Analyse des difficultés liées à l'usage des mathématiques dans l'étude de la Cinématique par des élèves en classe de terminale scientifique

Moustapha THIAM, **Amadou Yacine DIATTA, Salmon FAYE, Cheikh Tidiane SALL et Assane TOURÉ**

Université Cheikh Anta Diop de Dakar/Sénégal

Résumé

Cet article qui s'inscrit dans le cadre d'une recherche en sciences de l'éducation et précisément en didactique de la physique s'intéresse à la forte intrication des mathématiques comme outil pour l'enseignement de la physique. Cette étude de caractère interdisciplinaire a pour objet d'explorer le niveau de maitrise, par des élèves de terminale du Sénégal, de concepts mathématiques dans l'étude de la cinématique. En choisissant une méthode quantitative, un questionnaire en ligne, sous forme de test, a été administré à des élèves de terminales S1 et S2. Les questions ont porté sur la représentation vectorielle de grandeurs cinématiques, la détermination de coordonnées cartésiennes par calcul de dérivées ou recherche de primitives et la détermination de constantes de mouvement par exploitation graphique. Les résultats ont révélé que les élèves éprouvent plus de difficultés avec la manipulation des vecteurs. Le calcul de dérivées et intégral et la recherche de primitives connaissent moins de difficultés. L'exploitation de graphiques donne plus de satisfaction. Certes les performances réalisées par les élèves sont acceptables, mais nous trouvons nécessaire d'améliorer encore le niveau de maitrise des élèves des savoirs mathématiques utilisés en physique, particulièrement la manipulation des vecteurs.

Mots- clés : Cinématique, Vecteur position, Vecteur vitesse, Vecteur accélération, Dérivée, Intégral, Primitive.

Abstract

This article, which is part of research in educational sciences and specifically in physics didactics, focuses on the strong intertwining of mathematics as a tool for teaching physics. This interdisciplinary study aims to explore the level of mastery, by high school students in Senegal, of mathematical concepts in the study of kinematics. By choosing a quantitative method, an online questionnaire, in the form of a test, was administered to high school students. The questions focused on the vector representation of kinematic quantities, the determination of Cartesian

coordinates by calculating derivatives or searching for primitives and the determination of motion constants by graphical exploitation. The results revealed that students have more difficulty with manipulating vectors. The calculation of derivatives and integrals and the search for primitives are less difficult. The exploitation of graphs gives more satisfaction. Certainly, the performances achieved by the students are acceptable, but we find it necessary to further improve the level of mastery of the students' mathematical knowledge used in physics, particularly vector manipulation.

Keywords: Kinematics, Position vector, Velocity vector, Acceleration vector, derivative, Integral, Primitive.

Introduction

Bien qu'étant une science expérimentale, la physique est une discipline dont l'enseignement repose sur un cadre mathématique rigoureux. Lorsqu'il s'agit de décrire, d'analyser, et d'expliquer les phénomènes naturels, des prérequis mathématiques solides sont exigibles chez les apprenants.

La plupart des concepts de la physique sont des « *concepts relationnels* » c'est-à-dire un ensemble de propositions et de relations postulées comme invariantes. Ils traduisent des relations entre propriétés. C'est le cas par exemple, des grandeurs fondamentales de la mécanique telles que force ($\vec{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{m}\vec{\boldsymbol{a}}$), quantité de mouvement ($\vec{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{m}\vec{\boldsymbol{v}}$), etc. Les concepts relationnels jouent un rôle fondamental dans la construction de la science. Ils sont présents dans les équations générales de causalité qui résument les lois et les théories. Bachelard ne disait-il pas que : « *Les hypothèses de la Physique se formulent mathématiquement ».* Il serait difficile, voire impossible de trouver un concept physique qui ne soit pas indissolublement associé à un (ou plusieurs) concept(s) mathématique(s). Ainsi, pour reprendre Bodinier & Sevrain (2017), « *Ces deux disciplines ne peuvent donc pas être abordées de manière complètement séparée, mais peuvent (et peut-être, doivent), se développer conjointement.* »

