

L'interdisciplinarité : construction d'un modèle d'apprentissage de "la position" en mécanique du point matériel

IMEN ALIBI, MARIA IMPEDOVO, RACHED BEN YOUNES,
JEAN-MARIE BOILEVIN

*Laboratoire de Technologie, Energie
et Matériaux Innovants LR21ES27
Unité de recherche ECOTIDI UR 16E S10 ECOTIDI
Tunisia
alibiimen792@gmail.com*

*Laboratoire Apprentissage, Didactique,
Evaluation, Formation UR 4671
Université Aix-Marseille
France*

*Laboratoire de Technologie, Energie
et Matériaux Innovants LR21ES27
Faculté des Sciences de Gafsa
Université de Gafsa
Tunisia*

*CREAD, F-29200 Brest
Université de Brest, Université de Rennes
France
jean-marie.boilevin@inspe-bretagne.fr*

ABSTRACT

With a view to improving the teaching-learning process of physics in higher education, this present work deals, in an interdisciplinary manner, with the construction of a new prototype for learning "the position" in mechanics of the material point in light of the results found. Indeed, in our study, we will determine the epistemological nature of knowledge, then reveal the methodology of the work in its general context. Those results found are related to the determination of the preliminary difficulties of the students related to this concept by a questionnaire and to the detection of their erroneous conceptions.

KEYWORDS

Higher education, mechanics of the material point, position, interdisciplinarity, learning prototype

RÉSUMÉ

Dans l'optique de l'amélioration du processus d'enseignement-apprentissage de la physique dans l'enseignement supérieur, cet article présente une première essai de la construction d'un prototype prototype d'apprentissage du concept de « la position » en mécanique du point matériel. Dans cette étude, nous avons tout d'abord déterminé la nature épistémologique du savoir. Puis, nous avons présenté la méthodologie mise en œuvre. Finalement, les résultats

trouvés sont issus en premier lieu de l'analyse préliminaire d'un questionnaire préalablement effectuée visant les difficultés et les conceptions erronées liées au concept de la position chez les étudiants. Et en second lieu, ils sont issus de l'interprétation de l'étude épistémologique de notre travail. Ces résultats visent la construction d'un prototype d'apprentissage de ce concept physique.

MOTS CLÉS

Enseignement supérieur, mécanique du point matériel, position, interdisciplinarité, prototype d'apprentissage

INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

L'histoire de l'humanité illustre le développement du concept de « position » dans plusieurs disciplines (astrophysique, mécanique du point, mathématiques, informatique, technologie, géographie...). Cette variété pourrait expliquer le degré de complexité de ce savoir et les difficultés énormes que rencontre le processus de compréhension. C'est pourquoi dans l'enseignement et l'apprentissage de ce concept, les chercheurs ont besoin de tenir compte de cette dimension interdisciplinaire. Cependant, bien que l'interdisciplinarité en sciences soit abordée par plusieurs recherches antérieures (Ba, 2007; Barelli, 2021; Durand-Guerrier, 2022a; Lenoir, 1994, 1996a, 1996b), ou était le thème central de plusieurs colloques scientifiques (colloque ADIMA3 Tunisie 2022 ; ADMPES Canada 2024 ; ...), nous trouvons que l'interdisciplinarité dans son sens large signifie la mise en relation de deux ou de plusieurs disciplines (Lenoir & Sauvé, 1998). Ainsi l'interdisciplinarité englobe le transfert et la communication des méthodes, des idées, des concepts, des terminologies d'une discipline à l'autre (Reverdy, 2016), crée une réelle interaction entre les matières (Nicolescu, 2011) et est ce qui manque aux disciplines pour rendre compte de la réalité (Fontolliet, 2002). En didactique des sciences physiques, plusieurs recherches aient abordé les difficultés vécues par les apprenants en mécanique (Aguirre, 1988; Genin et al., 1987; Nguyen & Meltzer, 2003; Shaffer & Mc Dermott, 2005) et se centrant sur des concepts, tels que la vitesse ou l'accélération, mais il n'existe pas, à notre connaissance, de recherches qui mettent en relief l'enseignement et l'apprentissage de ce concept de « position ».

Des recherches plus récentes (Di Fabio et al., 2021) abordant le tracé des vecteurs en cinématique au niveau supérieur, y compris le vecteur position, ont conclu que le concept de « position », « pose davantage de difficultés et il est mal maîtrisé par un grand nombre d'étudiants » tant qu'il n'était pas étudié jusqu'à présent.

Les étudiants universitaires inscrits en licence dans des filières scientifiques éprouvent certaines difficultés avec l'apprentissage des concepts physiques. On le constate dans divers pays du monde à travers les résultats de recherches qui s'intéressent à l'enseignement de la mécanique, un des domaines de la physique (Di Fabio et al., 2021; Yavuz, 2007). En effet, il semble que les méthodes d'enseignement utilisées ou les ressources didactiques mises à disposition ne soient pas suffisamment efficaces pour une bonne assimilation des savoirs en sciences physiques. Or les étudiants qui accumulent des lacunes quant à leur maîtrise de concepts dans le domaine de la physique peuvent se retrouver en situation désavantageuse, notamment face au développement technologique, numérique, électrique et électronique. Cela oblige à chercher des alternatives dans la façon d'enseigner ces concepts clés durant la formation. Par ailleurs, l'importance de la discipline mécanique se manifeste à plusieurs niveaux, ce qui nous encourage à chercher des solutions aux défis auxquels sont confrontés les enseignants et les étudiants de ces domaines d'études dans le but d'améliorer le processus d'enseignement-apprentissage. Comme le concept de la position relève aussi du champ des

mathématiques, c'est donc la question de l'apprentissage efficace de ce savoir dans ces deux natures épistémologiques, qui est posée.

Nous avons choisi, ici, de traiter les difficultés potentielles lors de l'apprentissage de la position en se plaçant dans une vision interdisciplinaire par la suggestion d'un prototype d'apprentissage favorisant une meilleure assimilation de ce concept au niveau supérieur.

Notre travail se situe dans le cadre d'un projet doctoral visant l'apprentissage de la mécanique du point matériel dans l'enseignement supérieur. Le concept de la « position » est un concept concrétisant l'intersection de diverses disciplines, principalement les sciences physiques, les mathématiques, la technologie et l'informatique. Nous nous concentrerons ici sur l'interdisciplinarité mathématiques-physique.

