématisation, aucune méthode uniforme ou standardisée n'émerge de l'ensemble des réponses collectées.

I.2.2. Nature des problèmes fréquemment rencontrés (*Question Q2*)

L'analyse de la question *Q2* vise à identifier, à travers les perceptions des enseignants, la nature des problèmes les plus couramment rencontrés dans l'enseignement des sciences physiques au niveau terminal. Selon les données recueillies, chaque proposition de réponse a reçu environ un quart des réponses, indiquant une diversité d'opinions parmi les enseignants sur les difficultés prédominantes. Sur un total de 366 réponses fournies par 144 enseignants, chaque enseignant a en moyenne sélectionné deux propositions, ce qui reflète la complexité et la variabilité des défis pédagogiques rencontrés avec la mathématisation des sciences physiques (Jensen et al., 2017; Koul et al., 2011).

Les enseignants avaient la possibilité de choisir une ou plusieurs réponses parmi quatre propositions. Les résultats du ***Tableau 7***, indiquent une pluralité de points de vue sur les méthodes pédagogiques optimales, suggérant que les défis de l'enseignement des sciences physiques au terminal varient considérablement selon les contextes d'apprentissage et les pratiques pédagogiques. Une étude récente souligne que les enseignants confrontés à des situations d'apprentissage complexes doivent souvent adapter leurs stratégies pour intégrer de manière cohérente les concepts mathématiques et physiques, et favoriser une compréhension approfondie chez les apprenants (Ceuppens et al., 2019).

Les réponses des enseignants indiquent la nécessité d'une approche flexible et interdisciplinaire pour l'enseignement des sciences physiques. Les défis spécifiques, tels que l'équilibre entre mathématisation et analyse physique, exigent des ajustements pédagogiques adaptés aux besoins variés des apprenants pour améliorer l'efficacité des pratiques pédagogiques dans ce domaine (Arbia et al., 2021; Zeidmane, 2013).

Pour vérifier s'il y a ou non une dominance particulière des différents choix des enseignants, nous avons eu recours à l'indice de Simpson qui exprime la dominance *(E1)* ou la

diversité *(E2)* (Simpson, 1949). Plus cet indice est proche de 1 ($\mathbf{C_{max}}$ (*E1*)), plus les choix sont homogènes, en revanche, plus il est proche de 0 ($\mathbf{C_{min}}$ (*E1*)), plus les choix sont diversifiés. Dans le présent travail nous avons eu 0,2508 comme une valeur de l'indice de Simpson donc nous pouvons déduire que les choix de la question *Q2* sont diversifiés.

La valeur de **D** (indice de diversité (*E2*)) varie de manière opposée à la valeur **C** (indice d'homogénéité (*E1*)). Lorsque **D** est proche de 1, plus les choix sont diversifiés. Plus **D** est proche de 0 (*E2*), plus les choix sont homogènes. Dans cette étude nous avons eu 0,6836 comme un indice de diversité ce qui signifie que les choix de la question *Q2* sont diversifiés. Cette conclusion confirme les résultats de l'indice d'homogénéité.

Selon les valeurs de *l'indice de dominance* et *l'indice de diversité*, on peut dire qu'il n'y a pas de consensus d'enseignant. Partant du principe que le choix d'une proposition par un enseignant reflète sa manière d'aborder les problèmes en physique, on peut stipuler que, bien que la majorité des enseignants interrogés admettent que toutes les thématiques de la physique étudiées en terminale nécessitent la mathématisation, il n'existe pas chez les enseignants questionnés de méthode unifiée et normalisée pour le traitement des problèmes en physique.

I.2.3. Complémentarité durable entre mathématiques et sciences physiques (Question Q3)

La question *Q3* explore la perception des enseignants concernant la complémentarité durable et continue entre les mathématiques et les sciences physiques dans l'enseignement. Les résultats montrent que 86 % des enseignants interrogés (67 % d'accord et 19 % tout à fait d'accord) considèrent que ces deux disciplines sont complémentaires de manière durable et continue. Ces résultats confirment l'importance d'une intégration continue des mathématiques et des sciences physiques dans l'enseignement, une idée largement soutenue par la littérature récente (Bain et al., 2019; A. El Azzouzi et al., 2023a; Rodriguez et al., 2018). Selon (E. F. Redish & Kuo, 2015), la relation entre les mathématiques et les sciences physiques permet non seulement de renforcer la compréhension conceptuelle des apprenants, mais aussi de développer des compétences en résolution de problèmes complexes, essentielles dans la formation scientifique. (Haeruddin et al., 2020) argumentent également que cette intégration aide les apprenants à faire des liens entre les concepts abstraits et les applications réelles, rendant l'apprentissage plus significatif et durable. De plus, (Bărboianu & Romanian Academy - Iasi Branch, 2022) soulignent que l'enseignement interdisciplinaire améliore la capacité des

apprenants à transférer des connaissances entre différents domaines scientifiques, un objectif crucial dans l'éducation moderne.

I.2.4. Intégration des mathématiques dans l'étude des phénomènes physiques (*Question Q4*)

La question *Q4* s'intéresse à l'importance de l'intégration des mathématiques dans l'étude des phénomènes physiques. Les données révèlent que 82 % des enseignants pensent que l'utilisation des mathématiques est essentielle pour interpréter les phénomènes physiques (59 % d'accord et 23 % tout à fait d'accord). Ces résultats sont en accord avec les recherches de (Pospiech, 2019) qui montrent que les mathématiques jouent un rôle crucial dans la compréhension et l'analyse des phénomènes physiques.

Selon (Schoenfeld, 2020), l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques permet aux élèves de développer des compétences en raisonnement logique et analytique, ce qui est fondamental pour leur développement scientifique. Par ailleurs, (Aldahmash & Alamri, 2020) notent que l'utilisation des mathématiques dans le cadre des sciences physiques renforce la capacité des apprenants à conceptualiser des idées abstraites et à appliquer des concepts scientifiques dans des contextes réels. Cette approche est également soutenue par (Geyer & Kuske-Janßen, 2019), qui montrent que l'intégration des mathématiques favorise l'engagement des apprenants et améliore leur compréhension globale des concepts scientifiques.

I.2.5. Difficulté de la mathématisation dans l'enseignement des sciences physiques (*Question Q5*)

Les résultats de la question *Q5* les enseignants font part de la difficulté dans l'enseignement des sciences physiques basées essentiellement sur les mathématiques. Environ 48 % des enseignants sont tout à fait d'accord pour dire que la mathématisation représente une difficulté majeure, et 32 % sont d'accord. Ces données sont conformes avec l'étude menée par (Hu & Rebello, 2013) qui montre la complexité d'expliquer et de comprendre les équations mathématiques dans les cours de sciences physiques. En effet, cette situation selon (Hu & Rebello, 2013) possède une difficulté au niveau de l'enseignement de la discipline car l'interaction entre les mathématiques et les sciences physiques devient un mélange improductif éducativement.

Les résultats de la question *Q5* soulignent également que la mathématisation est un défi important dans l'enseignement des sciences physiques. Selon Bresson, (1973) la mathématisation est souvent perçue comme un obstacle par les apprenants en raison de la complexité des concepts mathématiques nécessaires pour comprendre les phénomènes physiques. Cette difficulté est accentuée par le manque de stratégies pédagogiques adéquates pour enseigner ces concepts de manière accessible. Nous suggérons que pour surmonter ces défis, les enseignants devraient adopter des méthodes plus interactives et contextuelles, telles que l'apprentissage par enquête ou l'utilisation de simulations numériques, afin de rendre la mathématisation plus engageante et significative pour les apprenants (A. El Azzouzi et al., 2023, 2023; A. E. El Azzouzi et al., 2022).

I.2.6. Difficultés des apprenants avec la mathématisation des sciences physiques (*Question Q6*)

Les enseignants questionnés dans cette question *(Q6)* ont cité quelques difficultés de la mathématisation des sciences physiques. D'après les résultats, presque la totalité des enseignants affirment que leurs apprenants trouvent une difficulté avec la mathématisation des sciences physiques (92% des enseignants ont répondu par Oui).

Nous avons par la suite demandé aux enseignants qui ont répondu oui de préciser les causes des difficultés. Plusieurs réponses ont été données :

- *Les apprenants n'arrivent pas à comprendre les significations physiques des symboles et/ou des formules mathématiques.*
- *Les apprenants n'arrivent pas à interpréter physiquement les équations mathématiques.*
- *Les enseignants ont cité également que leurs apprenants rencontrent des difficultés avec les processus mathématiques dans la résolution des problèmes physiques.*

Ces difficultés sont déjà représentées par la littérature scientifique. (Hu & Rebello, 2013) ont conclu que nombreux sont les apprenants qui n'arrivent pas à combiner leurs connaissances mathématiques avec les sciences physiques de manière productive, bien qu'ils possèdent les connaissances mathématiques requises. Dans ce sens, (E. F. Redish, 2005) a souligné également que les enseignants sont souvent surpris par leurs apprenants qui peuvent exceller dans le cours de mathématiques mais ils peuvent trouver des difficultés dans la mathématisation des sciences physiques.

Également, (Kabil, 2015) a souligné que les enseignants ont montré que les apprenants n'arrivent pas à faire une adaptation des formules, des équations et /ou des manipulations mathématiques à la situation problématisée. Dans ce contexte, (Zeidmane, 2013) a montré que le développement des compétences d'un apprenant, il est essentiellement lié par le bon attachement entre les pratiques physiques et les manipulations mathématiques.

Alors, l'analyse des perceptions des enseignants questionnés nous a montré que les apprenants marocains ont vraiment une difficulté en mathématisation des sciences physiques. Cela confirme les conclusions de (Tuminaro, 2004) qui ont montré que nombreux sont les enseignants des sciences physiques de l'enseignement secondaire qui insistent sur les difficultés des apprenants en leur manque de connaissances mathématiques.

II.3. Résultats de l'Expérimentation 1.2

Les résultats de cette expérimentation *"Expérimentation 1.2"* sont présentés selon quatre axes.

I.3.1. <u>Axe 1 :</u> Avis des enseignants sur la mathématisation des problèmes physiques.

Question 1 : La mathématisation est une tentative de reconstruction les savoirs physiques.

Les résultats obtenus mettent en évidence la relation entre les sciences physiques et les mathématiques. D'ailleurs, la majorité des enseignants des sciences physiques enquêtés (63%) sont en accord (32%) ou tout à fait d'accord (31%) et ils affirment que la mathématisation est une tentative de reconstruction des savoirs physiques ***(Figure 18)***. A l'opposé de 37% des enseignants qui sont en Désaccord (24%) et pas du tout d'accord (13%) ***(Figure 18)***.

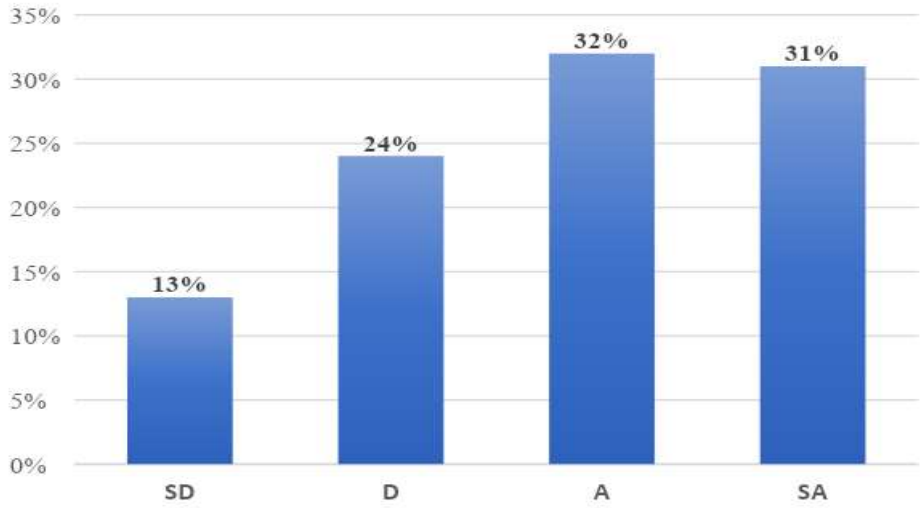


Figure 18 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la mathématisation des sciences physiques.

Question 2 : La mathématisation en sciences physiques dépend généralement du problème étudié.

Pour les données de cette question *(Q2)*, nous avons constaté que 51% des enseignants sont d'accord et ils affirment que la mathématisation des sciences physiques dépend généralement du problème étudié ***(Figure 19)***. Aussi, 24% des enseignants sont tout à fait d'accord avec cette opinion ***(Figure 19)***. Par contre, 25% s'opposent à cet avis (20% sont en désaccord et 5% sont tout à fait en désaccord ***(Figure 19)***).

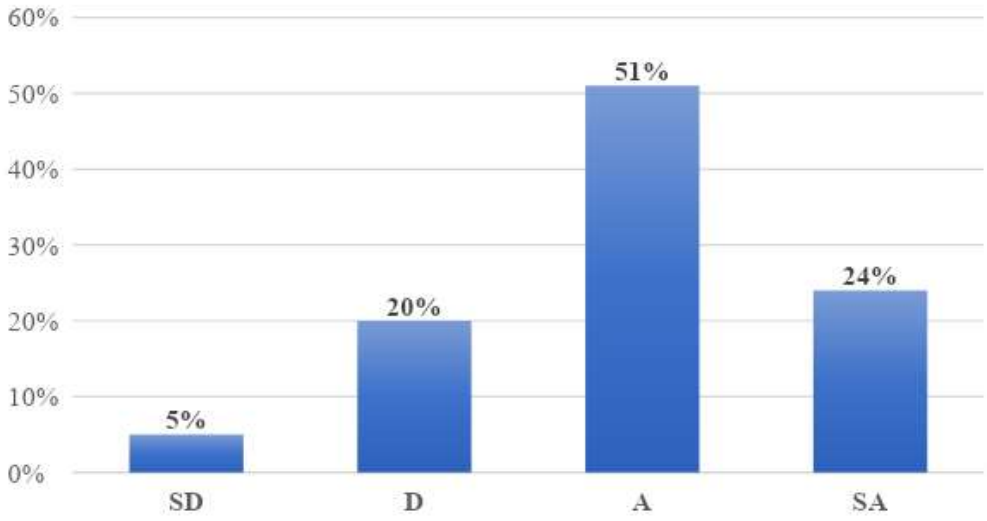


Figure 19 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la relation entre la mathématisation et les problèmes en sciences physiques.