La cinématique, branche fondamentale de la physique, focalise particulièrement cette interaction étroite entre physique et mathématiques. L'enseignement de la cinématique constitue un pilier essentiel dans la formation scientifique des élèves du secondaire, mettant en lumière une fusion inextricable entre les concepts physiques et les outils mathématiques nécessaires à leur compréhension. La description de ces concepts de la cinématique se fait à travers des outils mathématiques comme le calcul vectoriel, la trigonométrie, le calcul différentiel et intégral, ainsi que la manipulation de relations algébriques et analytiques, la représentation et

l'exploitation graphique. Cette forte dose de mathématiques se justifie d'ailleurs par le fait que dans les anciens programmes et anciens manuels, la cinématique était traitée en mathématiques dans la partie *« Fonction vectorielle d'une variable réelle »* (Monge et al, 1971).

Cet étroite intrication entre mathématiques et cinématique n'est pas sans obstacles en raison des nombreux concepts mathématiques sous-jacents. La problématique de l'utilisation des mathématiques comme outil dans l'enseignement de la physique a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche antérieurs. (Genin & al, 1987 ; Ghislain, 2004 ; Ruth Rodriguez (2007) ; Malonga Moungabio (2008) ; Ba, 2011 ; Trudel & Metioui, 2011 ; Adjibi et al, 2016 ; Raaouf & al, 2016 ; Bodinier, G. & Sevrain, 2017 ; Alice & al, 2021 ; …). Ces auteurs ont mis en lumière des points critiques lorsqu'il s'agit pour les élèves d'appliquer correctement les concepts mathématiques à la résolution de problèmes de physique concrets. Ce présent article a pour objet d'explorer le degré de maitrise d'outils mathématiques dans l'étude de la cinématique par des élèves en classe de terminale scientifique ?

Après avoir précisé la méthodologie de recherche, nous présenterons les résultats de l'étude et leur analyse. Ensuite les résultats feront l'objet de discussion. En fin, une conclusion sera tirée.

1. Méthodologie

Dans cette étude nous tenterons d'explorer l'aptitude d'élèves à manipuler les outils mathématiques, tels que le calcul des dérivées[42], la recherche de primitives[43] ou le calcul intégral[44] et l'exploitation de représentations graphiques, qui peuvent se dresser comme des obstacles dans l'enseignement-apprentissage de la cinématique en classe de terminale afin d'estimer les obstacles liés à leur carence, à la maitrise des concepts cinématiques.

Pour mener cette étude de nature quantitative, un questionnaire structuré est administré, de manière anonyme, à des élèves de terminales des

[42] La dérivée d'une fonction d'une variable réelle $f(x)$ est une fonction notée $f'(x)$. Elle mesure l'ampleur du changement de la valeur de la fonction Δf par rapport à un petit changement de son argument Δx.

[43] La recherche de primitive, c'est l'opération inverse du calcul de dérivées. Toute fonction $F(x)$ dont la dérivée donne la fonction $f(x)$ est une primitive de $f(x)$.

[44] On appelle intégrale d'une fonction $f(x)$ entre deux réels a et b sur un intervalle I, notée $\int_a^b f(x)dx$, le réel $F(b) - F(a)$, où $F(x)$ est une primitive quelconque de $f(x)$ sur I. Elle donne la valeur de l'aire algébrique du domaine délimité par l'axe des abscisses et la courbe représentative de $f(x)$ et les droites verticales d'équations $x = a$ et $x = b$.

séries S1 et S2, répartis dans différents établissements du Sénégal, publiques comme privés. Il s'agit d'un questionnaire en ligne sous forme de test, constitué de douze questions, envoyé via l'application Drive. Les questions ont porté sur la représentation vectorielle de grandeurs cinématiques (vecteur position, vecteur vitesse, vecteur accélération), la détermination de coordonnées cartésiennes par calcul de dérivées ou recherche de primitive, y compris pour le mouvement rectiligne sinusoïdal avec les fonctions trigonométriques. En fin, la détermination de constantes de mouvement (période, amplitude, phase, abscisse initiale) par exploitation graphique.