Nous commençons par le cadre théorique où nous passons de l'alternance entre la convergence et la divergence des deux disciplines mathématiques et physique à la naissance de l'approche interdisciplinaire. Pour argumenter notre choix, nous adoptons une approche historique pour cet enchainement et nous projetons la lumière également sur l'aspect méthodologique et conceptuel de ces disciplines. Une première classification met en valeur l'alternance entre les moments de convergence et de divergence entre ces deux disciplines, suivie d'une deuxième classification illustrant une typologie des divergences possibles entre les deux. Ensuite, un cadre empirique présente le contexte et la réalisation de cette recherche. Enfin, en passant aux résultats et à la discussion, nous mettons l'accent dans cette partie sur les résultats les plus pertinents qui servent à aboutir à l'objectif de notre recherche (élaboration d'un prototype d'apprentissage) avant de proposer une conclusion.

CADRE THÉORIQUE

En observant l'histoire de l'humanité, nous trouvons que l'alternance entre la convergence et la divergence des mathématiques et des sciences physiques a toujours existé. Ultérieurement, le monde a reconnu des physiciens qui étaient aussi des mathématiciens comme Albatini (854-924 après JC), Aristarque de Samos (310 avant JC). Il s'avère donc que maîtriser un concept physique nécessite une vue de proche en proche sur ces deux moments indispensables de convergence et divergence entre les mathématiques et les sciences physiques.

Convergence des deux disciplines

Commençons par la convergence et posons la première question qui est de nature épistémologique : peut-on étudier la physique sans les mathématiques ?

Certes, les mathématiques sont indispensables pour la résolution des problèmes physiques et la maîtrise de cette science. À savoir :

- Les mathématiques sont un outil pour les sciences physiques : un outil physique (par le biais des manuels, livres de mathématiques), un outil psychologique (langage...) et un outil symbolique (système de signes...) ;
- Les mathématiques accordent un sens aux concepts physiques abstraits : Par exemple, le concept abstrait de l'accélération (ou vitesse) en physique est défini comme la dérivée seconde de la position par rapport au temps ;
- Les mathématiques fournissent une médiation cognitive pour exprimer les phénomènes physiques en passant du réel au concret (au sens de Durand-Guerrier, 2022a et Damamme, 2022) ;
- Les mathématiques et les physiques pour Udhén et al. (2012, cité par Caussarie, 2018) sont indispensables pour la modélisation dans la mesure où « *il est un peu arbitraire de séparer manipulations mathématiques et physique dans le processus de modélisation. Que penser du graphe ? Du schéma plus ou moins symbolique ? Pour ces auteurs, la*

modélisation est en fait la majeure partie du temps une navigation entre différents niveaux d'abstraction dans lesquels physique et mathématiques sont intimement mêlées ».

- Les mathématiques sont une source de découverte pour la physique dans la mesure où les mathématiques peuvent quelque fois précéder la physique grâce à leur caractère heuristique. « *La physique moderne regorge d'exemples où des artefacts mathématiques ont conduit à des découvertes physiques : les antiparticules de Dirac, la transformation de Lorentz, À l'échelle plus modeste de l'étudiant, ce sont souvent des analogies au niveau des représentations mathématiques entre un problème à résoudre et une situation connue qui permettent la résolution de problème* » (Caussarie, 2018).

Divergence des deux disciplines

Pour illustrer la divergence, prenons l'exemple de la mécanique du point matériel. Pour étudier le mouvement d'un corps, nous avons besoin d'effectuer des expériences sur ce corps et donc de recours à une représentation géométrique d'un système mécanique. En mécanique, un système mécanique est représenté soit par un ensemble fini de points, soit par un ou plusieurs corps continus. Et comme le mouvement mécanique est une variation de la position du corps dans l'espace avec le temps (Strelkov, 1978, p. 10), alors déterminer le mouvement signifie la détermination des positions des éléments du système en fonction du temps. Ainsi, la nécessité de complémentarité entre les deux disciplines est indispensable. Mais cela n'empêche pas que chacune possédé des spécificités propres.

Pour aborder cette divergence entre les deux disciplines, nous avons choisi d'élaborer une classification en se basant sur les exemples issus de notre recherche et des travaux de recherches antérieures (Ba, 2007; Ba & Dorier, 2007; Caussarie, 2020; Gbaguidi, 2022; Lê Thi, 2001). Nous proposons de distinguer cette divergence aux niveaux des concepts, des formules, des figures et de la logique associée à chaque discipline.

Divergence au niveau des concepts

- Langage (Appellation) : en mathématique et en physique, les appellations sont différentes dans la mesure où lorsque les mathématiciens parlent de « Parabole », « Translation » et « Changement de matrice », on trouve que les physiciens parlent « Mouvement parabolique », « Mouvements de translation » et de « changement de base » ;
- Langage (Symbole et signification) : en parlant des statuts des lettres en mathématiques, on manipule des fonctions. Or en physique, on manipule des grandeurs dont les variations en fonction d'autres grandeurs sont modélisées par des fonctions. En mathématiques, les lettres sont muettes car l'accent n'est pas mis sur le sens des lettres utilisées, mais sur la structure de l'expression. Mais en physique, les lettres possèdent toujours un sens en elles-mêmes.

Divergence au niveau des formules

- Le vecteur nul : en mathématiques, le vecteur nul est un « élément de nature » au sens de Lê Thi (2001) et on peut l'éliminer lors de la simplification de l'expression, par exemple lorsqu'il joue le rôle d'élément neutre du groupe additif de l'espace vectoriel. Or en physique, le vecteur nul est un vecteur « existant » qui ne possède ni direction ni sens mais possède une norme ;
- Trouver un minimum : en mathématiques, trouver la valeur minimale d'une variable nécessite d'abord de rappeler que la fonction est dérivable et ensuite de chercher la valeur de la variable pour laquelle la dérivée change de signe. En physique, demander

de trouver la valeur d'une variable qui minimise une grandeur signifie que l'apprenant cherche la valeur qui annule la dérivée.

Divergence au niveau de la logique

- Approximation : les mathématiques produisent des vecteurs, des matrices et fabriquent des espaces vectoriels. Les physiques produisent des forces, des bases et des observation... et fabriquent des états physiques ;
- La mathématique rejette les positions imprécises, la physique les positions absolument précises ;
- L'infiniment petit et l'infiniment grand, sont absolument indispensables en mathématiques, mais n'ont aucune réalité en physiques (mécanique du point) ;
- Les vérités absolues sont indispensables aux mathématiques alors que la physique les rejette ;
- En mathématiques, le domaine des contraires dialectiques sont fréquemment rejetés. Quant à la physique, c'est le domaine des contraires dialectiques concrétisant la nature « provisoire » de la science qui permet de faire avancer les recherches scientifiques.

Divergence au niveau de la figure

- Notation différente : dans le cas des vecteurs, on parle systématiquement des coordonnées en mathématiques. Or, on parle souvent des composantes en physique bien qu'un physicien utilise la notion de « coordonnées » lorsqu'elles portent en elles la notion de projection ;
- La proportionnalité : pour l'enseignant de mathématiques, il faut que tous les points soient alignés sur une droite qui passe par l'origine pour que l'on puisse parler de situation de proportionnalité. La proportionnalité donc correspond au modèle utilisé pour l'enseignant de mathématiques. Pour l'enseignant de physique, il faut que la répartition des points soit compatible avec une modélisation par une droite. Les écarts au modèle, lorsque celui-ci est adapté, sont souvent dus aux incertitudes de mesure.

