N° Ordre : 229 – 2007 ***Année 2007***

THESE DE DOCTORAT

présentée devant

l'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

et

l'UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP - DAKAR

pour l'obtention

du DIPLOME DE DOCTORAT en CO-TUTELLE

(arrêté du 6 janvier 2005)

présentée et soutenue publiquement le 9 novembre 2007

Par

Cissé BA

Etude épistémologique et didactique de l'utilisation du vecteur en mathématiques et en physique – lien entre mouvement de translation et translation mathématique

Spécialité : Didactique des mathématiques

Directeurs de thèse : Jean-Luc DORIER/Mamadou SANGHARE

Membres du Jury

Cherif BADJI, Professeur – Université Cheikh Anta DIOP	Examinateur
Galaye DIA, Professeur – Université Gaston Berger	Rapporteur
Jean-Luc DORIER, Professeur – Université de GENEVE	Directeur
Marc ROGALSKI, Professeur émérite – Université LILLE 1	Rapporteur
Mamadou SANGHARE, Professeur – Université Cheikh Anta DIOP	Co-directeur
Jacques TOUSSAINT, Professeur – IUFM – Lyon	Président

A la mémoire de mon père Mamadou Cissé BA dit Jom Mbeere

A la mémoire de ma mère Oumou Salamata KEBE dite Bolèle

A la mémoire de mon petit frère Oumar BA dit Barouyel

A la mémoire de Cheikh Ibrahima Sall

REMERCIEMENTS

Cette thèse n'aurait vu le jour sans la confiance et la générosité de Monsieur Jean-Luc DORIER, Professeur à l'Université de Genève, que je veux vivement remercier d'avoir accepté de diriger ce travail poursuivant ainsi l'aventure commencée au DEA. Plus qu'un encadrant ou un collègue, je crois avoir trouvé en lui un ami qui m'a aidé aussi bien dans le travail que dans la vie lorsque j'en avais besoin. Son soutien constant et ses encouragements maintes fois renouvelés, joints à un engagement fort et une disponibilité sans faille, ont permis à ce mémoire de s'élaborer au fil du temps. Diarama.

Mes plus sincères remerciements vont également à Monsieur Mamadou SANGHARE, Professeur à l'Université Cheikh Anta DIOP, pour l'intérêt qu'il porte à mon travail et à la didactique des mathématiques et qui en agissant à titre de co-directeur a fortement facilité mon intégration dans le cadre d'une thèse en co-tutelle entre l'Université Claude Bernard Lyon1 et l'Université Cheikh Anta DIOP.

Je remercie vivement Monsieur Marc RAGALSKI, Professeur émérite à l'Université des Sciences et Technologies de Lille de s'être rendu disponible en acceptant d'être rapporteur de ma thèse. Le regard critique, juste et avisé qu'il a porté sur mes travaux ne peut que m'encourager à être encore plus perspicace et engagé dans mes recherches en didactique des mathématiques. Je remercie également Monsieur Galaye DIA, Professeur à l'Université Gaston Berger de St-Louis d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail, ainsi que pour l'attention toute particulière qu'il lui a accordé.

Je suis très sensible à l'honneur que m'a fait Jacques TOUSSAINT, Professeur à l'IUFM de Lyon, en acceptant d'être président de mon jury de thèse, je l'en remercie vivement.

Je voudrais également remercier Monsieur Chérif BADJI, Professeur à l'Université Cheikh Anta DIOP, d'avoir accepté de siéger dans le jury.

Je remercie tout particulièrement Madame Viviane Durand-Guerrier Professeur à l'IUFM de Lyon, Responsable du Master au LEPS /LIRDHIST[1] pour sa disponibilité, ses encouragements et son soutien moral et matériel qui n'a jamais failli depuis le DEA jusqu'au terme de cette thèse.

Mes plus chaleureux remerciements s'adressent à Madame Françoise Langlois et Monsieur Bernard Langlois pour leur sympathie ainsi qu'à tous les membres du laboratoire LEPS /LIRDHIST. Je garde un souvenir reconnaissant pour mes collègues thèsards Thomas, Caroline, Sandie et Jérémy. Je rends un vibrant hommage à titre posthume à feu Bernard TRIBOLLET ancien directeur du LIRDHIST pour m'avoir soutenu au début de cette thèse.

Je remercie également Monsieur Pierre CREPEL pour sa sympathie et sa bonne humeur. J'éprouve un profond respect pour ses qualités humaines et son engagement militant pour les causes justes. Je n'oublie pas Jérôme FATET pour son soutien efficace.

J'aimerais par ailleurs souligner la contribution importante réalisée par mes collègues et amis du département de mathématiques de la FASTEF[2] qui ont eu à supporter le surcroît

[1] Laboratoire d'Etudes du Phénomène Scientifique/Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique et en Histoire des Sciences et des Techniques.

[2] Faculté des Sciences et Technologies de l'Education et de la Formation.

de travail occasionné par mes périodes de mobilité. Je les remercie de tout mon cœur pour leur soutien sans faille et pour leurs prières qui m'ont toujours accompagné. Je suis particulièrement redevable à Mamadou Bachir DIAHAM pour l'énergie qu'il a déployée pour la réussite de ce projet. Merci à Doyen THIOUNE, à Doyen BARRY, à Doyen FAYE, à Doyen DIAHAM aux « jeunes Doyens » Mangary et Marcel, merci à Sérigne Touba, à Moustapha et à MAlick.

Je remercie chaleureusement tous mes parents et amis qui m'ont accompagné et ont su me manifester leur intérêt pour mon travail de thèse en demandant régulièrement des nouvelles sur son état d'avancement. Ils ont tous été là, à leur façon, pour m'encourager.

J'exprime toute ma reconnaissance à tous mes collègues qui ont répondu aux questionnaires et particulièrement à mes amis Diarga DIOUF, Moussa DIOP et Vieux NDIAYE qui ont participé activement à la réalisation de ce travail. Je voudrais également remercier Cheikh Mbacké DIOP directeur de l'IREMPT[3] et Mamadou Ndiaye DIA qui ont su m'aider lorsque cela était nécessaire. J'exprime aussi toute ma gratitude à Mamour SANKHE pour son soutien et ses encouragements maintes fois renouvelés. Mes plus sincères remerciements vont également à Déthié BA pour son soutien efficace.

Je remercie très vivement L'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) et la région Rhône-Alpes à travers le programme MIRA pour leur soutien financier.

Un message reconnaissant à mon ami Aliou KONTE qui m'a accueilli très chaleureusement à Montargis à l'occasion de la visite de feu Cheikh Ibrahima SALL (Qu'Allah l'agrée), à mon neveu Moustapha BA qui m'a toujours accueilli avec enthousiasme à Paris depuis la Gare de Lyon, et à mon jeune frère Bocar BA pour l'accueil chaleureux qu'il m'a réservé à Genève. Je remercie également Marième NDOUR et Ousmane DIOL pour leur soutien efficace lors de mes séjours à Lyon.

Pour terminer, je remercie mon épouse Fatima, mes deux filles Sala et Aïcha et mon neveu Ibrahima qui ont été soumis à rude épreuve pendant ces trois années et ont supporté avec patience ces longs moments d'absence.

[3] Institut de Recherches sur l'Enseignement des Mathématiques, de la Physique et de la Technologie.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

L'objet de ce travail est une étude épistémologique et didactique sur les liens entre mathématiques et physique à propos des concepts de vecteur et de translation d'une part et de grandeurs physiques vectorielles et de mouvement de translation d'autre part.

L'interaction entre les mathématiques et les autres sciences est un sujet riche qui se décline sous divers aspects selon le contexte et les époques. Pour ce qui concerne l'enseignement, c'est un point qui est au cœur des réformes curriculaires récentes. Néanmoins, la réalisation dans les classes semble plus problématique. Concernant les activités interdisciplinaires faisant intervenir les mathématiques, Legrand (2004) souligne une dualité, en distinguant :

> – Celles où un savoir mathématique que l'on connaît déjà permet d'explorer et mieux comprendre un aspect du monde qu'on ignore, et à l'inverse
>
> – celles où la force significative des situations de vie ordinaire permet de donner sens et de faire parler des entités mathématiques complexes qu'on ne connaît pas encore et dont le côté nécessairement très abstrait ou technique risque de se dresser comme une barrière au sens et à la consistance si on les aborde d'entrée de jeu exclusivement par les mathématiques. (Legrand, 17)

Si on s'intéresse aux liens entre les mathématiques et la physique, une des notions les plus élémentaires, où l'interaction semble possible et d'ailleurs préconisée par les programmes depuis longtemps, est celle de vecteur. En outre, de nombreuses recherches (Lounis 1989, Lê Thi 1997, Bittar 1998, Pressiat 1999) ont montré que l'enseignement des vecteurs en mathématiques en fin de collège et au début du lycée pose plusieurs difficultés aux élèves aussi bien dans cette discipline que dans leur utilisation en physique. Partant de ce constat, nous nous proposons dans notre travail d'analyser les liens entre mathématiques et physique dans l'utilisation du vecteur et de la translation dans ces deux disciplines.

La question des liens entre mathématiques et physique est en premier lieu une question d'ordre épistémologique et historique. Comme le dit Lounis (1989) :

> Il est courant d'admettre les liens étroits et multiformes entre ces deux disciplines fondamentales. Outre les rapports entre outil et objet d'étude, ou entre langage formalisé et connaissances empiriques correspondantes, on relève également leur consubstantialité et leurs rapports particuliers au niveau de la production et de la genèse des concepts. (Op. cité, 2)

Ces liens ont fait l'objet de plusieurs recherches et récemment la *commission Kahane* réfléchissant sur l'enseignement des mathématiques n'a pas manqué de prendre position sur cette question :

> C'est un fait évident que les mathématiques, et notamment la géométrie, ont des applications dans beaucoup d'autres sciences et singulièrement en physique. […] En vérité, il est fascinant de constater que la plupart des notions géométriques que l'histoire a conservées jouent un rôle en physique. En contrepartie, l'intuition procurée par le monde physique est un guide essentiel pour la compréhension des notions mathématiques et la physique demeure, pour les mathématiciens une source de problèmes toujours renouvelée. (Kahane, 2000, pp. 101-102).

Dans le même ordre d'idées, nous pensons que cette relation de la physique avec la théorie et en particulier avec les mathématiques doit être très tôt mise en scène avec les élèves, et cela pour enrichir et varier les registres sémiotiques de représentations (Duval, 1993) des objets physiques, qui, il faut le reconnaître, sont difficiles d'accès. Dans cette même optique, nous ne manquerons pas de citer les propos de Vergnaud dans l'interview qu'il a accordée à Goffard et Weil-Barais (2005) à propos de la relation dialectique entre la physique et les mathématiques :

> La relation entre les mathématiques et la physique est absolument essentielle, d'une part en raison de l'importance des mathématiques dans la théorie physique, aussi parce que les mathématiques ont leur source dans la connaissance du réel que sont l'espace et les grandeurs spatiales, et les quantités discrètes d'ailleurs. L'histoire des mathématiques ne peut être comprise si on ne voit pas les relations avec la physique, au moins comme source de problèmes à résoudre. (Op cité, 66)

A l'inverse, le constat du cloisonnement de l'enseignement des deux disciplines est plus que jamais actuel comme en témoigne ce point de vue d'un membre de la noosphère de l'enseignement des mathématiques*:*

> S'il arrive parfois que nos collègues de sciences physiques oublient l'importance de la géométrie et plus généralement des mathématiques pour leur discipline, les modifications de programme viennent la leur rappeler de temps à autre à leur grand dam. Cela a été le cas lors des récents allégements des programmes de géométrie en terminale. Cela nous semble une raison supplémentaire pour lutter contre le cloisonnement excessif de nos deux disciplines. (Commission Kahane 2000, 103)

Il faut d'ailleurs remarquer avec Chevallard que :

> Tout au long de ce siècle (vingtième siècle), les mathématiques enseignées au secondaire n'ont en fait pas cessé d'être progressivement épurées de leurs organisations « mixtes », c'est à dire des organisations praxéologiques mettant en jeu, à côté d'objets mathématiques, un certain nombre d'objets non mathématiques. En nombre de cas, la difficulté, voire la quasi-impossibilité d'organiser l'étude d'un sujet ou d'un thème donné en y faisant intervenir autre chose que les moyens d'étude sur lesquels l'activité mathématique scolaire est aujourd'hui repliée – l'espace chirographique et les ostensifs que l'on peut y tracer –, tient à des contraintes installées au niveau de la discipline… (Chevallard, 2000, 9)

Cela dit, l'appel récent de la « Commission Kahane » à la création de laboratoires de mathématiques, s'il est suivi d'effets concrets tendrait à atténuer ce repliement épistémologique. Par laboratoires de mathématiques elle entend : *Le laboratoire serait un lieu privilégié pour la rencontre entre chercheurs, enseignants et élèves. En créant une nouvelle image des mathématiques et de leur aspect expérimental, le laboratoire devrait favoriser les relations interdisciplinaires.* (Kahane 2000, p.269)

Il paraît utile de rappeler que notre thème d'étude s'inscrit dans la même problématique de relations interdisciplinaires dans le contexte géométrique de l'utilisation du vecteur en physique et des liens entre translation mathématique et mouvements de translation.

Et il nous semble important de rappeler aussi que la géométrie a un fondement empirique « si donc il n'y avait pas de corps solides dans la nature, il n'y aurait pas de géométrie » disait Henri Poincaré pour mettre en valeur davantage les liens entre la géométrie et la physique. Il nous semble donc important que les liens entre les deux disciplines soient explicitement pris en charge par les textes des programmes.

C'est dans cette perspective qu'il nous a paru important de mener une étude épistémologique et didactique sur les concepts de vecteur et de translation en rapport avec les concepts physiques enseignés en classe de première S en France et 2nde S au Sénégal. Notre étude envisage dans une perspective anthropologique d'analyser cette question à la fois sur le plan de l'histoire du savoir savant, de l'histoire de l'enseignement et des conditions actuelles d'enseignement des concepts mathématiques et physiques en jeu. Ces éléments nous permettront ensuite d'analyser les rapports des enseignants des deux disciplines à ces objets de savoir en jeu dans ce travail. Notre étude vise par ailleurs à tester le rapport des élèves dans les deux disciplines et à mettre en place une expérimentation d'un enseignement interdisciplinaire.

Partant de l'idée que les mathématiques sont nées sur le terrain même où elles sont utilisées, nous nous sommes alors posé la question de savoir si les difficultés des élèves dans les apprentissages en mathématiques et physique ne sont en partie dues au cloisonnement de l'enseignement des deux disciplines. Ce qui nous amène au questionnement suivant qui sera la base de notre travail.

Quelles sont les conceptions des professeurs de physique sur les apprentissages mathématiques des élèves et celles des professeurs de mathématiques sur les apprentissages physiques ?

Quel est le devenir de cet objet de savoir vecteur dans le système didactique aussi bien en mathématiques qu'en physique?

Sur quelles connaissances déjà construites, ou en cours de construction s'appuient les élèves pour comprendre la notion de mouvement de translation ?

Le rapport Kahane précise, que les connaissances de géométrie et plus généralement les mathématiques, sont partout, dans les sciences comme dans la vie courante bien qu'elles soient invisibles selon l'expression de Chevallard. Ce constat invite les enseignants de mathématiques à plus de disponibilité vis-à-vis des autres disciplines et plus particulièrement de la physique. Cependant, du côté de la noosphère de la physique, on tempère le rôle des mathématiques qui n'est considéré que comme un simple langage, outils pour la physique mais qui ne serait être une fin en soi. Ainsi, les concepteurs des programmes de physique disent par exemple :

> La formalisation, qu'elle soit sous forme de diagrammes, de symboles, de dessins, ou sous forme mathématique, aide bien sûr à la formation de ces images mentales. La modélisation du système étudié, par le choix des variables pertinentes, procède de cette reconstruction du réel par la pensée. Cette modélisation précède toujours une mise en équation éventuelle, et elle s'appuie sur une description de la situation physique à l'aide de la langue naturelle. Quant au langage mathématique, à l'évidence irremplaçable, il peut parfois masquer la compréhension physique, car il pense tout seul (et pense juste... si l'on ne fait pas d'erreur !) : c'est à la fois son avantage et, dans une certaine mesure, son inconvénient, en tout cas sa limite. Le résultat de l'analyse mathématique doit toujours être retraduit dans la langue naturelle. (B.O Hors Série n°7 du 31août 2000, p.2)

Il semble d'ailleurs qu'il y ait eu de multiples tentatives avortées mais toujours recommencées de « démathématiser » la physique comme le veut une position philosophique importante dans la noosphère actuelle qui prône l'enseignement d'une physique qualitative moins mathématisée. Par ailleurs, paradoxalement, la physique de référence (savoir savant) ne cesse d'utiliser de façon très efficace des modèles mathématiques de plus en plus sophistiqués.

La transposition didactique peut-elle alors continuer à ignorer ce phénomène ? Mais ces questions dépassent le cadre de ce travail.

Comme l'a fort bien remarqué Levy-Leblond (1982) :

> Bien entendu, un concept physique n'est pas, ne s'identifie pas, ne se réduit pas aux concepts mathématiques 'qu'il met en jeu; la physique ne se ramène pas à la physique mathématique. Il importe de ne pas concevoir la distinction entre un concept physique et sa mathématisation comme une simple différence statique. Un concept physique n'est pas un concept mathématique plus «autre chose». Le concept mathématique n'est ni un squelette auquel la physique prête chair, ni une forme abstraite que

> la physique emplirait d'un contenu concret : il est essentiel de penser le rapport des mathématiques à la physique en termes dynamiques. (Op. cité, 199)

Mais cette dynamique sur les rapports entre ces domaines de connaissances vit-elle dans l'enseignement actuel des notions mathématiques et physiques ?

Le présent travail a pour ambition de tenter de répondre partiellement à cette question en étudiant l'utilisation du vecteur en physique et le lien entre translation mathématique et mouvement de translation.

Pour ce faire, nous nous appuierons sur l'approche anthropologique des savoirs en Didactique des Mathématiques telle qu'elle a été élaborée par Chevallard afin d'étudier les rapports institutionnels et personnels aux savoirs en jeu des enseignants et des élèves dans les institutions scolaires des deux disciplines.

Avant de décrire le cadre théorique de notre travail et notre problématique détaillée nous commençons par un rapide aperçu des travaux antérieurs de didactique (des mathématiques ou de la physique) portant sur l'enseignement des objets de savoir en jeu dans les deux disciplines et des quelques travaux abordant la question générale des liens entre ces deux disciplines.

PARTIE I

CADRE THEORIQUE ET PROBLEMATIQUE

I.1Recherches antérieures

Les notions de vecteur et de translation ainsi que les concepts physiques correspondants (vitesse et force) ont fait l'objet de quelques études en Didactique de la Physique ainsi qu'en Didactique des Mathématiques.

Dès 1973, Malgrange, Saltiel et Viennot réalisent une enquête par questionnaire auprès d'étudiants entrant en première année d'université pour chercher à caractériser les significations que ceux-ci attachent aux vecteurs et leur utilisation en physique. Parmi les difficultés repérées, la plus tenace concerne l'addition vectorielle à laquelle s'ajoutent celles dues au langage qui ne distingue pas un vecteur de son module. Ces auteurs situent ces difficultés dans « l'influence trop grande d'une géométrie mal articulée sur l'algèbre et qui laisse dans l'ombre bien des aspects des relations entre forces, mouvements et géométrie des déplacements. » (Op. cité, 13)

Rappelons que cette recherche a été menée pendant la période de l'enseignement des mathématiques modernes, enseignement qui se souciait peu d'une articulation efficace des apprentissages dans les deux disciplines. Ce qui fait dire à ces auteurs que « la présentation géométrique est sans doute plus proche de l'intuition de l'espace physique réel. Elle permet de développer des « images mentales » (« on voit ce qui se passe ») dont l'importance dans les raisonnements est incontestable, quoique difficile à définir exactement. Elle permet, ou devrait permettre de résoudre des problèmes qualitativement (sans référence aux intensités). Elle est nécessaire lorsque le géométrique est seul en cause (problème de symétrie par exemple). Cependant, outre que ces divers aspects ne sont pas systématiquement exploités, s'en tenir à une présentation uniquement géométrique conduit aux défauts que nous connaissons.» (Malgrange et al. 1973, 12).

En 1987, pour évaluer au mieux les représentations des élèves sur les grandeurs vectorielles physiques Genin, Pellet et Michaud-Bonnet ont étudiés les conceptions des élèves de terminale et de seconde sur les grandeurs physiques vectorielles. Il semble à l'appui de cette étude « qu'en fin de terminale le processus d'acquisition du modèle vectoriel soit enclenché pour tous les élèves mais pratiquement achevé seulement pour une minorité d'entre eux. Pour la plupart, la grandeur physique vectorielle a un double statut : c'est aussi bien le modèle vectoriel, avec toutes les caractéristiques spatiales, que sa réduction scalaire constituée par sa norme. Les situations différentes, les réductions langagières les contenus adidactiques des conceptions, provoquent chez la majorité des élèves, le choix de l'une ou l'autre de ces deux conceptions. » L'étude faite en Seconde pour chercher les causes des difficultés liées à l'instabilité des conceptions des élèves de terminale, montre que le modèle mathématique semble être correctement appréhendé dès cette classe pour un grand nombre d'élèves. Les auteurs en concluent alors qu'on peut penser que les difficultés liées à l'apprentissage des grandeurs physiques vectorielles ne peuvent être imputées seulement aux acquis mathématiques.

Avec la thèse de Lounis (1989), il s'est agi aussi d'étudier les conceptions et les difficultés des élèves de la classe de seconde liées au modèle vectoriel en physique et en mathématiques. Ce travail a été axé essentiellement sur les procédures graphiques liées au modèle vectoriel à deux dimensions et les concepts mécaniques de force et de vitesse.

Les résultats montrent que les conceptions sur les vecteurs restent dominées par leur contenu scalaire. L'auteur « relève quelques similitudes entre difficultés et pré-concepts historiques et les difficultés et conceptions d'élèves d'aujourd'hui lorsqu'ils abordent le formalisme vectoriel. » (Op. cité, 262) Et il note que la lenteur caractérisant la faible évolution constatée des conceptions des élèves, ainsi que l'apprentissage du modèle vectoriel, apprentissage qui se prolonge parfois jusqu'aux années de licence scientifique, a pu également être rapprochée de la lenteur particulière du processus historique.

Poursuivant son analyse sur les grandeurs vectorielles physiques, Lounis relève une emprise du numérique encore renforcée en physique. Il impute ce type d'erreurs à la prépondérance accordée aux données numériques dans la présentation des situations où interviennent des grandeurs vectorielles physiques. Cela « semble contribuer à réduire dans les approches des sujets, l'importance des autres éléments non quantitatifs relatifs à l'orientation spatiale » (ibid., 263) des grandeurs physiques considérées. Un autre point de ce travail qui a attiré notre attention est qu'«une forte proportion (20% à 30%) des sujets de l'échantillon n'échouent que dans des questions de mécanique bien que celles-ci aient la même structure de celles des mathématiques correctement résolues. » (ibid., 265)

En physique, les erreurs commises par les élèves à propos des grandeurs vectorielles sont dues à la fois à une certaine incompréhension de la physique et à un manque de clarté dans les différences entre "vecteur mathématique" et "vecteur physique". En effet, les grandeurs vectorielles traitées en physique ne sont pas les vecteurs étudiés en mathématiques.

Il semble donc qu'une maîtrise préalable semblant bien assurée du modèle mathématique ne garantit pas une compréhension suffisante des problèmes liés à des situations physiques qui sont souvent plus riches en informations et plus complexes que les situations correspondantes en mathématiques. Une des raisons proviendrait de ce que, dans la plupart des exercices proposés aux élèves, les données sont fournies sous forme numérique, l'accent étant mis sur le quantitatif, puisque la direction et le sens des grandeurs physiques vectorielles en jeu vont de soi. Les valeurs numériques accompagnant alors les descriptions des situations induiraient une lecture centrée sur leur contenu scalaire. Ceci permettrait d'expliquer qu'un élève qui a réussi à construire correctement la somme de deux vecteurs dans des exercices de mathématiques peut néanmoins commettre des erreurs dans la construction de la résultante de deux forces.

Bien entendu, bien qu'on ne traite pas les mêmes objets en mathématiques et en physique, l'influence de l'appropriation des caractères vectoriels en mathématique sur l'apprentissage de la physique est incontestable. Quand ils ont à comparer des grandeurs vectorielles en physique, peu d'élèves tiennent compte à la fois des trois caractéristiques du vecteur. Beaucoup tendent à produire un mode de raisonnement “monovalent” en s'appuyant essentiellement sur une seule des trois caractéristiques (direction, sens, norme) du vecteur. Parmi ces trois caractéristiques, la norme est largement prédominante. Le type d'erreur le plus tenace est d'additionner les normes des vecteurs sans tenir compte des directions. De plus, même si l'élève prend en considération les caractéristiques d'orientation des vecteurs, il y a souvent une confusion entre direction et sens.

Dans le même sens, Legrand (1993, 136-139) a expérimenté une situation d'introduction du vecteur en cours de mathématiques, à partir d'un problème "réel" qui s'apparente à une question de physique. Il s'agit de choisir un ordre de grandeur du poids à accrocher à une corde à linge pour la tendre de façon à ce qu'un blue-jeans accroché à cette corde (en deux points) ne touche pas le sol. Les analyses montrent que le modèle métrique est dominant dans les réponses et Legrand propose une gestion de la situation, sous la forme d'un débat, permettant d'invalider les réponses majoritaires et de mettre en place une connaissance adaptée à la situation et conforme à celle de vecteur.

Un autre travail évoquant des liens entre mathématiques et sciences physiques à propos des translations et rotations, est Gasser (1996).

Dans cet article, l'auteur nous livre un échange intéressant entre professeurs de mathématiques (M) et professeurs de physique (P) dont nous reprenons ci-dessous un extrait :

> **M.** Je me rappelle bien des cours de terminale, c'est simple.
>
> **P.** L'exemple de la grande roue des fêtes foraines évoqué dans les programmes de physique semble intéressant pour mieux cerner la notion de mouvement de translation chez les élèves, car il fait référence à leur expérience.
>
> **M.** Vous êtes en train de parler de rotation !
>
> **P.** Mais non. Regardez le mouvement de la nacelle : (le physicien s'empare d'un livre censé représenter une nacelle de grande roue, et montre son mouvement) elle est bien en translation puisqu'elle reste toujours parallèle à elle-même.
>
> **M.** Mais ceci n'a rien à voir avec une translation !
>
> Un physicien s'empare alors brusquement d'une chaise, la brandit en l'air… pour compléter son explication.
>
> **P.** Voici ce que j'explique à mes élèves : je déplace la chaise, et j'observe ses arêtes ; quelle que soit la position de la chaise pendant le mouvement, une arête donnée reste toujours parallèle à elle-même. C'est ceci, un mouvement de translation.
>
> **M.** (en chœur) Aahhh !
>
> **M.** Mais alors, dans le cas de la grande roue, il s'agit d'une translation circulaire !
>
> (Gros éclats de rire)
>
> **P.** Si vous voulez, mais nous évitons quand même d'utiliser cette expression…
>
> **M.** Si j'ai bien compris, lorsqu'un solide est en mouvement de translation, à chaque instant, il existe une translation mathématique qui permet de passer de sa position initiale à sa position à l'instant t. Si un solide est en mouvement de rotation, à chaque instant, il existe une rotation mathématique qui permet de passer de sa position initiale à sa position à un instant quelconque d'observation.
>
> **P.** Effectivement !
>
> (Op. cité, 22-23)

Ce dialogue entre des professeurs des deux disciplines montre l'étanchéité qui existe entre les enseignements de mathématiques et de physique et que le lien entre mouvement de translation et translation mathématique est loin d'être évident pour les enseignants eux-mêmes de l'une ou l'autre des disciplines.

Nos premiers travaux (Ba 2003) confirment ce constat : les enseignants de physique ne font pas le lien, pour leurs élèves, entre mouvement de translation et translation mathématique et la grande majorité des enseignants des deux disciplines sont incapables de l'expliciter, voire doutent parfois qu'il existe, ou encore, sur la seule foi de la proximité de vocabulaire, pensent que c'est (plus ou moins) la même chose.