Question 3 : La mathématisation des sciences physiques est la partie importante dans la résolution des problèmes.

Les résultats obtenus nous ont montré que 27% des enseignants interrogés sont tout à fait en désaccord avec le fait que la mathématisation des sciences physiques est la partie importante dans la résolution des problèmes ***(Figure 20)***. Dans le même sens, 35% des enseignants sont en désaccord ***(Figure 20)***. Cependant, 38% des enseignants désapprouvent cette affirmation (28% sont d'accord et 10% sont tout à fait d'accord ***(Figure 20)***).

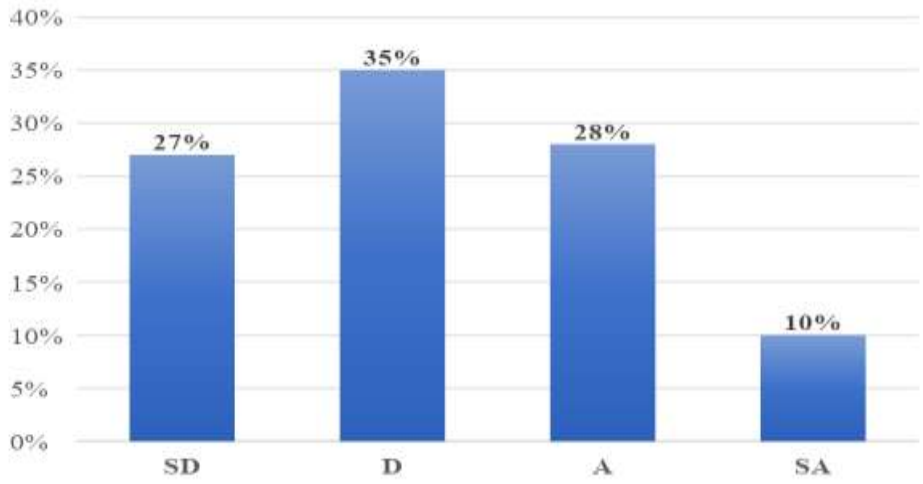


Figure 20 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant l'importance de la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques.

Question 4 : La mathématisation n'est qu'une méthode de résolution de problèmes physiques.

Les résultats obtenus montrent que 42% des enseignants interrogés sont d'accord que la mathématisation n'est qu'une méthode de résolution de problèmes physiques ***(Figure 21)***. Dans le même sens, 11% des enseignants sont tout à fait d'accord que la mathématisation n'est pas la partie majeure dans la résolution des problèmes ***(Figure 21)***. Cependant, 47% des enseignants désapprouvent cette affirmation (33% sont en désaccord et 14% sont tout à fait en désaccord ***(Figure 21)***).

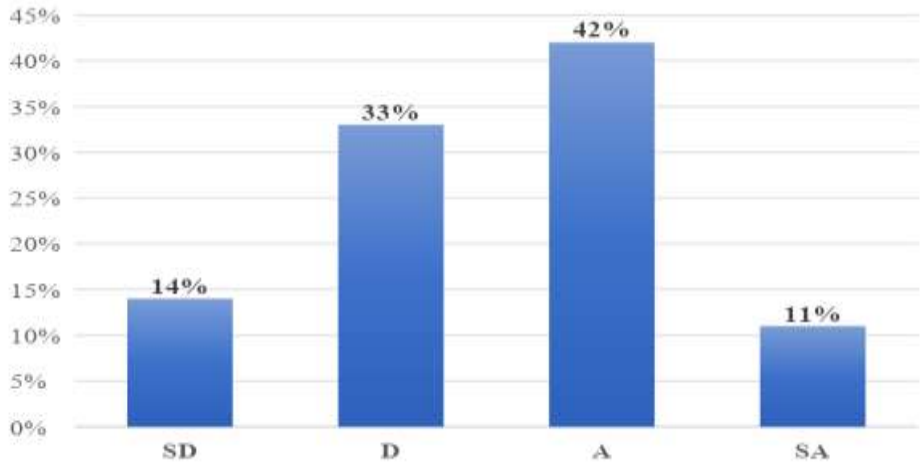


Figure 21 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la place de la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques.

I.3.2. Axe 2 : Avis des enseignants sur la difficulté de la mathématisation dans la résolution des problèmes.

Question 5 : La mathématisation est une vraie difficulté pour la résolution des problèmes en sciences physiques.

Pour cette question *(Q5)*, la majorité des enseignants enquêtés (75%) sont en accord (19%) ou tout à fait d'accord (56%) que la mathématisation est une vraie difficulté pour la résolution des problèmes en sciences physiques ***(Figure 22)***. Par contre 25% de ces enseignants sont en désaccord (18%) ou tout à fait en désaccord (7%) ***(Figure 22)***.

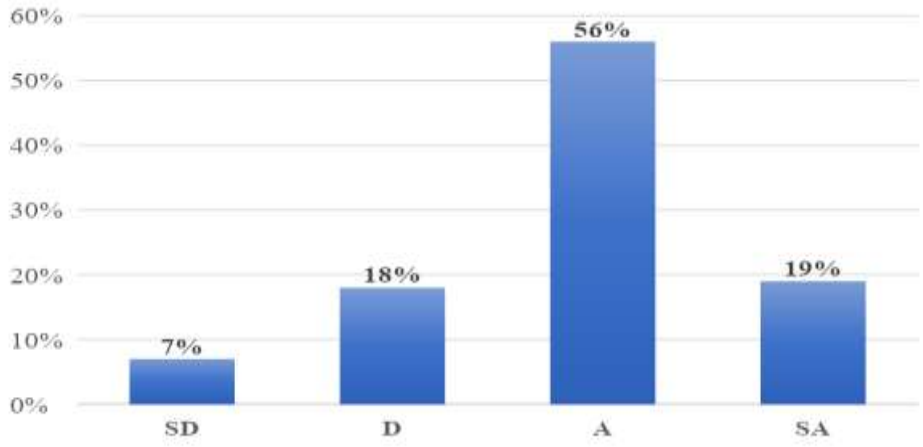


Figure 22 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la difficulté liée à la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques.

Question 6 : Vos apprenants rencontrent-ils des difficultés au niveau de la mathématisation des problèmes en sciences physiques (oui ou non).

Cette question a été posée d'une manière que les enseignants ont autorisés à répondre par *Oui* ou *Non.* Les résultats de cette question *(Q6)* nous ont montré que presque la totalité des enseignants affirment que leurs apprenants rencontrent une difficulté avec la mathématisation des problèmes en sciences physiques. 92% des enseignants sont répondus par *Oui* et seulement 8% sont répondus par *Non*. La question est suivie par une précision pour les enseignants qui ont répondu par *Oui,* les données des réponses ont montré que :

1. 29% des enseignants sont couchés pour les symboles utilisés en sciences physiques, contrairement aux mathématiques, ne sont pas choisis arbitrairement, mais ils représentent certaines quantités physiques ou chimiques ***(Figure 23),***

2. 32% pour les apprenants n'arrivent pas à attacher les significations physiques aux symboles, aux équations et aux formules mathématiques ***(Figure 23)***.

3. 34% pour les symboles, les équations et les formules mathématiques n'ont aucun sens pour les apprenants ***(Figure 23)***.

4. 5% des enseignants sont couchés autres ***(Figure 23)*** et ils ont précisé leurs choix que nous avons à discuter dans la section suivante.

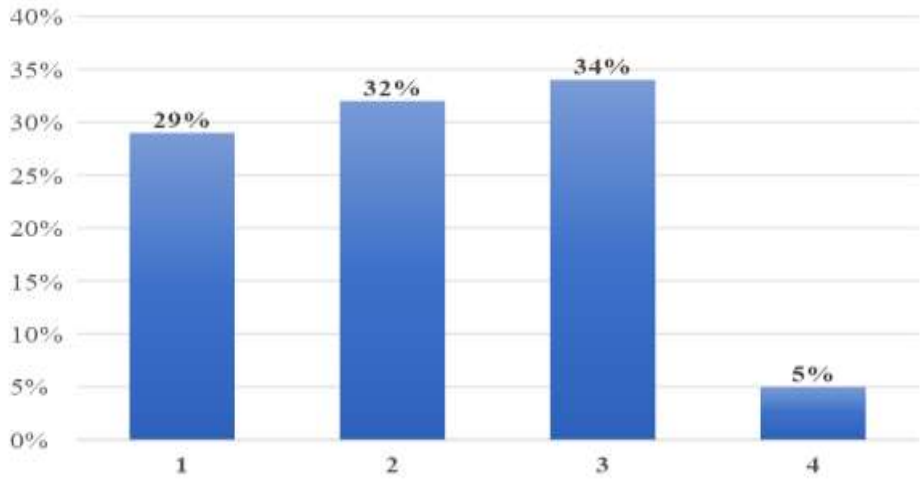


Figure 23 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant les types des difficultés trouvées dans la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques.

I.3.3. <u>Axe 3 :</u> Avis des enseignants sur l'intérêt des apprenants pour la résolution des problèmes.

Question 7 : L'intérêt des apprenants se développe au cours de la mathématisation des problèmes.

D'après les résultats obtenus*, 51*% des enseignants étaient en accord (7%) ou tout à fait d'accord (44%) sur le fait qu'ils sont obligés de faire des rappels mathématiques pour expliquer les contenus de cours mathématiques ***(Figure 24)***. Par contre, 49% s'opposent à cet avis puisque (28%) sont en désaccord et (21%) sont tout à fait en désaccord ***(Figure 24)***.

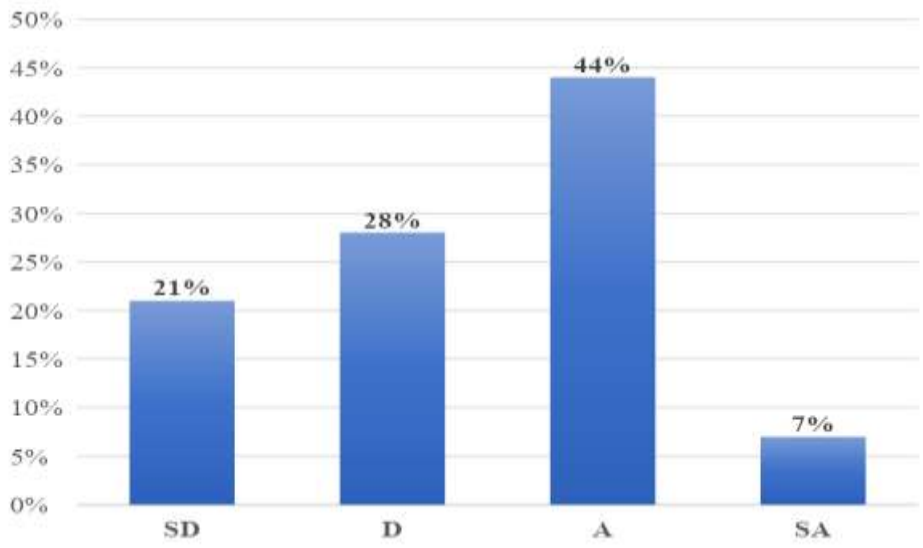


Figure 24 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la relation de l'intérêt des apprenants avec la mathématisation des problèmes en sciences physiques.

Question 8 : La mathématisation des problèmes peut influencer les attitudes des apprenants.

Pour cette question *(Q8)*, la majorité des enseignants enquêtés (84%) sont en accord (59%) ou tout à fait d'accord (25%) que le changement de la pratique d'enseignement de la mathématisation des sciences physiques peut influencer l'intérêt et les attitudes des apprenants ***(Figure 25)***. Par contre 16% de ces enseignants sont désaccord (11%) ou tout à fait désaccord (5%) ***(Figure 25)***.

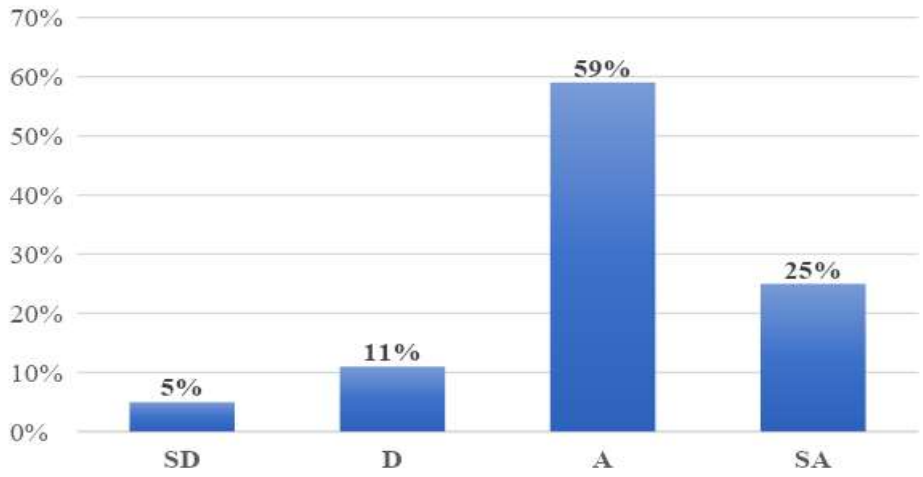


Figure 25 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant l'influence de la mathématisation de la résolution des problèmes sur les attitudes des apprenants.