Synthèse

Vue sa vision systémique et sa capacité à fournir des nouvelles dimensions cachées, soit en rapport avec le savoir en question, soit avec les partenaires du processus d'enseignement-apprentissage, l'approche interdisciplinaire est estimée comme le cadre adéquat pour concrétiser la dimension mathématique-physique de notre problématique.

Lenoir et Sauvé (1998) proposent ainsi une typologie reposant sur les liens hiérarchiques établis entre les disciplines dans le cadre de l'interdisciplinarité :

- Une relation d'équivalence entre les disciplines qui apportent un savoir ou savoir-faire relevant de leur domaine propre ;
- Une relation de dépendance entre les disciplines où l'intervention d'une discipline précède nécessairement les autres ;
- Une prédominance d'une des disciplines, situation dans laquelle une seule discipline fonctionne en réalité.

Dans notre travail, nous nous situons dans la première catégorie, dans la mesure où nous visons à la fin à présenter un prototype d'apprentissage qui met en valeur les deux disciplines et qui permet une réelle interaction entre elles au sens de Reverdy (2016). En effet, notre choix du point de vue de l'apprentissage des étudiants semble pertinent à deux niveaux. Le premier est lié à l'apprenant lui-même dans la mesure où placer l'étudiant au centre d'intérêts de la recherche scientifique permet de dévoiler ses difficultés, ses obstacles et ses erreurs. Donc de mieux comprendre comment l'individu acquiert les connaissances, développe des compétences

et mémorise les informations. Le deuxième niveau est strictement lié au premier niveau dans la mesure où ce dernier permettra une optimisation des méthodes didactiques et pédagogiques, ainsi qu'améliorer la motivation et l'engagement de l'apprentissage du contenu scientifique chez les étudiants : dans notre cas c'est la mécanique du point matériel. Les mathématiques étaient vues comme « outil » pour les sciences physiques (Alastuey et al., 2008; Apéry et al., 1982). Mais des travaux récentes (Alibi, 2021, 2025) ont dévoilé que, dans le processus d'apprentissage, cet outil a dominé à un tel point que la physique risque de n'être décrite que comme une « physique mathématique ».

Certes, cette dernière est très intéressante dans la résolution des problèmes physiques mais sûrement qu'elle est insuffisante pour réduire le sens des sciences physiques. En effet, même si les scientifiques réussissent à modéliser un phénomène physique par une loi mathématique, la plupart du temps, il s'agit des équations différentielles non-linéaires, donc non résolvables.

En revanche, il ne faut pas comprendre les mathématiques comme un squelette auquel la physique prête chair (Apéry et al., 1982). À titre d'exemple, pour étudier le mouvement d'un corps, nous avons besoin d'effectuer des expériences sur ce corps. Les résultats trouvés seront exprimés par des lois généralisables pour tout corps ayant les mêmes propriétés. Et pour aboutir à cette généralisation, « *on est conduit tout d'abord à chercher une représentation géométrique de chacun des corps que l'on étudie* » (Destouches, 1967). Il faut ensuite compléter la schématisation géométrique par une schématisation des propriétés mécaniques.

Donc si la formalisation (BOEN, 2000) par des symboles ou des formes mathématiques contribuent à la formation de ces images mentales, alors la modélisation, autant qu'elle permet le passage d'une relation entre des grandeurs physiques à une équation mathématique, favorise une meilleure assimilation du phénomène physique.

Des recherches antérieures (Ba, 2007; Legrand, 1993) estiment que le « *savoir mathématique que l'on connaît déjà permet d'explorer et mieux comprendre un aspect du monde qu'on ignore, et à l'inverse* » dans la mesure où les mathématiques fournissent des vecteurs et non pas des forces, des matrices et non pas des bases et des observations. Donc, ce sont les sciences physiques qui donnent sens et font parler ces entités mathématiques complexes, et en même temps elles présentent une riche source d'inspiration en mathématique. Cette dernière permet d'élaborer des relations entre les grandeurs physiques, de modéliser les systèmes et de prédire les résultats.

Mais ce n'est pas tout, il est essentiel de « *penser le rapport des mathématiques à la physique en termes dynamiques* » (Apéry et al., 1982). Car enseigner la physique et réfléchir en physique, ce n'est pas du tout comme enseigner des mathématiques et penser en mathématiques. Le mode de fonctionnement, les lois et les principes, les conceptions et les représentations, les buts ne sont pas les mêmes, mais qui avancent d'une manière analogique.

L'approche interdisciplinaire mathématiques-physique dans l'éducation

Les recherches en didactique ont abordé l'interdisciplinarité mathématiques-physique, que ce soit sous un angle focalisé sur les enseignants et leurs pratiques, soit en se centrant sur les apprenants : une première catégorie est conçue dans le but de dévoiler des difficultés et proposer des solutions (Durand-Guerrier, 2022b; Squalli et al., 2009). Une deuxième catégorie était réalisée dans le but de présenter des recommandations (Ba, 2007; Ba & Dorier, 2007; Gbaguidi, 2022; Munier & Merle, 2007). Dans une troisième catégorie (Damamme, 2022) l'interdisciplinarité math-physique n'était pas l'objectif explicite de ces recherches en soi mais était mentionnée soit implicitement dans ces travaux, soit citée explicitement par d'autres auteurs.

Dans la première catégorie, une équipe de chercheurs canadiens (Squalli et al., 2009) a présenté une étude de cas visant la planification d'une situation d'apprentissage interdisciplinaire entre mathématiques et sciences d'une équipe formée de deux enseignantes

de mathématiques et de deux enseignantes de sciences et technologies afin d'évaluer le potentiel interdisciplinaire des situations discutées et de le confronter aux choix faits par le groupe. De son côté, Barelli (2021) a mis en œuvre une séquence d'enseignement interdisciplinaire mathématiques-physique dans le cadre d'une étude se concentrant sur l'enseignement de la « parabole et mouvement parabolique ». In fine, comme l'a commenté Durand-Guerrier (2022b) : « *différentes définitions de la parabole en tant qu'objet mathématique ont été données, en référence aux interactions entre les mathématiques et la physique au cours de nombreux siècles et au rôle de la symétrie comme objet frontière* » (p. 50). Les auteurs proposent ainsi de croiser les regards des deux disciplines pour penser dans une perspective didactique les relations entre concret et abstrait qui sont en jeu dans les deux disciplines.