Reste que l'élève n'a plus qu'à se débrouiller tout seul pour tenter de faire le lien entre la translation qu'il connaît en mathématiques et le mouvement de translation (souvent raccourci en « translation », comme dans le programme sénégalais) qu'il découvre en physique. Confronté à deux concepts qui utilisent le même vocable, totalement démuni pour pouvoir penser le lien, l'élève a tout intérêt à faire comme si le même terme était utilisé dans les deux disciplines sans qu'il n'y ait de lien, ce qui tend à renforcer le cloisonnement qu'il est déjà tenté de voir entre les deux disciplines.

Or, ce lien existe bien et nous prétendons qu'il n'est pas si complexe à expliciter. C'est ce que nous avons analysé dans le paragraphe qui suit.

Pourquoi le mouvement de translation a un lien avec la translation ?

Pour pouvoir expliciter ce lien, il est nécessaire d'introduire des notations adéquates pour pouvoir distinguer un point de ses différentes positions au cours du mouvement. C'est là une pratique qui ne choquera pas dans le cours de mathématiques, mais à laquelle l'enseignant de physique répugne par souci de ne pas rendre trop formel un enseignement qui se veut avant tout fonder sur l'expérience. Il y a donc là un premier terrain de négociation entre les enseignants des deux disciplines, condition sine qua non pour une possible collaboration.

On désignera donc par S un solide et par $A(t)$ la position d'un point A de S à l'instant t de $[0, T]$ (intervalle de temps du mouvement). Ainsi, la définition habituelle du mouvement de translation (tout segment reste parallèle à lui-même) devient :

S est animé d'un mouvement de translation si et seulement si :
Pour tous points A et B de S, et tous instants t et t' : $[A(t)B(t)] // [A(t')B(t')]$ (1)

Il y a là matière à un premier échange entre les enseignants des deux disciplines pour bien montrer que les deux formulations ne sont pas exclusives l'une de l'autre, mais bien complémentaires pour traduire de deux façons distinctes une même réalité. La formulation du physicien n'utilisant que la langue usuelle est plus facile à « comprendre », mais la formulation plus formelle du mathématicien permet un traitement plus adéquat de l'information. Il est important que les deux enseignants s'entendent bien sur ce fait et assument leurs différences dans leurs débats pour préparer un travail commun, mais aussi face aux élèves s'ils s'engagent dans une intervention commune. Faire un travail inter-disicplinaire ne veut pas dire s'accorder sur un discours commun, sorte de compromis entre les deux disciplines, mais bien un discours à deux voix qui distingue les champs de compétence, condition indispensable pour montrer la complémentarité.

L'étape suivante consiste à passer à une formulation vectorielle. Or cette étape se justifie essentiellement par des arguments physiques. En effet, du fait essentiel, peu discuté en général dans le cours de physique, que le solide est indéformable, il découle que la distance entre deux points est invariable, donc pour tous points A et B de S, et tous instants t et t'

$A(t)B(t)=A(t')B(t')$ où $A(t)B(t)$ désigne la longueur du segment $[A(t)B(t)]$

Or $[A(t)B(t)]$ // $[A(t')B(t')]$ donc du point de vue vectoriel, il n'y a que deux possibilités : soit : $\overrightarrow{A(t)B(t)} = \overrightarrow{A(t')B(t')}$, soit : $\overrightarrow{A(t)B(t)} = -\overrightarrow{A(t')B(t')}$

Or la deuxième solution impliquerait que le solide fasse « subitement » un demi-tour sans passer par aucune position intermédiaire. Il est intuitivement facile à comprendre qu'un tel phénomène serait une entorse à un principe élémentaire de continuité du mouvement. Ainsi, seule la première possibilité reste et donc :

$\overrightarrow{A(t)B(t)} = \overrightarrow{A(t')B(t')}$ pour tous points A et B de S et tous instants t et t'.

Cette condition implique bien entendu la première sur le seul parallélisme des segments.

On démontre donc ainsi que la définition « classique » du mouvement de translation est équivalente à celle un peu plus sophistiquée qui consiste à dire que « tout vecteur associé au solide reste identique au cours du mouvement ». On voit par cette formulation que le formalisme mathématique est un outil indispensable pour démontrer l'équivalence mais n'est pas indispensable pour formuler la nouvelle définition !

Ce qui nous paraît intéressant ici c'est que c'est bien la combinaison d'arguments et d'outils mathématiques sur ce qu'est un vecteur et d'arguments physiques sur ce qu'est un solide indéformable et la nécessaire continuité d'un mouvement qui permet d'aboutir à cette caractérisation vectorielle d'un mouvement de translation, que l'on énoncera avec le formalisme mathématique sous la forme (2) :

S est animé d'un mouvement de translation si et seulement si :
Pour tous points A et B de S, et tous instants t et t' : $\overrightarrow{A(t)B(t)} = \overrightarrow{A(t')B(t')}$ (2)

En mathématiques, les vecteurs sont liés aux translations, d'un point de vue épistémologique, mais aussi, dans les programmes dès l'introduction des vecteurs en fin de collège. Ce lien permet d'énoncer une troisième définition d'un mouvement de translation (3) :

S est animé d'un mouvement de translation si et seulement si : Pour tous points A et B de S, il existe une translation $\tau(A, B)$, telle que, quel que soit l'instant t : $\tau(A, B)\,(A(t)) = B(t)$ (3)

Le fait essentiel à comprendre est bien entendu que $\tau(A, B)$ est une translation qui ne dépend que des points A et B (d'où la notation) ; en fait c'est la translation de vecteur $\overrightarrow{AB}$.

On a ainsi pu faire un premier lien entre mouvement de translation et translation, en introduisant une idée vectorielle derrière la notion de segment restant parallèle à lui-même. On voit bien que la translation en jeu n'intervient pas entre deux position du solide (comme dans la conception dynamique d'une transformation géométrique), mais plutôt à « l'intérieur du solide », elle assure que le solide ne change pas de direction, ne « tourne pas autour de lui-même » dans son déplacement, même si chacun de ses points suit une trajectoire complexe.

Néanmoins, ce premier lien reste très formel et ne consiste guère qu'en une reformulation, dont les physiciens auraient beau jeu de dire qu'elle n'est qu'une complication gratuite des mathématiciens.

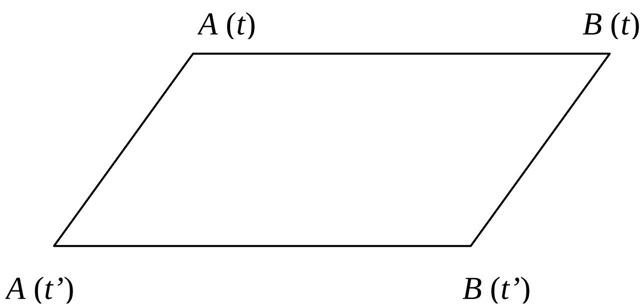
Mais le réel avantage est différé, bien que très proche. En effet, la trajectoire du point A étant l'ensemble des positions $A(t)$, la caractérisation (3) permet de déduire que la trajectoire du point B est l'image par la translation $\tau(A, B)$ de la trajectoire de A.

On déduit ainsi par une combinaison d'arguments mathématiques et physiques la deuxième propriété qui apparaît dans les manuels de physique (et qui est en fait une caractérisation du mouvement de translation) : tous les points du solide ont des trajectoires superposables.

Notre hypothèse, que nous venons d'argumenter, est que la démarche que nous venons d'expliciter est compréhensible par un élève de ce niveau et illustre bien la complémentarité des deux disciplines. Il ne s'agit pas ici de la faire « découvrir » à l'élève, mais de la faire expliciter par une intervention à deux voix des enseignants de chacune des deux disciplines.

Toutefois, cette première étape est insuffisante pour montrer entièrement les liens qui existent entre mouvement de translation et translation. On va compléter cette argumentation, en montrant du même coup comment on débouche sur la caractérisation par les vitesses.

Cette étape est certainement la plus intéressante pour l'apport des mathématiques. L'idée est justement de passer d'égalités entre vecteurs tracés sur le solide à des égalités entre vecteurs entre deux positions différentes de mêmes points. Du point de vue mathématique cela repose sur la propriété élémentaire dite du parallélogramme (classique dans le cours de mathématiques sur les vecteurs).



En effet, en partant de l'égalité (2) on peut ainsi déduire que :

$\overrightarrow{A(t)A(t')} = \overrightarrow{B(t)B(t')}$ car $A(t)B(t)B(t')A(t')$ est un parallélogramme.

Ceci conduit à la nouvelle caractérisation :

S est animé d'un mouvement de translation si et seulement si :
Quels que soient les deux instants t et t', il existe une translation $\tau(t, t')$ telle que, quel que soit le point *A* de *S*, $\tau(t, t')\,(A(t)) = A(t')$ (4)

Le point essentiel ici est de bien comprendre que la translation $\tau\,(t, t')$ ne dépend que des instants t et t'et est la même pour tous les points du solide.

La difficulté bien sûr c'est que cette translation ne préjuge en rien de la trajectoire suivie par les points du solide entre les deux instants *t* et *t'*. En effet la méprise qui consisterait à croire qu'entre les deux instants, les points du solide ont une trajectoire rectiligne correspond à ce que nous avons identifié comme une conception dynamique des transformations géométriques. Ici les points *A*, *B*, … peuvent avoir suivi n'importe quel type de trajectoire curviligne, mais entre deux instants donnés, il existe une translation unique qui permet de « passer » de la position à l'instant *t* à celle à l'instant *t'*, quel que soit le point.

L'intérêt de cette caractérisation se voit quand on divise par l'intervalle de temps (*t'*-*t*).

En effet, de $\overrightarrow{A(t)A(t')} = \overrightarrow{B(t)B(t')}$, on déduit pour $t \neq t'$: $\dfrac{\overrightarrow{A(t)A(t')}}{t-t'} = \dfrac{\overrightarrow{B(t)B(t')}}{t-t'}$

En faisant alors tendre *t* vers *t'*, on obtient $\overrightarrow{V_A(t)} = \overrightarrow{V_B(t)}$ (où $\overrightarrow{V_A(t)}$ et $\overrightarrow{V_B}(t)$ sont les vecteurs vitesses des points *A* et *B* à l'instant *t*).

On retrouve ainsi la troisième caractérisation donnée par les manuels de physique du mouvement de translation d'un solide :

Tous les points d'un solide en translation ont, à chaque instant *t*, le même vecteur vitesse $\overrightarrow{V(t)}$: c'est le vecteur vitesse du solide.

En toute rigueur, pour montrer que c'est bien une caractérisation, il faudrait montrer que de l'égalité des vitesses on peut revenir à l'égalité des vecteurs, ce qui nécessite l'outil intégrale, qui n'est pas disponible à ce niveau d'enseignement.

Par ailleurs, en physique en Première S en France (ou en seconde S au Sénégal) la vitesse instantanée n'est pas définie par la dérivée, mais comme une vitesse moyenne sur un petit intervalle de temps. La démonstration ci-dessus s'adapte alors très facilement.

Il faut bien comprendre que l'intérêt didactique pour un réel travail interdisciplinaire ne consiste pas ici à faire les démonstrations les plus rigoureuses, mais bien à montrer que les deux disciplines peuvent se faire écho. On ne visera donc pas à obtenir une démonstration la plus rigoureuse, qui serait inaccessible et ruinerait notre propos, mais à montrer (s'il faut au prix de quelques entorses à la rigueur mathématique) que des connaissances mathématiques accessibles par des élèves de ce niveau peuvent les informer sur des liens entre plusieurs caractérisations d'une même notion physique et leur faire comprendre pourquoi on utilise le mot translation dans les deux contextes.

Dans sa thèse de Doctorat, Le Thi (1997), quant à elle, a conduit une étude didactique et épistémologique sur l'enseignement du vecteur en classe de seconde.

En premier lieu, elle dresse une étude historique de la genèse du concept de vecteur et du développement du calcul vectoriel. Ce qui lui permet alors de mettre en évidence des difficultés qui ont entravé l'émergence de ce concept, difficultés dans lesquelles les caractéristiques de sens et de direction représentent les difficultés essentielles. Ensuite Le Thi (1997) a mené une analyse comparative de l'enseignement des vecteurs en première année de lycée au Vietnam et en France en s'appuyant sur des programmes et certains manuels de ce niveau d'étude. Ce travail lui a permis de fixer la spécificité de chacun des deux contextes vietnamien et français.

Les résultats de cette deuxième expérimentation confortent l'hypothèse de la prégnance du modèle métrique, et de la difficulté de la prise en compte des caractéristiques d'orientation des grandeurs vectorielles renvoyant ainsi aux difficultés de nature épistémologique.

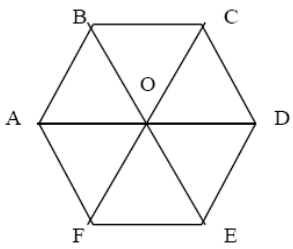
Par ailleurs, l'auteur a fait passer des tests aux élèves des deux institutions, afin de confronter les résultats des analyses précédentes aux réalités de l'enseignement du vecteur en première année de lycée. Il s'agit pour elle « de mettre en évidence les ressemblances et les différences entre le rapport des élèves à l'objet vecteur dans ces institutions différentes, afin de repérer les difficultés qui semblent liées au contexte vietnamien et d'autre part les difficultés qui résistent malgré les différences de rapport institutionnel […]. Il sera intéressant d'analyser ce dernier type de difficultés, à la lumière de notre analyse épistémologique, afin de voir si elles relèvent d'une résistance apparue dans le contexte historique. » (op. cité, p.201)

Pour ce faire, elle a analysé dans un premier temps le rapport des enseignants de mathématiques de première année de lycée des deux pays à l'objet vecteur, à l'aide d'un questionnaire. Les résultats montrent que le rapport de ces enseignants au savoir en jeu semble réduit essentiellement à leur rapport au savoir enseigné et très proche du rapport officiel de l'institution dont ils sont les sujets. Les arguments développés par les enseignants lorsqu'ils parlent du rôle du vecteur laissent supposer que pour eux le vecteur est un objet analytique, ou plutôt que l'enseignement des vecteurs est une partie de l'enseignement de la géométrie analytique. Or l'analyse historique montre que la géométrie analytique a précédé et s'est développée indépendamment du calcul vectoriel.

Il est à regretter cependant que l'auteur n'ait pas donné une place au lien naturel entre le vecteur et la translation. Même si Jacques Hadamard (1898) dans ses « leçons de géométrie » ne parle pas de vecteur, on découvre aisément de quoi il s'agit quand il dit « On voit qu'une translation est déterminée quand on se donne en grandeur, direction et sens le segment tel que AA', qui va d'un point à son homologue. »

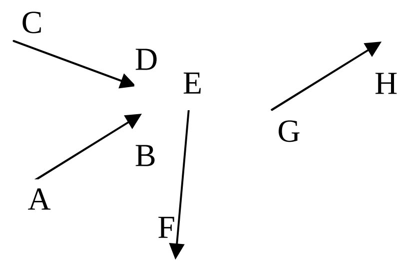
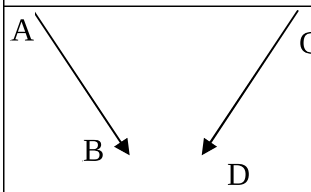
Dans un deuxième temps, Le Thi a étudié le rapport à l'objet vecteur des élèves vietnamiens et français en s'appuyant sur un test comportant un exercice dont voici le libellé :

Soit un hexagone régulier ABCDEF dont le centre est O.



Parmi tous les vecteurs dont l'origine et l'extrémité sont prises dans l'ensemble des points {A,B,C,D,E,F,O}, indiquez tous ceux qui sont égaux au vecteur $\overrightarrow{AB}$.

Ce test est essentiellement fondé sur l'égalité des vecteurs à partir de laquelle l'auteur dégage un certain nombre de stratégies possibles que nous résumons dans le tableau suivant :

Stratégie Norme (N)	Tous les segments de même de longueur représentent le même vecteur. Stratégie gagnante seulement dans le cas très particulier où les segments ont même direction et même sens.
 Stratégie Sens (S)	Deux vecteurs sont égaux si leurs représentants ont même longueur et même sens (les deux caractéristiques d'orientation sont réduites en une seule « sens » du vecteur)
Stratégie D = ∗S	Fait référence à l'utilisation d'une seule des deux caractéristiques de direction ou de sens.
 Stratégie D = ∗∗S	Ambiguïté au niveau des justifications. Le sens étant employé séparément de la direction.
Stratégie Vecteur (V)	Dénote une conception correcte de la notion de vecteur à travers la considération des trois caractéristiques (longueur, direction, sens)
Stratégie parallélogramme (P)	Vérification de l'égalité des vecteurs à travers la configuration de parallélogramme.

Or, ses analyses laissent paraître que seul un tiers des élèves français en début de seconde répondent correctement, alors qu'un quart ne prennent en compte que la longueur du vecteur pour répondre, ce qui les conduit à identifier jusqu'à 24 vecteurs égaux à $\overrightarrow{AB}$. Certains donnent des réponses qui montrent une difficulté avec l'utilisation du mot sens, bien que ce problème soit plus aigu avec les élèves vietnamiens qu'avec les élèves français (en raison d'une ambiguïté dans le manuel utilisé). Ainsi certains élèves considèrent que $\overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AB}$ car ils ont même longueur et même sens, mais que $\overrightarrow{CB} \neq \overrightarrow{AB}$ car ils ont même longueur mais des sens différents.

Un autre travail sur les vecteurs est dû à Pressiat (1999), il s'appuie sur une analyse épistémologique de l'histoire du concept de vecteur (en mathématiques et en physique). Cette étude est suivie par une analyse didactique du traitement vectoriel, dans le cadre des programmes et manuels, des problèmes d'alignement et de concours. Une comparaison des organisations mathématiques entre la France et quelques pays anglo-saxons fait apparaître deux univers différents dans la pratique du calcul vectoriel : celui anglo-saxon qui est attaché au pointage du plan et de l'espace et celui pratiqué en France caractérisé par des techniques fondées sur la notation $\overrightarrow{AB}$ et la relation de Chasles. De ce constat, l'auteur propose et met au point « une organisation mathématique dans laquelle on rentre par les types de problèmes de manière à introduire des techniques utilisant des vecteurs – positions » pour le début du lycée.

> Ce travail de construction d'une organisation mathématique permettant de faire du calcul vectoriel un moyen de modéliser les figures géométriques, et de les étudier en calculant sur les modèles ainsi fabriquées, vise à combler une lacune de la transposition didactique en France relative aux interventions du calcul vectoriel en géométrie élémentaire ; cette organisation devrait permettre de mieux tirer profit des acquis des élèves à ce sujet, de donner des moyens nouveaux et algébriques pour résoudre des problèmes de géométrie affine et métrique. […] L'organisation mathématique proposée devrait permettre d'installer au lycée, sur le plan des pratiques et des techniques, cette identification entre un espace affine pointé et un espace vectoriel. (Op. cité, 451-452)

Pour illustrer cette approche par les vecteurs – positions, l'auteur propose différentes modélisations de configurations géométriques et des transformations géométriques. Voyons par exemple comment il fait fonctionner la modélisation sur l'exercice (p. 393-395) suivant :

ABCD est un tétraèdre ; E, F, G et H sont les points définis par : $\overrightarrow{DE} = 2\overrightarrow{DA}$ *;* $\overrightarrow{AF} = -\frac{3}{2}\overrightarrow{AC}$; $\overrightarrow{BG} = 5\overrightarrow{BA}$; $\overrightarrow{CH} = -\overrightarrow{CD} + \frac{16}{5}\overrightarrow{CB}$. *Il s'agit de démontrer que E, F, G et H sont coplanaires.*

Pointons l'espace en A, Le vecteur - position $\overrightarrow{AM}$ *d'un point quelconque M sera noté* $\vec{m}$ *et travaillons dans la base* $(\vec{b}, \vec{c}, \vec{d})$ *avec* $\vec{b} = \overrightarrow{AB}$, $\vec{c} = \overrightarrow{AC}$ *et* $\vec{d} = \overrightarrow{AD}$.

Les hypothèses se traduisent ainsi : $\vec{e} = -\vec{d}$ *;* $\vec{f} = -\frac{3}{2}\vec{c}$ *;*

$\vec{g} - \vec{b} = -5\vec{b}$, *c'est-à-dire* $\vec{g} = -4\vec{b}$

$\vec{h}-\vec{c}=\vec{c}-\vec{d}+\frac{16}{5}(\vec{b}-\vec{c})$*, c'est-à-dire* $\vec{h}=\frac{16}{5}\vec{b}-\frac{6}{5}\vec{c}-\vec{d}$

On a donc $5\vec{h}=16\vec{b}-6\vec{c}-5\vec{d}$ *,* $4\vec{g}=-16\vec{b}$ *,* $-4\vec{f}=6\vec{c}$ *et* $-5\vec{e}=5\vec{d}$ *ce qui donne* $5\vec{h}+4\vec{g}-4\vec{f}-5\vec{e}=\vec{0}$. *La coplanarité des points E, F, G et H en résulte. On en déduit immédiatement que* $5(\vec{h}-\vec{e})=4(\vec{f}-\vec{g})$ *c'est-à-dire* $5\overrightarrow{EH}=4\overrightarrow{GF}$*, ce qui montre que les droites (EH) et (FG) sont parallèles (ce que la perspective cavalière – qui conserve le parallélisme – de la configuration spatiale confirme).*

Conclusion

Il apparaît à travers cette revue des recherches antérieures que l'enseignement du vecteur pose des problèmes en mathématiques et que même les points qui semblent acquis par les élèves dans cette discipline, redeviennent problématiques quand ils interviennent dans l'utilisation des grandeurs physiques vectorielles (cf. les travaux de Lounis (1989) sur le tracé de la somme de deux vecteurs). Le rabattement des grandeurs vectorielles sur leurs seules caractéristiques de longueur a été mis en évidence dans les deux disciplines. Ici encore, le fait que ce problème puisse être surmonté dans l'enseignement des mathématiques ne suffit pas pour qu'il n'apparaisse pas à nouveau dans le cadre de la physique. On a vu d'ailleurs que l'enseignement en physique a souvent tendance à favoriser cet écrasement. On peut d'ailleurs s'interroger sur les choix récents des programmes français de mathématiques qui enferment quasiment le vecteur dans le cadre analytique (voir partie II) renforçant ainsi les aspects numériques et donc métriques du vecteur.

Il apparaît donc que non seulement, les deux disciplines sont cloisonnées, mais aussi que les compétences acquises dans l'une ne se transfèrent pas automatiquement dans les tâches que l'on pourrait croire voisines dans l'autre discipline. Ce constat nous pousse à un travail de fond pour essayer de déterminer non seulement les points où l'interdisciplinarité pourrait être bénéfique (pour des raisons épistémologiques, voire de logique scolaire), mais aussi les conditions à réaliser pour que cette interdisciplinarité puisse effectivement jouer le rôle attendu, en dépit des contraintes institutionnelles défavorables.

Dans ce sens, plusieurs des travaux que nous avons recensés s'intéressent au lien possible à propos du vecteur et des grandeurs physiques vectorielles. Ils sont essentiellement centrés sur les difficultés des élèves ou sur des aspects épistémologiques assez larges. Notre travail tout en reprenant ces aspects vise à rentrer plus à fond dans cette question. Ainsi, deux aspects essentiels vont nous intéresser. D'une part, il nous semble important d'interroger la faisabilité institutionnelle (dans le cadre des programmes actuels) d'une approche réellement interdisciplinaire à propos des vecteurs / grandeurs physiques vectorielles ou de la translation / mouvement de translation. Il importe donc de voir les points des programmes qui offrent une ouverture dans ce sens et les tentatives qui sont faites dans les manuels. Mais il nous semble aussi important de voir comment les enseignants des deux disciplines se positionnent, à la fois en termes de collaborations possibles et de connaissances effectives des contenus et problématiques de l'autre discipline.

Enfin, à l'appui de ces analyses et de notre travail de DEA (Ba, 2003), sur les notions de translation et de mouvement de translation, tel que nous l'avons rappelé plus haut, nous présenterons, à la fin de ce travail, une expérimentation d'un cours à deux voix des enseignants de chacune des deux disciplines pour mieux illustrer la complémentarité possible des deux disciplines.

I.2 Cadre théorique

Comme nous l’avons annoncé dans l’introduction de ce travail, le cadre théorique dans lequel nous nous plaçons est constitué essentiellement de différents aspects de la théorie anthropologique du didactique telle qu’elle a été développée par Chevallard (1991). Nous présentons dans ce qui suit une synthèse, à l’appui de plusieurs citations, des éléments que nous mettrons en œuvre pour notre propos dans la suite de notre travail.

Dans le cadre général de la théorie anthropologique du didactique, Chevallard s’appuie sur les termes primitifs d'*objet*, d'*individu*, de *rapport* et d'*institution* pour construire son modèle. Tout est quasiment susceptible d’être objet, en particulier, toute *œuvre,* c'est-à-dire toute production humaine pour apporter une réponse à une ou plusieurs questions, théoriques ou pratiques est un objet.

Un savoir n'existe pas "in vacuo" dans un vide social : tout savoir apparaît, à un moment donné, dans une société donnée, comme ancré dans une ou des institutions. (Chevallard, 1989)

Ainsi tout savoir est savoir de ce que Chevallard appelle institution, c’est-à-dire, *à peu près n’importe quoi [...]. Une école est une institution de même qu’une classe ; mais il y a aussi l’institution «travaux dirigés», l’institution «cours», l’institution « famille». La vie quotidienne est une institution. (Chevallard, 1992, p.88).*

Dans cette approche on retrouve, entre autres, la théorie initiale de la transposition didactique, puisque, pour qu'un savoir puisse vivre dans une institution, il faut qu'il se soumette à un certain nombre de contraintes, ce qui implique notamment qu'il se modifie, sinon il ne peut pas se maintenir dans l'institution. Ce nouveau cadre plus large constitue ce que Chevallard a appelé l’écologie des savoirs.

I.2.1 Ecologie des savoirs

Selon le point de vue de Chevallard, un savoir S va exister dans différentes institutions, entouré par d'autres savoirs ou connaissances (explicites ou implicites) qui, pour les sujets de chaque institution, vont aller de soi, être stables, et constituer ce qu’il appelle un milieu. Ce milieu va caractériser les conditions dans lesquelles va vivre ce savoir S dans l'institution considérée. La caractérisation des conditions de vie d’un savoir donné vont amener

Chevallard (1994) à élargir le cadre en intégrant ce qu'il appelle le questionnement écologique s'inspirant de l'écologie biologique :

> Les écologistes distinguent, s'agissant d'un organisme, son habitat et sa niche. Pour le dire en un langage volontairement anthropomorphe, l'habitat, c'est en quelque sorte l'adresse, le lieu de résidence de l'organisme. La niche, ce sont les fonctions que l'organisme y remplit : c'est en quelque façon la profession qu'il y exerce. (Op. cité, p. 142).

À la suite de Chevallard, Artaud (1997) montre alors comment un objet émerge et peut vivre dans un écosystème didactique.

> Pour qu'un objet O émerge dans un écosystème didactique, il est nécessaire qu'existe un milieu pour cet objet, c'est-à-dire un ensemble d'objets connus (au sens où il existe un rapport institutionnel non problématique) avec lesquels O viendra se mettre en interrelation. Cette condition est à mettre en rapport avec une condition citée plus haut, la loi du tout structuré, dont je rappelle l'énoncé : un objet mathématique ne peut exister seul ; il doit venir prendre place dans une organisation mathématique, organisation qu'il faut faire exister. La nécessité qu'existe un milieu dit alors que cette émergence d'une organisation mathématique ne peut se faire ex nihilo. Il faut prendre appui sur des organisations, mathématiques ou non mathématiques, déjà existantes. (Op. cité, p. 124).

Cette dimension écologique permet de questionner les objets mathématiques.