Question 9 : D'après votre expérience, un rappel mathématique est obligatoire pour résoudre un problème en sciences physiques.

Les résultats obtenus ont montré que la majorité des enseignants enquêtés (79%) affirme qu'un rappel mathématique est obligatoire pour résoudre un problème en sciences physiques *(Q9)* puisque 47% des enseignants sont d'accord ou tout à fait d'accord (32%) ***(Figure 26)***. A l'opposé de 21% des enseignants qui sont en désaccord (13%) ou pas du tout d'accord (8%) ***(Figure 26)***.

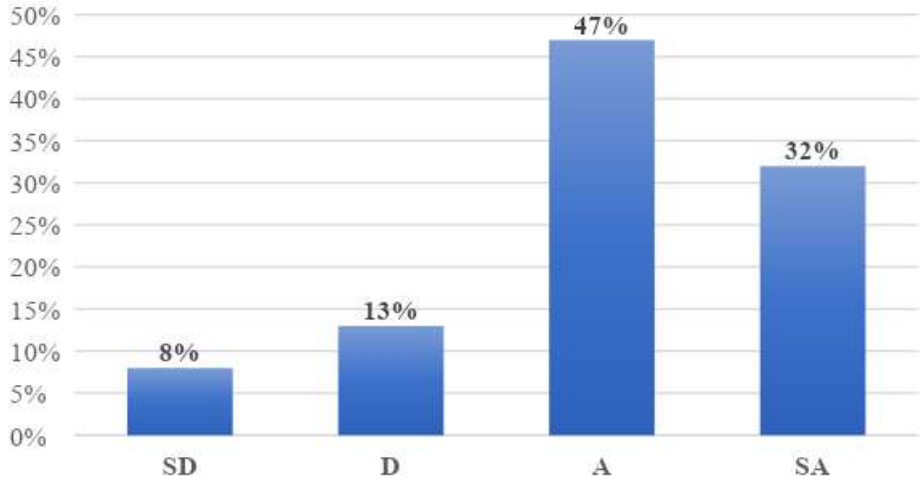


Figure 26 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant le rappel mathématique dans la résolution des problèmes en sciences physiques.

Question 10 : Les rappels mathématiques peuvent influencer l'intérêt et les attitudes des apprenants pour la résolution des problèmes en sciences physiques.

Les données obtenues mettent en valeur l'impact du rappel mathématique sur l'intérêt et les attitudes des apprenants pour la résolution des problèmes en sciences physiques. D'ailleurs, 87% des enseignants des sciences physiques enquêtés sont en accord (62%) ou tout à fait d'accord (25%) et ils affirment que pour la bonne éducation scientifique dans la résolution des problèmes en sciences physiques nécessitent des rappels mathématiques ***(Figure 27)***. A l'opposé de 13% des enseignants qui sont en désaccord (9%) et pas du tout d'accord (4%) ***(Figure 27)***.

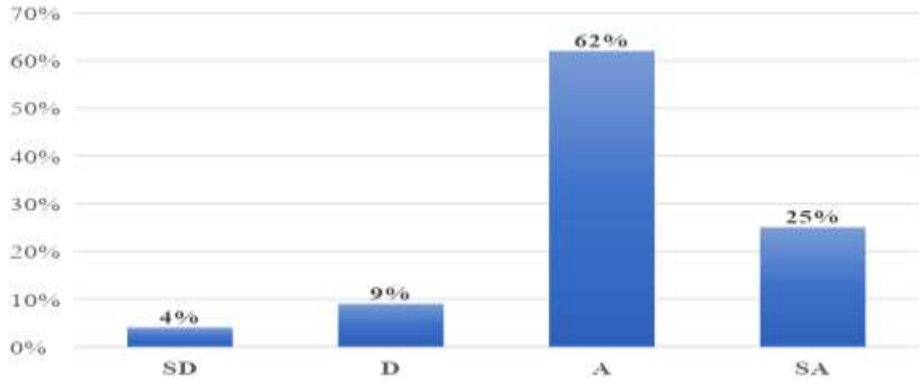


Figure 27 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant l'impact des rappels mathématiques sur l'intérêt et les attitudes des apprenants pour la résolution des problèmes en sciences physiques.

I.3.4. <u>Axe 4 :</u> Avis des enseignants sur les processus de mathématisation des problèmes physiques.

Question 11 : La réussite dans l'enseignement des sciences physiques nécessite une pédagogie d'enseignement unifiée pour la mathématisation des sciences physiques.

Les résultats obtenus pour cette question (*Q11*) nous ont montré que 54% des enseignants sont d'accord ainsi que 26% sont tout à fait d'accord ***(Figure 28)*** que la réussite dans l'enseignement des sciences physiques nécessite une pédagogie d'enseignement unifiée pour la mathématisation des sciences physiques. Par contre, 20% sont désaccord (14% sont en désaccord et 6% sont pas du tout d'accord ***(Figure 28))*** ;

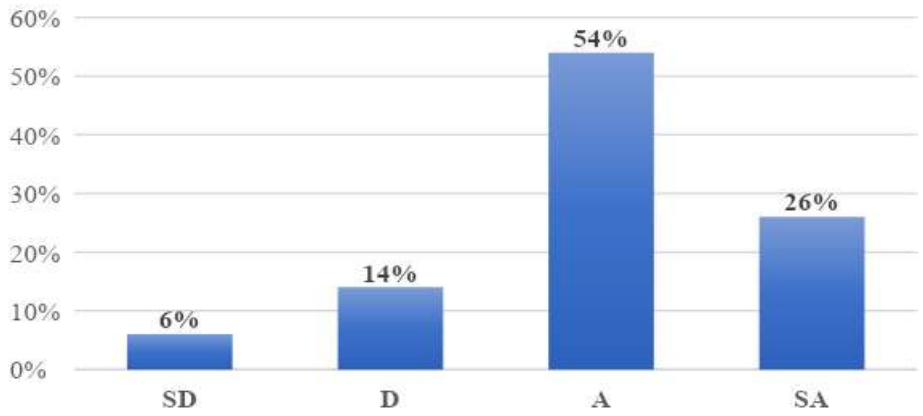


Figure 28 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant la pédagogie d'enseignement unifiée pour la mathématisation des sciences physiques.

Question 12 : La mathématisation des sciences physiques devient essentiellement un projet d'enseignement et d'apprentissage de la discipline.

Les résultats obtenus nous ont montré que 17% des enseignants interrogés sont tout à fait en désaccord avec le fait que la mathématisation des sciences physiques devient essentiellement un projet d'enseignement et d'apprentissage de la discipline ***(Figure 29)***. Dans le même sens, 27% des enseignants sont en désaccord par le projet de la mathématisation dans l'enseignement et d'apprentissage de la discipline ***(Figure 29)***. Cependant, 56% des enseignants désapprouvent cette affirmation (38% sont d'accord et 18% sont tout à fait d'accord ***(Figure 29)***).

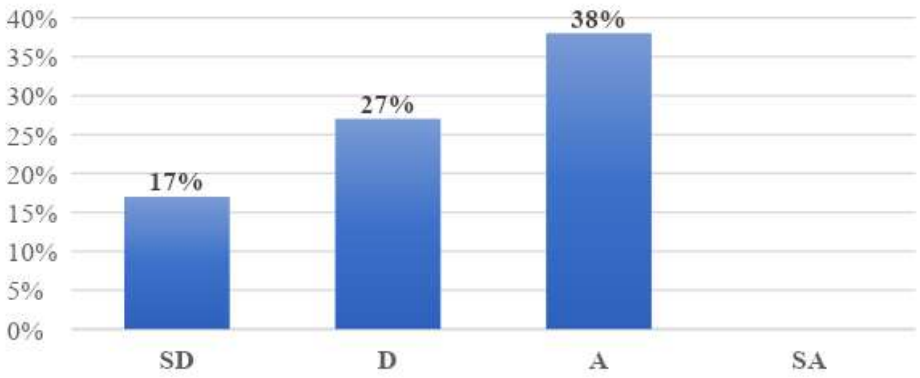


Figure 29 : Les pourcentages des réponses données par les enseignants concernant le projet d'enseignement et d'apprentissage de la mathématisation des sciences physiques.

II.4. Discussion de l'Expérimentation 1.2

I.4.1. Axe 1 : Avis des enseignants sur la mathématisation des problèmes physiques

L'analyse du premier axe nous a permis de constater que l'enseignement des sciences physiques est un terrain pour pratiquer la mathématisation (Balta et al., 2016; Bing & Redish, 2007, 2009, 2012; De Cock, 2012; Kim et al., 2018; Tuminaro & Redish, 2007), c'est-à-dire à considérer la mathématisation comme une tentative de reconstruction des savoirs physiques spécialement dans la résolution des problèmes *(Q1)*.

Mais, dans un autre contexte, les enseignants des sciences physiques doivent se concentrer sur les concepts et notions physiques et non pas sur les calculs mathématiques (Smigiel & Sonntag, 2013). Cela est clairement constaté avec les enseignants questionnés dans cette recherche. 62% des enseignants sont assurés que la mathématisation n'est pas une partie importante dans la résolution des problèmes en sciences physiques *(Q3)*.

Dans le même sens, 53% des enseignants questionnés affirment que la mathématisation n'est qu'un processus de résolution d'un problème physiques *(Q4)* ou comme (Reverdy, 2016) a conclu dans sa recherche que les mathématiques sont une *« matière-outil »* au service des sciences physiques c'est-à-dire, la mathématisation des sciences physiques exige toujours une adaptation à la situation-problème *(Q2)* en sciences physiques (Gustafsson et al., 2015; Häussler & Hoffmann, 2002; Hoffmann, 2002) . En fait, la résolution des problèmes est un regroupement de toutes les capacités mentales qu'il faut maîtriser et mobiliser pour trouver la bonne solution à un problème (M. Abdullah et al., 2009; S. I. S. S. Abdullah et al., 2011; Altun, 2002; Han & Gezer, 2006). La résolution des problèmes est donc définie comme une formalisation de la bonne solution à une situation problématisée (Jensen et al., 2017).

Même si la relation entre les sciences physiques et les mathématiques dans la résolution des problèmes était l'objectif de plusieurs recherche scientifique (Bain et al., 2019; Ceuppens et al., 2019; Haeruddin et al., 2020; Hu et al., 2019; Lucas & Lewis, 2019; Meli et al., 2016; Rodriguez et al., 2018), rares sont les recherche qui ont défini où réside la difficulté de la mathématisation dans la résolution des problèmes en sciences physiques. En effet, la littérature scientifique a montré que nombreux sont les enseignants des sciences physiques dans l'enseignement secondaire qui tient compte de la difficulté de la mathématisation de la discipline dans leurs pratiques en classe (Meli et al., 2016).

I.4.2. Axe 2 : Avis des enseignants sur la difficulté de la mathématisation dans la résolution des problèmes

Dans le deuxième axe, l'analyse des avis des enseignants questionnés a mis en évidence l'obstacle de la mathématisation dans la résolution des problèmes. Ces derniers ont réparti cet obstacle en trois difficultés majeures dans la résolution des problèmes *(Q6)*, qui sont les suivantes : d'une part, les symboles utilisés en sciences physiques, contrairement aux mathématiques, ne sont pas choisis arbitrairement, mais représentent certaines quantités physiques ou chimiques *(Q6)* ; d'autre part, les apprenants n'arrivent pas à associer des significations physiques aux symboles, équations et formules mathématiques *(Q6)* (Zeidmane, 2013). Par ailleurs, les symboles, équations et formules mathématiques n'ont aucun sens pour les apprenants *(Q6)*. L'analyse de ces résultats a montré que les apprenants marocains rencontrent effectivement des difficultés dans la résolution de problèmes, notamment lorsque la situation nécessite des compétences en mathématiques *(Q5).* Cela confirme les conclusions de E. F. Redish (2005) et Tuminaro (2004), qui ont démontré que de nombreux enseignants des sciences physiques du secondaire insistent sur les difficultés des apprenants liées à un manque de connaissances en mathématiques dans leur pratique quotidienne *(Q5)*.

I.4.3. Axe 3 : Avis des enseignants sur l'intérêt des apprenants pour la résolution des problèmes

Le troisième axe met en exergue la mathématisation dans le programme des sciences physiques selon les avis des enseignants marocains de secondaire. Examinons maintenant les avis de ces enseignants sur l'intérêt et les attitudes des apprenants pour la résolution des problèmes *(Q7)* et *(Q8)*, car ils sont les acteurs essentiels qui mettront les programmes à l'épreuve. Donc leurs avis sur l'intérêt et les attitudes des apprenants au cours de leurs pratiques en classe seront une opportunité pour mettre en valeurs la discipline dans le cursus scientifique marocain du secondaire. En effet, le présent travail nous a permis de conclure que la résolution des problèmes en sciences physiques à une relation profonde avec les qualités affectives des apprenants telles que l'intérêt, les attitudes et la motivation, qui ne sont généralement pas évidentes dans la littérature scientifique, vu qu'ils ne sont pas évaluées par les modèles choisis dans ce travail.

I.4.4. Axe 4 : Avis des enseignants sur les processus de mathématisation des problèmes physiques

Le dernier axe aborde que les enseignants sont toujours appréciés au problème de la relation entre les sciences physiques et les mathématiques en raison de l'insuffisance des possibilités d'une pédagogie unifiée entre les enseignants dans ce domaine *(Q11)*, ce qui constitue un obstacle à l'introduction de de la résolution des problèmes dans les pratiques de classe (Başkan et al., 2010). En outre, les enseignants questionnés dans le présent travail affirment qu'ils sont toujours obligés de passer par des rappels mathématiques pour résoudre un problème en sciences physiques *(Q9)*. Mais, l'éducation interdisciplinaire (Reverdy, 2016), qui permet l'interaction entre les mathématiques et la résolution des problèmes en sciences physiques est nettement insuffisante. C'est pour cette raison que 87% des enseignants des sciences physiques enquêtés sont en accord (62%) ou tout à fait d'accord (25%) et ils affirment que pour la bonne éducation scientifique dans la résolution des problèmes en sciences physiques nécessite des rappels mathématiques *(Q10)*.