Pour la deuxième catégorie, le travail de Munier et Merle (2007) dévoile que l'introduction de l'espace physique permet aux apprenants « *de se créer un référent empirique qui les aidera à construire et contextualiser* » le concept d'angle en mathématiques, ce qui signifie que les connaissances utiles pour résoudre d'un problème s'élaborent de façon empirique. De son côté, le travail de Gbaguidi (2022) s'est limité à montrer, dans le cadre d'une approche interdisciplinaire, que la notion de mesure des grandeurs en mathématiques et en sciences physiques sont différentes, et que les apprenants sont quelques fois confrontés « *à des aspects contradictoires de présentation de mesures de grandeurs par des professeurs de mathématiques et de sciences physiques* ». Pour illustrer la situation conflictuelle entre physique et mathématique, et qui pourrait être un obstacle didactique, l'auteur cite l'exemple d'une grandeur L dont tout calcul fait donne $110/7$, donc $L \approx 15,71$. En mathématique $15,71$ est une valeur approchée de L à 10^{-2} où $15,71$ est un arrondi d'ordre 2 de L . Or en science physique, on écrit tout simplement $L=15,71$, par exemple une longueur. Ainsi, pour les physiciens, L confère en cm en nombre décimal, ce qui n'est pas acceptable en mathématique car $110/7$ n'est pas un nombre décimal. Nous avons cité en premier lieu cet exemple simple pour pouvoir par la suite illustrer un niveau plus élevé de complexité. En effet, pareil en mécanique du point matériel, dans plusieurs cas les élèves et les étudiants passent par le même fil conducteur définissant la difficulté mais à des niveaux différents. Par exemple, en parlant des difficultés de mesure et de grandeurs liées au concept de la vitesse, les élèves ont des difficultés à maîtriser la différence entre la vitesse scolaire et la vitesse vectorielle (confusion entre vitesse moyenne et vitesse instantanée, erreur dans la conversion des unités par exemple de km/h vers m/s...). Pour les étudiants, les difficultés résident par exemple en maîtrisant l'expression vectorielle de la vitesse aussi mais dans différents systèmes de coordonnées. D'après les travaux antérieurs d'Alibi (2021, 2025), on peut dire que les élèves rencontrent des difficultés avec le nombre et l'unité associés à la mesure de la vitesse, or les étudiants ont des difficultés à maîtriser l'objet mathématique-physique (vecteur) qui présente la grandeur et sa manipulation dans l'espace et les systèmes de coordonnées différents. Pour finir avec cet exemple, nous trouvons que c'est pertinent d'intégrer quelques fois l'exemple des difficultés chez les élèves dans la mesure où regarder cette problématique des différentes facettes nous permettra d'avoir une vue plus systémique sur ce type de difficulté. Donc on peut dire en générale que les difficultés des élèves sont des difficultés de mesures et sont d'ordre empirique et de manipulation numérique, alors que celles des étudiants sont des difficultés de grandeur et de modélisation et sont d'ordre abstrait et formel. Ça n'empêche, que nous avons trouvé une minorité des étudiants qui souffrent aussi des difficultés du premier ordre.

D'autres travaux (Ba, 2007 ; Ba & Dorier, 2007) se limitent à des recommandations. En effet, le lien entre mouvements de translation et translation était objet de recherche abordé par la thèse de Ba (2007). Dans Ba et Dorier (2007), les auteurs posent la question : « Pourquoi le mouvement de translation a-t-il un lien avec la translation ? ». La question est pertinente car par le biais d'une situation interdisciplinaire, les apprenants sont confrontés à deux concepts utilisant un même vocable, sans pouvoir établir de lien entre les deux. Les auteurs mentionnent

qu'il « *est nécessaire de construire un discours qui distingue les champs de compétence, indispensable pour montrer la complémentarité* ».

Certaines recherches sont menées dans le cadre d'une approche interdisciplinaire qui ne visent pas nécessairement l'interdisciplinarité math-physique. Mais en même temps elles abordent des concepts, des dimensions ou mêmes des méthodologies issues de ce parrainage. Par exemple, Damamme (2022), dans son travail abordant les maths et le concret, a choisi de parler des phénomènes tel que la météorologie, le réchauffement climatique et les précipitations.

Un autre travail dans le cadre du projet européen « IDENTITIES » sur la période 2019-2022 est évoqué par Durand-Guerrier (2022a) : « *Notre approche de l'interdisciplinarité est explicitement destinée à surmonter deux formes de banalisation dont la deuxième est « l'interdisciplinarité en tant qu'utilisation instrumentale de concepts tirés d'une discipline (par exemple les mathématiques) pour résoudre un problème formulé dans une autre discipline (par exemple en physique) »* (p. 278). Dans le cadre de ce projet, parmi les résultats dévoilés on trouve la complémentarité entre les deux types de modules (le module cryptographie et module curriculaire) est essentielle, bien que ces deux catégories ne sont pas étanches.

CADRE EMPIRIQUE

Ce travail, inscrit dans le cadre d'un projet doctoral basé sur l'ingénierie didactique, a été renforcé par un questionnaire visant l'apprentissage du concept de la position en mécanique du point matériel au niveau supérieur. Des étudiants de première année universitaire de deux universités tunisiennes (université de Gafsa et université de Carthage) étaient inclus dans cette étude. 179 étudiants ont répondu à un questionnaire, ces étudiants sont issus de quatre institutions (deux préparatoires et deux facultés de sciences) de ces deux universités, Mais seulement 89 étudiants issus deux institutions (deux facultés de sciences) de ces deux universités ont participé à la mise en place d'une' ingénierie didactique, reposant sur une séance en classe accompagnée d'un prétest et d'un post-test illustrant les pré-acquis et les prérequis chez les étudiants liées au concept de la position, .

Ces deux outils nous ont permis de dévoiler plusieurs difficultés liées au concept de la position en mécanique du point matériel. Le modèle d'apprentissage élaboré s'est basé en premier lieu sur les résultats trouvés et en deuxième lieu sur l'application de l'approche interdisciplinaire lors de la construction de ce prototype d'apprentissage.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous allons, dans cette partie, présenter les deux résultats les plus pertinents, dévoilés par notre étude. En premier lieu, nous mettons en lumière quelques difficultés dévoilées par l'analyse des données recueillies. En deuxième lieu, nous présentons quelques prototypes élaborés.

Difficultés et obstacles

Nos résultats concernant le concept de la position, et bien qu'il n'existe pas de recherches centrées sur ce concept, sont venus corroborer ceux d'autres travaux antérieurs abondants cette nature épistémologique interdisciplinaire. À titre d'exemple, citons Malgrange et al. (1973), Genin et al. (1987) ou encore Di Fabio et al. (2021). Ces travaux ont confirmé les difficultés liées au concept de la position comme étant des difficultés liées à la grandeur vectorielle, des difficultés liées à la maîtrise de l'addition vectorielle, un manque de connaissances... Les difficultés (travail en cours) liées à ce concept sont nombreuses et nous avons choisi ici d'en illustrer quelques-unes.