> La problématique écologique se présente, d'emblée, comme un moyen de questionner le réel. Qu'est-ce qui existe, et pourquoi ? Mais aussi, qu'est-ce qui n'existe pas, et pourquoi ? Et qu'est-ce qui pourrait exister ? Sous quelles conditions ? Inversement, étant donné un ensemble de conditions, quels objets sont-ils poussés à vivre, ou au contraire sont-ils empêchés de vivre dans ces conditions ? (Artaud, 1997, 99)

L'analyse écologique vise ainsi, à nous permettre de mettre à jour un réseau de conditions et de contraintes qui vont déterminer la place que peuvent occuper les notions en jeu dans chacune des disciplines mathématiques et physique et dans leur interrelation. Pour ce faire, nous analysons leur évolution au cours des changements de programmes en prenant en compte le fonctionnement global des institutions scolaires où elles interviennent, mais aussi d'institutions plus larges liées au fonctionnement du savoir savant chez les mathématiciens ou les physiciens. Ce positionnement théorique nous semble important, en effet comme le fait remarquer Dorier (2000):

> Par l'objet même de son étude, la recherche en didactique des mathématiques présente un caractère expérimental, cependant le travail "de terrain" (observations, expérimentations, analyses de productions d'élèves, etc.) est sous-tendu par un travail préalable important ayant trait à "l'étude du savoir mathématique". Cette étude est une phase fondamentale pour que le chercheur puisse prendre ses distances par rapport aux enjeux didactiques. Le sens des concepts, les problèmes qui s'y rattachent, la position relative d'un élément de savoir dans un savoir plus large qui l'englobe, mais

> aussi la variabilité de ces données en fonction des périodes et des institutions, etc. sont autant de questions qui aident à mieux comprendre le fonctionnement d'un système didactique. De plus, le chercheur en didactique ne peut se contenter d'un point de vue interne au système d'enseignement, il analyse le processus complexe qui conduit de la production du savoir dans la communauté mathématique jusqu'à son enseignement, en replaçant l'enjeu de connaissance dans le contexte plus vaste de la constitution des savoirs. […] Ainsi une part importante de l'analyse didactique consiste à prendre en compte l'évolution et la constitution historique du savoir mathématique dans la sphère savante et ses rapports avec la constitution du texte du savoir enseigné. En outre, le processus de transposition didactique est complexe, il ne commence pas au moment où l'enseignant prépare son cours, il est au contraire à ce moment là dans sa phase finale, l'enseignant n'ayant plus que le contrôle de variables locales dans la présentation du texte du savoir. Le chercheur en didactique est donc tenu de remonter aux sources de ce processus, jusqu'à la production du savoir savant, pour "se déprendre de la familiarité de son objet d'étude, et exercer sa vigilance épistémologique". (Op. cité, 9)

Ce cheminement dans la recherche en didactique qui consiste à partir de la constitution historique du savoir est fondamental voire crucial pour l'étude du processus de la transposition didactique. Cette phase pouvant être complétée par une analyse de matériaux plus accessibles comme les programmes et les manuels scolaires.

> L'étude de la transposition didactique appelle, le plus souvent, celle de l'histoire de l'enseignement d'un domaine donné des mathématiques. Les matériaux à disposition ne permettent pas, le plus souvent, d'avoir accès à l'enseignement effectif des époques anciennes. Les manuels scolaires peuvent renseigner sur un élément qui est intermédiaire entre la prescription officielle (en France, les programmes officiels) et les pratiques effectives des professeurs. Même pour les périodes actuelles, étant donné que les programmes et les manuels sont très aisément accessibles alors que les pratiques en classe sont longues à observer, cette facilité méthodologique est très souvent (presque toujours), notamment dans les travaux de thèse, à l'origine de questions qui sont adressées aux pratiques.
>
> Ainsi le manuel, dans de nombreux travaux de didactique des mathématiques, est un outil pour analyser le curriculum et les processus de transposition didactique. (Assude et Margolinas 2005, 232)

Dans notre travail, nous nous proposons de dégager à partir des programmes et des manuels de différentes périodes (depuis 1852) en mathématiques et en physique l'évolution des habitats et des niches occupés par les notions de vecteurs et de translation et de grandeurs physiques vectorielles et de mouvement de translation. C'est donc une analyse épistémologique, fondée sur les outils de l'analyse écologique, de l'évolution de l'enseignement de ces concepts que nous nous proposons de mener.

Nous présentons à présent les outils de l'anthropologie du didactique que nous allons utiliser pour analyser l'enseignement actuel à la lumière de l'analyse écologique précédente.

I.2.2 Rapports personnels et institutionnels

Se former, pour une personne, c'est « entrer en contact avec un certain nombre d'œuvres ». Chevallard décrit ainsi la nature des liens possibles entre les différents termes de son système de base :

> Un objet O existe pour une personne x si existe un rapport personnel R(x,O), de la personne x à l'objet O. Semblablement, l'objet O existe pour l'institution I si existe un rapport institutionnel, RI (O), de I à O. Dualement, on dira que x (ou I) connaît O s'il existe un rapport R(x,O) de x à O (respectivement, un rapport RI (O) de I à O)." (Chevallard, 1991, p.161)

Il distingue ensuite la notion de personne de celle d'individu, par la dynamique créée dans l'évolution des rapports personnels que l'individu entretient avec tous les objets à son contact :

> La personne est alors définie comme le couple formé par un individu x et le système de ses rapports personnels R(x,O) (à un moment donné de l'histoire de x). […] Au cours du temps, le système des rapports personnels de x évolue : des objets qui n'existaient pas pour lui se mettent à exister ; d'autres cessent d'exister ; pour d'autres enfin le rapport personnel de x change. Dans cette évolution, l'invariant est l'individu ; ce qui change est la personne. (Chevallard, 1992)

Dans cette approche, un apprentissage est caractérisé pour un individu x, relativement à un objet O, par l'évolution de son rapport personnel R(x, O), c'est donc une modification de la personne.

L'univers cognitif de x que Chevallard note U(x) est l'ensemble des couples (O, R(x, O)) tel que $R(x, O)\neq\emptyset$.

Une institution existe dès qu'elle a un sujet. De même, tout individu est sujet de plusieurs institutions et peut rencontrer un même objet dans différentes institutions. Son assujettissement à une institution règle en partie la nature des rapports qu'il peut avoir avec ses objets.

> En devenant sujet d'une institution I en position p un individu x, qui est déjà une personne dotée d'un certain univers cognitif U(x), s'assujettit aux rapports institutionnels $R_I(p,O)$, qui vont remodeler ses rapports personnels : si O existe pour les sujets de I en position p, le rapport personnel de x à O, R(x, O), tendra à ressembler au rapport institutionnel $R_I(p,O)$, à moins que x ne se révèle être, à cet égard, un mauvais sujet de I. De manière générale, nos rapports « personnels » sont ainsi le fruit de l'histoire de nos assujettissements institutionnels passés et présents. (Chevallard, 1992)

Aucune institution n'est homogène. Dans chacune d'elle il existe différentes positions de ses sujets. Ce n'est donc pas un rapport institutionnel générique qui va contraindre chaque sujet, mais un rapport institutionnel pour une position donnée.

> Au demeurant, le rapport personnel R(X, O) se présente en I comme clivé. Il comporte une composante publique (relativement à I), qui se donne à voir dans I et sur l'examen de laquelle, sera fondé éventuellement le verdict de conformité de R(X, O) à R(p,O) ; et institutionnellement invisible (depuis I), une composante privée, qui échappe à l'évaluation par I. Notons ici que ce clivage n'est en rien un absolu : il est relatif à l'institution I, et ce qui du rapport personnel se dérobe à telle institution pourra apparaître en pleine lumière à telle autre. C'est la dénégation du clivage public/privé qui soutient en I l'illusion du pur sujet. Pourtant, paradoxalement, c'est ce clivage qui permet que I s'attache de loyaux sujets - qui, parce qu'ils sont des personnes, ne seront jamais, toutefois, de purs sujets. (Chevallard 1992, pp. 91-92)

Si le rapport personnel à l'objet comporte une composante publique, qui se donne à voir dans l'institution et sur laquelle sera fondé le verdict de conformité, il a aussi une composante privée, invisible depuis l'institution, qui échappe à cette institution.

Une institution est dite didactique s'il existe au moins deux positions possibles dans cette institution, l'une de formateur et l'autre de formé. Mais il faut également une intention d'enseigner, c'est à dire qu'un sujet de cette institution, occupant la position de formateur, entreprend d'agir pour que le rapport personnel à l'objet de connaissance de l'autre sujet, occupant une position de formé, change. Par exemple dans l'institution d'enseignement, le formateur est le professeur qui occupe une position d'enseignant. Celui-ci va chercher à rendre le rapport personnel (dans sa composante publique) à un objet de connaissance, pour toute personne en position d'élève, conforme à ce que l'institution d'enseignement conçoit comme rapport institutionnel attendu en position d'élève.

Précisons ce qu'on entend par savoir dans la théorie anthropologique :

> Un savoir est un objet particulier au sein d'une société donnée : de ce point de vue, être un savoir est un statut culturel pour certains objets. Un savoir est donc producteur de connaissances pour un individu, à partir du moment où cet individu a un rapport avec ce savoir, en général en devenant sujet d'une institution (d'enseignement par exemple). " […] un savoir est toujours supposé. Il se présente à nous par ses emblèmes (sa dénomination, etc.), et nous le rencontrons […] comme une potentialité - ou un manque, quand nous voulons 'l'apprendre'. […] Les savoirs introduisent ainsi une dynamique dans la société et la culture. Je ne soulignerais pas davantage qu'ils y sont des objets de désir. Cela déjà suffirait, je crois, pour reconnaître dans les savoirs, tels qu'ils émergent dans le réel anthropologique, un certain type d'objets." (Chevallard 1991, pp.209–210)

Dans l'évolution récente de la théorie anthropologique du didactique (TAD), la notion d'oeuvre semble s'être substituée à celle de savoir, peut-être parce qu'un savoir ne se rencontre qu'à travers les objets qui constitue une œuvre.

Une œuvre vit en général dans plusieurs institutions I, I', I'', … On appelle transposition institutionnelle d'une œuvre le processus global qui amène l'œuvre à vivre dans une institution I à partir d'une institution I'.

Lorsqu'elle a lieu vers une institution didactique telle qu'un système d'enseignement, on parle alors de **transposition didactique** et Chevallard a appelé noosphère l'institution qui décide et opère cette transformation**.**

Dans cette évolution récente de la théorie, la notion de praxéologie fait son entrée et permet ainsi d'analyser plus finement les réponses apportées par une œuvre.

> La théorie anthropologique du didactique considère que, *en dernière instance*, toute activité humaine consiste à *accomplir une tâche t* d'un certain *type T, au moyen* d'une certaine *technique* τ, *justifiée* par une *technologie* θ qui permet en même temps de la *penser*, voire de la *produire*, et qui a son tour est *justifiable* par une *théorie* Θ. En bref, toute activité humaine *met en oeuvre* une organisation qu'on peut noter [*T*/τ/θ/Θ] et qu'on nomme *praxéologie*, ou *organisation praxéologique*. Le mot de praxéologie souligne la structure de l'organisation [*T*/τ/θ/Θ] : le grec *praxis*, qui signifie « pratique », renvoie au *bloc pratico-technique* (ou *praxique*) [*T*/τ], et le grec *logos*, qui signifie « raison », « discours raisonné », renvoie au *bloc technologico-théorique* [θ/Θ]. Ces notions permettent de redéfinir de manière assez réaliste certaines notions courantes : ainsi peut-on considérer que, par *savoir-faire*, on désigne usuellement un bloc [*T*/τ], et, par *savoir*, en un sens restreint, un bloc [θ/Θ] – ou même, mais en un sens large cette fois, une praxéologie [*T*/τ/θ/Θ] tout entière. Pour cette dernière raison, on pourra désigner aussi une organisation praxéologique comme étant une *organisation de savoir* – en se résignant alors à ne rencontrer qu'aléatoirement les points de vue institutionnels spontanés, qui font d'ordinaire un usage élitaire et parcimonieux du mot *savoir*. (Chevallard, 1999, p. 2)

Si l'œuvre est de type mathématique, [*T*/τ/θ/Θ] est appelée organisation mathématique ou praxéologie mathématique.

Un enjeu didactique est alors l'objet de connaissance enseigné, c'est à dire un objet pour lequel il y a intention de changer le rapport personnel de l'élève pour qu'il devienne conforme au rapport institutionnel attendu. C'est l'analyse des interactions publiques entre les élèves et l'enseignant qui permet de caractériser les enjeux didactiques, leurs différents statuts (les objets de connaissances qu'il faut savoir définir, ceux qu'il faut savoir utiliser, ceux qui doivent être mémorisés, ceux qui peuvent être oubliés) et les rapports institutionnels visés.

Dans notre travail, nous envisagerons les 6 grandes institutions que sont «les mathématiques savantes », la « physique savante », les « classes mathématiques de fin de collège en France », les « classes mathématiques de fin de collège au Sénégal », la « classe de physique de 1[ère] S en France », la « classe de physique de Seconde S au Sénégal ». Notre propos sera d'essayer de caractériser les rapports institutionnels relativement à ces 6 institutions des objets de savoirs qui nous préoccupent, ainsi que les rapports personnels des enseignants des deux disciplines et des élèves. La caractérisation des rapports institutionnels s'appuie en partie sur la deuxième partie consacrée à l'analyse écologique, nous la compléterons par une analyse des programmes et des manuels actuels. C'est l'objet de notre troisième partie intitulée « Analyse institutionnelle ». Pour dégager les caractéristiques des rapports personnels des enseignants et des élèves nous avons construit divers questionnaires et tests, dont l'analyse constitue la quatrième partie de notre travail intitulée « Analyse des rapports personnels ».

I.3 Problématique, méthodologie et plan commenté de la thèse

Notre travail se propose d'aborder les points suivants :

- Etude de l'histoire de ces concepts et de leur enseignement, essentiellement en France, vu que jusqu'au début des années quatre-vingts les programmes du Sénégal étaient quasiment identiques.
- Analyse des conditions actuelles de leur enseignement dans les deux pays à travers une analyse des programmes et de manuels de mathématiques (fin de collège début de lycée) et de physique (essentiellement en classe de seconde S au Sénégal et de Première S en France).
- Etude des représentations et des pratiques des enseignants des deux disciplines à la fois sur les concepts concernés par notre étude et sur les liens possibles entre les deux disciplines.
- Enfin, nous examinerons les rapports personnels des élèves aux objets de savoir en jeu et aux liens éventuels entre les deux disciplines.

Comme nous l'avons expliqué plus haut notre étude se place avant tout dans une perspective épistémologique et anthropologique et s'appuie sur des travaux antérieurs sur les concepts en jeu dans les deux disciplines et les liens éventuels.

Notre étude se découpe en trois temps :

1. Dans un premier temps, nous analysons de façon succincte l'histoire des vecteurs et des grandeurs vectorielles. Cette étude nous a permis de dégager les grandes lignes de l'évolution de ces concepts en mettant en particulier en évidence les liens que les mathématiques et la physique ont entretenus dans ce contexte. De ce travail, nous dégageons ensuite, dans le cadre de l'écologie des savoirs, les conditions qui ont amené à faire vivre et évoluer les vecteurs et les grandeurs physiques vectorielles dans l'enseignement secondaire, en examinant particulièrement les interactions entre l'enseignement des mathématiques et de la physique. Ce travail nous a permis d'identifier l'évolution de l'habitat et des niches des vecteurs dans les programmes de mathématiques depuis 1852 jusqu'à nos jours. Parallèlement, nous menons une analyse de l'évolution de l'enseignement de la physique concernant les grandeurs physiques vectorielles. L'analyse de l'évolution de l'enseignement vise donc à nous permettre de dégager les conditions

historiques et épistémologiques qui ont conduit à la situation actuelle dans les deux pays au regard de l'enseignement des concepts concernés dans chacune des deux disciplines et de l'existence ou non de liens effectifs.

Nous regrouperons ces deux analyses qui se complètent à travers une lecture en termes de transposition didactique dans une même partie (**deuxième partie** de la thèse) que nous intitulons ***Analyse écologique***, dans la mesure où nous nous proposons de dégager à travers le contexte historique des institutions, qu'elles soient savantes ou scolaires, les conditions et contraintes écologiques qui pèsent sur le système actuel.

2. Dans un deuxième temps, nous dégageons les aspects essentiels du rapport institutionnel actuel dans chaque discipline aux objets en jeu. Pour les mathématiques, ceci nous conduit à analyser les programmes et des manuels de fin de collège et de lycée sur les contenus associés au vecteur et à la translation. En physique, nos analyses portent essentiellement, sur la classe de seconde S au Sénégal et de première S en France, avec les concepts de force, de vitesse et de mouvement de translation. L'enrichissement de notre travail avec la translation et le mouvement de translation vient des structures actuelles des programmes de mathématiques et de physique, qui nous ont conduit naturellement, partant du vecteur, à nous intéresser à la translation. Notons enfin que cette analyse porte sur les programmes français et sénégalais. Les manuels analysés sont français, mais d'usage répandu dans les deux pays.

L'ensemble de ces analyses constitue la **troisième partie** de notre travail intitulée ***Analyse institutionnelle***.

3. Dans un troisième temps, nous avons tenté de mieux cerner le rapport effectif des enseignants et surtout des élèves aux objets de savoir en jeu et les variations existantes selon qu'on se place dans l'une ou l'autre des disciplines. Pour ce faire, nous avons mené des enquêtes de terrain basées sur deux questionnaires pour les élèves et deux questionnaires destinés aux enseignants des deux disciplines. Ces enquêtes nous permettent de mieux cerner comment les acteurs du système réagissent par rapport aux contraintes institutionnelles. Dans les deux questionnaires destinés aux élèves, nous proposons des tâches hors contrat. Le premier questionnaire a pour but de confronter les hypothèses faites aux cours des analyses précédentes à la réalité de l'apprentissage des notions de vecteur, de translation et des concepts physiques associés. En d'autres termes, ce questionnaire vise à clarifier le rapport des élèves de seconde et première S à ces objets de savoir et à étudier l'évolution des difficultés déjà repérées dans la revue critique des recherches existantes à

propos de l'enseignement / apprentissage des notions de vecteur et de la translation en mathématiques et des notions de force et mouvement de translation en physique. L'enjeu de l'ensemble des situations proposées dans le deuxième questionnaire est de donner sens à la somme de deux vecteurs et à la non linéarité de la norme par des problèmes issus de la physique mettant en scène la modélisation des actions mécaniques. On s'appuie donc sur le contexte de la physique pour voir comment les élèves font fonctionner le modèle vectoriel, en particulier la somme de deux vecteurs. Ces situations nous semblent constituées des points de contact entre les enseignements des deux disciplines. L'objectif est de repérer les procédures et types de constructions graphiques que les élèves mettent en œuvre pour résoudre des problèmes liés à la somme de deux vecteurs donnés. Ce qui nous permettra d'avoir quelques indices des contrats mis en œuvre en classe de physique et en classe de mathématiques pour ce qui est de l'utilisation du vecteur et d'avoir quelques éléments sur la disponibilité et l'efficacité de l'outil vectoriel.

Ces enquêtes de terrain sont complétées par deux questionnaires destinés aux enseignants de sciences physiques d'une part et aux enseignants de mathématiques d'autre part.

Il s'agit de recueillir des informations de la part d'enseignants de physique et de mathématiques concernant :

- Leur connaissance du savoir à enseigner dans l'autre discipline.
- Les interactions entre certains concepts enseignés dans les deux disciplines.
- Leur collaboration éventuelle avec les enseignants de l'autre discipline.
- Leur rapport à l'autre discipline.
- Leurs pratiques en classe relatives aux liens entre les concepts de grandeur vectorielle et de mouvement de translation en physique et les concepts de vecteur et de translation en mathématiques, ainsi que les difficultés d'apprentissage de ces concepts qu'ils repèrent chez leurs élèves.

L'ensemble des ces analyses visent à mieux cerner les rapports personnels, des enseignants de chaque discipline et des élèves, à ces objets de savoir dans les deux disciplines et quant aux liens qu'ils font ou non entre elles. C'est ce qui constitue notre **quatrième partie** intitulée ***Analyse des rapports personnels***.

Enfin, en conclusion nous reprendrons les principaux résultats de ces trois étapes de notre travail, en mettant en évidence les limites. Nous évoquerons de façon modeste quelques propositions d'interactions possibles entre les deux disciplines sur les concepts étudiés. En particulier, nous proposons, sans avoir pu l'analyser faute de temps et de données suffisamment fiables, une (proto) expérimentation d'un enseignement à deux voix (par les professeurs des deux disciplines sur la notion de mouvement de translation). Nous avons réalisé à Dakar, une première expérimentation dans des conditions difficiles. En effet, au moment où nous pouvions mettre le dispositif en place, une longue grève des enseignants bloquait tous les lycées du pays. Nous avons tout de même réussi à monter une expérimentation, mais les conditions peu favorables et le manque de temps nous ont contraint à ne pas exploiter les résultats dans le cadre de notre travail de thèse.

PARTIE II

ANALYSE ECOLOGIQUE

II.1 Introduction

Notre propos n'est pas ici de retracer en détail l'histoire des vecteurs et des grandeurs physiques vectorielles, nous renvoyons le lecteur intéressé à différents ouvrages sur le sujet, principalement (Crowe 1967, Flament 1997 et 2003 et Dorier 1997, 1ère partie). Nous nous intéressons plutôt à l'histoire de l'enseignement des vecteurs en France depuis leur timide apparition dans les programmes des classes du secondaire à la fin du XIXe jusqu'à nos jours. Au-delà de l'intérêt historique, nous voulons ainsi éclairer l'histoire de l'enseignement d'un domaine de l'éducation mathématique, qui, depuis ses heures de gloire à l'époque des mathématiques modernes, ne cesse de rétrécir au fur et à mesure des réformes récentes, et dont le lien avec l'enseignement de la physique, s'il paraît naturel aux deux parties, semble néanmoins ne pas pouvoir réellement servir d'appui efficace pour les enseignants de l'une et l'autre discipline.

L'analyse de l'évolution de l'enseignement vise donc à nous permettre de dégager les conditions historiques et épistémologiques qui ont conduit à la situation actuelle dans les deux pays au regard de l'enseignement des concepts concernés dans chacune des deux disciplines et de l'existence ou non de liens effectifs.

Nous allons étudier ainsi les différentes places occupées par le vecteur et la translation d'une part, et les grandeurs physiques vectorielles et le mouvement de translation d'autre part, dans les programmes de mathématiques et physique qui se sont succédés depuis la réforme de 1852. La question initiale que nous nous posons porte sur les conditions qui ont amené à faire vivre et évoluer les vecteurs dans l'enseignement secondaire français et sénégalais. Selon le cadre défini dans notre partie précédente, du point de vue théorique, nous nous situons dans une perspective écologique, c'est-à-dire que nous identifions l'évolution de l'habitat et des niches des vecteurs, selon les termes définis par Chevallard (1994) dans son approche de l'écologie didactique des savoirs, que nous avons rappelé dans la présentation de notre cadre théorique.

L'analyse écologique vise à nous permettre de mettre à jour un réseau de conditions et de contraintes qui vont déterminer la place que peuvent occuper les notions en jeu dans chacune des disciplines et dans leur interrelation. Pour ce faire, nous analysons leur évolution au cours des changements de programmes en prenant en compte le fonctionnement global des institutions scolaires où elles interviennent, mais aussi d'institutions plus larges liées au fonctionnement du savoir savant chez les mathématiciens ou les physiciens.

Pour l’histoire de l’enseignement, nous allons procéder par ordre chronologique depuis 1852 (date de la première apparition du concept de vecteur dans l’enseignement) jusqu’à nos jours, en différentes phases qui correspondent aux grandes réformes scolaires. Notons que nous ne nous attarderons pas trop sur les réformes les plus récentes, qui sont mieux connues des lecteurs et ont fait l’objet d’analyses fines dans des travaux que nous citerons en conclusion, en débouchant sur quelques réflexions didactiques qui orientent ce travail.

II.2 Aspects historiques et épistémologiques de la genèse du vecteur en mathématiques

II.2.1 Le vecteur un concept finalement récent

Même si l'on retrouve des traces du parallélogramme des forces dès l'antiquité, l'origine du vecteur est à chercher dans des périodes beaucoup plus récentes. La critique de Leibniz à la fin du XVII^{e} de la géométrie de Descartes, qui prônait la recherche d'une caractéristique purement géométrique qui puisse s'appliquer aux positions de la même façon que l'algèbre s'applique aux grandeurs, est restée vaine pendant plus d'un siècle. C'est vraiment avec l'interprétation géométrique des quantités imaginaires et le désir de généralisation à l'espace, que le concept de vecteur se fait jour dans le courant du XIX^{e}, à la croisée de l'algèbre et de la géométrie, puis dans les applications à la physique (Crowe 1967 et Flament 1997 et 2003). De même, les liens qui ont uni la genèse du calcul vectoriel et l'élaboration de l'algèbre linéaire sont aussi plus complexes et plus ténus qu'ils n'en ont l'air (Dorier 1997, 1ère partie).

Le calcul vectoriel a connu un développement lent dans l'histoire des mathématiques. En effet, on peut considérer qu'il prend racine dans le processus d'élargissement du concept de nombre qui débuta dans les civilisations babyloniennes et égyptiennes. Néanmoins, les premiers travaux décisifs, qui ont conduit à sa conceptualisation ne datent que de la fin du XVIII^{e} siècle avec, pour ne citer que les principaux : Wessel (1797), Argand (1806), Gauss (1831), Bellavitis (1833), Möbius (1827), Hamilton (1843) et Grassmann (1844). L'origine de ces travaux n'est souvent pas à chercher du côté de la physique, ni même seulement de la géométrie. En effet, une des sources principales de ces travaux tient dans la volonté de légitimer l'usage des quantités imaginaires et de généraliser ce nouveau type de calcul à de plus grandes dimensions. Il y a donc bien une origine algébrique, indissociable du contexte géométrique, aux vecteurs. Le lien avec la physique ne sera que plus tardif (deuxième moitié du XIX°) et touchera d'abord à des domaines de pointe du moment, principalement les équations de Maxwell, que la notation vectorielle permettait de simplifier grandement par rapport à l'écriture analytique.

Tout part de la méthode analytique de Descartes introduite en géométrie en 1637 :

> Cependant en marge de ce succès indéniable, certains mathématiciens commencèrent à exprimer des réserves, voire des critiques, à l'égard de la méthode analytique. Il semblait en effet inacceptable pour eux que la résolution d'un problème géométrique passe par l'utilisation de nombres, étrangers au

> domaine de la géométrie, sur lesquels, qui plus est, porte un arbitraire lié au choix du repérage. Cette position, qui peut sembler un peu dogmatique, était assortie du reproche que la méthode analytique, masquant la réalité géométrique de la résolution, ne permettait aucun recours à l'intuition et que, si elle semblait démontrer le résultat, par contre, elle ne l'expliquait en rien. (Dorier 1997, p. 40)

Leibniz, en particulier a exprimé ses réserves très tôt et tenter en vain de créer un calcul purement géométrique, c'est ce qu'il exprime, entre autres, dans une lettre adressée à Christian Huyghens, datée du 8 septembre 1679 :

> Je ne suis pas encor content de l'Algèbre, en ce qu'elle ne donne ny les plus courtes voyes, ny les plus belles constructions de Geometrie. C'est pourquoy lorsqu'il s'agit de cela, je croy qu'il nous faut encor une autre analyse proprement géométrique ou linéaire[4], qui nous exprime directement situm, comme l'Algèbre exprime magnitudinem. Et je croy d'en avoir le moyen et qu'on pourroit représenter des figures et mesme des machines et mouvements en caractères, comme l'Algèbre represente les nombres ou grandeurs. (Leibniz 1850, 1:382)

Leibniz tente alors de créer une *Géométrie des Situations,* dont il explicite ainsi les principes:

> J'ay trouvé quelques éléments d'une nouvelle caracteristique, tout à fait différente de l'Algèbre, et qui aura des grands avantages pour representer à l'esprit exactement et au naturel, quoyque sans figure, tout ce qui dépend de l'imagination. L'algèbre n'est autre chose que la caractéristique des nombres ou des grandeurs. Mais elle n'exprime pas directement la situation, les angles, et le mouvement, d'où vient, qu'il est souvent difficile de reduire dans un calcul ce qui est dans la figure, et qu'il est encor plus difficile de trouver des demonstrations et des constructions géometriques assez commodes lors meme que le calcul d'Algebre est tout fait. Mais cette nouvelle caracteristique suivant des figures de vue, ne peut manquer de donner en meme temps la solution et la construction et la demonstration géometrique, le tout d'une maniere naturelle et par une analyse. C'est à dire par des voyes déterminées. (Ibid., 1:384)

L'analyse géométrique de Leibniz est fondée sur une relation de congruence entre *n*-uplets de points de l'espace : deux bipoints sont congrus si leurs deux points sont à égale distance, deux triplets de points sont congrus si les triangles qu'ils forment sont superposables, etc. ce qui manque clairement à l'approche de Leibniz, c'est l'idée de direction. Ce n'est que plus de cent ans plus tard, et encore dans des travaux qui ne seront vraiment connus qu'au début du XIX°, qu'un premier pas sera franchi avec l'interprétation géométrique des quantités imaginaires. Le tableau ci-dessous résume très succinctement les grandes étapes de cette évolution ; nous renvoyons le lecteur intéressé par plus de détails aux travaux cités plus haut.