II.5. Vers une réforme de la mathématisation des sciences physiques dans le contexte marocain

Nous pouvons conclure à la fin de cette discussion que les styles informatif et injonctif dominent dans les problèmes de sciences physiques. Ainsi, les apprenants marocains du secondaire ont souvent besoin de rappels mathématiques pour résoudre les problèmes avec succès *(Q9)* et *(Q10)*. Par conséquent, la réussite dans l'enseignement des sciences physiques nécessite une innovation dans la mathématisation du curriculum des sciences physiques *(Q12)* en appliquant par exemple les techniques d'information et de communication (TIC) (Drigas & Kontopoulou, 2016; A. E. El Azzouzi et al., 2022) ou bien une méthodologie basée sur les STEM (Hutchins et al., 2020; Widayanti et al., 2019; Yusuf & Widyaningsih, 2019; Zaher & Damaj, 2018).

Il ressort aux avis de plusieurs enseignants marocains : la forme de pensée dominante chez les apprenants de secondaire marocain envers la résolution des problèmes en sciences physiques est l'analogie avec des problèmes similaires, où les élèves essaient de se rappeler s'ils ont déjà vu ce type des problèmes ou non. En effet, les apprenants marocains pensent que la règle générale de la résolution des problèmes est la mémorisation de la plus grande quantité des problèmes et des situations afin de développer le sens de l'autonomie et l'autoréflexion pour leurs apprentissages tout au long de l'enseignement et l'apprentissage de la discipline (Hammoumi et al., 2020). Cependant, l'approche de la résolution des problèmes est totalement le contraire : D'une part, selon (Capone, 2022) la résolution de problèmes est

une approche conceptuelle de la discipline centrée sur l'apprenant et souvent associe aux mathématiques. D'autre part, l'approche utilisée est alors compatible avec le fait que l'enseignement des sciences est fondé à la fois sur la pratique et sur l'interprétation. Il est donc connecté à la vie réelle et nécessite une coopération, ce qui devrait faciliter les pratiques de résolution de problèmes. Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont mis l'accent sur les méthodes de résolution de problèmes qui constitue une difficulté dans la majorité des disciplines scientifiques. Ces recherches indiquent que les stratégies de résolution de problèmes dirigées et autogérées par l'enseignant ont eu un impact important sur le développement d'intérêt et des attitudes positives des apprenants de secondaire envers les sciences physiques (Akinbobola, 2009; Caleon & Subramaniam, 2008; Coll et al., 2002; George, 2006; Hasni & Potvin, 2015; Naki ERDEMİR, 2009).

Nos résultats sont discutés en quatre axes principales. Le premier axe entreprend une analyse des avis des enseignants sur la mathématisation des problèmes physiques. Le deuxième axe est une étude qui continue l'analyse des avis des enseignants, mais l'étude est dédiée à montrer la difficulté de la mathématisation dans la résolution des problèmes. Le troisième axe est consacré sur les avis des enseignants sur l'intérêt des apprenants au cours de la résolution des problèmes. Ainsi qu'une innovation dans la mathématisation du curriculum des sciences physiques peut influencer d'une part, l'intérêt des apprenants pour les sciences physiques, et l'enseignement et l'apprentissage de la discipline en d'autre part.

II.6. Synthèse des résultats des expérimentations 1.1 et 1.2

II.6.1. Validation des hypothèses de recherche

Les résultats obtenus confirment que les enseignants qui utilisent une réflexion approfondie sur les représentations mathématiques contribuent à améliorer la compréhension scientifique des apprenants. La majorité des enseignants interrogés reconnaissent que l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques est essentielle pour renforcer les capacités analytiques et conceptuelles des apprenants. Cette observation valide l'hypothèse selon laquelle la maîtrise des représentations mathématiques est importante pour surmonter les difficultés d'apprentissage en sciences physiques.

Par ailleurs, les enseignants soulignent que les apprenants ayant de solides compétences en mathématiques montrent moins de difficultés à assimiler les concepts scientifiques. Cela confirme que le niveau de compétence mathématique des apprenants joue

un rôle déterminant dans leur capacité à comprendre et à modéliser des phénomènes physiques complexes.

II.6.2. Confirmation des objectifs de recherche

Les résultats des expérimentations répondent également aux objectifs fixés dans cette recherche. Concernant l'objectif visant à améliorer l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques, les enseignants interrogés mettent en avant l'importance d'adopter une pédagogie plus structurée et des outils adaptés pour faciliter cette intégration. Ils recommandent l'élaboration de méthodes pédagogiques détaillées et l'utilisation de logiciels de simulation éducative pour renforcer l'enseignement de la mathématisation.

En ce qui concerne l'objectif portant sur l'impact des mathématiques sur l'intérêt des apprenants, les résultats montrent que l'intégration des mathématiques dans les cours de sciences physiques a un effet positif sur l'intérêt des apprenants. Une explication claire et contextualisée des concepts mathématiques favorise non seulement une meilleure compréhension, mais aussi un engagement accru des apprenants dans leur apprentissage.

Conclusion

Les résultats des expérimentations confirment largement les hypothèses et répondent aux objectifs fixés pour cette recherche. Ils mettent en lumière le rôle central des représentations mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques, tout en soulignant la nécessité de réformes pédagogiques et curriculaires pour surmonter les défis identifiés. Ces observations offrent une base solide pour envisager des améliorations ciblées dans l'enseignement des sciences physiques au Maroc, afin de mieux répondre aux besoins des enseignants et des apprenants.

Chapitre 2

Expérimentation 2 : La mathématisation des sciences physiques du volet apprenant

I. Expérimentation 2 : La compréhension de la mathématisation des sciences physiques par des apprenants

I.1. Discussion de l'Expérimentation 2

I.1.1. Difficultés identifiées dans l'intégration des mathématiques en sciences physiques

L'expérimentation, centrée sur la perspective des apprenants, a mis en évidence des défis spécifiques liés à la mathématisation des concepts en sciences physiques, avec un focus particulier sur le concept du *temps de demi-vie*. Grâce à l'application de la technique de groupe nominale (TGN), nous avons recueilli et analysé les perceptions des apprenants concernant les difficultés qu'ils rencontrent lors de l'apprentissage de ce concept.

Une fois les données recueillies, nous avons dressé le tableau suivant :

Tableau 8 : Difficultés liées aux réponses des apprenants en classant selon le Σpi décroissant.

Difficultés liées aux réponses des apprenants	***% de réponse*=$\frac{Pi}{\sum Pi}$**	***Ordre***
L'intégration des mathématiques dans les sciences physiques dans le programme du terminal.	**86**	**1**
L'insuffisance des compétences mathématiques nécessaire pour le calcul de temps de demi-vie.	**77**	**2**
L'interprétation physique des symboles utilisés dans le concept de temps de demi-vie.	**54**	**3**
La compréhension du lien entre la loi de la décroissance radioactive et le temps de demi-vie.	**52**	**4**
Les démonstrations mathématiques dans les calculs de temps de demi-vie.	**40**	**5**

L'assimilation du concept de temps de demi-vie autant qu'un concept nouveau dans le programme des sciences physiques au secondaire.	**35**	**6**
Manque d'expérience dans les transformations nucléaires.	**28**	**7**
Manque d'application des techniques d'information et de communication (TIC).	**20**	**8**

Les résultats révèlent une série des difficultés, notamment en ce qui concerne l'application des mathématiques dans un contexte physique, soulignant ainsi les défis que posent la compréhension et la manipulation des représentations mathématiques utilisés pour représenter des phénomènes complexes.

L'examen du ***Tableau 8*** révèle que les apprenants attribuent leurs difficultés dans l'apprentissage du temps de demi-vie essentiellement à l'intégration des mathématiques dans les sciences physiques. En effet, 86 % des réponses font référence au fait que le concept du temps de demi-vie nécessite principalement des compétences en mathématiques. En analysant le programme, nous pouvons dire que le calcul du *temps de demi-vie* est basé forcement aux manipulations mathématiques liées à la fonction népérienne et à la fonction exponentielle.

Dans ce sens, (Jensen et al., 2017) dans leurs recherches font part à une situation similaire dont sa formalisation nécessite de près ou de loin quelques manipulations mathématiques et ils montrent que la mathématisation et les la physicalisation ont les mêmes objectifs pour résoudre une situation en physiques. Ainsi, l'idée de (Başkan et al., 2010) qui ont montré également que les enseignants des sciences physiques insistent que tous les sujets de physiques exigent certaines connaissances mathématiques. Alors, les sciences physiques peuvent être un simple catalogue des manipulations mathématiques qui se différencient juste dans leurs applications d'une situation à autre (Smigiel & Sonntag, 2013).

Pourtant, les résultats montrent aussi que les compétences mathématiques et leurs analogies dans des sciences physiques sont loin d'être satisfaisantes avec les apprenants

marocains de secondaire. 77% des réponses sont en accord que les apprenants marocains ont un manque des compétences mathématiques nécessaire pour le calcul de *temps de demi-vie*.

En effet, la mathématisation des sciences physiques dans l'enseignement secondaire est très pratique dans l'attribution des difficultés des apprenants au manque de connaissances en mathématiques dans leurs cours scientifiques (Elmougy et al., 2017). Car, les leçons de physiques et de mathématiques sont étroitement liées et les apprenants doivent donc transférer ses connaissances et ses compétences en mathématiques pour comprendre et résoudre des problèmes en physiques (Başkan et al., 2010) tel le concept de temps de demi-vie. Dans ce sens, 40% des réponses sont pour la difficulté des démonstrations mathématiques dans les calculs de temps de demi-vie. Cela confirme la recherche effectuée par (Kim et al., 2018) qui ont conclu que les démonstrations mathématiques d'une équation physique représentent toujours une relation entre des symboles en modélisant mathématiquement les connaissances conceptuelles des sciences physiques.

I.1.2. Difficultés dans la Compréhension des Concepts Physiques

Les significations mathématiques de *temps de demi-vie* peuvent donc améliorer la compréhension des concepts des sciences physiques par les apprenants. Alors, les implications mathématiques dans les sciences physiques peuvent influencer la compréhension des apprenants pour la discipline dont la question dans le présent travail. Jusqu'à présent nous pouvons affirmer que plus le concept physique a une relation avec les démonstrations mathématiques plus que l'apprentissage de ce concept est difficile et par conséquent l'élève juge que les sciences physiques comme discipline est difficile.

Dans un autre contexte, (E. F. Redish, 2005) a montré dans sa recherche que la mathématisation des sciences physiques est complétement différente à celle des mathématiques pures. D'où la difficulté d'assimilation des nouveaux concepts physiques (35%) et l'interprétation des symboles utilisés dans le concept de temps de demi-vie (54%). Dans ce contexte, (Kabil, 2015) affirme que les enseignants des sciences physiques sont souvent surpris par le fait que leurs apprenants semblent connaître si peu de mathématiques malgré leurs bons résultats en cours de mathématiques. La raison selon (Kabil, 2015) est que les symboles utilisés en physiques, contrairement aux mathématiques, ne sont pas choisis arbitrairement, mais ils sont chargés de certaines significations physiques. Il s'ensuit que les apprenants en physiques

ne parviennent pas à attacher les significations physiques aux symboles des équations et des formules (52%).

I.1.3. Nécessité d'une Approche Interdisciplinaire et d'Innovations Pédagogiques

L'implication des mathématiques dans les sciences physiques doit être effectuée avec une harmonie entre le programme des sciences physiques et les mathématiques (Başkan et al., 2010b; Meli et al., 2016; West et al., 2007). De reste, cette intégration doit être réalisée, soit avec les enseignants des sciences physiques qui doivent programmer des rappels mathématiques et leurs analogies en sciences physiques avec leurs apprenants, soit sous forme d'une interdisciplinarité (Reverdy, 2016) durable et pratique entre les sciences physiques et les mathématiques.

Alors, le développement d'un programme interdisciplinaire à l'aide d'une étude coopérative avec les enseignants des sciences physiques et des mathématiques (West et al., 2007) ou un processus qui regroupe toutes les compétences mathématiques et physiques dans la résolution des problèmes physiques (Gustafsson et al., 2015), est indispensable pour attribuer à la compréhension des apprenants marocains en physiques. Donc, l'hypothèse énoncée selon laquelle les mathématiques ont un impact sur la compréhension des apprenants en apprenant le calcul de temps de demi-vie radioactive a été bien vérifié.

Le présent travail a indiqué également l'importance de l'expériences pratiques dans l'apprentissage de la physiques (Anchordoqui et al., 2022) vu que 28% des réponses concernent les expériences dans toute la partie des transformations nucléaires. En analysant le programme nous pouvons conclure que le nucléaire semble soit dangereux pour l'expérimentation soit qu'il nécessite un temps duratif pour l'effectuer. Par conséquent, la réussite dans l'enseignement de la physiques nécessite une innovation dans la mathématisation du curriculum de la matière en appliquant par exemple les techniques d'information et de communication (TIC) (20%) (Drigas & Kontopoulou, 2016; A. E. El Azzouzi et al., 2022). En effet, la littérature scientifique affirme que le programme d'enseignement des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques (STEM) (Oliveros et al., 2016; Widayanti et al., 2019; Yusuf & Widyaningsih, 2019) reste une bonne solution pour améliorer l'apprentissage de la mathématisation des sciences physiques par les apprenants marocains de secondaire.