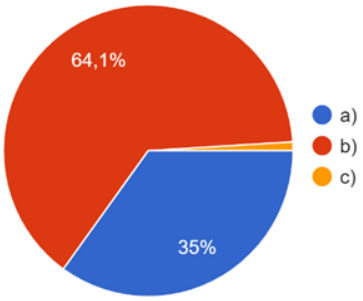
Pour chacune des douze questions, trois réponses notées a), b) et c) sont proposées, dont une est correcte. L'élève doit choisir la bonne réponse. Les réponses sont reçues directement après validation des répondants. Les données sont collectées et représentées sous forme de diagrammes circulaires, grâce à l'application Drive qui intègre le traitement statistique. Ensuite, elles sont. Ensuite, elles sont analysées de manière à identifier les tendances et les patterns relatifs aux difficultés d'origine mathématique dans l'enseignement-apprentissage de la cinématique.

2. Résultats et analyse

2.1. Questions sur la représentation vectorielle

Question n°1 : 103 réponses

Réponse correcte : b)

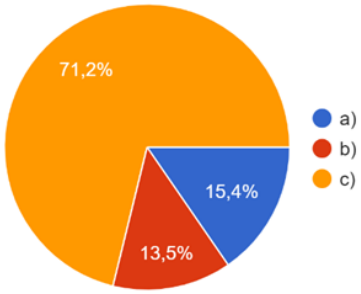


La question n°1 a porté sur la représentation du vecteur position. Sur 103 réponses, les 64,1 % sont correctes. Ce résultat indique que près de deux tiers des élèves sont en mesure de représenter correctement le vecteur position et que, environ un tiers d'entre eux n'arrivent pas à représenter correctement cette grandeur vectorielle. Soit donc un tiers d'élèves de terminale scientifiques qui éprouvent encore des difficultés dans la manipulation des vecteurs comme outil mathématique dans le domaine de la cinématique.

Question n°2 : 104 réponses

Réponse correcte : c)

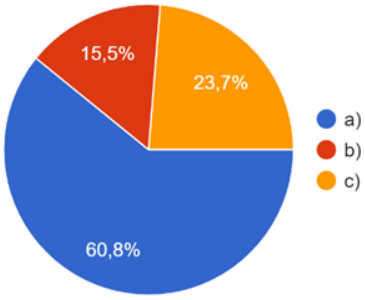
La question n°2 a porté sur la représentation du vecteur vitesse. Pour 104 réponses obtenues, 71,2 % sont correctes. Ce pourcentage, bien que plus élevé que le précédent, montre que plus d'un quart des élèves ont encore du mal à représenter correctement le vecteur vitesse.



Question n°3 : 97 réponses

Réponse correcte : a)

La question n°3 a porté sur la représentation du vecteur accélération. Pour 97 réponses d'élèves, on obtient un taux de satisfaction de 60,8 %. Donc moins de deux tiers des élèvent ont réussi à représenter correctement le vecteur accélération, tandis que plus d'un tiers n'y arrivent pas. Le taux de satisfaction moins important que les deux précédents montre que la représentation du vecteur accélération est plus problématique. Le fait qu'il y ait moins de réponses également confirme cette hypothèse.

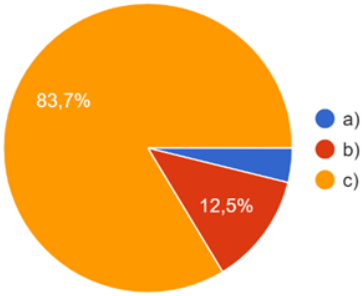


2.2. Question sur le calcul de dérivées et la recherche de primitive

Question n°4 : 104 réponses

Réponse correcte : c)

La question n°4 a porté sur la détermination des cordonnées du vecteur vitesse partant de celles du vecteur position. Il est question alors de dériver les coordonnées du vecteur position pour obtenir celles du vecteur vitesse.