[4]. Attention à ne pas prendre ce terme dans le sens moderne. Ici, il signifie que l'analyse s'applique à la grandeur de ligne par opposition à la grandeur de nombre qui est l'objet de l'algèbre.

Date	Auteur	Œuvre	Appellation et notations adoptées
1799	WESSEL Caspar (1745-1818) Cartographe danois mathématicien amateur plus ou moins autodidacte.	*Essai sur la représentation analytique de la direction.* Inventeur de la représentation des grandeurs géométriques impliquant une direction	Ligne droite ou ligne
1806	ARGAND Jean Robert (1768-1822) (Suisse).	*Essai sur la manière de représenter les quantités imaginaires dans les constructions géométriques*	$\overline{AB}$ pour un vecteur *ligne dirigée*
1827	MÖBIUS August Ferdinand (1790-1868) (Allemand).	*Le calcul barycentrique*	AB Signe ≡ pour l'équipollence
1828	MOUREY C. V. (Français).	*La vraie théorie des quantités négatives et des quantités prétendues imaginaires*	AB Vecteur=Segment orienté= chemin
1831	GAUSS Carl Friedrich (1777-1855) (Allemand).	*Expose publiquement ses idées datant de 1811 sur la représentation géométrique des imaginaires où apparaît implicitement l'addition des vecteurs.* *Grâce à son autorité scientifique, participe efficacement à la légitimation des quantités imaginaires et à leur interprétation géométrique*	
1832–1837	BELLAVITIS Giusto (1803-1880) (Italien).	*Calcul sur les vecteurs du plan et ses applications géométriques.* *Donne les règles concernant l'addition et la soustraction géométriques des vecteurs.* *Méthode des équipollences.*	AB vecteur AB longueur du vecteur Signe = pour l'équipollence
1844	GRASSMAN Hermann Günter (1809-1877) (Allemand – Prusse).	*Die lineale Ausdehnungslehre* *Addition des vecteurs dans l'espace à n dimensions* *Définition de l'indépendance des vecteurs.* $dimV+dimW=dim(V+W)+dim(V\cap W)$ *Multiplication extérieure et multiplication intérieure.* Algébre linéaire, espace vectoriel puis la structure euclidienne : orthogonalité des vecteurs *Œuvre originale a surpassé ses prédécesseurs*	Segment 1844 : $a\times b$ exprime le produit scalaire 1862 : $[AB]$ vecteur $[u \mid v]$ pour exprimer le produit scalaire
1845	SAINT-VENANT Jean Claude Barré de (1797-1886) français	*Mémoire sur les sommes et les différences géométriques et sur leur usage pour simplifier la Mécanique*	Produit géométrique = produit scalaire
1846	HAMILTON William Rowan (1805-1865) (Anglais – Irlandais)	*Les Quaternions*	Introduit le premier le terme de « vector » Il écrit B-A, AB mais emploie de préférence la première. Abandonne les deux notations et désigne un vecteur par une seule lettre. Ta = tenseur de a = longueur du vecteur
1853	CAUCHY Augustin Louis (1789-1857) (Français).	*Rayon vecteur* $\overline{r}$ *et ses projections* $\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}$ *sur les axes. Le rayon vecteur est la somme de ses projections* $\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}$ *sont des segments mesurés par les expressions xi, yj, zk* *Grâce à sa notoriété mathématique, popularise l'utilisation des nombres complexes et leur représentation géométrique.*	Mod R = module de R

Date	Auteur	Œuvre	Appellation et notations adoptées
1858	CAYLEY Arthur (1821-1895) (Anglais).	*« Langage commode » vecteur de l'espace à n dimensions = système de nombres réels ou complexes* *Définition d'un espace vectoriel par des coordonnées.* *Mémoire sur la théorie des matrices*	
1874	LAISANT Charles-Ange (1841-1920) (Français).	*Taité et applications des équipollences* *Applications mécaniques du calcul des quaternions (thèse) 1877*	$AB \cong CD$ AB équipollent à CD «droite»=vecteur
1888	PEANO Giuseppe (1852-1932) italien	*Calculo geometrico* *Il définit axiomatiquement les espaces vectoriels et fait le lien entre la géométrie et les applications linéaires*	

Tableau chronologique sur la notion de vecteur

Chez tous les auteurs, et notamment, les premiers de ce tableau, l'idée essentielle consiste à prendre en compte la direction des grandeurs géométriques, c'est par exemple ce qu'exprime Wessel (1797) quand il dit :

> Savoir comment la direction doit être représentée analytiquement, c'est-à-dire comment on devrait exprimer les segments de droite, si on voulait, au moyen d'une équation unique entre un seul segment inconnu et d'autres donnés, trouver une expression représentant à la fois la longueur et la direction du segment inconnu. (Op. cité, 1)

Wessel fut aussi le premier à montrer comment « additionner » deux segments :

> On les combine en faisant partir l'un du point où l'autre se termine ; on joint par un nouveau segment les deux bouts de la ligne brisée ainsi obtenue ; ce nouveau segment s'appelle alors la somme des segments donnés. (Ibid., 7)

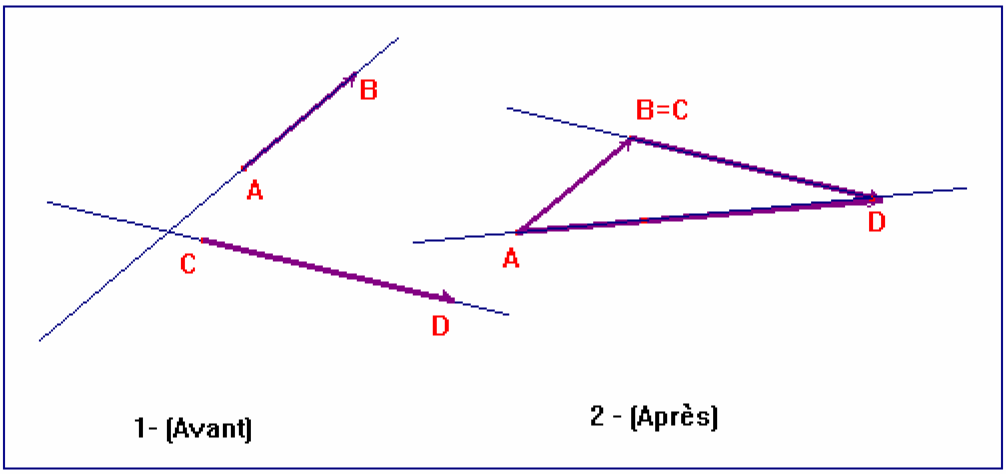


Illustration de la somme de deux segments (Flament, 2003, 121)

Mais de l'avis de Schubring (1997) de toutes les contributions celle de Mourey (dont la biographie reste inconnue) est la plus intéressante pour l'histoire du concept de vecteur :

> Mourey restreint l'opération de soustraction à la signification d'origine en arithmétique et n'accepte donc pas un sens élargi en algèbre. Pour effectuer quand même des opérations avec des quantités négatives, il propose de remplacer l'algèbre par une nouvelle branche de la géométrie, un calcul avec des segments orientés. Il lia, […] non pas algébriquement mais plutôt géométriquement, les deux aspects des grandeurs opposées : longueur et direction [et] l'exprime ainsi : « l'idée fondamentale de cette théorie est celle du chemin, considéré comme conduisant en un seul sens. » […] [Il] développe déjà quelques éléments d'un calcul vectoriel. Par exemple, il définit la somme des vecteurs : « Nous dirons que deux chemins sont de suite, si le terme de l'un est l'origine de l'autre. […]L'équation AB+BC=AC sera notre principe fondamental. (op. cité, p.5)

Wessel, Argand et Mourey ont tous trois essayé (en vain) de généraliser à la dimension trois ce qu'ils avaient mis en place pour la dimension deux, c'est-à-dire une algèbre des grandeurs géométriques de l'espace. C'est Hamilton qui le premier y arrivera en créant en 1843 les Quaternions. De façon indépendante à ce courant, qu'il ignorait, Grassmann ira plus loin en créant, dans un langage touffu et parfois confus, une théorie (*Die Lineale Ausdehnungslehre*, 1844), qui préfigure l'algèbre linéaire (et même multilinéaire) la plus générale.

Sir William Rowan Hamilton, directeur de l'Observatoire de Dublin, mathématicien physicien de renom invente en 1843, après plusieurs années d'intense recherches, les *Quaternions*, généralisant ainsi à la dimension 3 les quantités imaginaires. Les quaternions ont donc bien été créés pour être l'extension à l'espace de ce que les nombres complexes sont à la géométrie plane. Ce sont des nombres de la forme $w+ix+jy+kz$ où w, x, y et z sont des nombres réels et i, j et k des « quantités » qui obéissent aux lois : $ij=k$ $jk=i$ $ki=j$ $ji=-k$ $kj=-i$ $ik=-j$ $ii=jj=kk=-1$, les calculs sur les quaternions se font ensuite selon le principe dit de permanence, façon d'exprimer à l'époque que les nouveaux nombres avaient une structure d'algèbre, dont la particularité est de ne pas être commutative. Hamilton explique que contrairement à ce qui se passe pour la partie réelle des nombres complexes, le w de l'expression $w+ix+jy+kz$ n'indique pas une « distance sur un axe » et l'appelle la partie *scalaire* d'un quaternion. Par ailleurs, il introduit pour la première fois en mathématiques le mot *vector*[5] pour désigner $ix+jy+kz$ et le représente par une flèche joignant deux points. Auparavant, le mot *Vecteur* était utilisé par les astronomes sous forme d'adjectif dans les expressions *tourbillon vecteur* pour désigner le mouvement d'une planète et *rayon vecteur* pour joindre le foyer à une position sur l'orbite. L'emploi du second se généralise en géométrie et apparaît pour la première fois dans

[5] Etymologiquement le mot *vector* vient du latin *vehere, signifiant transporter,* qui fait penser au véhicule à l'aide duquel on passe d'un point à un autre.

des programmes de mathématiques du secondaire en 1852 (pour la classe de première) mais ce concept est très éloigné de l'usage qu'en fait Hamilton, très proche de la notion moderne de vecteur.

> The algebraically real part may receive…all values contained on the one scale of progression of number from negative to positive infinity ; we shall call it therefore the saclar part, or simply the saclar of the quaternion, and shall fom its symbol by prefixing, to the symbol of the quaternion, the characteristic Scal., or simply S., where no confusion seems likely to arise from using this last abbreviation. On the other hand, the algebraically imaginary part, being geometrically constructed by a straight line or radius vector, which has, in general, for each determined quaternion, a determined length and determined direction in space, may be called the vector part, or simply the vector of quaternion; and may be denoted by prefixing the characteristic Vect., or V. We may therefore say that a quaternion is in general the sum of its own scalar and vector parts, and may write Q = Scal.Q + Vect.Q = S.Q + V.Q or simply Q = SQ + VQ. (Cité par Pressiat, 1999, 48-49)

Hamilton illustre l'emploi des symboles V et S dans le cas particulier des quaternions dont la partie scalaire est nulle :

Si $\alpha = ix + jy + kz$ et $\alpha' = x'i + y'j + z'k$,

$S\alpha\alpha' = -(xx' + yy' + zz')$ et $V\alpha\alpha' = i(xy' - x'y) + j(zx' - xz') + k(xy' - x'y)$.

Avec les notations modernes du calcul vectoriel - $S\alpha\alpha'$ représente le produit scalaire et $V\alpha\alpha'$ le produit vectoriel.

En 1846 et 1847, Hamilton introduit la nouvelle opération $\nabla = i\frac{d}{dx} + j\frac{d}{dy} + k\frac{d}{dz}$

Dont le carré symbolique vérifie la formule : $\nabla^{é} = \left(\frac{d}{dx}\right)^2 + \left(\frac{d}{dy}\right)^2 + \left(\frac{d}{dz}\right)^2$, formule dont l'importance en physique est considérable.

Nous verrons plus loin que la théorie des quaternions a joué un rôle important dans la physique de la fin du XIX°, en particulier dans la simplification des notations en électromagnétisme. Du point de vue mathématique, la contribution de Hamilton apporte surtout un jour nouveau aux recherches naissantes sur ce qui va devenir les structures algébriques et l'algèbre moderne.

Hermann Günther Grassmann est philologue de formation, il est reconnu comme un des pères de la linguistique moderne, par ses recherches sur les origines des langues indo-européennes. C'est un mathématicien physicien autodidactique, qui sera toute sa vie professeur généraliste de lycée dans la Prusse du XIX°, à qui l'on refusera à plusieurs reprises un poste universitaire. Cependant la portée et l'importance de son œuvre, bien que tardivement reconnue sont immenses :

> Dans un style qui lui reste très personnel, Grassmann a non seulement anticipé tous les grands concepts du calcul vectoriel, mais ses travaux sont aussi très proches d'une théorie des espaces vectoriels tels qu'on les envisage aujourd'hui. (Dorier 1990, 57)

Son premier travail mathématique, qui date de 1840, intitulé « Théorie du flux et du reflux » n'a été publié qu'en 1911. Il en explique l'origine dans la préface de son ouvrage fondamental, l'*Ausdehnungslehre* (1844) :

> La considération du négatif en géométrie m'avait donné la première impulsion ; je m'habituais à voir dans les segments AB et BA des grandeurs opposées, d'où. résultait que si A, B et C sont des points d'une ligne droite, AB + BC = AC, est également toujours vrai et quand AB et BC sont désignés pareillement, et quand ils sont opposés, c'est-à-dire quand C est placé entre A et B. Dans ce dernier cas, AB et BC n'étaient pas vus seulement comme de simples longueurs, mais il y était fixé en même temps la direction au moyen de laquelle justement ils étaient opposés. S'imposait ainsi la distinction entre la somme des longueurs et la somme de tels segments où était en même temps fixée la direction. D'où résultait l'exigence de fixer ce dernier concept de somme non seulement pour le cas où les segments sont dirigés dans la même sens ou dans le sens opposé, mais aussi pour tous les autres cas. Cela se pouvait faire de la façon la plus simple en maintenant encore la loi AB + BC = AC, même quand A, B, C n'étaient pas sur une ligne droite. - Ainsi fut fait le premier pas vers une analyse qui menait par la suite vers la nouvelle branche de la mathématique que voici. Mais je n'avais aucune idée de la richesse et du caractère fructueux du domaine auquel j'étais parvenu ; au contraire ce résultat ne me semblait pas très remarquable jusqu'au moment où je l'ai combiné avec une idée connexe.
>
> En suivant le concept de produit en géométrie, tel qu'il fut conçu par mon père6, je trouvai que non seulement le rectangle mais somme toute aussi le parallélogramme est à considérer comme le produit de deux côtés contigus, quand on prenait en effet, là encore, non pas le produit des longueurs, mais celui des deux segments en tenant compte de leurs directions. En combinant alors ce concept de produit avec celui de somme exposé précédemment, j'obtins l'harmonie la plus frappante (op. cité, préface, i, d'après la traduction de Flament, 1994)

Avec cette nouvelle présentation, Grassmann accomplit un saut conceptuel décisif en passant du registre graphique du « parallélogramme des forces » à un registre purement algébrique.

> Cette loi est la traduction algébrique du parallélogramme des forces, connu depuis l'antiquité. Cependant entre un moyen graphique de représenter la résultante de deux forces et une interprétation algébrique de l'addition de deux vecteurs, le saut conceptuel est énorme. Il ne faut donc pas s'étonner de la nouveauté de l'addition vectorielle en ce milieu du 19e siècle (Dorier 1996, p. 36)

Malgré sa profondeur scientifique l'œuvre de Grassmann passa presque inaperçue pendant des décennies, contrairement à celle de Hamilton. Il semble que hormis son statut de non universitaire, son œuvre en rebutait plus d'un, par le fait de sa complexité philosophique.

[6] Voir : la "Raumlehre", 2e partie, p.194 de Justus Grassmann, et sa "Trigonometire", p.10. (c'est une note de Grassmann).

Cette barrière philosophique contribua fortement à éloigner les mathématiciens de son œuvre. Voici ce qu'en dit Mobius dans une correspondance à Grassmann :

> « Je réponds que j'ai été sincèrement heureux de voir en vous un esprit proche, mais notre familiarité touche seulement aux mathématiques, pas à la philosophie. Comme je me souviens vous l'avoir dit en personne, je suis étranger au domaine de la spéculation philosophique. Je ne suis pas préparé pour apprécier d'une façon adaptée l'élément philosophique dans votre excellent travail, qui repose à la base d'éléments mathématiques, ni même à le comprendre correctement. Je me suis suffisamment rendu compte de cela lors des nombreuses tentatives d'étude ininterrompue que j'ai faites de votre travail ; à chaque fois j'ai été arrêté par la grande généralité philosophique. » (Grassmann 1894-1911, 3 :100)

Un philosophe du nom de Ernst Friedrich Apelt (1912-1859) dira à ce propos dans une correspondance à Mobius :

> Il me semble qu'une philosophie erronée des mathématiques est à la base du travail de Grassmann. Le caractère essentiel du savoir mathématique, son aspect intuitif paraît avoir été chassé de l'ouvrage. Une théorie de l'extension aussi abstraite comme il l'envisage peut seulement être développée à partir des concepts. Mais la source de la connaissance mathématique repose non sur des concepts mais sur l'intuition. (Grassmann 1894-1911, 3 :101)

L'accueil très mitigé des travaux de Grassmann peut trouver une explication dans les conceptions philosophiques dominantes qui étaient fortement marquées par le caractère a priori des connaissances mathématiques inspiré de la philosophie kantienne. *La scène contemporaine était dominée par le point de vue kantien sur le caractère indispensable de l'intuition dans les mathématiques.* Nagel (1939)

Malgré le succès très limité de son œuvre, Grassmann reste confiant quant à l'avenir prometteur de ses théories dans l'architecture mathématique :

> Je reste confiant dans l'idée que le travail que j'ai développé dans la science que je présente ici et qui a demandé une partie significative de ma vie ainsi que la plus acharnée mise en œuvre de mes capacités, ne sera pas perdu. Il est vrai que je suis conscient que la forme que j'ai donnée à cette science est imparfaite et doit être améliorée. Mais je sais et je me sens obligé de dire (même si je cours le risque de paraître arrogant) que même si ce travail devait de nouveau rester inutilisé pendant 17 années encore ou même plus longtemps sans entrer dans le développement véritable de la science, le temps viendra où il sera tiré de la poussière de l'oubli, et où des idées aujourd'hui dormantes porteront leurs fruits. Je sais que je n'ai pas non plus réussi à réunir autour de moi dans un statut que j'ai jusqu'ici désiré en vain, un groupe d'étudiants à qui j'aurai pu profiter de ces idées et que j'aurais pu encourager à les développer et les enrichir ; néanmoins, un temps viendra où ces idées, peut être sous une nouvelle forme, émergeront à nouveau et entreront en communication vivante avec les développements contemporains. (Cité par Pressiat, 1999, 74)

De fait l'influence de Grassmann restera très limitée dans un premier temps, mais ses travaux finissent par diffuser un peu, surtout dans le monde des physiciens. Dans la seconde moitié du XIX°, le vecteur va peu à peu s'implanter en électromagnétisme, d'abord avec les quaternions puis sous une forme plus proche des idées de Grassmann.

Ainsi en 1882, Tait (le disciple le plus convaincu de Hamilton), met en valeur les liens entre la théorie des quaternions et la physique et contribue fortement à la popularisation de la théorie des quaternions.

Toutefois, notons que ce sont en définitive les physico-mathématiciens Gibbs (1884) et Heaviside (1893), s'inspirant des travaux de leurs prédécesseurs, qui vont conduire aux vecteurs tels qu'on les conçoit actuellement, en découvrant l'utilité d'isoler la partie vectorielle des quaternions. Ces derniers étant présentés comme inutiles dans la pratique, le système vectoriel élaboré par Gibbs et Heaviside se propage et trouve écho chez les scientifiques.

> L'un des premiers grands ouvrages d'enseignement d'analyse vectorielle est dû à Gibbs (1901) qui y définit ainsi ce qu'est un vecteur: « the typical vector is the displacement of translation in space », avant d'exposer le produit scalaire, le produit mixte et le produit vectoriel pratiquement sous leur forme actuelle. Cette définition du vecteur symbolise et résume à elle seule l'essentiel de l'articulation entre mathématiques et physique (mécanique) ; le mouvement se trouvant en effet explicitement présent dans une proposition fondamentale de mathématiques. (Lounis 1989, 139).

Par cet ouvrage d'analyse vectorielle, Gibbs, a été l'un des premiers à contribuer ainsi à une transposition didactique de ce savoir hérité de Hamilton et de Grassmann.

> Dans ce but, il a contribué à dépersonnaliser des édifices théoriques qui contenaient des contraintes propres à leurs constructeurs respectifs, contraintes qui sont souvent d'ordre philosophique aussi bien chez Hamilton que chez Grassmann. Gibbs (comme Heaviside) n'assume plus ces contraintes, mais en imposent d'autres, parmi lesquelles figure en bonne place la nécessité de communiquer avec des étudiants ou des lecteurs. Grassmann est lui aussi conscient que cette absence d'interlocuteurs, d'étudiants, de spécialistes avec qui échanger lui a porté préjudice. Nous trouvons là une confirmation du rôle du didactique au cœur même du cognitif, souligné par Yves Chevallard. » (Pressiat 1999, 113)

Cette brève esquisse historique montre que les origines du vecteur ne sont ni purement géométriques, ni liées aux domaines de la physique où les étudiants rencontrent les premières grandeurs physiques vectorielles.

Cependant, comme le souligne Georges Bouligand (1944), c'est à l'électromagnétisme qu'il appartient d'avoir mis l'élément vecteur au premier plan des préoccupations mathématiques au profit de la théorie abstraite des espaces vectoriels. De plus, comme le souligne Dorier :

> […] la nature du vecteur géométrique […] est l'aboutissement nécessaire d'une mise en rapport dialectique de la structuration algébrique et de l'intuition géométrique. Nous devons souligner ici que l'usage du terme « structuration algébrique » ne doit pas faire croire que le calcul vectoriel est par essence l'émergence de la théorie des espaces vectoriels en géométrie. En effet, il ne faut pas ici se laisser abuser par la similitude du vocabulaire. La théorie des espaces vectoriels est de nature axiomatique, les vecteurs algébriques ne sont pas construits, ils existent a priori et ne sont définis que par leurs propriétés structurelles. Le calcul vectoriel relève quant à lui d'une modélisation dynamique, l'objet se crée dans la combinaison algébrique en interaction avec l'intuition géométrique. De plus, le rôle de la multiplication a été fondamental dans la genèse du vecteur géométrique, alors que la structure linéaire ne comporte pas de produit. (Dorier 1997, p. 76-77)

C'est donc que des modifications importantes ont été apportées par les transpositions successives de ces deux notions dans les enseignements des mathématiques et de la physique (aux frontières d'ailleurs mouvantes puisque la mécanique et la cinématique, deux lieux où les grandeurs physiques vectorielles sont importantes, ont longtemps fait partie des mathématiques). C'est ce que nous allons étudier à présent, en analysant en termes de niches et d'habitat l'évolution de ces notions dans les enseignements de mathématiques puis de physique de 1852 à nos jours (voir aussi Ba et Dorier 2006).

II.3 Analyse de l'évolution de l'enseignement du vecteur dans les programmes de maths

II.3.1 Les débuts (1852 – 1925)

II.3.1.1 1852 – Une première référence au mot vecteur

Comme nous l'avons dit plus haut, les astronomes avaient pour habitude de parler de *tourbillon vecteur* pour désigner le mouvement d'une planète et de *rayon vecteur* pour désigner le segment qui joint le foyer de la conique décrivant la trajectoire de la planète à une position sur l'orbite. L'emploi du terme *rayon vecteur* s'est ensuite généralisé en géométrie, mais n'a finalement rien à voir avec le vecteur tel qu'on l'entend actuellement. C'est pourtant dans cette expression qu'il apparaît pour la première fois dans des programmes de mathématiques du secondaire en 1852 (pour la classe de première), suite à la réforme dite de la « bifurcation ».

C'est une réforme à visée exclusivement utilitaire comme le rappellent Gispert et Hulin (2000) :

> Avec cette réforme, un double but est poursuivi : réserver aux sciences une place plus importante (compte tenu de leur développement), mais aussi constituer un enseignement plus approprié aux besoins de la société productive. L'enseignement est alors marqué par une conception utilitaire et tournée vers les applications. Jean-Baptiste Dumas, l'un des protagonistes de la réforme, explique qu'il convient de « réduire la géométrie aux propositions vraiment usuelles, l'algèbre à ce qu'il faut pour étudier les éléments de physique et de mécanique ». (Op. cité, p.1)

Dans l'esprit de cette réforme, les mathématiques sont avant tout vues comme une discipline au service des autres. Mais, le vecteur concept encore en cours de constitution dans le savoir savant n'a pas encore acquis ses lettres de noblesse et ne figure ainsi pas dans les mathématiques, ni dans la physique, enseignées.

C'est la même année, en 1852, qu'apparaît en mécanique la composition des forces, des vitesses et des mouvements, avec une allusion au parallélogramme des forces et à la composition des forces concourantes ou parallèles. Mais le lien avec la notion de vecteur n'était pas encore fait.

II.3.1.2 La réforme de 1902 : apparition du vecteur en géométrie

À l'orée du XX[e] siècle, les conceptions épistémologiques sur l'enseignement des sciences change. En 1902, une réforme inspirée par des enseignants du supérieur (comité présidé par Darboux pour les mathématiques), donne une nouvelle vision de l'enseignement des sciences. Cette réforme opérée dans l'enseignement secondaire vise à faire des sciences des humanités au même rang que les humanités classiques. Elles doivent contribuer à former l'homme et le citoyen.

> L'accroissement notable de la place accordée aux sciences, et en particulier à la physique, s'accompagne d'un discours sur l'apport spécifique des diverses disciplines tout en soulignant l'unité de la science. (Gispert et Hulin 2000, p. 2).

Lors de cette réforme, le terme rayon vecteur disparaît des programmes laissant la place à la notion de vecteur défini comme segment orienté. Jusque-là confinée dans le monde savant, la notion de vecteur va commencer à pénétrer dans les programmes de première en mécanique et en cinématique. Les points abordés sont : les projections, la somme et la différence de vecteurs concourants, le théorème des projections, le moment linéaire. En statique et dynamique, on parle de travail des forces (produit scalaire). Le vecteur entre donc dans l'enseignement secondaire par l'habitat paraphysique et trouve une niche dans la représentation de grandeurs physiques. C'est une réforme qui consacre la place des mathématiques dans la connaissance de la nature. Lors de cette réforme majeure de 1902, les concepteurs des programmes accordent une importance accrue à la collaboration entre les professeurs des deux disciplines. D'ailleurs, l'intérêt de cette collaboration est souligné par une circulaire de 1909 :

> Il serait bon [..] que les professeurs de mathématiques et les professeurs de physique d'un même établissement se prêtassent un mutuel appui. Le professeur de physique doit, à chaque instant, savoir à quel degré d'avancement se trouve l'éducation mathématique de ses élèves et réciproquement, le professeur de mathématiques a tout intérêt à ne pas ignorer quels exemples il peut choisir, dans les connaissances expérimentales déjà acquises, pour illustrer les théories qu'il a expliquées d'une façon abstraite. (cité par Gispert et Hulin 2000, p. 3).