L'analyse de l'ensemble des difficultés regroupées dans cette étude nous a montré que les mathématiques sont un impact important sur la compréhension des élèves marocains de secondaire des sciences physiques. Cette étude s'est appuyée sur la technique de groupe nominal (TGN) autant une technique d'opérationnalisation optimale des avis et des opinions des élèves questionnés dans ce travail. Les résultats obtenus donc nous a permis, d'une part, de conclure que les élèves marocains de secondaire n'ont pas la capacité nécessaire pour la mathématisation des sciences physiques qui pose une difficulté pour l'apprentissage de la matière et par la suite pour l'apprentissage de certains concepts physiques comme dans notre cas le temps de demi-vie. D'autre part, les résultats montrent clairement que l'implication des mathématiques est une difficulté qui entrave la compréhension non seulement certains concepts physiques mais aussi la compréhension de l'ensemble de la discipline.

Le calcul du *temps de demi-vie* dans le programme marocain illustre que les mathématiques jouent un rôle crucial en physique, car il a été montré que, dans ce domaine particulier, les apprenants du secondaire rencontrent des difficultés à comprendre la nature complexe du temps de demi-vie d'une substance radioactive.

Au terme de ce travail ayant pour finalité que les difficultés relatives à l'apprentissage du *temps de demi-vie*, avec une approche basée sur la Technique du groupe nominal (TGN). Cette méthode de génération d'idée a confirmé qu'une gestion interdisciplinaire entre les sciences physiques les mathématiques en calcul du temps demi-vie favorisent la compréhension des apprenants marocains du secondaire.

Finalement, la recherche sur la compréhension de temps de demi-vie par les apprenants de secondaire a montré que les connaissances et compétences cognitives mathématiques apprises dans les sciences mathématiques peuvent jouer un rôle important dans l'apprentissage non seulement le calcul de temps de demi-vie, mais aussi pour la discipline en général.

L'enseignement avec une interdisciplinarité optimale entre les mathématiques et les sciences physiques chez les apprenants marocain est donc loin d'être satisfaisante car le système éducatif marocain jusqu'à présent ne prend pas en considération cette interdisciplinarité qui peut aider les élèves à comprendre les enjeux scientifiques des sciences physiques et à rendre la classe de cette discipline une classe confortable pour l'apprentissage scientifique.

De nombreuses études nous permettent de conclure que l'utilisation des mathématiques devrait faire partie intégrante de l'enseignement des sciences physiques, tant à l'école que dans la formation des enseignants. D'une manière générale, il pourrait être utile d'initier les étudiants dès le début à l'interaction entre les phénomènes physiques des objets, un modèle des sciences physiques et un modèle mathématique. Il existe des preuves qui permettent de formuler certaines règles :

- Les apprenants ont besoin d'aide pour réfléchir aux concepts physiques avant de passer à une formulation mathématique
- Les enseignants doivent être encouragés à donner une variété de tâches différentes qui nécessitent une utilisation flexible des mathématiques et des concepts physiques.

I.1.4. Synthèse des résultats de l'Expérimentation 2

I.1.4.1. Validation des hypothèses de recherche

Les résultats obtenus confirment que les apprenants rencontrent des difficultés significatives lorsqu'ils doivent manipuler des concepts physiques complexes nécessitant une forte composante mathématique, comme le concept de temps de demi-vie en physique nucléaire. Ces observations valident l'hypothèse selon laquelle des compétences mathématiques solides sont indispensables pour surmonter ces défis. Les apprenants peinent notamment à interpréter les symboles mathématiques, à appliquer les formules et à établir des liens entre les représentations mathématiques et les concepts physiques, ce qui met en lumière l'importance d'une préparation adéquate en mathématiques.

L'hypothèse selon laquelle l'efficacité pédagogique dépend de la capacité des enseignants à encourager une réflexion approfondie sur les mathématiques sous-jacentes aux concepts physiques est également confirmée. Les enseignants capables de guider les apprenants dans l'exploration des liens entre mathématiques et sciences physiques jouent un rôle clé dans l'amélioration de leur compréhension conceptuelle.

I.1.4.2. Confirmation des objectifs de recherche

Les résultats apportent également des réponses claires aux objectifs fixés dans cette recherche :

- Amélioration de l'intégration des mathématiques dans les sciences physiques : Les résultats montrent qu'une intégration plus explicite et concrète des mathématiques dans les cours de sciences physiques est essentielle pour faciliter la compréhension des concepts par les apprenants. Cette intégration doit être soutenue par des explications claires, des exemples concrets et des approches pédagogiques interconnectées.
- Impact des mathématiques sur l'intérêt des apprenants : Les apprenants manifestent un intérêt accru pour les sciences physiques lorsque les concepts mathématiques sont bien expliqués et reliés à des applications concrètes. Cette observation met en évidence la nécessité de concevoir des séquences pédagogiques interdisciplinaires pour renforcer leur engagement et leur motivation.

Conclusion

Les résultats de l'Expérimentation 2 confirment non seulement les hypothèses de cette recherche, mais offrent également des perspectives claires pour améliorer l'enseignement des sciences physiques. Ils appellent à une meilleure intégration des mathématiques, à la fois en termes de contenu et de pédagogie, afin de favoriser une compréhension conceptuelle plus profonde et un intérêt durable pour la discipline.

Conclusion générale

La conclusion générale des expérimentations réalisées dans le cadre de cette thèse met en exergue les défis et les enjeux cruciaux liés à la mathématisation des sciences physiques, particulièrement dans le contexte de l'enseignement secondaire qualifiant au Maroc. Ces expérimentations mettent en évidence les perceptions et les difficultés rencontrées par les enseignants et les apprenants, tout en soulignant les implications pédagogiques pour l'avenir de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences physiques.

- **Perceptions des enseignants et défis de la mathématisation**

Les résultats des expérimentations indiquent que la mathématisation est perçue par les enseignants du secondaire comme un pilier fondamental pour l'enseignement des sciences physiques. Par exemple, une large majorité des enseignants de la région de Fès-Meknès a identifié des parties spécifiques du programme, telles que les transformations nucléaires, l'électricité, et la mécanique, comme nécessitant une forte intégration des mathématiques. Ces choix confirment l'analyse des manuels scolaires et sont corroborés par la littérature existante, qui souligne l'importance cruciale des mathématiques pour une compréhension approfondie des concepts physiques complexes.

Cependant, cette étude met également en lumière une absence d'approche pédagogique unifiée concernant l'application des mathématiques en physique. L'analyse de la diversité des réponses des enseignants, notamment à travers des indices de Simpson et de Shannon, révèle un manque de consensus sur les meilleures pratiques pédagogiques, reflété par des choix variés et non homogènes concernant les stratégies d'enseignement de la mathématisation. Par exemple, les indices de diversité calculés pour certaines questions indiquent que les méthodes employées pour résoudre des problèmes physiques varient considérablement d'un enseignant à l'autre, ce qui complique l'intégration harmonieuse des concepts mathématiques et physiques dans l'enseignement.

En dépit de la reconnaissance généralisée de l'importance de la mathématisation, les enseignants sont confrontés à une complexité pédagogique qui nécessite le développement de nouvelles stratégies d'enseignement et d'outils didactiques innovants. Ces outils devraient permettre une intégration plus efficace des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques, afin de surmonter les obstacles identifiés et garantir une meilleure assimilation des savoirs par les élèves.

- **Difficultés des apprenants face à la mathématisation des sciences physiques**

L'expérimentation centrée sur les perceptions des apprenants met en lumière des obstacles significatifs rencontrés lors de l'apprentissage des sciences physiques, particulièrement pour des concepts tels que le temps de demi-vie, qui nécessitent des compétences mathématiques avancées. Une grande majorité des apprenants (86%) a souligné que le calcul du temps de demi-vie repose sur des manipulations mathématiques complexes, comme l'utilisation des fonctions népériennes et exponentielles. Ces manipulations sont perçues comme abstraites et deviennent des difficultés importantes à l'assimilation des concepts scientifiques.

Les difficultés des apprenants ne se limitent pas à la simple manipulation des équations ; elles incluent également des défis dans l'interprétation physique des symboles mathématiques et dans la compréhension du lien étroit entre les mathématiques et les concepts physiques. Par exemple, 77% des apprenants ont indiqué une insuffisance de compétences mathématiques pour appréhender pleinement ces concepts, et 54% ont exprimé des difficultés à relier les équations mathématiques aux phénomènes physiques qu'elles décrivent. De plus, 40% ont mentionné la complexité des démonstrations mathématiques comme un obstacle majeur. Ces résultats révèlent une dissonance entre les connaissances mathématiques acquises et leur application pratique en physique, exacerbée par l'absence d'expériences pratiques concrètes et l'usage limité des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans l'enseignement.

- **Vers une réforme des pratiques pédagogiques en sciences physiques**

Cette étude souligne l'importance de la mathématisation dans l'enseignement des sciences physiques au niveau secondaire qualifiant, tout en identifiant des lacunes significatives dans les pratiques pédagogiques actuelles. Une refonte des approches éducatives est nécessaire pour améliorer la qualité de l'enseignement et de l'apprentissage. Cette refonte pourrait inclure une intégration plus cohérente des mathématiques dans le curriculum des sciences physiques et l'utilisation d'outils pédagogiques innovants, tels que les TIC, pour faciliter l'apprentissage des concepts complexes.

Les résultats des expérimentations confirment également que l'efficacité pédagogique repose sur la capacité des enseignants à amener les apprenants à réfléchir de manière approfondie sur les mathématiques sous-jacentes aux concepts physiques. Les

prochaines étapes devraient consister à développer du matériel éducatif adapté, des tâches variées, et des séquences d'apprentissage qui favorisent une compréhension interdisciplinaire et interconnectée des mathématiques et des sciences physiques. Ces ajustements sont essentiels pour surmonter les défis actuels et renforcer l'intérêt, l'engagement, et la motivation des apprenants marocains dans l'apprentissage des sciences physiques.

Perceptives de recherche

Les résultats de cette recherche mettent en évidence plusieurs défis clés liés à l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques au Maroc. En tenant compte de ces défis, les perspectives suivantes visent à améliorer les pratiques pédagogiques, à renforcer l'efficacité de l'enseignement, et à promouvoir une meilleure compréhension des concepts scientifiques par les apprenants.

- **Repenser les approches pédagogiques marocaines actuelles :** Les expérimentations menées ont souligné l'utilité de réviser les approches pédagogiques actuelles pour une meilleure intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques. Les enseignants rapportent un manque d'harmonisation des méthodes utilisées, ce qui crée une fragmentation des savoirs et complique la compréhension des concepts pour les apprenants. Pour pallier cette situation, il est nécessaire de développer une approche pédagogique plus structurée et coordonnée entre les disciplines de mathématiques et de sciences physiques. Cette approche devrait encourager une vision intégrée des connaissances, où les mathématiques ne sont plus perçues comme une matière isolée, mais comme un outil essentiel pour comprendre les phénomènes physiques.

- **Renforcement de la formation continue des enseignants :** Un élément crucial pour surmonter les défis identifiés est le renforcement de la formation continue des enseignants. Cette formation devrait inclure des ateliers pratiques sur l'intégration des mathématiques dans les cours de sciences physiques, l'adoption d'approches interdisciplinaires, et l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC) pour rendre l'apprentissage plus interactif et accessible. De plus, il est essentiel de promouvoir la collaboration interdisciplinaire entre les enseignants de mathématiques et de sciences physiques. Des sessions de travail conjointes et des échanges réguliers pourraient faciliter le partage de bonnes pratiques et contribuer à une cohérence accrue dans l'enseignement de ces matières.

- **Refonte du curriculum marocain :** Les expérimentations suggèrent que le curriculum doit être revu pour valoriser les liens entre les mathématiques et les sciences physiques dès les premières années de l'enseignement secondaire. Un curriculum intégré pourrait introduire des modules interdisciplinaires, où les concepts mathématiques sont appliqués immédiatement à des situations concrètes de la physique. De tels modules encourageraient les apprenants à voir les mathématiques comme un outil nécessaire

pour résoudre des problèmes physiques, renforçant ainsi leur compréhension et leur motivation.

- **Usage efficient des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) :** L'intégration des TIC dans l'enseignement des sciences physiques et des mathématiques peut jouer un rôle déterminant. Les outils numériques, tels que les simulations informatiques et les laboratoires virtuels, permettent de visualiser les concepts complexes et de manipuler les modèles mathématiques dans un environnement interactif. Cela rend l'apprentissage plus concret et accessible, en particulier pour les apprenants qui ont des difficultés à conceptualiser des notions abstraites.

- **Collaboration interdisciplinaire et soutien institutionnel :** Pour que l'intégration des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques soit réussie, une collaboration interdisciplinaire doit être activement soutenue par les institutions éducatives. Les établissements scolaires, les académies régionales, et les décideurs doivent faciliter les échanges entre enseignants de différentes disciplines par le biais de groupes de travail, de réunions régulières et de ressources pédagogiques communes. Le soutien institutionnel devrait également inclure des subventions pour des projets pédagogiques innovants, l'accès à des formations spécialisées, et l'encouragement à utiliser des méthodes d'enseignement fondées sur la recherche. Ces mesures contribueraient à la création d'un environnement éducatif qui valorise l'intégration des mathématiques et des sciences physiques.

- **Approche contextuelle et adaptée au contexte marocain :** Il est essentiel que les recommandations soient adaptées aux spécificités du contexte éducatif marocain. Cela inclut la reconnaissance des disparités régionales en termes de ressources éducatives, des différences culturelles dans la perception des sciences, et des niveaux de compétence mathématique des apprenants. Les programmes de formation des enseignants devraient être adaptés aux besoins spécifiques des régions rurales, où les ressources éducatives et l'accès aux TIC sont plus limités. De même, des approches pédagogiques différenciées sont nécessaires pour s'assurer que chaque apprenant, quel que soit son niveau de compétence, puisse progresser à son rythme et assimiler les concepts clés.