Commençons par deux remarques issues d'un travail complémentaire à cet article (travail soumis) analysé dans le questionnaire :

- Statistique sur le nombre total des copies. Par une statistique effectuée sur les réponses, nous avons trouvé que les difficultés majeures sont au nombre de quatre : le « calcul des coordonnées » ; le processus « changement de base » et « choisir le type des coordonnées » ; les problèmes de nature mathématiques (calcul des intégrales et la résolution mathématique du problème) ; l'interprétation physique du problème ;
- Statistique par institution. En résumé, citons les difficultés par ordre décroissant :
 - Préparatoire Gafsa : 1) Calcul/ choix du type des coordonnées 2) changement de base 3) problème de nature mathématique. 4) interprétation à dimension physique.
 - Préparatoire Bizerte : 1) changement de base. 2) interprétation à dimension physique. 3) Calcul/ choix du type des coordonnées. 4) problème de nature mathématique.
 - Licence Bizerte : 1) calcul/ choix du type des coordonnées 2) Changement de base. 3) problème de nature mathématique. 4) interprétation à dimension physique.
 - Licence Gafsa : 1) changement de base. 2) calcul/ choix du type des coordonnées. 3) problème de nature mathématique. 4) interprétation à dimension physique.

Conceptions erronées

Trois types de réponses pertinentes révélaient leurs conceptions erronées :

- La distinction entre position et vecteur position selon l'utilisation des deux notions repère et référentiel. La position est définie comme « Coordonnée dans un repère » or le vecteur position est définie comme « coordonnée dans un référentiel ».
- Le vecteur position est le vecteur de positionnement d'un plan (Vecteur position : « Vecteur responsable du positionnement d'un plan dans l'espace »).
- Certains combinent entre le « stable », « fixe » et « scalaire ». En effet, le fait d'être « stable » ou « stationnaire » signifie qu'il est invariant dans le temps, mais même si la norme de la grandeur change dans le temps, cela ne la prive pas d'être une scalaire (Position : « stable », « une coordonnée fixe et le vecteur position décrit la position au cours du temps » ...)

Confusion

En fait, l'alternance entre l'écriture scalaire et l'écriture vectorielle selon le contexte montre bien que les étudiants ont du mal à distinguer l'expression exigée dans chaque contexte. Par exemple, dans leurs réponses à la question posée pour choisir la somme, nous avons remarqué que quelques-uns confondent la signification des deux écritures vectorielle et scalaire. On note bien ici que nous n'avons pas utilisé le notion norme mais plutôt scalaire, bien que la première est une fonction alors que la deuxième est un nombre. En effet, certes la notion du scalaire est universelle, mais en physiques elle est plutôt une grandeur qui possède une quantité (la plupart des cas différente de sa magnitude /norme), sans direction et sans sens.

Nos résultats viennent corroborer ceux de De Hosson et al. (2021), Malgrange et al. (1973), qui attribuent la raison des difficultés rencontrées liées au vecteur en sciences physiques par les étudiants à l'origine des difficultés de nature mathématiques et à la mauvaise maîtrise de l'addition vectorielle. Notons aussi la confusion entre vecteur de déplacement et vecteur position (Vecteur position : « un déplacement » ...).

L'existence du vecteur nul

Le vecteur nul est un « élément de nature plus algébrique que géométrique (...) joue le rôle d'élément neutre du groupe additif de l'espace vectoriel, qui est une structure algébrique, pas géométrique (Lê Thi, 2001) ». L'auteur soulève la complexité de la situation par l'explication des conceptions des apprenants « qui ne prennent pas en compte le vecteur nul dans leur

réponse répondent dans le cadre géométrique et ne font pas de lien avec l'aspect algébrique des objets en jeu ».

Explicitons cette difficulté par l'exemple suivant : le vecteur \overrightarrow{AB} est opposé au \overrightarrow{BA} et les deux vecteurs \overrightarrow{AP} et $\overrightarrow{-AP}$ ont la même direction et la même norme mais de sens contraire.

D'après la relation de Charles $\frac{AB}{AB} + \frac{-AB}{BA} = \frac{AA}{AA} = \overset{0}{\rightarrow}$ A et B sont confondus, on appelle translation de vecteur AA la translation qui transforme le point A en A ; le vecteur AA est un vecteur noté vecteur nul. Donc ce vecteur « existant » ne possède ni direction ni sens mais possède une norme.

TABLE 1

Construction d'un prototype d'apprentissage

Dans le cadre de notre ingénierie, nous avons construit les situations d'apprentissage, objet des séances en classe, et qui seront par la suite le modèle initial pour la construction du prototype d'apprentissage.

Pour construire les situations d'apprentissage, ou le prototype d'apprentissage par la suite, nous nous sommes basé sur des travaux antérieurs, ce qui nous a permis d'élaborer une démarche en passant par quatre étapes :

- Détermination de la nature épistémologique du savoir dans chacune des deux approches mathématiques et physique ;
 - Détermination des difficultés liées au savoir en question ;
 - Construction de deux prototypes différents de la même situation, en se référant à une des deux disciplines, pour aboutir par la suite à un prototype math et un prototype physique ;
 - En se basant sur les trois niveaux d'action et d'assimilation (Découvrir, Approfondir, Réinvestir/ Restituer une connaissance, donner du sens, Appliquer une procédure) présentés par Michaud (1975, cité par GFR, 2006), nous avons pu construire un modèle interdisciplinaire où les questions posées permettent à chaque fois de croiser au moins deux niveaux choisis selon l'objectif visé par cet énoncé.

Modèle d'apprentissage

Pour parler d'une situation interdisciplinaire Mathématiques–Physique centrée sur le concept de position en mécanique du point matériel, nous avons besoin d'intégrer des outils mathématiques et des outils (ou contenu) physiques.

Analysons deux situations dans le cadre de cette approche pour pouvoir illustrer notre stratégie. Le premier cas conçoit les choix entre les différents outils mathématiques et physiques et leurs argumentations pour dévoiler leurs stratégies de résolution et leurs obstacles. Le deuxième cas intègre la modélisation mathématique, l'analyse vectorielle et les lois fondamentales de la mécanique.

Premier modèle

Nous visons dans ces prototypes à rendre l'étudiant conscient de la nécessité de mobiliser ses savoirs mathématiques et physiques pour résoudre le problème, à déterminer à chaque fois la stratégie (les choix de la démarche et des données à utiliser) dans chacune de ces trois différentes situations qui visent toutes à déterminer la position ou/ la trajectoire et mettre en valeur l'interprétation physique et l'étude graphique mathématique de ce problème.