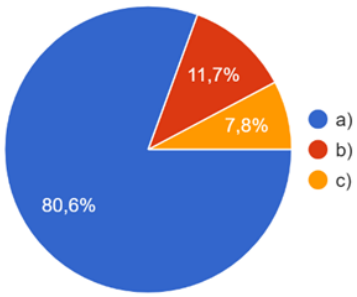


Pour 104 élèves ayant répondu, on se retrouve avec un taux de bonnes réponses de 83,7 %. Ce pourcentage indique d'abord que la majorité des élèves savent qu'il faut utiliser l'opération de dérivation, ce qui est un savoir physique. Ensuite qu'ils ont réussi à mener correctement le calcul de dérivées, ce qui est une aptitude d'ordre mathématique. Tout de même environ un élève sur cinq présente des lacunes

sur la détermination des coordonnées du vecteur vitesse à partir de celles du vecteur position.

Question n°5 : 103 réponses

Réponse correcte : a)

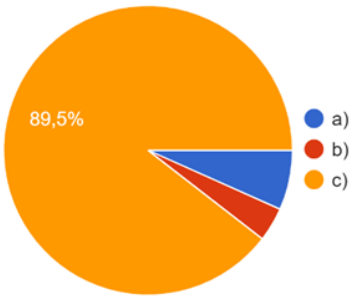


La question n°5 a porté sur la détermination des coordonnées de vecteur accélération, celles du vecteur vitesse correspondant étant données. On attend ici de l'élève qu'il dérive successivement deux fois les coordonnées du vecteur position pour aboutir à celles du vecteur accélération.

Sur 103 réponses d'élèves, le taux de réussite est de 80,6 %. Ce taux est proche mais un peu moins faible que le précédent. Cet écart peut s'expliquer par la deuxième opération de dérivation. Avec un rapport d'un élève sur cinq n'ayant pas répondu correctement, c'est à peu près le même constat que précédemment.

Question n°6 : 105 réponses

Réponse correcte : c)



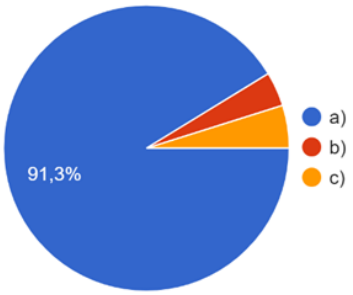
La question n°6 porte encore sur la détermination des coordonnées du vecteur accélération mais cette fois-ci à partir des coordonnées du vecteur vitesse. L'élève doit encore effectuer un calcul de dérivées en une seule étape.

105 élèves ont répondu avec 89,5 % de satisfaction. Environ un élève sur dix n'arrive pas à donner la bonne réponse. Ce résultat s'inscrit dans la même logique que les deux précédents malgré l'amélioration. On dérive une seule fois, donc plus simple que pour la question n°5 où il faut calculer la dérivée seconde. On dérive une fonction du second degré, plus évident que pour la question n°4 avec une fonction du troisième degré.

Question n°7 : 103 réponses

Réponse correcte : a)

La question n°7 porte sur la détermination des coordonnées du vecteur position à partir de celles du vecteur vitesse. Pour y arriver, l'élève doit effectuer une recherche de primitive ou un calcul intégral.

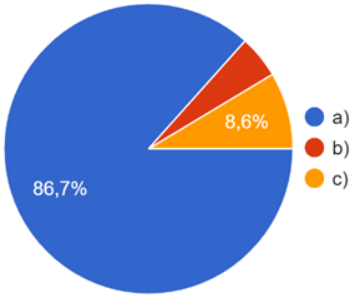


103 élèves ont répondu avec 91,3 % de bonnes réponses. Ce résultat indique que neuf élèves sur dix connaissent l'opération à mener (savoir physique), et arrivent à le faire correctement (savoir mathématique).

Question n°8 : 105 réponses

Réponse correcte : a)

La question n°8 porte sur la détermination des coordonnées de vecteur vitesse partant de celles de vecteur accélération. Comme dans la question précédente, une recherche de primitive permet d'accéder au résultat.