La surcharge des programmes est dénoncée par les enseignants qui demandent et obtiennent des allégements en 1905. Ainsi, les vecteurs passent de la première à la Terminale dans l'habitat de la géométrie pour se constituer en outils pour la physique (ce qui constitue leur niche).

> En mécanique, […] le professeur devra éviter tous les développements et les exercices présentant uniquement un intérêt géométrique ; c'est pour supprimer toute occasion de développements de ce

> genre que les théorèmes se rapportant aux vecteurs ont été réduits au minimum indispensable et transportés dans le programme de géométrie, où ils se présentent sous leur véritable jour. (Instruction du 27 juillet 1905 relative à l'enseignement des mathématiques, p. 676)

Les vecteurs se retrouvent donc « basculés » de l'habitat de la mécanique à celui de la géométrie, en réponse à un problème purement didactique. Ils ne changent cependant pas vraiment de niche, encore que l'expression, « ils se présentent sous leur véritable jour », laisse présager une géométrisation de l'objet, qui va peu à peu changer de fonction, dans un contexte avant tout didactique.

II.3.1.3 1925 – Un nouvel habitat potentiel

En 1925, sans être explicitement au programme, les vecteurs apparaissent au niveau de la classe de troisième, pour la représentation des nombres relatifs comme « notions concrètes sur les nombres positifs et négatifs » en arithmétique :

> La définition des nombres positifs et négatifs, au moyen des grandeurs mesurables susceptibles de sens, n'offre pas de difficultés spéciales. Leur correspondance avec des vecteurs portés par un axe n'en présente guère plus […] l'appel à la représentation des nombres algébriques sur un axe donne une solution tout à fait satisfaisante de ces difficultés, du point de vue théorique tout au moins. (Instructions pour les programmes de 1925)

On voit ainsi que l'habitat potentiel des vecteurs en classe de troisième est l'arithmétique et la représentation des grandeurs mesurables susceptibles de sens leur tient lieu de niche. C'est un fait tout à fait nouveau.

Pour la terminale, les vecteurs apparaissent à présent en trigonométrie, avec un contenu quasiment inchangé « Théorie des projections. Somme géométrique des vecteurs. Formule d'addition pour le sinus, le cosinus et la tangente.» L'intervention des vecteurs en cinématique est plus précise : le vecteur vitesse est clairement nommé, les vitesses moyenne et à un instant donné sont définies comme des vecteurs. Le vecteur accélération est évoqué dans le cas particulier du mouvement circulaire. Pour les forces appliquées à un corps solide, le centre de gravité est introduit en liaison avec le centre des forces parallèles. Les vecteurs ont donc trouvé une légitimité à l'intérieur même des mathématiques, et s'y nichent comme outils pour établir les formules de trigonométrie. Cette introduction des vecteurs dans un titre de trigonométrie est jugée bénéfique par les instructions relatives à l'enseignement de la statique : *En statique, la confusion qui se produisait si souvent, entre les propriétés des systèmes de forces et celles des systèmes de vecteurs associés, disparaîtra avec l'étude générale de ces derniers.*

Ainsi le statut géométrique des vecteurs se renforce et leur niche dans cet habitat se consolide dans le rapport à la trigonométrie.

II.3.2 Une évolution lente (1937-1967)

II.3.2.1 1937-38 – L'habitat arithmétique se concrétise

En 1937-38, en classe de quatrième, en algèbre et arithmétique, les vecteurs sur un axe sont introduits avec la question de l'orientation et du repérage sur l'axe réel et la relation de Chasles. La projection de vecteurs de même direction sur un autre axe apparaît comme une illustration de la multiplication des nombres relatifs. Il s'agit toujours de vecteurs liés (segments orientés) de même direction avec la notation $\overrightarrow{AB}$.

Figurent aux programmes :

- Les notions de droites orientées ou axes, de vecteur unitaire, de direction orientée,
- De mesure algébrique d'un vecteur sur un axe ou parallèle à une direction donnée (notée $\overline{AB}$, la relation de Chasles étant traitée),
- De somme géométrique de deux vecteurs de même direction, de somme algébrique de leurs mesures,
- De repérage sur une droite : abscisse d'un point sur une droite orientée comportant un point origine, changement d'origine,
- Mesure d'un vecteur vue comme accroissement de l'abscisse de l'origine à l'extrémité, abscisse du milieu du segment,
- Interprétation géométrique des inégalités, position d'un point par rapport à un segment.

On peut noter aussi que l'homothétie est introduite à partir de segments interceptés sur deux parallèles par des sécantes concourantes. La définition de l'homothétique d'un point est donnée à l'aide de mesures algébriques. Ce sont donc réellement les mesures algébriques qui sont en jeu, plus que les vecteurs.

Le contenu sur les vecteurs en trigonométrie apparaît à présent au niveau de la première.

Les habitats et les niches n'ont pas changé, sauf que l'habitat algébrique se renforce tout en montrant qu'il reste limité à la dimension 1 et que l'habitat trigonométrique est descendu d'un niveau. Dans l'habitat algébrique, c'est la multiplication par un scalaire qui est importante.

Mais c'est seulement en 1942, que les entités vectorielles commencent à investir le champ de l'enseignement secondaire de la physique avec la représentation vectorielle d'une force en seconde. Cependant, l'articulation entre les concepts de vecteur et de grandeur physique vectorielle n'y est pas explicitée, mais on commence déjà à relever des difficultés des élèves à propos des grandeurs vectorielles.

II.3.2.2 1947 – Un pont entre les deux habitats

En 1947, pas de changements majeurs. Tout d'abord, en seconde, en algèbre, apparaît une révision du programme de quatrième et un prolongement au repérage dans le plan et en géométrie : « Rapport de deux vecteurs parallèles, point divisant un segment dans un rapport donné, théorème de Thalès. » L'homothétie plane est introduite, en vue de donner les figures homothétiques d'une droite et d'un cercle, propriétés qui seront réinvesties dans l'étude du périmètre du cercle. L'emploi des vecteurs à son sujet n'est pas imposé.

En première, le vecteur sort de la trigonométrie et revient en géométrie, avec pour la première fois les termes de « vecteurs équipollents » qui servent à définir la translation, et de « rapport de deux vecteurs parallèles » qui sert à introduire vectoriellement l'homothétie, somme et différence vectorielle, projections et mesure algébrique, dans un plan orienté, angles orientés de vecteurs ou de droites. On retrouve une allusion aux vecteurs dans la partie trigonométrie : la somme géométrique des vecteurs est introduite pour faciliter l'établissement des formules donnant le cosinus ou le sinus de la différence ou de la somme de deux arcs. L'utilisation du vecteur en cinématique s'amplifie avec l'introduction des notions de vecteur vitesse et de vecteur accélération que l'on retrouve en mathématiques en terminale scientifique.

On voit donc que les mêmes habitats et niches demeurent par rapport à la période précédente. Sauf que la trigonométrie disparaît comme habitat de référence au profit d'un élargissement dans la géométrie.

Mais surtout un pont est fait entre les deux habitats jusqu'alors disjoints de l'algèbre et de la géométrie, par le théorème de Thalès qui associe géométrie et mesure algébrique. Ainsi le vecteur géométrique s'algébrise, la multiplication par un scalaire prend de l'importance, et l'équipollence qui apparaît pour la première fois devient nécessaire pour une bonne définition des opérations.

II.3.2.3 1957 – Statu quo

De 1957 à 1967, on retrouve le vecteur en physique en classe de première à propos d'électromagnétisme : il y est défini comme un segment de droite orienté, ayant une origine et une extrémité ; son traitement est le plus souvent, sinon exclusivement, analytique. Un usage des vecteurs est fait aussi en cinématique qui reste un domaine d'étude en mathématiques en classe de première C, avec les notions de vecteur vitesse et de vecteur accélération dans l'étude des mouvements rectilignes et des mouvements circulaires uniformes. Dans ce contexte, tous les calculs, portent sur les coordonnées cartésiennes qui sont fonctions du temps. En seconde, les vecteurs apparaissent en géométrie, on y reprend les segments orientés vus en troisième. Ceci comprend l'équipollence, l'addition et ses propriétés, les projections et leur effet sur la somme et la différence de vecteurs, la multiplication d'un vecteur par un nombre ; de plus, les translations et homothéties sont définies par des vecteurs.

C'est en première, que la distinction entre vecteurs liés équipollents et vecteur libre[7] est faite. Les applications des vecteurs à la géométrie et à la cinématique prennent de plus en plus d'importance : pour la première fois on aborde le barycentre de deux points et le produit scalaire de deux vecteurs avec ses propriétés. C'est à ce niveau aussi, qu'on note un intérêt grandissant pour l'utilisation des vecteurs en géométrie analytique qui en est un passage obligé.

On peut donc dire que, dans cette période, les habitats et niches restent inchangés alors que l'outil vectoriel s'impose de plus en plus.

II.3.3 Période des mathématiques modernes (1968-1985)

II.3.3.1 La réforme

Face à la nécessité et à l'urgence de rénover l'enseignement secondaire et particulièrement celui de la géométrie, on assiste à partir des années 1970 à une réforme en profondeur des contenus d'enseignement sous l'influence du mouvement dit des mathématiques modernes. Cette réforme est mise en œuvre et soutenue de manière radicale par des universitaires dont l'une des figures de proue est Jean Dieudonné, qui, en 1964, dans un ouvrage intitulé « Algèbre linéaire et géométrie élémentaire », défend fortement sa vision de la réforme concernant l'enseignement de la géométrie, avec souvent un ton polémique.

> Ce volume donne un exposé détaillé et complet des notions et théorèmes d'algèbre linéaire élémentaires qui devraient constituer le bagage minimum du bachelier ès sciences au moment où il entre dans les classes du 1^{er} cycle de l'enseignement supérieur. L'orientation générale et la substance en ont été déterminées par le souci de préparer l'étudiant à assimiler le plus facilement possible

[7] Ce vocabulaire qui permet de distinguer le segment orienté de la classe d'équipollence a disparu avec les mathématiques modernes. Les termes de *libre* et *lié* n'ont rien à voir ici avec les notions de famille libre ou liée de l'algèbre linéaire.

> l'enseignement actuel donné dans ces classes, qui devrait lui apparaître comme le prolongement naturel de ce qu'il a déjà appris. Le fait qu'à l'heure présente, il n'y a sans doute pas un bachelier sur mille qui serait en état de lire ce livre sans aide et sans fournir un travail personnel considérable en dit long sur l'incohérence de nos programmes d'enseignement. (Op. cité, p. 7).

De cet argumentaire, Dieudonné déduit qu'il ne faut enseigner dans le secondaire que ce qui prépare au supérieur (sans élitisme !). Ainsi, il faut préparer les élèves à l'algèbre linéaire qui unifie la géométrie synthétique et la géométrie analytique, riche en applications les plus variées et qui est la base de la plupart des notions enseignées en propédeutique (premières années d'université).

> Il me semble qu'il y a intérêt à familiariser le débutant le plus tôt possible avec les notions essentielles de cette discipline, à lui apprendre à « penser linéairement », ce qui est d'autant plus facile qu'il y a peu de notions, en mathématiques, qui soient plus simples à définir que celles d'espace vectoriel et d'application linéaire. A notre époque de prolifération intense dans toutes les sciences, tout ce qui condense et tend à l'unification a une vertu qu'on ne saurait surestimer. […] D'autre part, j'ai cherché à résister à la tentation d'introduire prématurément les théories qui seront enseignées à l'Université. Il me semble que la nature nous a heureusement fourni « une ligne de démarcation » toute tracée, en nous douant de l'intuition géométrique pour les espaces à 2 et 3 dimensions ; il est donc possible de représenter graphiquement tous les phénomènes de l'Algèbre linéaire limités à ces deux dimensions (et bien entendu aux scalaires réels). (Op. cité, p. 12-14).

On voit bien que Dieudonné se soucie beaucoup plus de la nature unificatrice de l'Algèbre linéaire permettant ainsi de présenter la géométrie élémentaire avec toute la rigueur mathématique qui lui sied. Pour lui, l'intérêt de la géométrie dans l'enseignement secondaire tient en ce qu'elle représente un :

> […] merveilleux laboratoire où se familiariser avec des cas particuliers d'aspect fort simple et susceptibles d'images concrètes, de notions dont l'essence est beaucoup plus générale mais aussi beaucoup plus abstraite, et qu'il faudra assimiler sous cette forme générale plus tard ; il serait vraiment dommage de ne pas profiter au maximum de cette heureuse circonstance. (Ibid., p. 14)

En revanche, Gustave Choquet (1964), qui a aussi joué un rôle dans cette réforme, tout en étant en retrait voire opposé aux Bourbaki, conçoit l'enseignement de la géométrie pour les jeunes enfants non pas comme un enseignement déductif mais plutôt basé sur l'observation et ayant pour but l'élaboration des concepts fondamentaux à partir de l'expérience. Il pense que la « voie Royale » qui modélise l'espace géométrique comme un espace affine euclidien de dimension 3 n'est pas accessible directement à des élèves de moins de 17 ans, et propose une axiomatique intermédiaire.

Choquet prône :

> […] l'utilisation d'une axiomatique simple aux axiomes forts, c'est-à-dire donnant très vite accès à des théorèmes non évidents, et intuitifs, c'est-à-dire traduisant les propriétés de l'espace qui nous entoure faciles à vérifier.(Op. cité, p. 10).

Delachet (1967) reprend les points de vue développés dans ces deux ouvrages en les complétant:

> L'ouvrage de Dieudonné utilise directement les notions d'espace vectoriel et de produit scalaire bien qu'il permette d'aller plus vite beaucoup plus loin, il nous paraît laisser un vide entre l'utilisation de la méthode expérimentale, la seule que l'on puisse employer avec des jeunes enfants et une initiation de la méthode axiomatique, qui nous semble bien adaptée aux élèves du second cycle de nos lycées. (Op. cité, p. 7).

La position de Dieudonné, qui a dominé la réforme des mathématiques modernes, est un modèle idéologique du haut vers le bas : plaquer le modèle de l'espace euclidien normé pour l'introduction du vecteur au collège dans la perspective de l'enseignement de l'algèbre linéaire, et même plus loin de l'analyse fonctionnelle.

Dans ce contexte, le vecteur est introduit dès la classe de quatrième comme classe d'équivalence de bipoints équipollents. L'étude des propriétés algébriques doit faire apparaître, sans le dire, la structure d'espace vectoriel sous-jacente à l'espace géométrique (en commençant par la droite, puis le plan). Dans ce but, les résultats élémentaires de la théorie des espaces vectoriels de dimension finie sont introduits dans les programmes du lycée dès la classe de seconde en 1969. En classe de première C, les vecteurs interviennent en géométrie vectorielle, mais le sens de ce mot s'élargit avec la nouvelle structuration du savoir mathématique :

> […] ce mot a recouvert longtemps une certaine description du monde physique, une énumération (parfois incomplètement explicitée) de propriétés que des raisons expérimentales lui faisaient attribuer, enfin - et c'est l'essentiel – l'étude des propriétés qui pouvaient être déduites des précédentes par un raisonnement logique. Il désigne dorénavant une construction mathématique, logique par nature, s'appuyant sur un système cohérent d'axiomes où interviennent au premier chef les structures algébriques (espaces vectoriels, groupes…) et topologiques (**R**, $\mathbf{R}^n$ …). (Pressiat 1999, p. 204)

Dans cette organisation verticale, la géométrie devient une propédeutique à l'algèbre linéaire et le vecteur géométrique devient le prototype quasiment exclusif des espaces vectoriels. C'est une solution technique au problème idéologique de l'apprentissage de l'abstrait à partir du concret, qui impose une certaine stratégie d'exposition.

> En effet, la nature du vecteur géométrique ne se résume pas à ses seules propriétés linéaires (parce qu'elles ne rendent compte ni de sa nature géométrique ni de l'aspect constitutif de la dialectique entre

> algébrique et géométrique, ni de l'importance de la multiplication vectorielle[8] dans la genèse du vecteur). C'est pourquoi l'introduction des axiomes d'espace vectoriel par leur vérification sur les vecteurs géométriques a pour intérêt essentiel de montrer que de tels ensembles abstraits existent à un niveau plus « familier ». Le choix du vecteur géométrique se justifie alors comme illustration, à condition d'être très explicite sur la fonction de cette illustration. (DORIER, 2000, p. 53)

Autrement dit, on assiste alors à une véritable linéarisation de la géométrie. Un des effets de ce choix est que des notions comme les sous-espace vectoriels, les vecteurs linéairement dépendants ou indépendants et les bases constituent le fondement de cette nouvelle géométrie vectorielle. Elle va servir de point d'appui pour introduire la cinématique du point, avec entre autres, les notions de vecteur vitesse et de vecteur accélération en classe de terminale C.

Dans cette nouvelle organisation mathématique, les vecteurs vont occuper une nouvelle niche. Ainsi ils ont pour fonction de préparer les élèves à l'enseignement de l'algèbre linéaire, ils en seront le ferment et l'exemple central. Cette vision descendante de l'organisation mathématique, caractéristique des mathématiques modernes, va conditionner et modeler l'organisation mathématique autour des vecteurs au collège.

En résumé, on voit que, pendant cette période, l'habitat « naturel » du vecteur est la géométrie et sa niche est de servir de fondement à la géométrie, mais surtout de préparer à l'algèbre linéaire.

On remarque alors une filiation directe mais lointaine avec les espaces de Hilbert enseignés quelques 5 ou 6 ans plus tard, et encore uniquement à une élite !

II.3.3.2 Critique de la réforme

La première critique qui touche à toute la partie sur la réforme de l'enseignement de la géométrie dénonce l'absence d'interaction avec l'intuition géométrique dans l'étude du calcul vectoriel. C'est ce que souligne Choquet en 1973 :

> Je suis effaré par ce que je constate dans l'enseignement à l'école primaire et dans le premier cycle du secondaire. Certes j'ai été l'un des promoteurs de la réforme de l'enseignement mathématique, mais ce que je préconisais était simplement un élagage de quelques branches mortes et encombrantes, et l'introduction d'un peu d'Algèbre […] mais il y a eu toute une atmosphère nocive qui a accompagné leur mise au point : en particulier une attaque contre la géométrie et contre le recours à l'intuition ; on a dit aux enseignants qu'ils étaient minables s'ils étudiaient les triangles que l'Algèbre linéaire remplaçait toute l'ancienne géométrie […] (Op. cité, p.889)

Ainsi, dès 1985, les programmes des lycées changent, en réaction aux choix bourbakistes. S'entame alors la période que l'on qualifiera de contre-réforme des mathématiques modernes.

[8] Que ce soit le produit scalaire ou le produit vectoriel.

L'algèbre linéaire disparaît entièrement des programmes du secondaire. Commencée avec les programmes de la seconde indifférenciée de 1981, cette disparition atteint toutes les classes des lycées avec les programmes de 1985.

Les raisons de cette remise en cause des programmes des mathématiques modernes ont été en particulier soulignées par le rapport de la commission Kahane (2000) :

> […] ce projet (tout linéaire), s'il pouvait sembler cohérent du point de vue mathématique, a été introduit sans qu'ait été menée une véritable réflexion didactique préalable. Il a conduit à un échec retentissant que ne suffit pas à expliquer l'impréparation du corps enseignant. Il semble y avoir, en effet des raisons didactiques essentielles qui font qu'une introduction précoce de l'algèbre linéaire n'est pas aussi simple que ne l'avaient pensé les collègues des années soixante. (Op. cité, p. 110).

Cependant, notons que la nouvelle définition du vecteur, comme élément d'un espace vectoriel issue de la nouvelle structuration de l'enseignement de la géométrie autour de l'algèbre linéaire, n'a pas eu d'incidence immédiate sur les pratiques enseignantes en physique, comme le souligne Hulin (1996) :

> La coordination physique - mathématique se complique : à côté du décalage dans le temps entre l'enseignement de mathématiques et les besoins de l'enseignant de physique, il existe un décalage entre les mathématiques modernes enseignées et les mathématiques applicables utilisées dans l'enseignement de la physique. D'ailleurs un groupe sera créé à la charnière de la commission Lagarrigue et de la commission Lichnerowicz pour étudier les relations entre les deux enseignements. (Op. cité, p. 112).

Malgré la bonne volonté des réformateurs, il y aura un constat d'échec dans les enseignements des deux disciplines. Ce qu'exprime aussi Belhoste (1996) :

> Une réforme pilotée par l'enseignement supérieur en fonction de ses intérêts et de ses préoccupations et sans vision claire des missions propres du secondaire, était sans doute vouée dès le départ à l'échec, quelle que soit sa légitimité scientifique et la bonne volonté de ses promoteurs. (Op. cité, p. 37).

Les études des didacticiens de la physique par exemple mettent à jour certaines difficultés liées aux vecteurs et à leur utilisation en physique, et tentent d'éclaircir ce constat d'échec. C'est ainsi qu'en 1973, Malgrange, Saltiel et Viennot réalisent une enquête par questionnaire auprès d'étudiants entrant en première année d'université pour chercher à caractériser les significations que ceux-ci attachent aux vecteurs et leur utilisation en physique. Parmi les difficultés repérées, la plus tenace concerne l'addition vectorielle, à laquelle s'ajoutent celles dues au langage de la physique qui ne distingue pas en général la grandeur vectorielle de la grandeur scalaire (la vitesse désigne aussi bien le vecteur vitesse que l'intensité de la vitesse). Ce qui fait dire à ces auteurs que :

> […] La présentation géométrique est sans doute plus proche de l'intuition de l'espace physique réel. Elle permet de développer des « images mentales » (« on voit ce qui se passe ») dont l'importance dans les raisonnements est incontestable, quoique difficile à définir exactement. Elle permet, ou devrait permettre de résoudre des problèmes qualitativement (sans référence aux intensités). Elle est nécessaire lorsque le géométrique est seul en cause (problème de symétrie par exemple). Cependant, outre que ces divers aspects ne sont pas systématiquement exploités, s'en tenir à une présentation uniquement géométrique conduit aux défauts que nous connaissons. (Op. cité, p. 12).

En somme, ces auteurs attribuent ces difficultés à

> l'influence trop grande d'une géométrie mal articulée sur l'algèbre et qui laisse dans l'ombre bien des aspects des relations entre forces, mouvements et géométrie des déplacements. (Ibid., p. 13).

On ne tardera pas à reconnaître les effets néfastes de l'abstraction au niveau du secondaire et le lien des mathématiques avec les autres disciplines sera mis en valeur : les nouveaux programmes [de 1978], et tout particulièrement leur partie géométrique, mettent l'accent sur l'utilisation de l'acquis intuitif des élèves. La théorie n'est pas un but en soi, mais un outil pour répondre à des questions que pose la vie : technologie, physique, économie.

II.3.4 La contre réforme (de 1985 à 2006)

Suite à ce constat d'échec des mathématiques modernes dans les programmes d'enseignement secondaire, un processus de changement de point de vue s'est opéré : la théorie des espaces vectoriels qui servait de cadre d'étude à la notion de vecteur disparaît petit à petit des programmes du lycée laissant la place à un cadre géométrique plus « concret ». Dans le même sens, le texte du programme précise que : « Le calcul vectoriel ne doit pas constituer un terrain purement algébrique ; la maîtrise de ses relations avec les configurations joue un rôle essentiel pour la résolution des problèmes de géométrie ».

> C'était oublier que le vecteur géométrique est algébrique par essence et que cette nature algébrique n'a nullement besoin de s'afficher par l'intermédiaire de l'espace vectoriel. Les opérations sur les vecteurs géométriques sont constitutives du concept même de vecteur géométrique :
>
> La longueur est la base de l'algébrique depuis les Grecs.
>
> Le sens (sur une même direction) est ce qui permet de considérer des grandeurs négatives incontournables dans la constitution de l'addition.
>
> La direction enfin est ce qui vient de l'idée de multiplication.
>
> Cette dernière hypothèse est plus difficile à comprendre. Mais regardons ce qu'est la multiplication de deux vecteurs. Dans l'algèbre géométrique des Grecs anciens, la multiplication de deux nombres (c'est-à-dire de deux segments) est l'aire d'un rectangle. Si l'on passe du rectangle au

> parallélogramme apparaît dans la formule de l'aire le sinus de l'angle formé par les deux côtés, c'est-à-dire la position relative de leurs directions (l'idée de négatif implique ici la prise en compte de l'orientation). Ainsi comme le souligne Grassmann dans l'introduction de l'Ausdehnungslehre, c'est le parallélogramme et non le rectangle qui symbolise le vrai concept de multiplication si l'on considère les grandeurs géométriques orientées (en direction et sens). Ce point de vue souligne l'importance de la direction des grandeurs géométriques dans l'idée de produit. (DORIER 2000, p. 79-80)

Ainsi, dans ces nouveaux programmes, le calcul vectoriel est présenté comme outil de résolution de problèmes de constructions géométriques ou comme pouvant servir aux enseignements en physique y afférant. Pour illustrer ce point de vue, on peut remarquer qu'en classe de première, on ne parle plus que de la pratique du calcul vectoriel avec des injonctions comme « tout point de vue axiomatique est exclu pour l'ensemble de la géométrie ». En terminale, le titre de « Outil vectoriel et configurations » en géométrie, est révélateur de ce processus de mise à l'écart de toute forme d'abstraction autour du concept de vecteur. Ainsi on peut noter que le caractère outil de l'objet mathématique vecteur se renforce, à savoir qu'il intervient plus fortement dans le cadre du processus d'étude d'autres objets mathématiques.

De même, la notion de vecteur est introduite en fin de collège de manière « naïve » en association avec la notion de translation. C'est un retour aux leçons de géométrie de Jacques Hadamard (1898), qui traduit bien le lien naturel entre translation et vecteur quand il définit la translation :

> Si, par tous les points d'une figure, on mène des droites égales, parallèles et de même sens, les extrémités de ces droites forment une figure égale à la première. [...] L'opération par laquelle on passe de la première figure à la seconde a reçu le nom de translation. On voit qu'une translation est déterminée quand on se donne en grandeur, direction et sens le segment tel que AA', qui va d'un point à son homologue. Aussi désigne-t-on une translation par les lettres d'un tel segment : on dit par exemple la translation AA'. (Op. cité, p. 51).

Cependant, cette idée de droites parallèles masque souvent le lien entre mouvement de translation et translation mathématique que peu d'enseignants de mathématiques se soucient d'établir comme nous l'avons constaté dans notre travail (Ba 2003). Pour autant, Gibbs (1901) avait défini le vecteur comme une translation et la liaison avec la mécanique est perceptible quand il énonce : *the typical vector is the displacement of translation in space*.

La cinématique, qui était le seul domaine des mathématiques permettant un pont entre mathématiques et physique, est reléguée comme secteur à part entière du programme de mécanique de la classe de seconde de physique. Dans le même temps, l'utilisation du vecteur se généralise dans les programmes de physique du secondaire. La force, grandeur vectorielle modélisant l'action mécanique d'un objet sur un autre, voit ses caractéristiques explicitées et formellement représentées dans tous les manuels scolaires et la modélisation de la vitesse correspond à un vecteur au sens mathématique de vecteur libre.

On note ici que l'aspect outil des concepts vectoriels prime sur leur aspect objet.