Situation A	Situation B	Situation C
 <p>Dans un jeu vidéo de tir, le joueur tente de gagner des points en tuant les monstres par son pistolet d'alarme. Ce joueur doit choisir le monstre qu'il va cibler en fonction de sa position et de la trajectoire de la balle de son pistolet d'alarme. Étudions la trajectoire de la balle pour l'aider à gagner un maximum de points pendant la plus courte durée.</p> <p>Une balle M de masse m est repérée dans un référentiel fixe Oxyz par des coordonnées cylindriques (r, θ, z) telles que : $\theta = \omega t$ et $z = h\theta$ (r et ω sont des constantes positives et t le temps).</p> <p>1) Écrire l'expression du vecteur position \vec{OM} en coordonnées cartésiennes dans la base (ex, ey, ez)</p> <p>2) Quelle est la trajectoire du point M dans le plan xOy ?</p> <p>3) Quelle la trajectoire du point M suivant la direction de l'axe Oz ?</p> <p>4) Quelle est la trajectoire résultante du point M dans l'espace ?</p>	 <p>Un accident d'effondrement d'une grande roue au manège PhyMat s'est produit. Cet accident était plus pire que celui produit au manège 'Fantasy word' au Liban en 2016.</p> <p>La grande roue se déplace d'un mouvement uniforme de vitesse v, sur une route horizontale dirigée suivant l'axe Ox du référentiel (R) : Oxyz, où Oz est la verticale ascendante. On admettra que la grande roue roule sans glisser sur la route. On considérera le référentiel (R') : A x'y'z', lié au centre de la roue de centre A, de rayon r, et dont les axes sont parallèles à ceux de (R).</p> <p>Quelle est, dans le référentiel (R), la trajectoire que décrit Meriem (M); joueuse assise dans l'une des cabines de la grande roue, si, à l'instant $t = 0$, M est en contact avec le sol en O ?</p>	 <p>La comète de Halley repassera en 2061, comme elle le fait tous les 76 ans environ, au voisinage du soleil (et donc de la terre). Si l'on néglige sa « chevelure », la comète peut être assimilée à une boule de glace de 3 km de diamètre et dont la masse volumique est égale à 10 Kg/m^3. Dans ce problème, on étudie le système formé des deux points matériels qui sont le soleil et la comète, en négligeant l'effet perturbateur des autres planètes du système solaire. Soient m la masse de la comète, M celle du soleil et S la position du centre du soleil. On rappelle que : $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$ et $G = 6,7 \cdot 10^{11} \text{ m}^3 \text{Kg}^{-1} \text{s}^{-2}$. La position de C du centre de gravité du système comète-soleil diffère très peu de celle de S centre du soleil. Dites quelles sont les approximations effectuées dans cet exercice et expliquer pourquoi.</p>  <p>Dans un film de science-fiction, le scénario était que lorsque cette comète entre dans l'atmosphère terrestre; et avant de tomber sur terre, le héros n'est capable d'intervenir et de sauver la terre que lorsque la comète est en position d'équilibre relatif.</p> <p>Aidez-les à déterminer la position d'équilibre, sachant que : la comète P de masse m, glisse sans frottement sur une droite (D), qui tourne de l'axe vertical Oz, sans le rencontrer, avec une vitesse angulaire constante w. On étudiera le mouvement relatif de P par rapport au référentiel orthonormé (R) Oxyz lié à la droite (D) où Oy a la direction de la perpendiculaire commune $OA=a$, à Oz et (D). Soit l'angle constant que fait (D) avec le plan horizontal xOy. On pose $AP=r$. On désignera par g l'accélération de la pesanteur.</p>

En effet, pour déterminer la position :

- Dans le premier exemple, nous effectuons une simple projection du vecteur avec changement de base pour tenir compte du mouvement de rotation de la balle de tir, extraire l'équation horaire $x=f(y)$ et éliminer le temps pour obtenir la trajectoire (=l'ensemble des positions).

- b. Dans le deuxième exemple, nous utilisons la loi de décomposition du mouvement car nous visons la position, la trajectoire d'un point par rapport à un référentiel absolu (R).
- c. Dans le troisième exemple, en parlant d'équilibre et de stabilité, nous renvoie vers des forces et les causes, donc l'outil est RFD, équation différentielle. Et ainsi, nous cherchons la solution de cette dernière pour déterminer la position d'équilibre.

On cherche la trajectoire et/ ou la position dans chacun de ces trois cas. Ainsi il est demandé à l'étudiant, dans chacun de ces cas, de :

- Faire la figure et représenter le vecteur position ;
- Décrire brièvement la démarche à suivre pour déterminer la trajectoire ou /et la position selon l'exercice. Et argumenter le choix chaque fois ;
- Déterminer chaque fois : si nous avons besoin de changer la base pour déterminer les coordonnées ou non (dire selon quoi nous effectuons le changement de base : Selon le mouvement du point, selon la forme du système, ...).

Deuxième modèle

Dans cette situation, les objectifs pédagogiques sont les suivants : le premier est de lier des concepts physiques (mouvement, position, vitesse, gravité) avec des outils mathématiques (dérivées, fonctions vectorielles) ; le deuxième est de développer l'intuition du mouvement dans un repère cartésien ; le troisième est d'initier à la modélisation du réel par des équations ; le quatrième objectif est de mettre en valeur l'interprétation physique et l'étude vectorielle mathématique dans ce problème.

Un drone est lancé depuis le sol avec une vitesse initiale de V_0 dans un plan vertical (plan xz). On néglige les frottements de l'air. On prend l'origine du repère au point de lancement du drone.

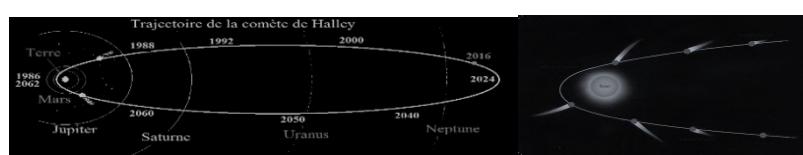
La position du drone à un instant t est donnée par le vecteur :

$\vec{r}(t) = \vec{x}(t) + \vec{z}(t)$, avec $x(t) = V_0 \cos(\theta) \cdot t$ et $z(t) = V_0 \sin(\theta) \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$, où $V_0 = 20 \text{ m/s}$ est la norme de la vitesse initiale, $-\theta = 45^\circ$ est l'angle de lancement, $-g = 9,8 \text{ m/s}^2$ est l'accélération de la pesanteur, $-t$ est le temps en seconds.