Limites de la Recherche

Cette recherche, bien qu'exhaustive dans son analyse des défis et des stratégies pour améliorer la mathématisation en sciences physiques au Maroc, présente plusieurs limites :

Premièrement, l'échantillon utilisé pour les expérimentations était limité à la région de Fès-Meknès, ce qui peut ne pas représenter l'ensemble des divers contextes éducatifs au Maroc. Les perceptions et les difficultés rencontrées peuvent varier significativement d'une région à l'autre, en particulier entre les milieux urbains et ruraux.

Deuxièmement, les outils de mesure utilisés, tels que les questionnaires et les groupes nominaux, sont basés sur les perceptions des enseignants et des apprenants, qui peuvent être subjectives et influencées par des facteurs externes non contrôlés. Il serait bénéfique d'intégrer des données quantitatives supplémentaires, telles que des résultats d'examens ou des évaluations de compétences, pour corroborer et enrichir les conclusions obtenues.

Enfin, la recherche n'a pas exploré en profondeur l'impact de la formation continue des enseignants sur l'intégration effective des mathématiques dans les sciences physiques. Une étude plus longitudinale, suivant l'évolution des pratiques pédagogiques après la mise en œuvre de formations spécifiques, pourrait offrir des perspectives plus solides sur l'efficacité des recommandations proposées.

Pour que l’enseignement des sciences physiques au Maroc évolue de manière significative, il est impératif de repenser les approches pédagogiques actuelles en intégrant plus étroitement les mathématiques. Cela nécessite un renforcement de la formation continue des enseignants, une refonte du curriculum, l'utilisation accrue des TIC, et une collaboration interdisciplinaire soutenue par les institutions éducatives. Ces efforts, s'ils sont adaptés aux réalités locales, pourront contribuer à une meilleure préparation des apprenants pour les défis futurs dans les domaines scientifiques et technologiques.

Annexes

Annexe 1 : ***Questionnaire de l'enseignant***

Ce travail rentre dans le cadre d'une thèse effectuée au laboratoire d'Informatique, Signaux, Automatique et Cognitivisme (*LISAC*). Nous vous remercions infiniment de votre collaboration.

---

1. ***Je suis :***

Enseignante ☐ Enseignant ☐

---

2. ***Votre âge est (en ans) :***

Inférieur à 30 ☐ Entre 31 et 40 ☐ Entre 41 et 50 ☐ Supérieur à 50 ☐

---

3. ***Vous avez suivi une formation de :***

ENS ☐ CPR ☐ CRMEF ☐ Autres

……
…

---

4. ***Votre diplôme universitaire est :***

Licence ☐ Master ☐ Doctorat ☐ Autres

……
…

---

5. ***Votre expérience (en ans) :***

Moins de 5 ☐ Entre 6 et 15 ☐ Entre 16 et 25 ☐ Plus de 25 ☐

---

6. ***Pour étudier un phénomène physique on fait toujours un recours à une intégration des mathématiques :***

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

7. ***Les mathématiques et les sciences physiques sont complémentaires d'une manière durable et continue :***

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

8. ***La mathématisation des sciences physiques est une interaction profonde entre les deux disciplines :***

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

9. ***La mathématisation est une tentative de reconstruction des savoirs physiques :***

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

10. ***En sciences physiques les problèmes les plus couramment rencontrés sont liés :***

• *Nécessitent peu de physique et le travail consiste principalement à mathématiser la situation.*	☐

• *Nécessitent une analyse physique approfondie avant de penser à mathématiser la situation.*	☐
• *Nécessitent d'effectuer des mathématiques avant la physique pour intervenir au problème.*	☐
• *Nécessitent une implication simultanée de la physique et les mathématiques et non séparément.*	☐

11. La mathématisation en sciences physiques dépend généralement du problème étudié :

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

12. La mathématisation des sciences physiques est l'étape importante dans la résolution des problèmes :

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

13. La mathématisation est une vraie difficulté pour la résolution des problèmes des sciences physiques :

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

14. Pour le programme du terminal quelle partie du cours nécessite plus la mathématisation :

• La décroissance radioactive	☐
• Les dipôles RC et RL	☐
• Les équations horaires du mouvement d'un projectile	☐

- Autre :

Précisez :……

15. Vos apprenants trouvent-ils des difficultés au niveau de la mathématisation des problèmes en sciences physiques ?

Oui	Non
☐	☐

✓ ***Si la réponse par oui :***

• Les symboles utilisés en sciences physiques, contrairement aux mathématiques, ne sont pas choisis arbitrairement, mais ils représentent certaines quantités physiques.	☐
• Les apprenants n'arrivent pas à attacher les significations physiques aux symboles, aux équations et aux formules mathématiques.	☐
• Les symboles, les équations et les formules mathématiques ne sont aucun sens pour les apprenants.	☐

- Autre :

Précisez :……
……

16. L'intérêt des apprenants se développe en changeant la méthodologie d'enseignement de la mathématisation des sciences physiques :

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

17. Le changement de la pratique d'enseignement de la mathématisation des sciences physiques peut influencer les attitudes des apprenants :

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

18. D'après votre expérience en classe, des rappels mathématiques est toujours obligatoire pour l'enseignement de certaines parties physiques.

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

19. La réussite dans l'enseignement des sciences physiques nécessite une pédagogie unifiée pour la mathématisation des sciences physiques :

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

20. La mathématisation des sciences physiques devient essentiellement un projet d'enseignement et d'apprentissage de la discipline :

Pas du tout d'accord	*Pas d'accord*	*D'accord*	*Tout à fait d'accord*
☐	☐	☐	☐

Annexe 2 : ***Nombre des enseignants selon l'académie régionale d'éducation e de formation de Fès-Meknès.***

Cycle : *l'enseignement* secondaire Qualifiant	
Direction Provinciale	***Physique chimie***
Meknes	182
El hajeb	42
Ifrane	33
Fes	258
Moulay Yaacoub	28
Sefrou	57
Boulmane	50
Taza	83
Taounate	91
Total	*824*

Références bibliographiques

A

Abdullah, M., Mohamed, N., & Ismail, Z. H. (2009). The effect of an individualized laboratory approach through microscale chemistry experimentation on students' understanding of chemistry concepts, motivation and attitudes. Chem. Educ. Res. Pract., 10(1), 53-61. https://doi.org/10.1039/B901461F

Abdullah, S. I. S. S., Halim, L., & Shahali, E. H. M. (2011). Integration of environmental knowledge across biology, physics and chemistry subject at secondary school level in Malaysia. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 15, 1024-1028. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.03.233

Adu-Gyamfi, K., Stiff, L. V., & Bossé, M. J. (2012). Lost in Translation : Examining Translation Errors Associated With Mathematical Representations: Lost in Translation. School Science and Mathematics, 112(3), 159-170. https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2011.00129.x

Akinbobola, A. O. (2009). Enhancing Students' Attitude Towards Nigerian Senior Secondary School Physics Through the Use of Cooperative, Competitive and Individualistic Learning Strategies. Australian Journal of Teacher Education, 34(1). https://doi.org/10.14221/ajte.2009v34n1.1

Aldahmash, A. H., & Alamri, N. M. (2020). An Analysis of the Inclusion of Mathematical Discourse Components in Arabic Mathematical Textbooks : The Case of Saudi Arabia. Frontiers in Psychology, 11, 534803. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.534803

Altun, İ. (2002). Burnout and Nurses' Personal and Professional Values. Nursing Ethics, 9(3), 269-278. https://doi.org/10.1191/0969733002ne509oa

Anchordoqui, L. A., Ariga, A., Ariga, T., Bai, W., Balazs, K., Batell, B., Boyd, J., Bramante, J., Campanelli, M., Carmona, A., Celiberto, F. G., Chachamis, G., Citron, M., De Lellis, G., De Roeck, A., Dembinski, H., Denton, P. B., Di Crecsenzo, A., Diwan, M. V., … Zhang, Y. (2022). The Forward Physics Facility : Sites, experiments, and physics potential. Physics Reports, 968, 1-50. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2022.04.004

Arbia, A., Kouchou, I., Kaddari, F., Hajji Hour, R., & Elachqar, A. (2021). Evaluation of the Analysis of Classroom Practices of Future Moroccan Teachers. International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP), 11(3), 99. https://doi.org/10.3991/ijep.v11i3.20493

Archibald, T., Fraser, C., & Grattan-Guinness, I. (2005). The History of Differential Equations, 1670–1950. Oberwolfach Reports, 1(4), 2729-2794. https://doi.org/10.4171/owr/2004/51

Atiyah, M. F. (1988). Collected Works. Clarendon Press.

B

Bain, K., Rodriguez, J.-M. G., & Towns, M. H. (2018). Zero-Order Chemical Kinetics as a Context To Investigate Student Understanding of Catalysts and Half-Life. Journal of Chemical Education, 95(5), 716-725. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00974

Bain, K., Rodriguez, J.-M. G., & Towns, M. H. (2019a). Chemistry and Mathematics : Research and Frameworks To Explore Student Reasoning. Journal of Chemical Education, 96(10), 2086-2096. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00523

Bain, K., Rodriguez, J.-M. G., & Towns, M. H. (2019b). Chemistry and Mathematics : Research and Frameworks To Explore Student Reasoning. Journal of Chemical Education, 96(10), 2086-2096. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00523

Bakir, R., Tarras, I., Hader, A., Sbiaai, H., Mazroui, M., & Boughaleb, Y. (2016). Scaling behavior of non-equilibrium phase transitions in spontaneously ordered motion of self-propelled particles. Modern Physics Letters B, 30(24), 1650304. https://doi.org/10.1142/S0217984916503048

Balta, N., Mason, A. J., & Singh, C. (2016). Surveying Turkish high school and university students' attitudes and approaches to physics problem solving. Physical Review Physics Education Research, 12(1), 010129. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.010129

Bărboianu, C. & Romanian Academy - Iasi Branch. (2022). Structural-Epistemic Interdisciplinarity and the Nature of Interdisciplinary Challenges. Logos & Episteme, 13(1), 7-35. https://doi.org/10.5840/logos-episteme20221311

Başkan, Z., Alev, N., & Karal, I. S. (2010). Physics and mathematics teachers' ideas about topics that could be related or integrated. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2(2), 1558-1562. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.03.235

Bauer, M., Severus, E., Köhler, S., Whybrow, P. C., Angst, J., Möller, H.-J., & on behalf of the Wfsbp Task Force on Treatment Guidelines for Unipolar Depressive Disorders. (2015). World Federation of Societies of Biological Psychiatry (WFSBP) Guidelines for Biological Treatment of Unipolar Depressive Disorders. Part 2 : Maintenance Treatment of Major Depressive Disorder-Update 2015. The World Journal of Biological Psychiatry, 16(2), 76-95. https://doi.org/10.3109/15622975.2014.1001786

Benjelloun. (2023). Impact of using computer-assisted experimentation on learning physical sciences in secondary schools in Morocco. Knowledge Management & E-Learning: An International Journal, 554-574. https://doi.org/10.34105/j.kmel.2023.15.032

Berger, R., & Hänze, M. (2009). Comparison of Two Small-group Learning Methods in 12th-grade Physics Classes Focusing on Intrinsic Motivation and Academic Performance. International Journal of Science Education, 31(11), 1511-1527. https://doi.org/10.1080/09500690802116289

Bicalho, L., & Oliveira, M. de. (2011). A teoria e a prática da interdisciplinaridade em Ciência da Informação. Perspectivas em Ciência da Informação, 16(3), 47-74. https://doi.org/10.1590/S1413-99362011000300004

Bing, T. J., & Redish, E. F. (2007). The Cognitive Blending of Mathematics and Physics Knowledge. AIP Conference Proceedings, 883, 26-29. https://doi.org/10.1063/1.2508683

Bing, T. J., & Redish, E. F. (2009). Analyzing problem solving using math in physics : Epistemological framing via warrants. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 5(2), 020108. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.5.020108

Bing, T. J., & Redish, E. F. (2012). Epistemic complexity and the journeyman-expert transition. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 8(1), 010105. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.8.010105

Black, N., Murphy, M., Lamping, D., McKee, M., Sanderson, C., Askham, J., & Marteau, T. (1999). Consensus Development Methods : A Review of Best Practice in Creating Clinical Guidelines. Journal of Health Services Research & Policy, 4(4), 236-248. https://doi.org/10.1177/135581969900400410

Blomhoj, M. (2003). Developing mathematical modelling competence : Conceptual clarification and educational planning. Teaching Mathematics and Its Applications, 22(3), 123-139. https://doi.org/10.1093/teamat/22.3.123

Bouzid, T., Darhmaoui, H., & Kaddari, F. (2024). Force and motion misconceptions in Moroccan high school science majors : Insights from video game activity. Research in Science & Technological Education, 1-22. https://doi.org/10.1080/02635143.2024.2428618

Bresson, F. (1973). Some aspects of mathematization in psychology. Social Science Information, 12(4), 51-65. https://doi.org/10.1177/053901847301200404

Bruner, J. S. (1974). From communication to language—A psychological perspective. Cognition, 3(3), 255-287. https://doi.org/10.1016/0010-0277(74)90012-2

Byun, T., & Lee, G. (2014). Why students still can't solve physics problems after solving over 2000 problems. American Journal of Physics, 82(9), 906-913. https://doi.org/10.1119/1.4881606

C

Caleon, I. S., & Subramaniam, R. (2008). Attitudes towards science of intellectually gifted and mainstream upper primary students in Singapore. Journal of Research in Science Teaching, 45(8), 940-954. https://doi.org/10.1002/tea.20250

Capone, R. (2022). Blended Learning and Student-centered Active Learning Environment : A Case Study with STEM Undergraduate Students. Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education, 22(1), 210-236. https://doi.org/10.1007/s42330-022-00195-5

Carrejo, D. J., & Marshall, J. (2007). What is mathematical modelling? Exploring prospective teachers' use of experiments to connect mathematics to the study of motion. Mathematics Education Research Journal, 19(1), 45-76. https://doi.org/10.1007/BF03217449

Castiblanco Abril, O. L., & Vizcaino Arevalo, D. F. (2024). Interaction in the classroom based on typologies of experiments and mathematization in physics teaching. Revista Mexicana de Física E, 21(2 Jul-Dec). https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.21.020208

Ceuppens, S., Bollen, L., Deprez, J., Dehaene, W., & De Cock, M. (2019). 9th grade students' understanding and strategies when solving x (t) problems in 1D kinematics and y (x) problems in mathematics. Physical Review Physics Education Research, 15(1), 010101. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010101

Chappey, J.-L. (2020). La Révolution des sciences : 1789 ou le sacre des savants. La Librairie Vuibert.