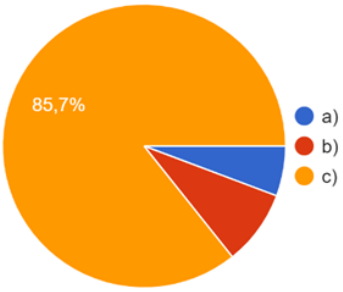


Sur 105 réponses obtenues, il y a un taux de réussite de 86,7 %. Ce résultat est un peu moins satisfaisant que le précédent. Cet écart peut être attribué à la nature des fonctions initiales dont on cherche des primitives.

Question n°9 : 105 réponses

Réponse correcte : c)

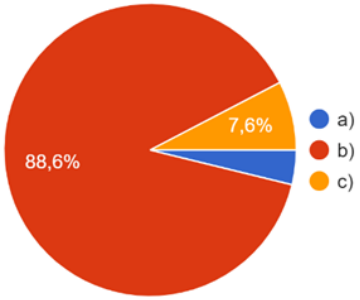
La question n°9 porte sur la détermination des coordonnées du vecteur position en partant de celles du vecteur accélération. On s'attend ici à ce que l'élève procède par la recherche de primitives successives pour accéder au résultat.



Avec un taux de satisfaction de 85,7 % sur 105 élèves ayant répondu, on se retrouve presque avec le même pourcentage que précédemment malgré les deux opérations à effectuer.

Question n°10 : 105 réponses

Réponse correcte : b)

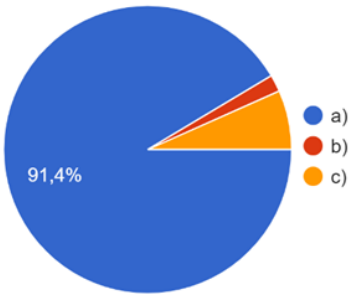


Pour la question n°10, il s'agit de déterminer l'expression de l'accélération, partant de celle de la vitesse, pour un mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal. L'opération à mener consiste donc à dériver une fonction sinusoïdale.

88,6 % des élèves ont répondu convenablement sur un nombre total de 105 répondants. Ce résultat indique que près de neuf élèves sur dix savent qu'il faut dériver et arrivent à le faire correctement. Aussi, un peu plus d'un élève sur dix n'arrivent pas à déterminer correctement l'expression de l'accélération en utilisant celle de la vitesse. Soit, ils ne savent pas qu'ils doivent dériver, ou bien ils ne sont pas en mesure d'effectuer le calcul de dérivées de fonctions sinusoïdales.

Question n°11 : 105 réponses

Réponse correcte : a)



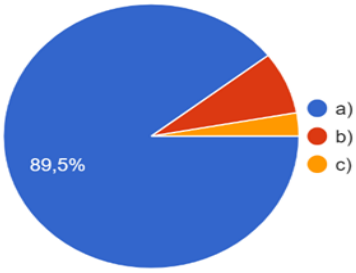
Partant de la même fonction que précédemment, c'est-à-dire de la même expression de la vitesse dans le cas d'un mouvement rectiligne sinusoïdal, il est demandé cette fois-ci de déterminer celle du vecteur position. Il sera question alors de procéder par recherche de primitive ou calcul intégral de fonction sinusoïdale.

Toujours avec 105 réponses, on se retrouve avec un taux de 91,4 % de succès. Un léger mieux est constaté par rapport à la question précédente. Apriori, ce résultat laisse apparaitre que les élèves maitrisent mieux le calcul intégral que le calcul de dérivées. En fait l'écart pourrait bien s'explique aussi par le fait que les élèves sont plus habitués dans le cours de physique à voir cette forme d'expression de l'abscisse en mouvement rectiligne sinusoïdal. Donc plus un savoir mathématique est utilisé en physique, plus les élèves ont des chances à le maitriser.