1. Exprimer le vecteur position $\vec{r}(t)$ sous sa forme vectorielle complète.
2. Déterminer le vecteur vitesse $\vec{v}(t) = \frac{d}{dt}(\vec{r})$ et le vecteur accélération $\vec{a}(t) = \frac{d^2}{dt^2}(\vec{r})$
3. Calculer la norme de la vitesse $\|\vec{v}(t)\|$ au temps $t = 1\text{s}$.
4. Déterminer le temps de vol total du drone (quand il retombe au sol).
5. Trouver la position maximale atteinte en hauteur (valeur de z_{\max} et à quel instant).
6. Tracer la trajectoire $z = f(x)$ du drone
7. Quel est le sens physique de l'équation horaire ? Pouvez-vous illustrer la distinction entre l'équation horaire, l'équation de trajectoire et l'équation de mouvement ?

Troisième modèle

FIGURE 1



La comète de Halley

I) La comète de Halley repassera en 2061 au voisinage du soleil (et donc de la terre) comme elle le fait tous les 76 ans environ. Si l'on néglige sa « chevelure », la comète peut être assimilée à une boule de glace de 3 km de diamètre et dont la masse volumique est égale à 10 Kg/m^3 . Dans ce problème, on étudie le système formé des deux points matériels qui sont le soleil et la comète, en négligeant l'effet perturbateur des autres planètes du système solaire. Soient m la masse de la comète, M celle du soleil et S la position du centre du soleil. On rappelle que : $M=2 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$ et $G=6,7 \cdot 10^{11} \text{ m}^3\text{Kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ et la masse réduite $\mu=(m \cdot M / M+m)=1,4 \cdot 10^{11} \text{ Kg} \approx m$

1) Dites quelles sont les approximations effectuées dans cet exercice et expliquer pourquoi.

Soient C la position du centre de gravité du système et H la position de la comète à l'instant t .

2) Après avoir exprimé SC en fonction de m , M et H , montrer que la position de C diffère très peu de celle de S centre du soleil. On choisira désormais le point S comme origine d'un référentiel galiléen (R). Analyser ce résultat.

FIGURE 2



Images représentant la séquence du film

II) Dans un film de science-fiction, le scénario était que lorsque cette comète entre dans l'atmosphère terrestre, et avant de tomber sur terre, le héros n'est capable d'intervenir et de sauver la terre que lorsque la comète est en position d'équilibre relatif.

Aidez-le à déterminer cette position, sachant que : la comète P de masse m , glisse sans frottement sur une droite (D), qui tourne de l'axe vertical Oz , sans le rencontrer, avec une vitesse angulaire constante w . On étudiera le mouvement relatif de P par rapport au référentiel orthonormé (R) $Oxyz$ lié à la droite (D) où Oy a la direction de la perpendiculaire commune $OA=a$, à Oz et (D). Soit l'angle constant que fait (D) avec le plan horizontal xOy . On pose $AP=r$. On désignera par g l'accélération de la pesanteur.

1a) Le mouvement relatif de P obéit à l'équation différentielle du 2nd ordre :

$$r'' - (w^2 \cos^2 \phi)r = -g \sin \phi$$

Pour obtenir cette équation nous allons :

- Déterminer les coordonnées et la trajectoire pour déduire le mouvement et son équation.
- Utiliser la relation fondamentale de la dynamique dans un référentiel galiléen.
- Utiliser la relation fondamentale de la dynamique dans un référentiel non galiléen.

Choisir la bonne réponse et argumenter votre choix.

1b) Quel est le sens physique de l'équation différentielle ? Pourquoi cherchons-nous l'équation différentielle lorsque nous avons besoin de déterminer le mouvement ?

2) Sachant que la loi du mouvement $r(t) = \frac{g \sin \phi}{w^2 \cos 2\phi} + C_1 e^{w \cos \phi t} + C_2 e^{-w \cos \phi t}$, déterminer la position P_0 où la particule est en équilibre relatif. Etudier la stabilité de cet équilibre.

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons travaillé sur la nature interdisciplinaire d'un concept physique afin de mettre en lumière les différentes dimensions des difficultés chez les étudiants. Ce qui permet de proposer un modèle d'apprentissage au sein duquel se manifeste l'approche

interdisciplinaire, en créant différents liens et en mettant en valeur les deux disciplines mathématiques et physique pour la compréhension du problème. Dans les quatre prototypes construits, dont deux font l'objet de ce travail, nous avons ajouté quelques fois des éléments dont leur absence peut causer un obstacle pour la compréhension chez l'apprenant. Ainsi, nous avons :

- Ajouté des questions liées à l'une des natures tels que matrice, vecteur, intégrale ou grandeurs... (situations 2 et 3) ;
- Crée des liens entre les différents éléments du système proposé (situation 1 et 2) ;
- Créer un lien (situation 1, 2 et 3) avec la réalité et le concret (Durand-Guerrier, 2022b) ;
- Ajouté la dimension physique ;
- Donné sens à quelques dimensions négligées ou non apparus.

Le prototype proposé a permis de dévoiler quelques conceptions erronées et de corriger, de valoriser le lien entre les deux disciplines dans la mesure où les deux dimensions sont bien existantes dans chaque problème. Ainsi, les réponses fournies pour l'un des disciplines participent à bien comprendre la deuxième dans un cadre offrant une vision plus systémique et plus riche, c'est l'interdisciplinarité.

RÉFÉRENCES

- Aguirre, J. M. (1988). Student preconceptions about vector kinematics. *The Physics Teacher*, 26(4), 212-216. <https://doi.org/10.1119/1.2342490>.
- Alastuey, A., Magro, M., & Pujol, P. (2008). *Physique et outils mathématiques. Méthodes et exemples.* Savoirs Actuels. CNRS Éditions et EDP Sciences. http://alexandre.sicard.free.fr/books/Physique_et_outils_mathematiques.pdf.
- Alibi, I. (2021). *Élaboration des critères de conception d'un software de simulation de l'accélérationen mécanique du point.* Mémoire de recherche. Université Virtuelle de Tunis, Tunisie.
- Alibi, I. (2025). *La position : Ingénierie didactique pour un prototype site web dans le cadre d'une approche interdisciplinaire.* Thèse doctorale, Université Virtuelle de Tunis, Tunisie.
- Apéry, R., Guénard, F., & Lelièvre, G. (1982). *Penser les mathématiques : Séminaire de philosophie et mathématiques de l'École normale et supérieure.* Paris: Éditions du Seuil.
- Ba, C. (2007). *Étude épistémologique et didactique de l'utilisation des vecteurs en physique et en mathématiques.* Thèse de doctorat, Université Claude Bernard – Lyon1, France et Université Cheikh Anta Diop – Dakar, Sénégal. <https://theses.hal.science/tel-00192241v1>.
- Ba, C., & Dorier, J.-L. (2007). Liens entre mouvement de translation et translation mathématique. *Repères*, 69, 81-93.
- Barelli, E. (2021). *Physics and Mathematics university students' ideas about computer simulations.* *Journal of Physics: Conference Series*, 1929, 012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012059>.
- BOEN (Bulletin Officiel de l'Education Nationale). BO hors-série N°4 du 13 juillet 2000. Ministère de l'Education Français.
- Caussarie, A. (2018). *De la physique sans mathématiques ? Vous avez dit ... dactique? Des sciences.* <https://ditdactique.hypotheses.org/221>.
- Caussarie, A. (2020). *Les différences entre les maths et les maths pour la physique.* Vous avez

dit ... dactique? Des sciences. <https://ditdactique.hypotheses.org/945>.