Chen, J., & Mu, Z. (2010). The Cross-national Comparison of Pre-service Mathematics Teacher Education and Curriculum Structure.

Claxton, J. D., Ritchie, J. R. B., & Zaichkowsky, J. (1980). The Nominal Group Technique : Its Potential for Consumer Research. Journal of Consumer Research, 7(3), 308. https://doi.org/10.1086/208818

Coll, R. K., Dalgety, J., & Salter, D. (2002). THE DEVELOPMENT OF THE CHEMISTRY ATTITUDES AND EXPERIENCES QUESTIONNAIRE (CAEQ). Chem. Educ. Res. Pract., 3(1), 19-32. https://doi.org/10.1039/B1RP90038B

D

Daher, W., Baya'a, N., & Anabousy, R. (2018). In-Service Mathematics Teachers' Integration of ICT as Innovative Practice. International Journal of Research in Education and Science, 534-543. https://doi.org/10.21890/ijres.428945

De Cock, M. (2012). Representation use and strategy choice in physics problem solving. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 8(2), 020117. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.8.020117

diSessa, A. A., Gillespie, N. M., & Esterly, J. B. (2004). Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force. Cognitive Science, 28(6), 843-900. https://doi.org/10.1207/s15516709cog2806_1

Docktor, J. L., Dornfeld, J., Frodermann, E., Heller, K., Hsu, L., Jackson, K. A., Mason, A., Ryan, Q. X., & Yang, J. (2016). Assessing student written problem solutions : A problem-solving rubric with application to introductory physics. Physical Review Physics Education Research, 12(1), 010130. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.010130

Docktor, J. L., & Mestre, J. P. (2014). Synthesis of discipline-based education research in physics. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 10(2), 020119. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.020119

Dolin, J., & Evans, R. (Éds.). (2018). Transforming Assessment : Through an Interplay Between Practice, Research and Policy (Vol. 4). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63248-3

Drake, S. (1978). Galileo at Work : His Scientific Biography. University of Chicago Press.

Drigas, A., & Kontopoulou, M.-T. L. (2016). ICTs based Physics Learning. International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP), 6(3), 53. https://doi.org/10.3991/ijep.v6i3.5899

Duval, N. (2006). L'Ecole des Roches, phare français au sein de la nébuleuse de l'Education nouvelle (1899–1944). Paedagogica Historica, 42(1-2), 63-75. https://doi.org/10.1080/00309230600551999

E

El Azzouzi, A. E., Kaddari, F., & Elachqar, A. (2022). Physics mathematization : Teachers' observations on the application of ICT. 2022 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), 1-5. https://doi.org/10.1109/ISCV54655.2022.9806103

El Azzouzi, A., Kaddari, F., & Elachqar, A. (2023). Physics mathematization assessment : The nominal group technique as a context to investigate student understanding. International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE), 12(3), 1206. https://doi.org/10.11591/ijere.v12i3.25271

Elmougy, S., Sarhan, S., & Joundy, M. (2017). A novel hybrid of Shortest job first and round Robin with dynamic variable quantum time task scheduling technique. Journal of Cloud Computing, 6(1), 12. https://doi.org/10.1186/s13677-017-0085-0

F

Foth, T., Efstathiou, N., Vanderspank-Wright, B., Ufholz, L.-A., Dütthorn, N., Zimansky, M., & Humphrey-Murto, S. (2016). The use of Delphi and Nominal Group Technique in nursing education : A review. International Journal of Nursing Studies, 60, 112-120. https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2016.04.015

G

Galili, I. (2018). Physics and Mathematics as Interwoven Disciplines in Science Education. Science & Education, 27(1-2), 7-37. https://doi.org/10.1007/s11191-018-9958-y

George, R. (2006). A Cross-domain Analysis of Change in Students' Attitudes toward Science and Attitudes about the Utility of Science. International Journal of Science Education, 28(6), 571-589. https://doi.org/10.1080/09500690500338755

Geyer, M.-A., & Kuske-Janßen, W. (2019). Mathematical Representations in Physics Lessons. In G. Pospiech, M. Michelini, & B.-S. Eylon (Éds.), Mathematics in Physics Education (p. 75-102). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04627-9_4

Gilbert, J. K., & Justi, R. (2016). Modelling-based Teaching in Science Education (Vol. 9). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3

Grant, E. (1996). The Foundations of Modern Science in the Middle Ages : Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts. Cambridge University Press.

Grenier, J., & Lagarde, M. (2000). LA TECHNIQUE DU GROUPE NOMINALE (TGN), UNE MÉTHODE DE CUEILLETTE DES DONNÉES À CONNAÎTRE. 8.

Gustafsson, P., Jonsson, G., & Enghag, M. (2015). The problem-solving process in physics as observed when engineering students at university level work in groups. European Journal of Engineering Education, 40(4), 380-399. https://doi.org/10.1080/03043797.2014.988687

H

Hacking, I. (1996). The Disunities of the Sciences. https://philpapers.org/rec/HACTDO

Haeruddin, H., Prasetyo, Z. K., Prof., Master of Science Education, Yogyakarta State University, Indonesia, zuhdan@uny.ac.id, Supahar, S., & Master of Science Education, Yogyakarta State University, Indonesia, supahar@uny.ac.id. (2020). The Development of a Metacognition Instrument for College Students to Solve Physics Problems. International Journal of Instruction, 13(1), 767-782. https://doi.org/10.29333/iji.2020.13149a

Hammoumi, M. M. E., Bakkali, S., & Youssfi, S. E. (2020). Learner-Centered Teaching : A Case Study of its Implementation in Physics and Chemistry Classes in Moroccan High Schools. European Scientific Journal ESJ, 16(22). https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n22p271

Han, G., & Gezer, K. (2006). © 2006 IJESE by Gökkuşagi , ALL RIGHTS RESERVED. International Journal Of Environmental and Science Education, 1(1), 13.

Hasni, A. & Patrice Potvin. (2015). L'intéret pour les sciences et la technologie à l'école : Résultats d'une enquéte auprès d'élèves du primaire et du secondaire au Quèbec.

Hasni, A., & Potvin, P. (2015). Student's Interest in Science and Technology and its Relationships with Teaching Methods, Family Context and Self-Efficacy. 30.

Hattikudur, S., Prather, R. W., Asquith, P., Alibali, M. W., Knuth, E. J., & Nathan, M. (2012). Constructing Graphical Representations : Middle Schoolers' Intuitions and Developing Knowledge About Slope and Y-intercept: Constructing Graphs. School Science and Mathematics, 112(4), 230-240. https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2012.00138.x

Häussler, P., & Hoffmann, L. (2002). An intervention study to enhance girls' interest, self-concept, and achievement in physics classes : INTERVENTION STUDY. Journal of Research in Science Teaching, 39(9), 870-888. https://doi.org/10.1002/tea.10048

Heath. (1981). A History of Greek Mathematics. https://books.google.com/books/about/A_History_of_Greek_Mathematics.html?hl=fr&id=drnY3Vjix3kC

Hiligsmann, M., van Durme, Geusens, P., Dellaert, Dirksen, van der Weijden, T., Reginster, J.-Y., & Boonen. (2013). Nominal group technique to select attributes for discrete choice experiments : An example for drug treatment choice in osteoporosis. Patient Preference and Adherence, 133. https://doi.org/10.2147/PPA.S38408

Hoffmann, L. (2002). Promoting girls' interest and achievement in physics classes for beginners. Learning and Instruction, 12(4), 447-465. https://doi.org/10.1016/S0959-4752(01)00010-X

Hsu, C.-C., & Sandford, B. A. (2007). The Delphi Technique : Making Sense of Consensus. https://doi.org/10.7275/PDZ9-TH90

Hu, D., Chen, K., Leak, A. E., Young, N. T., Santangelo, B., Zwickl, B. M., & Martin, K. N. (2019). Characterizing mathematical problem solving in physics-related workplaces using epistemic games. Physical Review Physics Education Research, 15(2), 020131. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020131

Hu, D., & Rebello, N. S. (2013). Using conceptual blending to describe how students use mathematical integrals in physics. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 9(2), 020118. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.9.020118

Huisman, J., Lepori, B., Seeber, M., Frølich, N., & Scordato, L. (2015). Measuring institutional diversity across higher education systems. Research Evaluation, 24(4), 369-379. https://doi.org/10.1093/reseval/rvv021

Hutchings, H. A., Rapport, F. L., Wright, S., Doel, M. A., & Wainwright, P. (2010). Obtaining consensus regarding patient-centred professionalism in community pharmacy : Nominal group work activity with professionals, stakeholders and members of the public. International Journal of Pharmacy Practice, 18(3), 149-158. https://doi.org/10.1211/ijpp.18.03.0004

Hutchins, N. M., Biswas, G., Maróti, M., Lédeczi, Á., Grover, S., Wolf, R., Blair, K. P., Chin, D., Conlin, L., Basu, S., & McElhaney, K. (2020). C2STEM : A System for Synergistic Learning of Physics and Computational Thinking. Journal of Science Education and Technology, 29(1), 83-100. https://doi.org/10.1007/s10956-019-09804-9

I

Ibrahim, B., & Rebello, N. S. (2013). Role of mental representations in problem solving : Students' approaches to nondirected tasks. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 9(2), 020106. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.9.020106

Jensen, J. H., Niss, M., & Jankvist, U. T. (2017). Problem solving in the borderland between mathematics and physics. International Journal of Mathematical Education in Science and Technology, 48(1), 1-15. https://doi.org/10.1080/0020739X.2016.1206979

K

Kabil, O. (2015). Philosophy in Physics Education. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 197, 675-679. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.07.057

Kim, M., Cheong, Y., & Song, J. (2018). The Meanings of Physics Equations and Physics Education. Journal of the Korean Physical Society, 73(2), 145-151. https://doi.org/10.3938/jkps.73.145

Kirk, G. S., Raven, J. E., & Schofield, M. (1983). The Presocratic Philosophers : A Critical History with a Selection of Texts. Cambridge University Press.

Koul, R., Lerdpornkulrat, T., & Chantara, S. (2011). Relationship Between Career Aspirations and Measures of Motivation Toward Biology and Physics, and the Influence of Gender. Journal of Science Education and Technology, 20(6), 761-770.

Kraus, S. F., & Krause, E. (Éds.). (2020). Comparison of Mathematics and Physics Education I : Theoretical Foundations for Interdisciplinary Collaboration. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-29880-7

Krey, O. (2012). Zur Rolle der Mathematik in der Physik : Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender. Logos.

Krey, O. (2019). What Is Learned About the Roles of Mathematics in Physics While Learning Physics Concepts? A Mathematics Sensitive Look at Physics Teaching and Learning. In G. Pospiech, M. Michelini, & B.-S. Eylon (Éds.), Mathematics in Physics Education (p. 103-123). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04627-9_5

Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (2015). Information, Natural Law, and the Self-Assembly of Rhythmic Movement. Routledge.

Kvasz, L. (2012). What Can the Social Sciences Learn from the Process of Mathematization in the Natural Sciences. In D. Dieks, W. J. Gonzalez, S. Hartmann, M. Stöltzner, & M. Weber (Éds.), Probabilities, Laws, and Structures (p. 379-389). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3030-4_27

L

Lemke, J. L. (2004). The Literacies of Science. In E. W. Saul (Éd.), Crossing Borders in Literacy and Science Instruction (Vol. 1, p. 33-47). International Reading Association. https://doi.org/10.1598/0872075192.2

Leone, M. (2014). History of Physics as a Tool to Detect the Conceptual Difficulties Experienced by Students : The Case of Simple Electric Circuits in Primary Education. Science & Education, 23(4), 923-953. https://doi.org/10.1007/s11191-014-9676-z

Linder, A., Airey, J., Mayaba, N., & Webb, P. (2014). Fostering Disciplinary Literacy? South African Physics Lecturers' Educational Responses to their Students' Lack of Representational Competence. African Journal of Research in Mathematics, Science and Technology Education, 18(3), 242-252. https://doi.org/10.1080/10288457.2014.953294

López-Gay, R., Martínez Sáez, J., & Martínez Torregrosa, J. (2015). Obstacles to Mathematization in Physics : The Case of the Differential. Science & Education, 24(5-6), 591-613. https://doi.org/10.1007/s11191-015-9757-7

M

Madrane, M., Khaldi, M., & Talbi, M. (2009). Un système de formation à l'enseignement des sciences dans le contexte éducatif marocain : Des conditions pour une évolution possible. Recherches et ressources en éducation et formation, 3, Article 3. https://doi.org/10.4000/rref.815

Malle, G. (1993). Didaktische Probleme der elementaren Algebra (E. Ch. Wittmann, Éd.). Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-89561-5

McLaughlin, J. E., McLaughlin, G. W., & McLaughlin, J. (2015). Using composite metrics to measure student diversity in higher education. Journal of Higher Education Policy and Management, 37(2), 222-240. https://doi.org/10.1080/1360080X.2015.1019124

McLaughlin, J. E., McLaughlin, G. W., McLaughlin, J. S., & White, C. Y. (2016). Using Simpson's diversity index to examine multidimensional models of diversity in health professions education. International Journal of Medical Education, 7, 1-5. https://doi.org/10.5116/ijme.565e.1112

McMillan, S. S., King, M., & Tully, M. P. (2016). How to use the nominal group and Delphi techniques. International Journal of Clinical Pharmacy. https://doi.org/10.1007/s11096-016-0257-x

Meli, K., Zacharos, K., & Koliopoulos, D. (2016). The Integration of Mathematics in Physics Problem Solving : A Case Study of Greek Upper Secondary School Students. Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education, 16(1), 48-63. https://doi.org/10.1080/14926156.2015.1119335

Meyer, G., & Vivier, A. (2007). The role of NAA in nuclear chemistry education. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 271(1), 77-82. https://doi.org/10.1007/s10967-007-0109-1

Mostefa, M. (2002). Enseignement des sciences physiques :pratiques pédagogiques. Insaniyat / إنسانيات. Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales, 17-18, Article 17-18. https://doi.org/10.4000/insaniyat.8688

N

Naki ERDEMİR. (2009). Determining students' attitude towards physics through problem-solving strategy. https://www.eduhk.hk/apfslt/v10_issue2/erdemir/erdemir5.htm

Newton, I. (1833). Philosophiae naturalis principia mathematica. G. Brookman.