Ainsi l'algèbre linéaire disparaît des programmes du secondaire, le vecteur géométrique reste introduit dans les classes de quatrième et de troisième mais avec interdiction à des références à l'algèbre linéaire. L'addition vectorielle doit être reliée à la composition des translations. La géométrie des figures revient en force. En classe de seconde, par exemple, il est précisé que tout point de vue axiomatique est à bannir en géométrie. La pratique des figures occupe une place centrale et le lien avec l'ordinateur est souligné. Le calcul vectoriel ne doit pas constituer un terrain d'activités purement algébriques, ce qui est essentiel, c'est de mettre en œuvre les vecteurs sur les configurations et les transformations. Il est précisé aussi que l'intérêt de la notion de vecteur ne se limite pas à la géométrie. Cet intérêt pouvant être illustré par des exemples issus de la physique. Les mêmes objectifs sont poursuivis en classe de première S avec la poursuite du calcul vectoriel dans le plan et l'extension à l'espace.

On voit donc que le vecteur retrouve un habitat réduit en géométrie et une niche pour l'illustration de la physique et comme outil performant pour faire de la géométrie. La référence à l'algèbre (que ce soit par l'algèbre linéaire ou par les grandeurs orientées, comme on l'a vu dans la niche arithmétique des années 40 à 60) a complètement disparu.

II.3.5 Conclusion

Dans le tableau qui suit, nous résumons les points essentiels de l'évolution que nous venons d'analyser :

	Dates et faits marquants	***Habitats et niches***
Les débuts 1852 – 1925	1852 Une première référence au mot « vecteur »	*Rayon vecteur* dans les programmes de mathématiques du secondaire. Allusion au parallélogramme des forces et à la composition des forces concourantes ou parallèles. Mais le lien avec la notion de vecteur n'est pas encore fait.
	1902 Première apparition du vecteur en Première	Habitat paraphysique (Mécanique - Cinématique) Niche : représentation de grandeurs physiques (force et vitesse).
	1905 Modification et allégement de programme	Habitat : Géométrie en Terminale Ils ne changent cependant pas vraiment de niche Adaptation purement didactique ;
	1925 Un nouvel habitat potentiel en troisième Légère modification en Terminale Pas de lien entre les deux	*Troisième* Habitat (potentiel) : arithmétique Niche : Représentation des grandeurs mesurables susceptibles de sens. *Terminale* Habitat : trigonométrie L'intervention des vecteurs en cinématique est plus précise. Ainsi le statut géométrique des vecteurs se renforce et leur niche dans cet habitat se consolide dans le rapport à la trigonométrie.
Une évolution lente 1937 - 1967	1937-1938 L'habitat arithmétique se concrétise	Les habitats et les niches ne changent guère. l'habitat algébrique se renforce (importance de la multiplication par un scalaire) tout en montrant qu'il reste limité à la dimension 1 L'habitat trigonométrique descend en Première.
	1947 Un pont entre les deux habitats	Peu de modification. L'habitat dans la trigonométrie s'élargit à toute la géométrie. Un pont est fait entre les deux habitats, par le théorème de Thalès qui associe géométrie et mesure algébrique. Importance de la multiplication par un scalaire et de l'équipollence.

	Dates et faits marquants	***Habitats et niches***
	1957-1967 Renforcement	Habitats et niches restent inchangés alors que l'outil vectoriel s'impose de plus en plus (apparition en physique en classe de première à propos d'électromagnétisme).
1968 - 1985 Réforme des mathématiques modernes	Le vecteur envahit la géométrie	Habitat : la géométrie Niche : de fondement à la géométrie, préparer à l'algèbre linéaire.
La contre réforme 1985 - 2006	Le vecteur est réduit au rang d'outil et occupe une place réduite en géométrie	Habitat (réduit) : géométrie Niche : illustration de la physique et outil performant pour faire de la géométrie. La référence à l'algèbre (que ce soit par l'algèbre linéaire ou par les grandeurs orientées, comme on l'a vu dans la niche arithmétique des années 40 à 60) a complètement disparu.

Tableau récapitulatif de l'évolution de l'enseignement du vecteur.

Nous ne ferons pas ici d'analyse détaillée des évolutions les plus récentes. On en trouvera dans les travaux de didactique des mathématiques, que nous avons présentés dans la première partie (Lê Thi Hoai, 1997, Pressiat, 1999).

Dans le paragraphe qui suit, nous allons examiner plus spécifiquement l'évolution de l'usage du vecteur dans l'enseignement des sciences physiques.

II.4 Evolution de l'usage du vecteur dans l'enseignement de la physique

Parmi les outils mathématiques utilisés en physique, le calcul vectoriel constitue un secteur fondamental. En effet, dans beaucoup de domaines de la physique, les phénomènes étudiés sont représentés par des vecteurs. Il en est ainsi, par exemple en mécanique et en cinématique où les vitesses, les accélérations, les forces, etc., sont modélisées par des vecteurs, mais aussi en électricité avec le champ électrique et en électromagnétisme avec l'exemple du champ électromagnétique. Pour souligner l'importance de cette modélisation de certains concepts physiques par le vecteur, Mach (1904) disait à propos des forces : *Savoir que les circonstances déterminantes d'une force appliquée en un point sont sa grandeur et sa direction est une expérience imperceptible, mais déjà fort importante.* Einstein (1956) renchérissait : *Le nombre est à lui seul insuffisant pour décrire certains concepts physiques. La reconnaissance de ce fait a marqué une avance très nette dans l'investigation scientifique… une direction est aussi essentielle qu'un nombre.*

Festraets (1979), fait remonter une ébauche de l'origine de la notion de vecteur à la théorie du plan incliné de Simon Stevin, publiée en 1586. Il soutient que le raisonnement de Stevin est basé sur une idée intuitive qu'il considère comme évidente qui est une préfiguration du principe d'inertie : c'est-à-dire qu'un système initialement au repos ne peut pas se mettre spontanément en mouvement. Il utilise aussi des considérations de symétrie dans le cadre de deux forces appliquées aux extrémités d'un fil passant sur une poulie fixe. L'équilibre est obtenu si et seulement si les deux forces ont la même intensité.

Mais la modélisation se limite toutefois à une représentation graphique de la grandeur physique par un segment (non orienté). De fait, seule l'intensité de la force est réellement prise en compte, même si la direction est implicitement considérée. La modélisation de la force par un vecteur, en tant qu'objet mathématique à part entière, n'a vu le jour que progressivement dans la deuxième moitié du XIX° siècle. Une étape essentielle était de reconnaître l'importance de la direction et du sens, mais ce n'était pas suffisant pour faire apparaître le vecteur comme le bon objet mathématique pour modéliser ce concept de physique.

A ce propos, examinons comment, Georges Bouligand (1944) dans son ouvrage *Les aspects intuitifs de la Mathématique,* décrit les premières modélisations des concepts physiques par le vecteur :

> […] la Statique et la Dynamique ont fait naître l'idée de force, idée certes complexe, mais qui apparaît dans toute sa pureté quand la force est transmise par le jeu du fil tendu. On prend ainsi conscience de la direction et du sens de la force, aussi bien que de son intensité : la force, à son tour, est donc assimilée à un vecteur. Le corpuscule électrisé, placé dans un champ électrique, va subir l'action d'une force ce qui conduit encore à représenter le champ électrique par un vecteur. Et le champ magnétique offre une occasion analogue. Le vecteur s'est donc imposé par la fréquence de ses interventions. (Op. cité, p. 90)

La pertinence de la modélisation de la notion de force par le vecteur est également illustrée par Ernest Mach (1904) dans son exposé historique et critique du développement de la mécanique, quand il dégage les attributs essentiels de cette grandeur physique.

> On appelle force une circonstance déterminante de mouvement qui possède les attributs suivants :
>
> 1° La *direction*, qui est la direction du mouvement déterminé par la force donnée agissant seule ;
>
> 2° Le *point d'application* qui est le point du corps qui se mettra en mouvement, même s'il est rendu indépendant de ses liaisons ;
>
> 3° L'*intensité*, c'est-à-dire le poids qui, agissant à l'aide d'un fil tendu appliqué au même point suivant la direction donnée, détermine le même mouvement ou maintient le même équilibre. (Op. cité, 82)

Ce type de vecteur, lié à son point d'origine est toutefois distinct de ce qu'on a longtemps appelé le vecteur libre, indépendant de son origine (le vecteur mathématique actuel), mais reste très utilisé en physique encore aujourd'hui.

Soulignons que les physiciens utilisent aussi une troisième catégorie de vecteur : le vecteur glissant que l'on peut remplacer par un vecteur équipollent de même support (tension d'un fil par exemple).

Peu à peu, le concept de force devient ainsi un objet sur lequel on va raisonner géométriquement.

La loi du parallélogramme des forces prélude à l'addition vectorielle, bien qu'implicitement présente dans les œuvres de Stevin et même certainement beaucoup plus tôt, n'a été énoncée clairement dans sa généralité qu'au XVII^e siècle par Varignon dans une œuvre posthume publiée en 1725. Mais à cette époque et jusqu'à la fin du XIX^e siècle, les vitesses et les forces étaient représentées par des segments de droites, puis par des segments de droites fléchés, sans notation particulière distinctive. Ces différentes modélisations géométriques des grandeurs physiques et de leur composition reposaient sur la géométrie analytique par des projections sur des axes que Descartes avait déjà développée. La loi du parallélogramme des forces dont l'origine est purement empirique stipule que deux forces, appliquées à un corps A, dirigées suivant les droites AB et AC et d'intensités proportionnelles aux segments [AB] et

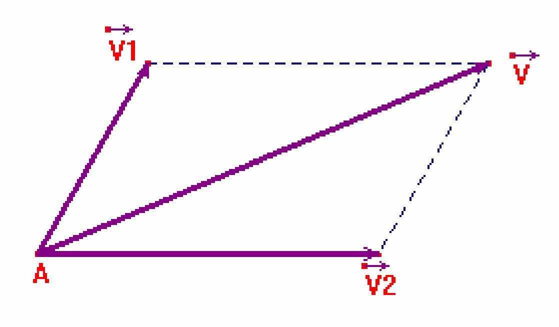
[AC], peuvent être remplacées par une force unique dirigée suivant la diagonale du parallélogramme ABDC et d'intensité proportionnelle à la longueur de celle-ci. [AB] et [AC] sont appelées les composantes et [AD], la résultante.

Tout cela préparait la voie au calcul vectoriel moderne, cependant les opérations du calcul vectoriel n'ont connu qu'assez tardivement la faveur qu'elles méritaient selon l'avis de Bouligand.

> On avait donc l'impression que le recours aux opérations vectorielles, luxe inutile, donnait seulement une physionomie à des résultats qu'on avait obtenus par d'autres méthodes. En fait cette physionomie s'est révélée décisive. Le recours aux opérations vectorielles a, en effet, permis de réduire et de clarifier la Géométrie analytique, en la rendant plus accessible qu'elle ne l'était au début du présent siècle. Cette simplification émane du fait que, si des axes sont nécessaires pour déterminer un vecteur (par recours à des projections), il existe, par contre, entre les vecteurs, divers types de relations qu'on peut concevoir indépendamment des axes. (Op. cité, 1944, pp. 90-91)

Il donne l'exemple calqué sur le parallélogramme des forces en mettant en évidence la somme de deux vecteurs et en montrant par la même occasion le lien naturel entre la somme vectorielle et la composition des translations, sans toutefois perdre de vue l'interaction avec l'expérience empirique.

> Aidons nous de l'image […], d'un milieu qui subit une modification d'ensemble, établissant une correspondance point par point entre un état initial et un état final. Cette modification d'ensemble sera ici un simple glissement : le milieu qui la subit est un solide rigide, car il n'y a pas altération des distances ; ce glissement est représenté par le vecteur allant de la position initiale d'un grain quelconque de notre solide à sa position finale. Indépendamment du grain, ce vecteur a toujours même direction, même sens, même intensité. Il est naturel de dire qu'il conserve toujours la même grandeur géométrique, grandeur d'un nouveau type dont dépend en définitive la translation étudiée. On peut concevoir qu'ayant imprimé au solide une première translation, on lui en imprime ensuite une seconde, de direction différente. Tout se passe alors comme si le solide avait subi une translation unique déterminée par le vecteur $\vec{v}$ diagonale du parallélogramme construit sur le vecteur $\overrightarrow{v_1}$ qui déterminait la première translation et sur le vecteur $\vec{v}_2$ qui déterminait la seconde. C'est ce qu'on appelle composer les deux translations. Nous prenons ainsi conscience d'une première opération, l'addition des grandeurs géométriques, laquelle tire son objectivité de la composition des translations. (Ibid. pp. 91-92)



Il faut remarquer que le calcul vectoriel a mis longtemps à pénétrer dans l'enseignement secondaire. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, ce n'est qu'à partir du début du XX[e] siècle que les vecteurs apparaissent dans l'enseignement. Ils sont d'abord apparus dans l'enseignement de la mécanique en 1902, puis dans l'enseignement de la géométrie en 1905. Pour ce qui est de l'enseignement de la physique, ce n'est qu'en 1942 qu'apparaissent les premières modélisations des forces par les vecteurs dans les programmes de la classe de seconde. Outre les difficultés liées aux notations symboliques qui n'étaient pas stabilisées, le traitement exclusivement analytique des grandeurs vectorielles faisait que les élèves avaient des difficultés à voir dans les forces et les vitesses autre chose que des longueurs. Face à ces difficultés, la représentation vectorielle des forces a été supprimée des programmes de seconde de 1957, lesquels prescrivent seulement une étude expérimentale des forces concourantes et des forces parallèles appliquées à un solide. C'est dans les programmes de la classe de seconde de 1966 qu'on retrouve la représentation vectorielle des forces. Le manuel de physique de J. Cessac et G. Tréherne de la collection Nathan très utilisé à cette époque illustre bien ce retour en force de la représentation vectorielle des forces.

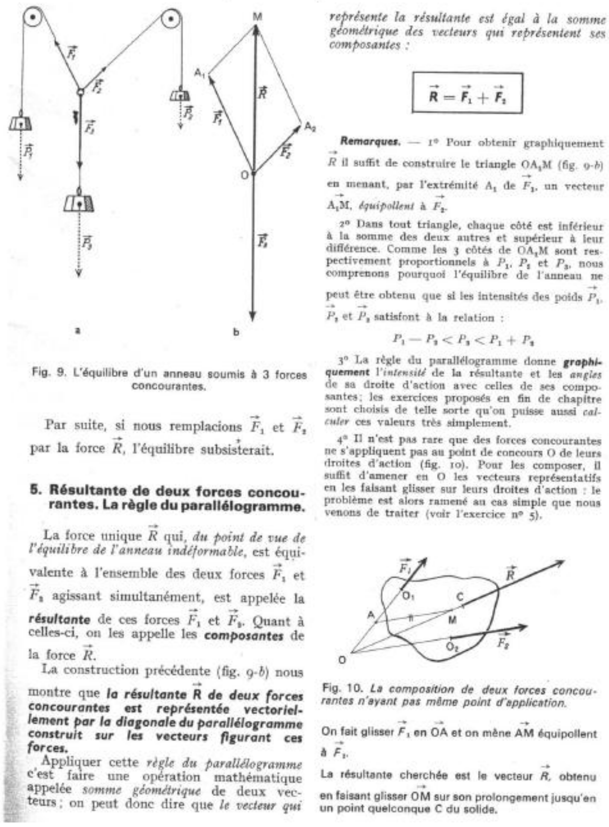


Fig. 9. L'équilibre d'un anneau soumis à 3 forces concourantes.

Par suite, si nous remplacions $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ par la force $\vec{R}$, l'équilibre subsisterait.

5. Résultante de deux forces concourantes. La règle du parallélogramme.

La force unique $\vec{R}$ qui, *du point de vue de l'équilibre de l'anneau indéformable*, est équivalente à l'ensemble des deux forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ agissant simultanément, est appelée la **résultante** de ces forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$. Quant à celles-ci, on les appelle les **composantes** de la force $\vec{R}$.

La construction précédente (fig. 9-*b*) nous montre que ***la résultante $\vec{R}$ de deux forces concourantes est représentée vectoriellement par la diagonale du parallélogramme construit sur les vecteurs figurant ces forces.***

Appliquer cette *règle du parallélogramme* c'est faire une opération mathématique appelée *somme géométrique* de deux vecteurs ; on peut donc dire que *le vecteur qui représente la résultante est égal à la somme géométrique des vecteurs qui représentent ses composantes :*

$$\boxed{\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2}$$

Remarques. — 1° Pour obtenir graphiquement $\vec{R}$ il suffit de construire le triangle OA_1M (fig. 9-*b*) en menant, par l'extrémité A_1 de $\vec{F}_1$, un vecteur $\vec{A_1M}$, *équipollent* à $\vec{F}_2$.

2° Dans tout triangle, chaque côté est inférieur à la somme des deux autres et supérieur à leur différence. Comme les 3 côtés de OA_1M sont respectivement proportionnels à P_1, P_2 et P_3, nous comprenons pourquoi l'équilibre de l'anneau ne peut être obtenu que si les intensités des poids $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$ et $\vec{P}_3$ satisfont à la relation :

$$P_1 - P_2 < P_3 < P_1 + P_2$$

3° La règle du parallélogramme donne **graphiquement** l'*intensité* de la résultante et les *angles* de sa droite d'action avec celles de ses composantes; les exercices proposés en fin de chapitre sont choisis de telle sorte qu'on puisse aussi *calculer* ces valeurs très simplement.

4° Il n'est pas rare que des forces concourantes ne s'appliquent pas au point de concours O de leurs droites d'action (fig. 10). Pour les composer, il suffit d'amener en O les vecteurs représentatifs en les faisant glisser sur leurs droites d'action : le problème est alors ramené au cas simple que nous venons de traiter (voir l'exercice n° 5).

Fig. 10. *La composition de deux forces concourantes n'ayant pas même point d'application.*

On fait glisser $\vec{F}_1$ en $\vec{OA}$ et on mène $\vec{AM}$ équipollent à $\vec{F}_2$.

La résultante cherchée est le vecteur $\vec{R}$, obtenu en faisant glisser $\vec{OM}$ sur son prolongement jusqu'en un point quelconque C du solide.

Illustration de la représentation vectorielle des forces (J. Cessac et G. Tréherne, 1966, pp 49-50)

A partir de cette époque, le modèle vectoriel se généralise dans l'enseignement secondaire en physique. D'ailleurs on assiste à cette période à une mathématisation croissante des contenus de l'enseignement de la physique justifiée par l'avènement des mathématiques modernes. Comme preuve de ce phénomène, on peut citer le numéro 545 de mai 1972 du Bulletin de l'Union des Physiciens (BUP) entièrement consacré à l'utilisation des mathématiques modernes et plus précisément aux vecteurs (comme éléments d'un espace vectoriel) dans l'enseignement de la physique. Cependant, le besoin de la coordination des enseignements de mathématiques et de la physique et l'opportunité de créer un lexique commun sont apparus à la fois comme plus nécessaires et comme plus difficiles à obtenir. L'éditorial de ce numéro met bien en scène cette tension :

> Nous avons rassemblé dans ce numéro des articles relatifs à l'utilisation des mathématiques, en particulier des « mathématiques modernes », dans l'enseignement de la physique. Nous ne portons aucun jugement sur le bien-fondé de tel ou tel exposé, laissant au lecteur le soin de juger et de réagir et, le cas échéant, de nous écrire. Le point essentiel nous paraît être de savoir dans quelle mesure l'emploi de tel outil mathématique contribue effectivement à une meilleure compréhension du phénomène physique étudié. L'écueil à éviter est de tomber dans l'abstraction gratuite ; l'outil mathématique doit nécessairement être un moyen d'approfondissement, d'élucidation et de clarification. Certains articles présentés ici ont également pour but de préciser le vocabulaire. On sait

> que cette question de vocabulaire est essentielle et qu'elle est à l'origine de nombreux malentendus. (Op. cité)

L'article de Provost (1972) en est un bon exemple. Ce dernier évoque la nécessité d'une réadaptation des enseignements de mathématiques et de sciences physiques et penche plus pour une axiomatisation de la physique à la manière des mathématiques modernes tout en préservant bien sûr la spécificité de la physique. Il est donc urgent pour lui de :

> Appliquer le mode de pensée mathématique moderne c'est-à-dire – n'ayons pas peur des mots « axiomatiser la physique ». Certes, on n'axiomatise pas l'observation ni l'expérimentation ; or, observer et expérimenter sont les activités essentielles et originales du physicien, celles par lesquelles il se distingue fondamentalement du mathématicien. Mais tout physicien qui observe et expérimente ne peut, à quelque niveau que ce soit, même le plus élémentaire, s'empêcher de penser, d'interpréter, de « comprendre » et pour cela, il construit un modèle ; il n'y a alors dans cette activité, aucune raison pour que sa pensée ne fonctionne pas comme celle du mathématicien, ne soit pas aussi rigoureuse et, pour cela, ne prenne pas conscience d'elle-même. A ce niveau de construction, d'élaboration du modèle, l'axiomatisation est possible et même nécessaire. (Op. cité, p .929)

Dans la même lancée, d'autres membres de la noosphère de l'enseignement des sciences physiques prônent un rapprochement des contenus d'enseignement secondaire de ceux de l'enseignement supérieur afin de combler le divorce grandissant entre les deux ordres d'enseignement. C'est par exemple le cas de Michel Hulin (1992) quand il évoque des modes d'intervention du formalisme mathématique :

> Mais il s'impose, dans ce contexte élargi, d'accorder à l'outil mathématique une valeur plus générale que ce n'est le cas traditionnellement, de prendre, en quelque sorte, un certain recul par rapport à sa mise en œuvre, et de ne pas le limiter à ses aspects purement algorithmiques. (Ce faisant, nous nous rapprocherons de l'esprit qui a guidé nos collègues mathématiciens lors de la réforme Lichnérowicz - ce qui, je l'espère, pourra ne pas apparaître seulement comme un inconvénient). En outre, ce qui est plus important, nous introduisons dans notre enseignement une attitude qui me semble caractéristique de la physique contemporaine, révélatrice de sa maturité, et parfaitement transposable à un niveau élémentaire. (Ibid., p. 99)

On voit à travers ces différents points de vue que les transpositions didactiques à l'œuvre à cette époque s'efforçaient d'approcher le savoir de référence de la physique contemporaine. Suite à ces considérations générales, le même auteur plaide pour un retour à la réalité géométrique du vecteur physique *obscurcie, peut-être, par un alignement inconsidéré sur l'enseignement des mathématiques* modernes dénonçant par là le tout linéaire qui commençait à gagner une importante partie de la physique. Ces propos mettent bien à jour les tensions que l'avènement des mathématiques modernes a engendrées dans la coordination des deux disciplines mathématiques et physique. Tensions liées entre autres à la profonde mutation des mathématiques, la tendance affichée des promoteurs des mathématiques modernes étant de privilégier les structures formelles tandis que la physique privilégie la « réalité concrète », en impliquant toutefois, comme la première, une formalisation ; le recours aux outils mathématiques doit aussi se moderniser. Nous nous sommes largement penché sur cette période des mathématiques modernes dans la partie consacrée à l'évolution de l'enseignement du vecteur en mathématiques.

II.4.1 Vecteurs dans les programmes de sciences physiques de 1982-1983

A partir des années 1980, période de la contre réforme des mathématiques modernes, les programmes de physique dans le secondaire évoluent dans le sens d'un retour en force de la dimension culturelle et d'une ouverture aux applications que cette discipline offre. A l'origine de ce changement, le souhait exprimé par la noosphère pour une réhabilitation de la relation entre science et technique.

> Aussi cet enseignement n'est-il pas conçu pour former prioritairement de futurs physiciens et chimistes mais pour amener le plus grand nombre d'élèves à prendre conscience de la valeur culturelle des sciences physiques, les faire participer aux démarches intellectuelles et expérimentales caractéristiques de cette discipline, leur faire acquérir un savoir et un savoir-faire, enfin leur permettre d'interagir efficacement avec un monde parfaitement marqué par l'omniprésence des produits de la technique. (CNDP, 1982, p. 19)

Ce qui met en relief le caractère complémentaire de l'approche théorique et de l'approche expérimentale souhaité par les rédacteurs des programmes. Cependant, ni dans les indications d'ordre général ni dans les commentaires, on ne fait état des liens avec les connaissances mathématiques des élèves. On parle plutôt vaguement de la possibilité offerte aux élèves de saisir l'unité profonde de la science par l'enseignement des sciences physiques en harmonie avec les autres disciplines scientifiques. Dans ce contexte, les grandeurs vectorielles physiques sont étudiées sans référence aux vecteurs mathématiques qui sont abordés eux aussi comme une étude intéressante en soi plutôt que comme outils en physique. Très souvent des rappels de mathématiques sur les vecteurs sont faits par des professeurs de physique sans référence précise à des applications ou significations physiques.

En classe de seconde l'usage du vecteur se manifeste en mécanique sur les points suivants :

1. Le mouvement avec la mise en évidence du vecteur vitesse d'un point mobile. Les commentaires précisent que :

> Par une approche très concrète, il conviendra de dégager le caractère vectoriel de la vitesse et de ses conséquences. Dans le cas, qui pourrait être étudié le premier, du mouvement rectiligne d'un point sur un plan horizontal, on fera remarquer aux élèves qu'il faut connaître, pour caractériser la vitesse, non seulement sa grandeur, mais encore sa direction et son sens : l'indication du compteur d'une voiture ne suffit pas pour que l'on sache dans quelle direction et dans quel sens elle se dirige. Le vecteur vitesse, avec ses trois attributs, peut alors être présenté comme l'être physique nous fournissant l'information complète dont nous avons besoin. Le cas du mouvement curviligne peut être abordé ensuite. On ne cherchera pas à justifier ni la grandeur de la vitesse, ni sa direction et son sens, par des passages à la limite qui ne pourraient être compris en classe de seconde. On indiquera que le vecteur vitesse en chaque point est porté par la tangente à la trajectoire, qu'il a le sens du mouvement et pour grandeur le quotient de la longueur parcourue sur la trajectoire entre deux points très voisins par le temps mis à le parcourir. On fera remarquer que, pour la détermination expérimentale de la grandeur de ce vecteur vitesse en travaux pratiques, il suffit de prendre comme longueur celle du segment rectiligne déterminé par les deux points très voisins. (CNDP, 1982, p. 30)

2. Une illustration du barycentre apparaît avec la recherche du centre d'inertie G de deux solides accolés dont les centres d'inertie G_1 et G_2 sont repérés. On montre alors que G est barycentre de G_1 et G_2 affectés des masses m_1 et m_2 des deux solides.
3. La quantité de mouvement avec la mise en évidence du vecteur quantité de mouvement d'un solide et d'un système de deux solides qui fait ressortir la modélisation par un vecteur libre $\vec{p} = m\overrightarrow{v_G}$. En étudiant le mouvement du point G, barycentre des points G_1 et G_2 centres d'inertie de deux solides formant un système isolé, on constate que ce point G a un mouvement rectiligne uniforme de vitesse $\overrightarrow{v_G}$ car la quantité de mouvement de ce système isolé $\vec{p} = (m_1 + m_2)\vec{v}_G = \overrightarrow{p_1} + \overrightarrow{p_2}$ est constant.
4. La force, action mécanique d'un solide sur un autre dont une représentation mathématique est constituée par le vecteur force $\vec{F}$ qui donne la mesure globale de l'action à la fois dans son aspect strictement quantitatif (contenu dans la grandeur scalaire F mesurée en newton) et dans son aspect direction et sens, en précisant si possible le lieu où elle s'exerce c'est-à-dire son point d'application.

Dans notre analyse des programmes de mathématiques, nous avons vu que les vecteurs sont abordés depuis les classes de quatrième et de troisième, donc bien avant l'étude des grandeurs vectorielles en mécanique, mais comme le fait remarquer Lounis (1989), les difficultés relèvent plutôt de l'articulation réciproque dans les deux types d'enseignement et en particulier des questions liées au vocabulaire.

En classe de première scientifique, la mécanique ne figure pas au programme (1982), l'utilisation du vecteur porte essentiellement sur l'électrostatique et l'électrocinétique avec l'introduction du champ (région de l'espace dans laquelle un objet physique subit une action qui correspond en mathématiques à une application d'une partie de l'espace affine dans l'espace vectoriel associé) électrique et des forces électrostatiques mais sans la composante technologico-théorique.