Damamme, G. (2022). Maths et concret : le choix de partir du réel. In A. C. Adihou & F. Chellougui (Eds), *Actes du troisième colloque de l'Association de Didacticiens des Mathématiques Africains. Approche interdisciplinaire dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques : Quels projets et quels enjeux pour l'Afrique ?* (pp. 272-276). Tunisie. https://adima3.sciencesconf.org/data/pages/Actes_colloque_ADiMA_3_2022_.pdf.

Destouches, J.-L. (1967). *La mécanique élémentaire*. Presses Universitaires de France.

Di Fabio, A., de Hosson, C., & Décamp, N. (2021). Le trace des vecteurs en cinématique: Étude de réponses d'étudiants de licence 1 de physique. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 23, 139-159.

Durand-Guerrier, V. (2022a). IDENTITIES, un projet européen pour promouvoir l'interdisciplinarité en sciences dans les apprentissages. In A. C. Adihou & F. Chellougui (Eds), *Actes du troisième colloque de l'Association de Didacticiens des Mathématiques Africains. Approche interdisciplinaire dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques : Quels projets et quels enjeux pour l'Afrique ?* (pp. 277-281). Tunisie. https://adima3.sciencesconf.org/data/pages/Actes_colloque_ADiMA_3_2022_.pdf.

Durand-Guerrier, V. (2022b). Faire vivre les articulations entre abstrait et concret dans la classe de mathématique - un levier pour penser les rapports entre mathématiques et réalité. In A. C. Adihou & F. Chellougui (Eds), *Actes du troisième colloque de l'Association de Didacticiens des Mathématiques Africains. Approche interdisciplinaire dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques : Quels projets et quels enjeux pour l'Afrique ?* (pp. 39-53). Tunisie. https://adima3.sciencesconf.org/data/pages/Actes_colloque_ADiMA_3_2022_.pdf.

Fontoliet, P.-G. (2002). Interdisciplinarité et nouvelle maturité. In P. Perrig-Chiello & F. Darbellay (Éds), *Qu'est-ce que l'interdisciplinarité ? Les nouveaux défis de l'enseignement* (pp. 37-43). Lausanne: Éditions Réalités sociales.

Gbaguidi, A. F. (2022). *L'Interdisciplinarité et l'histoire de la notion de mesure des grandeurs en mathématiques et physique au collège, au Bénin*. In A. C. Adihou & F. Chellougui (Eds), *Actes du troisième colloque de l'Association de Didacticiens des Mathématiques Africains. Approche interdisciplinaire dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques : Quels projets et quels enjeux pour l'Afrique ?* (pp. 208-217). Tunisie. https://adima3.sciencesconf.org/data/pages/Actes_colloque_ADiMA_3_2022_.pdf.

Genin, C., Michaud-Bonnet, J., & Pellet, A. (1987). Représentation des élèves en mathématiques et en physique sur les vecteurs et les grandeurs vectorielles lors de la transition collège-lycée. *Petit x*, 14-15, 39-63.

GFR. (2006). Rapport d'activités du Groupe de Formation par la Recherche. Développer les démarches et les apprentissages interdisciplinaires dans l'enseignement secondaire.

Legrand, M. (1993). Débat scientifique en cours de mathématiques et spécificité de l'analyse. *Repères*, 10, 123-159.

Lenoir, Y. (1994). *Quelques préalables à la mise en œuvre de l'interdisciplinarité didactique*. (Documents du CRIE, 1). Sherbrooke: Université de Sherbrooke, Canada.

Lenoir, Y. (1996a). *Perspectives curriculaires et interdisciplinarité : Un essai de clarification*. (Documents du CRIE, 11). Sherbrooke : Université de Sherbrooke, Canada.

Lenoir, Y. (1996b). *Interdisciplinarité et pratique de formation au niveau universitaire*. Séminaire dans le cadre de la préparation d'un Baccalauréat multidisciplinaire intégré en sciences de la nature et en sciences humaines, Collège militaire de St-Jean, 12 novembre.

Lenoir, Y., & Sauvé, L. (1998). De l'interdisciplinarité scolaire à l'interdisciplinarité dans la formation à l'enseignement : Un état de la question. *Revue Française de Pédagogie*, 124/125, 121-153/109-146.

Lê Thi, H. C. (2001). Difficultés d'apprentissage de la notion de vecteur pour des élèves de première année de lycée en France et au Viêtnam. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 21(1.2), 157=188. <https://revue-rdm.com/2001/difficultes-d-apprentissage-de-la/>.

Malgrange, J.-L., Saltiel, È., & Viennot, L. (1973). Vecteurs, scalaires et grandeurs physiques. *Bulletin de la Société Française de Physique*, 13, 3-13.

Munier, V., & Merle, H. (2007). Une approche interdisciplinaire mathématiques – physique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 27(3), 349-388.

Nguyen, N. L., & Meltzer, D. E. (2003). Initial understanding of vector concepts among students in introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 71(6), 630-638. <https://doi.org/10.1119/1.1571831>.

Nicolescu, B. (2011). De l'interdisciplinarité à la transdisciplinarité : Fondation méthodologique du dialogue entre les sciences humaines et les sciences exactes. *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*, 7(1), 89-103. <https://doi.org/10.7202/1007083ar>.

Reverdy, C. (2016). *L'utilisation de l'interdisciplinarité dans le secondaire*. <https://edupass.hypotheses.org/929>.

Shaffer, P. S., & Mc Dermott, L. C. (2005). A research-based approach to improving student understanding of the vector nature of kinematical concepts, *American Journal of Physics*, 73(10). 921-931.

Squalli, H., Theis, L., Hasni, A., & Benoit, D. (2009). *L'interdisciplinarité entre mathématiques et sciences à l'école secondaire. Une étude de cas*. Centre de Recherche sur l'enseignement et l'apprentissage des Sciences, Mathématiques et Technologie; Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

Strelkov, S. (1978). *Mécanique* (Traduit du Russe par O. Partchevski). Moscou: Éditions Mir.

Yavuz, A. (2007). *Stratégie de résolution d'exercice en mécanique du point matériel Stratégie des enseignants et difficultés des étudiants de la première année universitaire Exemple du problème de la machine d'Atwood*. Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier, France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00174030>.