O

OCDE. (2005). Résoudre des problèmes, un atout pour réussir : Premières évaluations des compétences transdisciplinaires issues de PISA 2003. OECD. https://doi.org/10.1787/9789264007444-fr

OCDE. (2006). Compétences en sciences, lecture et mathématiques : Le cadre d'évaluation de PISA 2006. OECD. https://doi.org/10.1787/9789264026421-fr

Okoye, K., Hussein, H., Arrona-Palacios, A., Quintero, H. N., Ortega, L. O. P., Sanchez, A. L., Ortiz, E. A., Escamilla, J., & Hosseini, S. (2023). Impact of digital technologies upon teaching and learning in higher education in Latin America : An outlook on the reach, barriers, and bottlenecks. Education and Information Technologies, 28(2), 2291-2360. https://doi.org/10.1007/s10639-022-11214-1

Omar, A., & Benjelloun, N. (2013). Intégration des TIC dans l'enseignement des sciences physiques au Maroc dans le cadre du programme GENIE : Difficultés et obstacles. Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire, 10(2), 49. https://doi.org/10.7202/1035522ar

Ouahab, Z. F., Machkour, A., & Otmane, I. A. (2024). Les difficultés liées à l'enseignement des sciences physiques par des activités expérimentales.

Oxford Languages. (2024). https://languages.oup.com/about-us/updates/june-2024/

P

Pal, M. & Rinki. (2022). Blended Approach to Physics Problem-Solving Using Conventional and Virtual Labs : A Survey of Student's Perception. Studies in Learning and Teaching, 3(1), 97-106. https://doi.org/10.46627/silet.v3i1.102

Pastuchow, M. (2011). I nterdisciplinarity in linguistic research. 12.

Paty, M. (2007). The idea of quantity at the origin of the legitimacy of mathematization in physics.

Pendule Simple. (2018). https://fr.scribd.com/document/433098235/Tp-Pendule-Simple

Pincock, C. (2007). A Role for Mathematics in the Physical Sciences. Nous, 41(2), 253-275. https://doi.org/10.1111/j.1468-0068.2007.00646.x

Planinic, M., Ivanjek, L., Susac, A., & Milin-Sipus, Z. (2013). Comparison of university students' understanding of graphs in different contexts. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 9(2), 020103. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.9.020103

Pospiech, G. (2019). Framework of Mathematization in Physics from a Teaching Perspective. In G. Pospiech, M. Michelini, & B.-S. Eylon (Éds.), Mathematics in Physics Education (p. 1-33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04627-9_1

Pospiech, G., Michelini, M., & Eylon, B.-S. (Éds.). (2019). Mathematics in Physics Education. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04627-9

Potvin, P., Hasni, A., Sy, O., & Riopel, M. (2018). Two Crucial Years of Science and Technology Schooling : A Longitudinal Study of the Major Influences on and Interactions Between Self-Concept, Interest, and the Intention to Pursue S&T. Research in Science Education. https://doi.org/10.1007/s11165-018-9751-6

Prather, E. (2005). Students' Beliefs About the Role of Atoms in Radioactive Decay and Half-life. Journal of Geoscience Education, 53(4), 345-354. https://doi.org/10.5408/1089-9995-53.4.345

Prediger, S., & Wessel, L. (2013). Fostering German-language learners' constructions of meanings for fractions—Design and effects of a language- and mathematics-integrated intervention. Mathematics Education Research Journal, 25(3), 435-456. https://doi.org/10.1007/s13394-013-0079-2

R

Redish, A. D. (2016). Vicarious trial and error. Nature Reviews Neuroscience, 17(3), 147-159. https://doi.org/10.1038/nrn.2015.30

Redish, E. F. (2005). PROBLEM SOLVING AND THE USE OF MATH IN PHYSICS COURSES. 10.

Redish, E. F., & Kuo, E. (2015). Language of Physics, Language of Math : Disciplinary Culture and Dynamic Epistemology. Science & Education, 24(5-6), 561-590. https://doi.org/10.1007/s11191-015-9749-7

Reverdy, C. (2016). L'essentiel sur… : L'utilisation de l'interdisciplinarité dans le secondaire [Billet]. Édupass. https://edupass.hypotheses.org/929

Rodriguez, J.-M. G., Santos-Diaz, S., Bain, K., & Towns, M. H. (2018). Using Symbolic and Graphical Forms To Analyze Students' Mathematical Reasoning in Chemical Kinetics. Journal of Chemical Education, 95(12), 2114-2125. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00584

S

Schnotz, W., & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. Learning and Instruction, 13(2), 141-156. https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8

Schoenfeld, A. H. (2020). Mathematical practices, in theory and practice. ZDM, 52(6), 1163-1175. https://doi.org/10.1007/s11858-020-01162-w

Sherin, B. L. (2001). How Students Understand Physics Equations. Cognition and Instruction, 19(4), 479-541.

Simpson, E. H. (1949). Measurement of Diversity. Nature, 163(4148), Article 4148. https://doi.org/10.1038/163688a0

Smigiel, E., & Sonntag, M. (2013). A paradox in physics education in France. Physics Education, 48(4), 497-505. https://doi.org/10.1088/0031-9120/48/4/497

Steinberg, R. N., Wittmann, M. C., & Redish, E. F. (1997). Mathematical tutorials in introductory physics. AIP Conference Proceedings, 399, 1075-1092. https://doi.org/10.1063/1.53110

Stillman, G., & Brown, J. P. (2014). Evidence of implemented anticipation in mathematising by beginning modellers. Mathematics Education Research Journal, 26(4), 763-789. https://doi.org/10.1007/s13394-014-0119-6

T

TaúkÕn, E., TaúkÕn, E., & Öztürk, M. (2005). Natural Compounds with Bioactive Properties from Marine Algae. 5.

Temel, H., & Durmus, S. (2007). A STUDY ON THE INTEGRATION OF PRIMARY SCHOOL SCIENCE AND TECHNOLOGY AND MATHEMATICS CURRICULA FOR GRADES 6 THROUGH 8. 7.

Tinker, M. H., & Thomson, J. J. (2003). Teaching mathematics to physicists in the UK-FLAP and PPLATO. Europhysics News, 34(5), 186-189. https://doi.org/10.1051/epn:2003504

Trouche, L. (2019). Rien n'est plus pratique qu'une bonne interdisciplinarité. Hermès, n° 85(3), 98. https://doi.org/10.3917/herm.085.0098

Truesdell, C., & Euler, L. (1960). The Rational Mechanics of Flexible Or Elastic Bodies, 1638-1788 : Introduction to Leonhardi Euleri Opera Omnia Vol X Et XI Seriei Secundae. Orell Füssli.

Tuminaro, J. (2004). Understanding students' poor performance on mathematical problem solving in physics. AIP Conference Proceedings, 720, 113-116. https://doi.org/10.1063/1.1807267

Tuminaro, J., & Redish, E. F. (2007). Elements of a cognitive model of physics problem solving : Epistemic games. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 3(2), 020101. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.3.020101

V

Vinitsky-Pinsky, L., & Galili, I. (2014). The Need to Clarify the Relationship between Physics and Mathematics in Science Curriculum : Cultural Knowledge as Possible Framework. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 116, 611-616. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.266

W

Waldrip, B., Prain, V., & Carolan, J. (2010). Using Multi-Modal Representations to Improve Learning in Junior Secondary Science. Research in Science Education, 40(1), 65-80. https://doi.org/10.1007/s11165-009-9157-6

Wallance & Ellerton (Éd.). (2004). Proceedings of the twenty-sixth annual meeting, North American Chapter of the International Group for the Psychology of Mathematics Education : PME-NA XXVI, October 21-24, 2004, Toronto, Ontario, Canada. Ontario Institute for Studies in Education of the University of Toronto.

West, S. S., Vasquez-Mireles, S., & Coker, C. (2007). Mathematics and/or Science Education : Separate or Integrate? Journal of Mathematical Sciences, 8.

Widayanti, Abdurrahman, & Suyatna, A. (2019). Future Physics Learning Materials Based on STEM Education : Analysis of Teachers and Students Perceptions. Journal of Physics: Conference Series, 1155, 012021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1155/1/012021

Williams, C. A., & Zumbansen, P. (2011). The Embedded Firm : Corporate Governance, Labor, and Finance Capitalism. Cambridge University Press.

Williams, C., Stanisstreet, M., Spall, K., Boyes, E., & Dickson, D. (2003). Why aren't secondary students interested in physics? Physics Education, 38(4), 324-329. https://doi.org/10.1088/0031-9120/38/4/306

Wolff, K. (2020). Researching the engineering theory-practice divide in industrial problem solving. European Journal of Engineering Education, 45(2), 181-195. https://doi.org/10.1080/03043797.2018.1516738

Y

Yusuf, I., & Widyaningsih, S. W. (2019). HOTS profile of physics education students in STEM-based classes using PhET media. Journal of Physics: Conference Series, 1157, 032021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1157/3/032021

Z

Zaher, A. A., & Damaj, I. W. (2018). Extending STEM Education to Engineering Programs at the Undergraduate College Level. International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP), 8(3), 4. https://doi.org/10.3991/ijep.v8i3.8402

Zeidmane, A. (2013). Development of Mathematics Competences in Higher Education Institutions. International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP), 3(S2), 11. https://doi.org/10.3991/ijep.v3iS2.2394

Zhang, Y., Vand, B., & Baldi, S. (2022). A Review of Mathematical Models of Building Physics and Energy Technologies for Environmentally Friendly Integrated Energy Management Systems. Buildings, 12(2), 238. https://doi.org/10.3390/buildings12020238

Productions Scientifiques

Publication Scopus

Publication n°1 :

El Azzouzi, A. E., Kaddari, F., & Elachqar, A. (2022). Physics mathematization : Teachers' observations on the application of ICT. *2022 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, 1-5. https://doi.org/10.1109/ISCV54655.2022.9806103

Publication n°2 :

El Azzouzi, A., Kaddari, F., & Elachqar, A. (2023). Physics mathematization assessment : The nominal group technique as a context to investigate student understanding. *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)*, *12*(3), 1206. https://doi.org/10.11591/ijere.v12i3.25271

Publication n°3 :

Physics Problem-Solving: Teachers' Views on the Impact of Mathematics on Secondary Students' Interest. (2023). *Journal of Educational and Social Research*, *13*(1), 204. https://doi.org/10.36941/jesr-2023-0019

Communications Orales

Communication n°1:

- ✓ Physics mathematization: Teachers' observations on the integration of ICT.
- ✓ E-ICIES'2022, Istanbul, Turkey
- ✓ Auteurs : Abdelwahab El Azzouzi, Abdelrhani Elachqar, Fatiha Kaddari

Communication n°2 :

- ✓ La mathématisation des problèmes en sciences physiques : un impact sur l'intérêt des apprenants du secondaire.
- ✓ Le colloque internationale EVALSUP, Oujda
- ✓ Auteurs : Abdelwahab El Azzouzi, Abdelrhani Elachqar, Fatiha Kaddari

Communication n°3 :

- ✓ La mathématisation des sciences physiques : Impact sur l'évaluation des apprenants du secondaire.
- ✓ La 8ème edition de l'ICT days annual education conference, Ifrane.
- ✓ Auteurs : Abdelwahab El Azzouzi, Abdelrhani Elachqar, Fatiha Kaddari

Communication n°4 :

- ✓ L'intégration des mathématiques dans la résolution des problèmes en sciences physiques : Impact sur l'intérêt des apprenants du secondaire.
- ✓ Conférence internationale en sciences d'éducation et système d'information, Kenitra.
- ✓ Auteurs : Abdelwahab El Azzouzi, Abdelrhani Elachqar, Fatiha Kaddari

Communication n°5 :

- ✓ Environmental education in the teaching and the learning of physics: teachers' observation on students' interest.
- ✓ International conference on innovation and modern applied sciences in environmental studies (ICIES'2022), Tanger.
- ✓ Auteurs : Abdelwahab El Azzouzi, Abdelrhani Elachqar, Fatiha Kaddari

Communication n°6 :

- ✓ L'application des TIC dans la mathématisation des sciences physiques : Impact sur la performance des apprenants du secondaire.
- ✓ Colloque international en Digitalisation, Éducation, Formation & Innovation (DEFI'22), Oujda
- ✓ Auteurs : Abdelwahab El Azzouzi, Abdelrhani Elachqar, Fatiha Kaddari