Question n°12 : 105 réponses

Réponse correcte : a)

Dans la question n°12, il est demandé aux élèves de déterminer les constantes de mouvement sinusoïdal (amplitude, abscisse initiale, période et phase initiale) à partir de la représentation graphique de la loi de variation de l'abscisse en fonction du temps.



Pour 105 réponses obtenues, le nombre de réponses correctes s'évaluent à 89,5 %, à peu près le même taux de satisfaction que pour les calculs de dérivées et intégral. Cela montre que la grande majorité des élèves sont dans de bonnes dispositions pour extraire les informations physiques pertinentes à partir d'une exploitation graphique basée sur l'utilisation de concepts mathématiques. Toujours est-il que le fait d'avoir un peu plus de 10 % des élèves qui continuent à avoir des difficultés de lecture de graphes est inquiétant.

3. Discussion

3.1. Questions n°1, n°2 et n°3

Les trois premières questions portant sur la représentation vectorielle de grandeurs cinématiques, les résultats montrent d'abord que, même s'il y a un niveau de maitrise variable entre la représentation des grandeurs, les écarts ne sont pas tout à fait importants (64,1 % ; 71,2 % ; 60,8 %). La représentation du vecteur accélération est un peu moins maitrisée, ensuite celle du vecteur position. Celle du vecteur vitesse donne un peu plus de satisfaction.

D'une part, la notion de vecteur est introduite dans le cours de mathématique à partir de la classe de 4^{ième} au collège. Le fait que des élèves de terminale scientifique peinent encore à la manipuler correctement est une preuve manifeste de l'existence de lacunes dans cette discipline. D'autre part, les écarts de résultats internes entre grandeurs peuvent trouver leur origine potentiellement dans la maitrise disparate de ces grandeurs dans le domaine de la physique même ; c'est-à-dire indépendamment des savoirs mathématiques. L'accélération étant une notion nouvellement découverte en terminale, les élèves peuvent ne pas être suffisamment habitués à sa représentation. Par contre les vecteurs position et vitesse sont manipulés par les élèves depuis la classe de seconde. Le fait que la représentation du vecteur vitesse donne plus de satisfaction peut s'explique par la connaissance de ses caractéristiques, particulièrement la direction qui est tangente à la trajectoire au point considéré. Cette précision sur la direction du vecteur vitesse, vue en seconde est appliquée en première et en terminale sur plusieurs chapitres jusqu'en électromagnétisme avec la force de Lorentz. Comme indiqué plus

haut, l'utilisation fréquente en physique d'un outil mathématique pourrait aider les élèves à son assimilation.

Si maintenant on considère le résultat global des trois questions portant sur la représentation vectorielle, on se retrouve avec un pourcentage d'environ 65,4 %. Ce résultat indique qu'un peu plus d'un tiers d'élèves de terminale trainent encore des lacunes sur la manipulation des vecteurs après cinq années d'utilisation en mathématiques et en physique. Cet échec est donc imputable en très bonne partie à la non maitrise d'un outil mathématique de base, à savoir le vecteur, fondamental et nécessaire à l'enseignement apprentissage de la physique.

3.2. Questions n°4, n°5, n°6, n°7, n°8, n°9, n°10, n°11 et n°12

Pour les questions portant sur le calcul de dérivées et la recherche de primitives ou le calcul intégral, les pourcentages de réponses correctes se situent entre 80,6 et 91,4, avec une valeur moyenne de 87,2 %. Nous obtenons des résultats légèrement mieux pour la détermination de constantes de mouvement sinusoïdal avec 89,5 %.