Quant à la classe de terminale, l'utilisation du vecteur est renforcée dans les deux importantes parties du programme que sont la mécanique et l'électromagnétisme. En mécanique, la vitesse et la quantité de mouvement, déjà introduites en classe de seconde, sont affinées grâce à la disponibilité de la notion de dérivée. La relation $\sum \vec{f} = \frac{\overrightarrow{dp}}{dt}$ précise quantitativement comment varie la quantité de mouvement d'un solide sous l'action des forces qui lui sont appliquées. On note ici une allusion au mouvement de translation d'un solide en rapport avec le théorème de l'énergie cinétique.

En électromagnétisme, les champs électrique et magnétique sont considérés presque toujours dans les cas où ils sont uniformes c'est-à-dire que leurs caractéristiques (direction, sens et valeur) restent inchangées en tout point de la région de l'espace considérée. La loi $\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ est l'occasion de la première rencontre avec l'usage du produit vectoriel en physique, outil considéré comme disponible chez les élèves dans le cours de mathématiques.

On peut remarquer qu'aucun lien n'est fait entre la notion de champ en physique et celle correspondante en mathématiques et la distance reste grande entre le vecteur physique se fondant sur le registre graphique et le vecteur mathématique fondé sur une présentation axiomatique de classe d'équivalence.

II.4.2 Vecteurs dans la réforme de 1992 des programmes de sciences physiques

Les principes directeurs de cette réforme reposent sur le constat que l'enseignement de la physique est parfois trop formel. En conséquence, les nouveaux programmes prônent une place accrue des activités expérimentales et une ouverture sur les techniques. On demande de valoriser les applications liées à la physique, tandis que les commentaires de programmes (CNDP, réédition, 1996) introduisent de constantes limitations dans la démarche de mathématisation dans la discipline. Dans ces objectifs évoqués par la noosphère de l'enseignement des sciences physiques, aucun ne fait allusion à une interaction entre mathématiques et physique. On ne s'étonnera pas alors que l'utilisation des vecteurs soit réduite au minimum. On note d'ailleurs qu'en seconde, l'approche des notions étudiées dans le programme reste essentiellement expérimentale et qualitative. La modélisation des forces par les vecteurs est renvoyée en classe de première. A ce niveau, les vecteurs interviennent surtout dans le secteur du programme intitulé **mouvements,** où on étudie d'une part :

- Le vecteur vitesse d'un point d'un solide.
- Le mouvement d'un solide en translation et le vecteur vitesse.
- Le mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe et le vecteur vitesse.

D'autre part :

- Des interactions entre objets : forces.
- Couple de forces et moment.

Les commentaires sont sans équivoque par rapport à l'importance accordée à l'expérience sur la formalisation :

> Cette étude introductive sur les mouvements doit s'appuyer sur des exemples concrets et familiers aux élèves. Il importe de mettre en œuvre des méthodes et des techniques expérimentales d'étude de mouvements qui seront utilisées dans toute la suite : la chronophotographie et la stroboscopie, l'enregistrement vidéo, l'observation image par image, l'analyse à l'aide de logiciels, la table à coussin d'air ou les mobiles autoporteurs sont des moyens privilégiés pour accéder aux concepts de mouvement, de trajectoire, d'uniformité (non uniformité), de vecteur vitesse - **toutes notions qu'ils convient d'aborder par l'expérience** . (Op. cité 1996, 51)

On voit bien que c'est un programme essentiellement pragmatique ou d'inspiration empiriste, qui tend à péjorer le formalisme mathématique. Concernant les mouvements de translation et de rotation, les concepteurs des programmes notent dans les commentaires la nécessité d'insister auprès des élèves sur la distinction entre ces deux types de mouvement que l'on confond souvent, surtout, s'il s'agit du mouvement de translation circulaire et du mouvement de rotation, mais toujours avec la primauté de l'observation.

> Il s'agit d'abord de faire en sorte que les élèves sachent distinguer **« à vue »** un mouvement de translation d'un mouvement de rotation. En particulier, il importe que les élèves réalisent qu'une trajectoire fermée, circulaire de surcroît, ne correspond pas nécessairement à une rotation (exemple de la grande roue foraine). Des expressions telles que « la Terre tourne sur elle-même » et « la Terre tourne autour du Soleil » doivent être décryptées. (Ibid. 1996, 51)

Ce refus de l'usage du formalisme mathématique apparaît aussi dans l'étude des interactions entre objets : *concernant les interactions à distance, les expériences d'électrostatique peuvent* *être rappelées mais la gravitation constitue un exemple privilégié qu'il convient d'analyser sans formalisme.* En fait, le formalisme n'est préconisé qu'en classe de terminale, et l'utilisation des vecteurs dans le programme de cette classe apparaît dans les rubriques :

- champs et interactions
- lois de la dynamique

Comme on peut le constater dans l'analyse précédente, les programmes de seconde et première S de physique donnent la primauté à l'observation et à l'expérimentation refusant tout formalisme lié aux mathématiques, mais il ne faut pas oublier, comme le dit Ollmo (1969) que : *l'expérimentation, et même la simple observation, sont des théories en acte. Un objet scientifique (le soleil, l'atome de carbone) est une théorie cristallisée ; un instrument d'expérience, ce type particulier d'objets scientifique, est une pensée construite, en partie réalisée par le technique. (Cité par Robardet 1997, p .69)* On voit que même si le rapport au monde est le fondement de la physique, il n'en demeure pas moins que celle-ci reste une théorie qui travaille sur des schémas abstraits et dont le lien avec les mathématiques est indissociable.

II.4.3 Conclusion

Cette brève étude montre que l'introduction du vecteur pour modéliser les grandeurs physiques est relativement récente et a été sujet à nombreux débats. Il est aussi important de noter que ce n'est pas dans les domaines les plus élémentaires que le vecteur s'est d'abord imposé. Au niveau de l'enseignement, le vecteur est longtemps resté (de 1902 à 1942) dans le domaine de la cinématique (qui relevait alors des mathématiques que l'on appelle parfois mixtes). Son usage (dans l'enseignement) pour modéliser les forces est plus récent et rentre toujours en concurrence avec les aspects plus expérimentaux. Le vecteur semble nettement perçu comme un objet du domaine des mathématiques. Par l'intermédiaire des projections et des coordonnées sur les axes, il permet les calculs sur les seules grandeurs scalaires. Il a par ailleurs une vertu représentative dans le registre graphique, permettant éventuellement le tracé d'une somme. De fait, le vecteur apparaît bien comme un objet exogène à la physique qui permet de représenter ou de calculer des forces, ou des vitesses, mais dont les règles de fonctionnement obéissent à des enjeux mathématiques. Les évolutions les plus récentes de l'enseignement de la physique en France, tendent à redonner plus d'importance à l'expérience et donc mettent les mathématiques encore plus à distance.

II.5 Conclusion sur l'analyse écologique

Rappelons que notre étude vise à dégager les contraintes et les conditions dans lesquelles l'enseignement des vecteurs et des grandeurs physiques vectorielles peut vivre à l'aube du XXI° siècle. Dans ce sens, nous retiendrons des analyses précédentes les points suivants :

- Malgré le rejet de la réforme des mathématiques modernes, le modèle de l'algèbre linéaire, s'il a disparu officiellement des programmes du secondaire, continue de marquer l'organisation mathématique autour du vecteur. L'importance accordée à la multiplication par un scalaire en classe de seconde en atteste. On continue de « montrer » sans le dire les axiomes de la structure linéaire. Cependant des aspects algébriques plus propres au vecteur, comme le lien avec le théorème de Thalès, sont passés sous silence. La disparition de toute niche algébrique opère toujours comme un manque, qu'une fois rejetée (à juste titre) la référence à la structure d'espace vectoriel, rien n'est venu combler. Dans ce sens, il conviendrait de s'interroger sur la nécessité d'assumer la part intrinsèquement algébrique du vecteur, qui n'est pas celle d'une structure linéaire, mais s'exprime de façon indissociable de la nature géométrique de celui-ci.
- Par ailleurs, la niche « outil performant pour la géométrie » a elle aussi du mal à fonctionner. Il est en effet difficile de trouver un problème de géométrie posé sans vecteur ou la modélisation par des vecteurs conduise à un usage réellement performant de l'outil vectoriel. On a vu en effet, à travers l'évolution des programmes (et l'analyse historique le confirme) que l'habitat géométrique n'était pas si naturel qu'il y paraît pour les vecteurs. Pour une part importante, le vecteur géométrique est une création didactique qui a permis à un moment donné de résoudre un problème idéologique et pratique dans l'organisation du savoir enseigné. Ce point est particulièrement étudié dans le travail de Pressiat (1999).
- Reste la niche « outil pour la physique », mais elle paraît aussi difficile à faire vivre. En effet, peu de situations physiques sont utilisables en troisième ou même en seconde, dans lesquelles le formalisme vectoriel soit vraiment pertinent. Le plus souvent, on trouve dans les manuels des habillages plus ou moins cachés de situations pseudo-physiques. L'élève en est réduit à comprendre ce qu'on veut lui faire faire, faute de pouvoir avoir vraiment prise sur la situation physique en jeu.

- Enfin dans l’enseignement de la physique, le vecteur est considéré comme un outil exogène dont les enjeux d’apprentissage relèvent des mathématiques. L’enseignement des vecteurs et des forces n’est pas vu comme un moment pour réinterroger la compréhension des élèves sur le vecteur. Celui-ci doit être un outil efficace pour faire des calculs et représenter graphiquement, mais le réel enjeu se trouve du côté de la physique.

Ainsi, on voit que le cloisonnement disciplinaire, mais aussi les effets inévitables de la transposition didactique (comme la segmentation des savoirs) ont conduit progressivement à un paysage éclaté où le vecteur reste un objet hybride, qui se cherche une raison d’être. Son lien avec les grandeurs physiques vectorielles ne peut ainsi être réellement mis en jeu, en partie à cause du décalage chronologique entre son enseignement en mathématiques en fin de collège – début de lycée et en physique en début ou milieu de lycée.

Nous allons à présent analyser à travers les programmes et certains manuels les rapports institutionnels actuels aux objets de savoir en jeu dans notre étude ; dans les deux disciplines et les deux pays.

PARTIE III

ANALYSE INSTITUTIONNELLE

III.1 Introduction

Dans cette partie, nous dégageons les aspects essentiels du rapport institutionnel actuel dans chaque discipline et dans chaque pays aux objets en jeu. Pour les mathématiques, ceci nous a conduit à analyser les programmes et des manuels de fin de collège et de lycée sur les contenus associés au vecteur et à la translation. Nous centrerons surtout notre analyse des manuels sur l'usage qui est fait ou non de situations physiques, pour introduire ou illustrer la notion de vecteur et sur les allusions éventuelles à la notion de mouvement en lien avec les transformations géométriques (pour ce qui concerne les translations). En physique, nos analyses portent, sur la classe de seconde S au Sénégal et de première S en France, avec les concepts de force, de vitesse et de mouvement de translation. L'enrichissement de notre travail avec la translation et le mouvement de translation vient des structures actuelles des programmes de mathématiques et de physique, qui nous ont conduit naturellement, partant du vecteur, à nous intéresser à la translation. Notons enfin, que cette analyse porte sur les programmes français et sénégalais. Néanmoins, nous n'analyserons que des manuels français, qui sont très utilisés au Sénégal, les manuels sénégalais étant peu nombreux et peu usités. Au Sénégal, les programmes sont longtemps restés identiques aux programmes français. Depuis les années 70, ils ont cependant acquis une plus grande autonomie. Celle-ci se traduit souvent par une moins grande propension à adopter les réformes qui ont eu lieu en France. Ainsi, comme nous allons le voir les programmes de mathématiques actuels au Sénégal offrent encore une place plus importante aux vecteurs que ce n'est le cas actuellement en France. Par ailleurs, le programme de physique de seconde S est quasi identique au programme de première S en France pour les notions qui nous intéressent. Signalons que les noms des institutions et des classes de l'enseignement secondaire sont identiques au Sénégal et en France. Par contre, la spécialisation au Sénégal commence dès la classe de seconde, alors qu'en France, elle ne commence qu'en classe de première.

Au Sénégal, la rédaction des programmes de mathématiques de l'enseignement moyen (collège) et secondaire (lycée) est sous la responsabilité de l'IGEN (Inspection Générale de l'Education Nationale). Celle-ci confie la tâche à la CNM (Commission Nationale de Mathématiques) qui regroupe l'ensemble des acteurs de l'enseignement des mathématiques du primaire à l'université. Les programmes actuellement en vigueur s'inscrivent dans la même ligne que les précédents et sont le résultat d'une réécriture de ces derniers en vue d'une meilleure lisibilité du contenu. Comme les précédents programmes, ceux actuellement en vigueur gardent la même présentation en trois colonnes : à gauche les contenus, au centre les commentaires qui précisent le sens et les limites à donner à certaines parties des contenus et à droite les compétences exigibles des élèves avec une correspondance entre contenus et compétences exigibles. Une présentation générale fixe les finalités, les objectifs généraux et les options épistémologiques et didactiques que ces nouveaux programmes ambitionnent de prendre en charge.

III.2 Analyse des programmes de mathématiques

III.2.1 Programmes de mathématiques du collège en France

Dans les programmes actuels de collège, l'entrée officielle de la translation se fait en quatrième. Elle est présentée comme une transformation et est définie en rapport au parallélogramme. L'étude des vecteurs est renvoyée en classe de troisième et est liée à la composition des translations.

CONTENUS	COMPÉTENCES EXIGIBLES	COMMENTAIRES
3. Translation	– l'image d'un point, appartenant ou non à la droite AB, – l'image d'un segment, d'une droite, d'une demi-droite, d'un cercle.	Les vecteurs seront abordés en 3e et leur étude sera reliée à celle des translations à l'occasion de la composition de ces dernières. Diverses approches expérimentales, par exemple sur des frises ou des pavages, pourront introduire la notion de translation. La translation est définie à partir du parallélogramme. Elle pourra donner lieu à des manipulations, notamment sur des quadrillages. On pourra ainsi, après un travail expérimental conduisant à mettre en évidence la conservation des longueurs, de l'alignement, des angles et des aires, justifier certaines de ces conservations.

(Programmes de mathématiques, classe de 4ème, CNDP, 2003, p. 55)

Les choix sont donc clairement explicités d'introduire la translation comme une transformation à partir d'un contexte expérimental sur les frises et les pavages. On repousse les liens avec les vecteurs à la classe suivante.

> [...] elle doit nécessairement être regardée comme une transformation, parce qu'en répétant une même translation on ne revient pas à son point de départ. Ce point de vue a paru suffisamment important pour que l'étude de la translation ne soit pas mélangée à d'autres acquisitions ; ainsi, ni les vecteurs, ni la projection, ni toute autre application n'ont été introduits en classe de 4e. Le report de la présentation de la notion de vecteur ne soulève pas de problèmes de liaison avec les autres disciplines. C'est la composition de translations différentes qui rendra utile l'introduction des vecteurs. Quant aux vecteurs, ils sont abordés en troisième. Leur étude est reliée à celle des translations par la composition de ces dernières. (Accompagnement des programmes 1998 du cycle central 5e/4e Mathématiques, **7**)

Remarquons qu'aucune allusion n'est faite dans ces programmes aux liens et aux différences possibles entre les transformations géométriques et la notion de mouvement.

Examinons maintenant comment est introduit le vecteur en 3ème :

4 - Vecteurs et translations		
Égalité vectorielle	Connaître et utiliser l'écriture vectorielle $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$ pour exprimer que la translation qui transforme A en B transforme aussi C en D.	Cette rubrique prend en compte les acquis du cycle central sur les parallélogrammes et sur la translation. Elle est orientée vers la reconnaissance, dans les couples (A,A'), (B,B'), (C,C')... de points homologues par une même translation, d'un même objet nommé vecteur. On écrira $\vec{u} = \overrightarrow{AA'} = \overrightarrow{BB'} = \overrightarrow{CC'} = ...$ L'un des objectifs est que les élèves se représentent un vecteur à partir d'une direction, d'un sens et d'une longueur.
	Lier cette écriture vectorielle au parallélogramme ABDC éventuellement aplati.	On mettra en évidence la caractérisation d'une égalité vectorielle $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$ à l'aide de milieux de [AD] et [BC] : Si $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$, alors les segments [AD] et [BC] ont le même milieu. Si les segments [AD] et [BC] ont le même milieu, alors on a $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$ et $\overrightarrow{AC} = \overrightarrow{BD}$
Composition de deux translations ; somme de deux vecteurs	Utiliser l'égalité $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AC}$ et la relier à la composée de deux translations. Construire un représentant du vecteur somme à l'aide d'un parallélogramme.	Des activités de construction conduiront à l'idée que la composée de deux translations est une translation. À partir de ce résultat, à établir ou admettre, on définira la somme de deux vecteurs. On introduira le vecteur nul $\vec{0} = \overrightarrow{AA} = \overrightarrow{BB} = ...$ ainsi que l'opposé d'un vecteur. Aucune compétence n'est exigible des élèves sur l'égalité vectorielle $\overrightarrow{AC} - \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{BC}$ ni, plus généralement, sur la soustraction vectorielle.
Coordonnées d'un vecteur dans le plan muni d'un repère	Lire sur un graphique les coordonnées d'un vecteur Représenter, dans le plan muni d'un repère, un vecteur dont on donne les coordonnées.	Les coordonnées d'un vecteur seront introduites à partir de la composition de deux translations selon les axes.
	Calculer les coordonnées d'un vecteur connaissant les coordonnées des extrémités de l'un quelconque de ses représentants.	
	Calculer les coordonnées du milieu d'un segment.	
Composition de deux symétries centrales	Savoir que l'image d'une figure par deux symétries centrales successives de centres différents est aussi l'image de cette figure par une translation.	Des activités de construction permettront de conjecturer le résultat de composition de deux symétries centrales. La démonstration sera l'occasion de revoir la configuration des milieux dans un triangle.
	Connaître le vecteur de la translation composée de deux symétries centrales.	On pourra utiliser, pour sa commodité, la notation $2\overrightarrow{AB}$ pour désigner $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AB}$. Tout commentaire sur le produit d'un vecteur par un entier est hors programme, ainsi que la notation « o » pour désigner la composée.

Extrait du (BO n°10 du 15 Oct. 1998 Hors Série, 108-109)

On voit donc que le vecteur est introduit en lien direct avec la translation. C'est directement le vecteur « libre » qui est en jeu avec la notation $\vec{u}$ pour désigner des couples de points homologues. Ce point de vue est censé favoriser l'appropriation du vecteur par la caractérisation en termes de direction-sens-longueur.

C'est essentiellement les aspects objets qui sont travaillés. Les aspects outils n'interviennent eux que dans le cadre analytique, puis dans le cas de la composée de deux symétries centrales avec un retour sur le théorème des milieux.

Dans ce programme aucune allusion n'est faite à une quelconque application en physique. Ceci est cohérent avec ce qui était annoncé dès la classe de 4ème à propos des translations, quand les commentaires sur les programmes déclarent que « le report de la présentation de la notion de vecteur ne soulève pas de problèmes de liaison avec les autres disciplines ». Il semble donc que les concepteurs des programmes aient renoncé à introduire les vecteurs en lien avec la physique. Une raison (pertinente) de ce choix peut tenir au fait qu'à ce niveau les élèves n'ont pas les connaissances de physique suffisantes pour pouvoir aborder des situations physiques où le vecteur serait un outil pertinent de résolution. En revanche la raison qui va justifier l'introduction du vecteur est interne aux mathématiques, en lien avec les translations, « c'est la composition des translations différentes qui rendra utile l'introduction des vecteurs ».

III.2.2 Programmes de mathématiques du lycée en France

Nous avons noté dans l'analyse des programmes des classes de quatrième et de troisième que l'objectif de l'introduction du calcul vectoriel était de préparer son exploitation au lycée et répondait plutôt à une cohérence interne des contenus mathématiques visés.

Nous avons aussi remarqué que cette introduction n'est fondée que sur des connaissances mathématiques antérieures sans lien avec la physique. Qu'en est-il au lycée ?

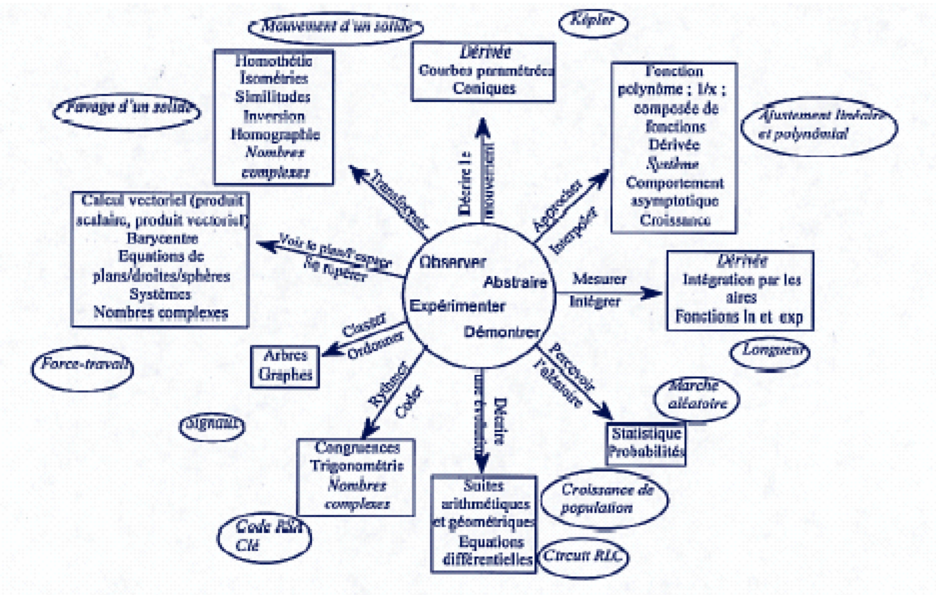
Remarquons tout d'abord, qu'en classe de seconde, classe de détermination, l'objectif déclaré par les textes officiels est d'entretenir les acquis du collège tout en limitant au minimum le calcul vectoriel et analytique.

> **Repères et vecteurs**
>
> Le programme met nettement l'accent sur la notion de repérage : on a voulu assurer à l'ensemble des élèves, quelle que soit leur orientation ultérieure, la maîtrise indispensable en ce domaine qu'exigent aussi bien l'interprétation de cartes et de plans que l'utilisation de tableurs ou la compréhension des représentations graphiques.
>
> La place du calcul vectoriel est réduite ; celui-ci est maintenu par souci de cohérence avec les
>
> choix faits dans le programme de collège, pour permettre d'entretenir les acquis (les vecteurs y sont introduits à partir des translations et ensuite définis en termes de direction, sens et longueur) et fournir l'indispensable pour résoudre les problèmes de repérage ; le choix a été fait de réserver à la classe de 1ère le développement de la géométrie vectorielle pour tous les élèves dont le cursus l'exigera.
>
> On définira la multiplication d'un vecteur par un réel indépendamment du repérage ; la définition étant acquise, ainsi que ses propriétés et sa traduction en terme de colinéarité de vecteurs ou d'alignement de points, on l'appliquera dans le seul cadre de la géométrie analytique.
>
> Les équations de droites ont été introduites en classe de troisième dans le cadre des représentations graphiques des fonctions affines. C'est ce point de vue, indispensable et suffisant pour toutes les poursuites d'études, qui a été privilégié : d'où la caractérisation analytique des droites proposée. Aucun développement n'est demandé sur la forme générale ; les élèves devront néanmoins être capables de s'appuyer sur l'équivalence d'expressions telles ($4y + 2x - 1 = 0$) et ($y = - \frac{1}{2} x + \frac{1}{4}$) pour interpréter géométriquement une résolution de système.

(Accompagnement du programme de 2nde / Juin 2000, 14)

On voit donc que la place du calcul vectoriel reste limitée à ce niveau, elle est très liée à la géométrie analytique et ne fait aucune allusion à un contexte de situations physiques.

En classe de première S, à la première page du texte du programme on trouve un schéma indiquant les différents liens interdisciplinaires caractérisant les concepts mathématiques fondamentaux du programme.



•Le noyau central du schéma résume, en quatre composantes essentielles, la spécificité de toute pratique mathématique: observation, abstraction, expérimentation, démonstration. Ces quatre composantes entretiennent entre elles des rapports dialectiques, l'une appelant l'autre ou s'appuyant sur elle, au gré du travail mathématique réalisé.

Dans tous les domaines, l'observation est un processus dynamique suscité par une problématique propre à la discipline; elle conduit à des questions et éclaire ainsi l'origine et le développement de certaines idées. L'observation ne peut être pratiquée sans disposer d'un bagage théorique; elle est d'autant plus riche que les connaissances de l'observateur sont importantes et organisées en un système cohérent. L'observation active demande de l'expérience et concourt en retour à la forger.

Schéma extrait du B.O N°7 Hors Série du 31 Août 2000.

Le schéma initial du programme propose une représentation simplifiée des sciences mathématiques. Il a pour fonction de résumer et structurer l'information traitée et permet d'en avoir une vision non linéaire ; il peut aider les élèves, les parents et toutes les personnes intéressées par le système éducatif à situer l'enjeu de l'enseignement des mathématiques au lycée. À ce titre, il participe à un travail de vulgarisation aujourd'hui absolument nécessaire. Ce schéma s'adresse aussi à tous les enseignants, par son invitation à choisir des problématiques suffisamment riches, issues de la réalité ou de domaines déjà familiers aux élèves – mathématiques ou autres – (c'est nous qui soulignons), pour aboutir à de nouveaux concepts et à des résultats nouveaux : les élèves doivent pouvoir se rendre compte que l'étude d'une notion se fait à partir de questions et permet d'élaborer des éléments de réponse. Pour information, on rejoint ici le point de vue adopté par des experts de l'OCDE qui définissent « la culture mathématique (mathematical litteracy)» comme «l'aptitude d'un individu à identifier et à comprendre les divers rôles joués par les mathématiques dans le monde, à porter des jugements fondés à leur propos, et à s'engager dans des activités mathématiques, en fonction des exigences de sa vie présente et future en tant que citoyen constructif, impliqué et réfléchi» (Programme international pour le suivi des acquis des élèves – PISA – visant à évaluer régulièrement les savoirs et compétences acquis par les jeunes de quinze ans d'une trentaine de pays).

(Accompagnement de la classe de première S, 46)

C'est un schéma qui résume ainsi les différentes activités mathématiques nécessaires à une formation scientifique en première S et en terminale S.

Remarquons que dans ce schéma, on retrouve en lien avec les vecteurs des compétences avant tout liées à la maîtrise de l'espace : « voir le plan/l'espace – se repérer ». Mais apparaît aussi un lien plus diffus avec Force-Travail. En fonction de ce qui est dit dans le texte d'accompagnement des programmes, reste à savoir ce qui sera effectivement fait dans les classes permettant de mettre en jeu des situations suffisamment riches issues de la physique et permettant de voir l'utilité du vecteur.

Les thèmes de ce programme en rapport avec les concepts de vecteur et de translation s'organisent autour des tâches suivantes : Opérer sur les vecteurs de l'espace par extension des opérations sur les vecteurs du plan ; introduire la notion de barycentre et de ses propriétés. Le tableau suivant est un extrait de ce programme pour la géométrie vectorielle.