Environ près de neuf élèves sur dix sont en mesure de déterminer les coordonnées de grandeurs cinématiques par calcul de dérivées ou intégral aussi bien pour des fonctions polynômes que pour des fonctions sinusoïdales et d'exploiter une sinusoïde en extrayant les informations utiles. Ainsi un peu plus d'un élève sur dix, rencontre encore des difficultés lorsqu'il s'agit de déterminer ces grandeurs. Même si ces résultats témoignent, à priori d'une bonne performance des élèves dans l'application de ces outils mathématiques en physique, les inquiétudes demeurent justement parce que ces outils constituent des prérequis. Si pour la recherche de primitives ou le calcul intégral et les sinusoïdes les élèves les ont appris dans le cours de mathématiques de terminale, pour le calcul de dérivées, c'est depuis la classe de première. Alors à ce stade de l'année, si plus de 10 % d'élèves trainent encore des lacunes sur de tels contenus de savoirs, il y a lieu de s'interroger. A priori, la difficulté peut être imputée à la non maîtrise du cours de mathématiques ; c'est-à-dire que les savoirs ne sont pas acquis dans le domaine des mathématiques. Cependant, le transfert des savoirs mathématiques à la physique, même s'ils sont acquis au départ, pourrait bien avoir un rôle à jouer à ce niveau. Il se pose alors la lancinante question de l'interdisciplinarité mathématiques-physique. Dans le cours de mathématiques, les fonctions sont exprimées habituellement avec la variable x. Or, en physique c'est généralement la variable temps t qui est utilisée. En fait on étudie des fonctions du temps. Là où les mathématiciens écrivent $\boldsymbol{f(x) = ax^2 + bx + c}$, le physicien écrit par exemple $\boldsymbol{v(t) = at^2 + bt + v}$. Pour la dérivée première, si le mathématicien écrit $\frac{\boldsymbol{df(x)}}{\boldsymbol{dx}}$ et note par $\boldsymbol{f'(x)}$, le

physicien écrit $\frac{dv(t)}{dt}$ et note par $\dot{v}(t)$. Alors pour mieux accompagner les élèves à gérer ces ponts entre disciplines, des stratégies de remédiation doivent être élaborées. Il faudrait d'abord, du côté du professeur de mathématiques, de proposer des exercices pratiques, par exemple en travaux dirigés changer parfois la variable x par la variable t. Le professeur de physique, à son tour, peut partir de l'écriture des fonctions en mathématiques avec la variable x. Ensuite il montre aux élèves que c'est la variable temps t qui sera utilisée à la place de la variable x et que par conséquent les calculs obéissent aux mêmes règles que celles qu'ils ont apprises dans le cours de mathématiques. Ainsi, cette jonction faite en amont et en aval permettrait aux élèves de ne pas perdre pied au cours de la transition entre les deux disciplines.

Conclusion

Au cours de cette recherche exploratoire, nous avons cherché à estimer le degré de maitrise d'outils mathématiques dans l'étude de la Cinématique par des élèves en classe de terminale scientifique. Pour cela, nous avons utilisé un questionnaire évaluatif sur la représentation vectorielle de grandeurs cinématiques, sur le calcul de dérivées et intégral ou la recherche de primitives, et en fin sur l'exploitation graphique.

L'analyse des résultats révèle que les élèves éprouvent plus de difficultés avec la représentation vectorielle des grandeurs cinématiques où le taux de succès et de 65,4 %. 34,6 % d'élèves éprouvent encore des difficultés avec le traitement des vecteurs. Pour le calcul de dérivées et intégral, il y a une nette amélioration du taux de réussite. 87,2 % des élèves s'en sortent. Environ 13 % d'élèves sont encore dans le besoin pour une sérieuse prise en charge de ces outils mathématiques indispensables à l'enseignement-apprentissage de la physique. Pour la dernière partie portant sur l'analyse graphique, les élèvent ont montré dans leur grande majorité des performances remarquables. Le pourcentage de 89,5 % atteste une aptitude à extraire des informations significatives à partir de représentations visuelles de manière satisfaisante. Ce qui est essentielle dans plusieurs domaines de la physique.

Globalement, cette étude révèle que les élèves ont atteint des performances à priori acceptables, voir satisfaisantes. Dans leur grande majorité, ils ont prouvé une bonne maitrise des concepts mathématiques sous-jacents et une capacité à les appliquer efficacement dans le contexte concret de la cinématique.

Malgré ces résultats positifs, il faut souligner la nécessité d'améliorer encore l'enseignement des outils mathématiques et leur intégration dans le domaine de la physique, en mettant l'accent sur la représentation vectorielle. En effet, ces pourcentages bien que relativement élevés, montrent une bonne

partie des élèves qui trainent des lacunes sur des questions de prérequis d'ordre mathématique.

Références bibliographiques

ADJIBI Hilaire, AVOSSEVOU Gabriel Y.H, MOUSSILIOU Cherif Abdoulaye & BRIAUD Phillipe, (2016). « Difficultés de l'utilisation de l'outil mathématique dans l'enseignement des sciences physiques : cas des circuits (R,L,C) en régime sinusoïdal forcé », *Le pédagogue,* numéro 3/4, pp. 50-62.

BA Cissé, (2011). « Vecteurs au lycée : difficile articulation entre mathématiques et physique », *Nouveaux cahiers de la recherche en éducation,* Vol. 14, n° 1, pp. 71-84.

BODINIER Guillaume & SEVRAIN David, (2017). « L'utilisation des mathématiques en sciences physiques et chimiques », *Education*, Hal Open Science, dumas-01647595.

DI FABIO Alice, DE HOSSON Cécile & DECAMP Nicolas, (2021). « Le tracé des vecteurs en cinématique : étude de réponses d'étudiants de licence 1 de physique », *RDST* [En ligne], 23 | , mis en ligne le 06 décembre 2021, consulté le 20 août 2024. URL : http://journals.openedition.org/rdst/3765 ; DOI : https://doi.org/10.4000/rdst.3765.

GENIN Christiane, MICHAUD-BONNET Jacques. & PELLET André, (1987). « Représentation des élèves en mathématiques et en physique sur les vecteurs et les grandeurs vectorielles lors de la transition collège-lycée », Groupe de Recherche en Didactique de la Physique de Marseille. *petit x,* n° 14-15, pp. 39-63.

MALONGA Moungabio F., (2008). *Interactions entre les mathématiques et la physique dans l'enseignement secondaire en France : cas des équations différentielles du premier ordre. Histoire et perspectives sur les mathématiques*. Thèse de doctorat de l'Université Denis Diderot Paris 7. ⟨tel-01260645⟩

MONGE M., AUDOUIN-EGOROFF M.-C. & LEMAIRE-BODY F., (1971). *Mathématiques terminales C et E : Thome 2 : Arithmétique, analyse et probabilités*. Bulletin officiel. Librairie Belin.

RAOUF Khadija, RADI Mourad, BELAZZAAR Imad, TALBI Mouhammed & MOUSSETAD Mohamed, (2016). « Difficultés De Mise En Œuvre De La Continuité Didactique Mathématique-Mécanique Au Secondaire Collégial, Registre Sémiotique Et Transfert Comme Éléments D'analyse », *European Scientific Journal*, Vol.12, n°31, pp. 165-188.

ROEGIERS Xavier, (2000). *Une pédagogie de l'intégration. Compétence et intégration des acquis dans l'enseignement*. Bruxelles : De Boeck Université.

RUTH Rodriguez G., (2007). Les équations différentielles comme outil de modélisation mathématique en Classe de Physique et de Mathématiques au lycée : une étude de manuels et de processus de modélisation d'élèves en Terminale S. Université Joseph Fourrier. Laboratoire Informatique de Grenoble. France. NNT : . tel-00292286.

SAMSON Ghislain, (2004). « Étude exploratoire du transfert des connaissances entre les mathématiques et les sciences auprès d'une clientèle de 4e secondaire » Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada.

TRUDEL Louis & METIOUI Abdeljalil, (2011). « Favoriser la compréhension des concepts du mouvement rectiligne à vitesse constante à l'aide d'une investigation scientifique assistée par ordinateur », *RDST* [Online], 4 | , mise en ligne depuis le 15 Février 2014, consulté le 21 Aout 2024, URL:

http://journals.openedition.org/rdst/494; DOI: https://doi.org/10.4000/rdst.494.