Géométrie vectorielle Calcul vectoriel dans l'espace.	On étendra à l'espace les opérations sur les vecteurs du plan. On introduira la notion de vecteurs coplanaires.	
Barycentre de quelques points pondérés dans le plan et l'espace. Associativité du barycentre.	On utilisera la notion de barycentre pour établir des alignements de points, des points de concours de droites.	La notion de barycentre, utile en physique et en statistique, illustre l'efficacité du calcul vectoriel. On évitera toute technicité.
Produit scalaire dans le plan ; définition, propriétés.	Propriétés de bilinéarité, de symétrie et expression analytique dans un repère orthonormal.	On n'étendra pas le produit scalaire à l'espace. On pourra faire le lien avec le travail d'une force.
Applications du produit scalaire : projeté orthogonal d'un vecteur sur un axe ; calculs de longueurs.	Équation d'une droite à l'aide d'un vecteur normal, équation d'un cercle défini par son centre et son rayon ou par son diamètre. Calculs d'angles, de longueurs et d'aires sur des figures planes en liaison avec le produit scalaire ; on établira et utilisera la formule dite d'Al Kashi, le théorème de la médiane et les formules d'addition et de duplication pour les fonctions cosinus et sinus.	Pour certains exercices, il pourra être utile de disposer des formules reliant les sinus des angles, les côtés et l'aire d'un triangle.
Transformations Translations et homothéties dans le plan et l'espace : définitions ; image d'un couple de points ; effet sur l'alignement, le barycentre, les angles orientés, les longueurs, les aires et les volumes ; image d'une figure (segment, droite, cercle).	Toutes les transformations connues seront utilisées dans l'étude des configurations, pour la détermination de lieux géométriques et dans la recherche de problèmes de construction, en particulier au travers des logiciels de géométrie.	Les transformations planes abordées en collège (translation, symétrie axiale, rotation) n'ont pas à faire l'objet d'un chapitre particulier.
Lieux géométriques dans le plan.	Les logiciels de géométrie dynamique seront utilisés pour visualiser certains lieux. On choisira quelques exemples mettant en évidence la diversité des méthodes de recherche (propriétés des configurations, vecteurs, produit scalaire, transformations, géométrie analytique). On veillera à traiter des cas nécessitant de démontrer une double inclusion.	La problématique des lieux géométriques sera présente dans tous les paragraphes de géométrie. Elle ne fera pas l'objet d'un chapitre indépendant. Il s'agit de ne pas s'en tenir à une simple observation mais de mobiliser les connaissances pour établir mathématiquement diverses caractéristiques géométriques. On s'appuiera, le cas échéant, sur le caractère bijectif des transformations ou sur une démarche d'analyse-synthèse.

Extrait du B.O N°7 Hors Série du 31 Août 2000.

On trouve dans la colonne des commentaires sur le produit scalaire : « On pourra faire le lien avec le travail d'une force » (ce qui est effectivement au programme de la même classe en physique). C'est la seule allusion, qui reste une seule potentialité, à un quelconque lien avec la physique. De plus, rien n'est dit sur les liens ou différences entre transformations et mouvement, bien que les premières soient explicitement liées à une idée de dynamique, qui peut renforcer la conception dynamique des transformations, qui est la source de la confusion entre translation et mouvement de translation.

III.2.3 Conclusion sur l'analyse des programmes de mathématiques en France

En conclusion sur les programmes de mathématiques du collège et du lycée sur les vecteurs et la translation, on voit que ces concepts ont une place qui a été réduite ces dernières années. Le vecteur apparaît de plus en plus lié au cadre analytique. La référence à la physique est quasi inexistante, sauf un peu en première S. Enfin rien n'est signalé, à aucun niveau, sur les liens et différences entre transformation géométrique et mouvement. Nous verrons plus loin comment cela est relayé dans les manuels.

III.2.4 Programmes de mathématiques du collège au Sénégal

Voici les objectifs généraux attendus des programmes du premier cycle (collège) :

- Assurer la continuité de l'enseignement des mathématiques déjà entamé;
- Relier les mathématiques aux activités de la vie : faire le lien entre les connaissances construites et les connaissances mathématiques, l'exploration et la valorisation de l'environnement socioculturel sont conseillées ;
- Développer chez l'élève les capacités de raisonnement en favorisant notamment l'accroissement de son habileté à observer, à analyser, à émettre des hypothèses et à les vérifier par une démarche rigoureuse inductive ou déductive ;
- Développer son aptitude à une bonne communication basée sur une expression écrite ou orale concise claire et précise ainsi que sur les qualités d'ordre, de soin, et de rationalité;
- Mobiliser ses acquis de base pour résoudre des problèmes. La résolution de problèmes est une trame de fond de tout enseignement de mathématiques.

(Programmes de mathématiques du Premier Cycle, 2006, p. 3)

Reste à savoir si ce lien entre les mathématiques et les autres activités de la vie évoqué ici est effectivement pris en charge dans la réalité, au moins en ce qui concerne les notions qui nous intéressent ici.

Nous allons à présent nous attacher à analyser les différentes parties des programmes qui correspondent à la translation et aux vecteurs.

L'étude de la notion de vecteur est abordée pour la première fois au collège en classe de quatrième où elle est associée à la notion de translation dans la rubrique *vecteurs et translation* du thème *activités géométriques.* Le programme de ce niveau d'étude fait une large place à ces deux notions.

Le fait d'associer les deux notions dans le programme peut laisser supposer que l'une des notions est subordonnée à la définition de l'autre, cependant, nous verrons que les sujets sont traités indépendamment l'un de l'autre. Le programme aborde d'abord la translation qui est définie à partir du parallélogramme vu dans les classes antérieures, mais les auteurs précisent dans les commentaires qu'on pourra la présenter comme une application du plan dans lui-même.

V. TRANSLATIONS ET VECTEURS		
Contenus	**Commentaires**	**Compétences exigibles**
1) Droites de même direction Sens sur une direction	• Définition d'une translation à partir du parallélogramme.	
2) Translation : définition et procédure de construction	• La translation est introduite par des activités de construction. • On pourra la présenter comme une application du plan dans lui-même. • On veillera à présenter des constructions avec plusieurs points et leurs images pour aider progressivement à percevoir la translation comme une transformation ou un déplacement.	• Construire l'image par une translation: - d'un point ; - d'une droite ; - d'une demi-droite, d'un angle ; - d'un segment, d'un triangle ; - d'un cercle. • Reconnaître une translation dans une configuration
3) Propriétés d'une translation : **a)** - Dans une translation l'image d'un segment est un segment qui lui est parallèle et de même longueur. **b)** - Dans une translation, l'image d'une droite est une droite qui lui est parallèle. **c)** - Dans une translation l'image d'une demi-droite est une demi-droite parallèle et de même sens. **d)** - Dans une translation, l'image d'un cercle est un cercle de même rayon, son centre est l'image du centre. **e)** - Une translation conserve l'alignement, les longueurs, les angles, les aires, le parallélisme et l'orthogonalité.	• Ces propriétés pourront être dégagées à partir d'activités de construction.	• Connaître et utiliser les propriétés d'une translation pour justifier l'alignement de 3 points. • Connaître et utiliser les propriétés d'une translation pour justifier une égalité de distances, une égalité d'angles, le parallélisme de droites, la perpendicularité de droites.
f) Direction, sens et longueur d'un vecteur. Notation. Vecteur nul (vecteur de longueur nulle, pas de direction pas de sens)	• On ne fera pas une présentation théorique des vecteurs utilisant la notion de relation d'équivalence. • On mettra en évidence la direction, le sens et la longueur.	
g) Vecteurs égaux : deux vecteurs sont égaux s'ils ont même direction, même sens et même longueur. **h)** Étant donnés un vecteur u et un point A du plan, il existe un point B unique du plan tel que : $\overrightarrow{AB} = \vec{u}$ **5) Parallélogramme et Vecteur** **a)** - Si $ABCD$ est un parallélogramme, alors $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{DC}$ **b)** - Si $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{DC}$ et A, B, C, D non alignés, alors $ABCD$ est un parallélogramme. **6) Milieu d'un segment et Vecteur** **a)** - Si un point I est le milieu d'un segment $[AB]$ alors $\overrightarrow{AI} = \overrightarrow{IB}$ **b)** - Si des points I, A et B sont tels que : $\overrightarrow{AI} = \overrightarrow{IB}$ alors I est le milieu du segment $[AB]$.	• On utilisera ces propriétés pour entraîner les élèves à faire des démonstrations	• Utiliser l'égalité de deux vecteurs pour justifier : - une égalité de distances - le parallélisme de droites. • Étant donnés un vecteur $\vec{u}$ et un point A, construire le point B tel que $\overrightarrow{AB} = \vec{u}$ • Utiliser l'égalité de deux vecteurs pour montrer qu'un quadrilatère est un parallélogramme. • Utiliser l'égalité de deux vecteurs pour justifier qu'un point est le milieu d'un segment.

Extrait du programme de quatrième (CNM, 2006, pp.70-72)

Comme on le voit dans les compétences déclinées ci-dessus, la notion de translation apparaît dans cette première rencontre comme un nouvel outil pour résoudre des problèmes de géométrie : alignement, distances, angles, parallélisme de droites, droites perpendiculaires. Notons qu'il est dit qu'on doit « aider les élèves à percevoir progressivement la translation comme une transformation ou un déplacement ». Cette dernière idée renforce la conception dynamique de la translation, mais aucun commentaire n'est fait sur les liens et différence avec le mouvement de translation. C'est toutefois logique, vu que cette notion n'est abordée en physique que deux ans plus tard. C'est donc surtout à ce moment-là que le problème de la confusion pourra se poser.

Les vecteurs sont introduits de façon très laconique en lien avec les translations, mais c'est la caractérisation par direction – sens – longueur qui est mise en avant. La notation $\vec{u}$ est introduite comme si c'était une évidence et le lien avec les translations n'est pas explicité. On peut se demander quelle est la pertinence de l'introduction de la notation $\vec{u}$ et comment les professeurs arriveront à faire vivre la propriété «Étant donnés un vecteur $\vec{u}$ et un point A du plan, il existe un point B unique du plan tel que : $\overrightarrow{AB} = \vec{u}$ » et de quels moyens ils disposent pour la justifier.

Comme on le voit, le principal objectif de l'introduction des vecteurs au premier cycle en quatrième est de fournir un outil efficace de résolution de problèmes de géométrie plane. Ces programmes permettent de mieux prendre en compte l'aspect outil des notions de vecteur et de translation dans les mathématiques.

Enfin, aucun lien avec la physique n'est évoqué.

En $3^{ème}$, les vecteurs apparaissent dans la rubrique *Activités géométriques.* On y étudie trois sujets : l'addition vectorielle, la multiplication d'un vecteur par un réel et les vecteurs colinéaires.

V. VECTEURS		
1) Addition vectorielle a) Théorème et définition Soient deux vecteurs $\vec{u}$ et $\vec{v}$. Pour tout point A du plan si C est l'image de A par la translation de vecteur $\vec{u}$ suivie de la translation de vecteur $\vec{v}$, le vecteur $\vec{w} = \overrightarrow{AC}$ est le vecteur somme de $\vec{u}$ et $\vec{v}$. On note $\vec{w} = \vec{u} + \vec{v}$.	• On fera remarquer que le vecteur $\vec{w} = \overrightarrow{AC}$ ne dépend pas du point A choisi.	• Construire le vecteur somme de deux vecteurs donnés.
b) Relation de Chasles Soient trois points quelconques A, B, C du plan. On a : $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AC}$	• On entraînera les élèves à construire des sommes de vecteurs à partir d'exercices variés.	• Connaître et utiliser la relation de Chasles.
2) Multiplication d'un vecteur par un nombre réel a) Définition : b) Propriétés : k et k' étant deux réels donnés $1\vec{u} = \vec{u}$ $k(\vec{u} + \vec{v}) = k\vec{u} + k\vec{v}$ $k(k'\vec{u}) = (kk')\vec{u}$ $(k + k')\vec{u} = k\vec{u} + k'\vec{u}$ c) Vecteurs de même direction		• Construire le vecteur produit d'un vecteur par un réel donné. • Connaître et utiliser les propriétés de la multiplication d'un vecteur par un réel.

Extrait du programme de troisième (CNM, 2006, p.92)

On voit ici que le lien entre vecteur et translation, dont on vient de constater qu'il n'était pas explicitement introduit dans les programmes de la classe précédente est ici supposé acquis. Ceci montre qu'il y a un problème de rédaction dans les programmes de la classe de $4^{ème}$.

L'addition vectorielle est ici reliée à la composition des translations, comme c'est le cas en France au même niveau.

Cette présentation de l'addition vectorielle, qui s'appuie sur les translations est équivalente à la relation de Chasles, mais la relation de Chasles est citée ensuite sans lien apparent avec ce qui précède. De plus, aucun commentaire n'est fait à propos de méthodes de construction effective de la somme de deux vecteurs.

On peut remarquer à travers cette présentation de l'addition vectorielle, une volonté des auteurs du programme de faire voir que cette nouvelle opération sur les vecteurs s'appuie sur la composition des translations, ce qui permet de « régler » la question du représentant. Cependant, on peut s'interroger sur la pertinence de cette présentation vue que la relation entre les notions de translation et de vecteur reste implicite aussi bien en classe de quatrième qu'en classe de troisième. De fait, la question de l'unicité de la construction, quel que soit le point de départ reste à démontrer, en l'absence d'un théorème antérieur sur la nature de la composée de deux translations. Il est bien dit dans les commentaires de faire remarquer que la somme est indépendante du point A, mais aucune démonstration de ce fait ne semble être exigée.

Nous avons là un point sensible de l'enseignement des vecteurs et des translations, comme le souligne Pressiat (1999) à propos des programmes français de 1993 :

> Il a été constaté que le lien entre la composition des translations et l'addition vectorielle est peu travaillé pour définir cette dernière (ceci revient à inverser les rôles tenus par ces deux objets dans les transpositions didactiques antérieures, inversion que de nombreux professeurs semblent avoir trouvée peu légitime du point de vue du savoir mathématique). Lors des évaluations qui ont été faites, un élève sur deux en moyenne confond « la règle du parallélogramme » avec la « relation de Chasles » en donnant $\overrightarrow{BC}$ ou $\overrightarrow{CB}$ comme résultat pour la somme $\overrightarrow{AB}+\overrightarrow{AC}$: pour un tel élève, construire la somme, c'est « fermer le triangle » dont deux côtés sont déjà tracés. (Ibid, p. 244)

Au Sénégal, la règle du parallélogramme n'apparaît pas explicitement dans les programmes à ce niveau, alors que c'est bien la construction la plus utilisée pour la somme des forces en physique.

Les auteurs abordent ensuite la multiplication d'un vecteur par un réel et ses propriétés.

Les compétences exigées sur les vecteurs à ce niveau concernent la construction graphique de représentants de vecteurs (bien que la distinction entre un vecteur et ses représentants soit passée sous silence) et l'utilisation des vecteurs pour la résolution de problèmes concernant les configurations (alignement et parallélisme) :

> Construire le vecteur somme de deux vecteurs donnés.
>
> Connaître et utiliser la relation de Chasles.
>
> Construire le vecteur produit d'un vecteur par un réel donné.
>
> Connaître et utiliser les propriétés de la multiplication d'un vecteur par un réel.
>
> Utiliser une égalité vectorielle pour démontrer :
>
> - la colinéarité de vecteurs ;
> - le parallélisme de droites ;
> - l'alignement de points.
>
> (CNM, 2006, 92-93)

On peut noter aussi qu'aucune des propriétés de l'addition vectorielle n'est présentée alors que celles relatives à la multiplication d'un vecteur par un réel sont données de façon très formelle et identique aux axiomes de la structure d'espace vectoriel.

Les translations en classe de troisième se séparent des vecteurs pour se retrouver dans l'introduction générale des transformations du plan, et elles ne font l'objet d'aucune compétence exigible. Le vecteur prend donc son indépendance de la translation et se constitue ainsi en thème autonome mais servant d'outil pour la résolution de problèmes géométriques liés aux configurations planes. Cette tendance va se confirmer dans le programme de seconde S que nous allons examiner au paragraphe suivant

III.2.5 Programmes de mathématiques du lycée au Sénégal

Comme au premier cycle, les vecteurs occupent une place importante dans la classe de seconde scientifique. Ils apparaissent dans la rubrique *Géométrie plane* de la partie *Activités géométriques* où leur influence semble plus importante comme outil mathématique de résolution de problèmes de géométrie. Dès l'introduction générale de ce programme, le ton est donné sur deux objectifs majeurs de l'enseignement des objets géométriques qui doivent être étudiés non comme des objets en soi mais comme des outils pour l'étude des configurations planes et pour un travail interdisciplinaire:

> La résolution de problèmes reste, comme au premier cycle, un objectif majeur de ce programme. Ces problèmes offriront l'occasion d'un travail interdisciplinaire bénéfique pour un développement du savoir unitaire de l'élève. […]
>
> En géométrie plane, l'objectif essentiel du programme est l'utilisation des outils vectoriel, analytique, métrique et des transformations. Elle se fera dans des exercices variés de calculs, de démonstrations, de recherches de lieux géométriques et de constructions géométriques. L'étude des configurations planes sera poursuivie. (CNM, 2006, p.6)

Cependant, comme on peut le constater sur le tableau suivant, la compétence exigible liée à ce travail interdisciplinaire pour ce qui concerne les vecteurs, (*On montrera l'utilité de l'outil vectoriel dans d'autres disciplines)* semble aller de soi, comme si c'était une évidence.

Par ailleurs, pour mettre en garde contre tout abus du formalisme algébrique sur le calcul vectoriel, des instructions très précises sont décrites à l'intention du professeur :

> Les élèves manipulent les vecteurs depuis la $4^{ème}$. Il n'est donc pas question dans ce chapitre de faire des activités d'introduction du vecteur, encore moins d'en proposer une définition.

> Le professeur fera rapidement le point des connaissances de l'élève à partir d'activités bien choisies. Il renforcera ces acquis avec la notion de combinaisons linéaires. (Ibid, p.7)

Le professeur évitera tout abus de calcul analytique ou vectoriel formel. Il s'efforcera plutôt à exercer les élèves à l'utilisation de l'outil vectoriel pour les démonstrations et la résolution des problèmes de géométrie.

Les contenus relatifs au thème des vecteurs dans ce programme comportent deux parties :

1) Consolidation des connaissances du 1er cycle sur les vecteurs ;
2) Barycentre.

Contenus	Commentaires	Compétences exigibles
1) Consolidation des connaissances du 1er cycle sur les vecteurs : ▪ égalité ▪ addition ▪ multiplication d'un vecteur par un réel ▪ colinéarité	• On montrera l'utilité de l'outil vectoriel dans d'autres disciplines. • On utilisera des combinaisons linéaires de vecteurs sans en donner la définition. Elles permettront en particulier de faire des décompositions de vecteurs.	•Construire une combinaison linéaire de vecteurs. •Décomposer un vecteur à l'aide de la relation de Chasles. • Passer de la relation vectorielle $\overrightarrow{AC} = \lambda.\overrightarrow{AB}$ à la relation algébrique $AC = \lvert\lambda\rvert .AB$. • Utiliser les relations vectorielles pour démontrer des propriétés géométriques (distance, alignement, milieu, parallélisme).
2) Barycentre. Barycentre de deux, trois points pondérés. • définition. • propriétés (commutativité, associativité, homogénéité)	• L'introduction du barycentre peut se faire en relation avec la physique ou des situations de la vie courante. • On fera la réduction du vecteur : $\vec{V} = \alpha\overrightarrow{MA} + \beta\overrightarrow{MB} + \gamma\overrightarrow{MC}$	• Connaître le barycentre de 2 ou 3 points et savoir utiliser les propriétés. • Construire le barycentre de 2 points ou 3 points.

Extrait du programme de seconde S (CNM, 2006, pp.7-8)

Nous nous interrogerons bien sûr sur la viabilité dans les classes de l'injonction à montrer l'utilité de l'outil vectoriel dans les autres disciplines. En effet, aucun contenu et aucune compétence exigible ne lui sont associés alors qu'à ce niveau les élèves rencontrent en cours de physique deux notions modélisées par les vecteurs (la vitesse et la force). On peut remarquer aussi que la notion de combinaison linéaire n'est évoquée que comme technique de décomposition de vecteurs sans être définie dans les contenus, seule la notion de barycentre paraît vraiment nouvelle pour ce qui concerne le thème des vecteurs dans le programme de seconde.

Dans les classes de première S et de terminale S, les contenus relatifs aux vecteurs et aux barycentres sont essentiellement les généralisations à la dimension trois. En particulier, le produit vectoriel est introduit en terminale S.

III.2.6 Conclusion sur l'analyse des programmes de mathématiques au Sénégal

L'étude des vecteurs au collège et au lycée met l'accent sur l'utilisation de l'acquis intuitif de l'élève dans les classes de sixième et de cinquième en géométrie plane qui privilégie les configurations sur les notions mathématiques à étudier. En classes de quatrième, troisième et seconde la même tendance est observée et en ce qui concerne les vecteurs, l'accent est alors mis plutôt sur les représentants et les constructions graphiques associées que sur la notion même de vecteur. On note ici que l'aspect outil des concepts vectoriels prime sur leur aspect objet, en particulier dans le lien avec la translation. L'injonction des programmes dans ce sens est claire : *On ne fera pas une présentation théorique des vecteurs utilisant la notion de relation d'équivalence.*

Cette position est cohérente avec les options épistémologiques et didactiques décrites par les concepteurs des programmes dans leur présentation générale :

> - éviter de fixer d'emblée le vocabulaire et les notations savantes,
>
> - prendre conscience de l'écart entre le savoir savant et le savoir à enseigner, ce qui nous amène à identifier et prévoir les subtilités qu'il est préférable de taire, les démarches rigoureuses qui sont à remplacer par les arguments acceptables et accessibles aux élèves,
>
> - donner du sens aux concepts dans le champ conceptuel de l'élève,
>
> - accepter la pluralité de sens de certains concepts étudiés, le contexte d'utilisation faisant la différence. (CNM, p. 4)

Cependant, comme nous l'avons constaté dans l'analyse de l'évolution de l'enseignement des vecteurs dans les programmes français, les programmes sénégalais restent aussi attachés au modèle de l'algèbre linéaire pour l'enseignement du vecteur. Même s'il a disparu officiellement des programmes du secondaire, il continue de marquer l'organisation mathématique autour du vecteur. L'importance accordée à la multiplication par un scalaire en classe de seconde en atteste. On continue de citer si ce n'est de faire démontrer sans le dire les axiomes de la structure linéaire (voire la liste des propriétés de la multiplication), alors que des aspects algébriques plus spécifiques du vecteur géométrique, comme le lien avec le théorème de Thalès, sont passés sous silence. La disparition de toute niche algébrique opère toujours comme un manque, qu'une fois rejetée (à juste titre) la référence à la structure d'espace vectoriel, rien n'est venu combler. La niche « outil pour les autres disciplines », paraît difficile à faire vivre. En effet, peu de situations physiques sont utilisables en troisième ou même en seconde, dans lesquelles le formalisme vectoriel soit vraiment pertinent. Le plus souvent, on trouve dans les manuels des habillages plus ou moins cachés de situations pseudo-physiques. L'élève en est réduit à comprendre ce qu'on veut lui faire faire, faute de pouvoir avoir vraiment de prise sur la situation physique en jeu.

III.3 Analyse de manuels de mathématiques

III.3.1 Introduction

En complément de l'analyse des programmes que nous venons de mener dans les deux pays concernant l'enseignement en mathématiques des notions de vecteur et de translation, nous allons à présent analyser comment ces programmes sont relayés dans les manuels. Nous chercherons surtout à voir les allusions possibles dans l'enseignement sur les relations entre mathématiques et physique à propos des vecteurs et éventuellement des translations. D'après Rouchier (2001)

> Leur organisation et leur rédaction (des manuels) doivent satisfaire un certain nombre de contraintes. Parmi celles-ci, trois nous paraissent jouer un rôle essentiel : la première tient au respect des curriculums et des contenus des programmes; la deuxième tient aux conceptions dominantes concernant les apprentissages et leur organisation, qui doivent trouver des formes de réalisation dans les manuels en question ; la troisième tient à leur ergonomie. Ils doivent pouvoir être employés dans le travail quotidien de la classe. (Op. cité, 145-146)

L'examen de ces manuels, où les professeurs prennent la quasi-totalité des exercices d'entraînement ou d'évaluation, nous permettra d'avancer un certain nombre d'hypothèses.

Cette étude à travers l'analyse de manuels est une donnée indispensable pour mieux identifier le rapport institutionnel à un savoir donné.

Notre propos étant avant tout de voir les ouvertures possibles sur la physique dans les différents niveaux de classes où le vecteur intervient. Il nous a semblé plus intéressant de balayer un nombre assez large de manuels, plutôt que de nous attacher à un manuel en priorité choisi au hasard.

Nous avons ainsi analysé 7 manuels de 3ème (éditions 2003) et 6 manuels de 2nde (éditions 2004).

Pour chacun de ces manuels, dans les activités, les TP, le cours ou les exercices, notons déjà qu'il n' y a aucune allusion aux liens ou aux différences entre transformations géométriques et mouvement. Nous avons ensuite relevé s'il y avait ou non une ou plusieurs situations de physique en lien avec les vecteurs.

III.3.1.1 Manuels de Troisième

Comme c'est stipulé dans le programme, tous les manuels analysés du niveau de la troisième relient la notion de vecteur avec le concept de translation et introduisent l'addition vectorielle en s'appuyant sur la composée de deux translations.

Nous avons regroupé dans le tableau ci-dessous les différentes situations physiques modélisées par le vecteur présentes dans les manuels analysés et observer comment les auteurs font vivre ces dernières et quelles sont leurs raisons d'être dans l'organisation didactique de ces manuels.

Collection Editeur	***Grandeurs physiques repérées***	***Mise en scène***
CINQ SUR CINQ Hachette	forces	Situations présentées en fin du Chapitre 11 p.228
DIABOLO Hachette	forces	Illustration en fin de chapitre
DIMATHEME Didier	forces et vitesse	Chapitre 12 page 204 : Dans la rubrique intitulée « d'une discipline à l'autre : mathématiques et sciences physiques », les auteurs du manuel illustrent l'utilisation du vecteur dans la modélisation des concepts de force et de vitesse par deux situations physiques.
MULTIMATH Hatier	Poids	exercice sur le poids d'un objet pour illustrer le lien entre vecteur et force.
TRIANGLE Hatier		Aucune situation empruntée à la physique pour illustrer l'usage du vecteur.
PETITS MANUELS Hatier		Idem.
TRAPEZE Bréal		Idem.

Situations physiques dans différentes collections de mathématiques de troisième en France.

La collection DIMATHEME propose une rubrique intitulée *« d'une discipline à l'autre : mathématiques et sciences physiques »* qui nous paraît avoir une ambition différente des autres. Nous allons la prendre comme objet d'étude dans la suite.

III.3.1.2 Manuels de Seconde

Collection Editeur	*Grandeurs physiques repérées*	*Mise en scène*
REPERES Hachette	Forces et vitesse	C'est sur les deux dernières pages à la fin du chapitre que les auteurs présentent des situations physiques modélisées par des vecteurs.
DECLIC Hachette	Forces	Dès la première page du chapitre 6 du manuel portant sur les vecteurs, les auteurs introduisent une situation physique sur les leviers et les mobiles mettant en oeuvre l'utilisation du vecteur en physique. De plus, à la fin du chapitre les auteurs nous présentent sous forme de travaux pratiques différentes situations physiques mettant en évidence les liens entre vecteur et forces.
AXIALE Hatier		Aucune situation illustrant les liens entre vecteur et concepts physiques.
IREM POITIERS		idem
MODULO Didier		idem
ABSCISSE Magnard		idem

Situations physiques dans différentes collections de mathématiques de seconde en France.

Dans la collection DECLIC, il est proposé dès la première page du chapitre 6 du manuel portant sur les vecteurs une situation physique sur les leviers et les mobiles mettant en œuvre l'utilisation du vecteur en physique. De plus, à la fin de ce chapitre, les auteurs de ce manuel donnent différentes situations dans la rubrique des travaux pratiques pour illustrer les liens entre vecteurs et forces. Cette collection semble donc avoir comme la collection DIMATHEME de troisième une ambition différente des autres pour ce qui est des liens entre mathématiques et physique. Nous allons la prendre comme objet d'étude dans la suite.

Moins de 50% des collections étudiées, soit exactement 6 sur 13, présentent une situation illustrant les liens entre vecteurs et grandeurs physiques vectorielles. De plus, il est à noter que la plupart du temps, ces situations ne semblent pas occuper une place essentielle dans le projet des manuels. En effet, les quelques collections qui en proposent les renvoient de manière systématique en fin de chapitre sous forme d'exercices corrigés ou de travaux pratiques. Notons aussi que c'est seulement dans deux collections sur six de la classe de seconde que nous retrouvons des situations où les vecteurs sont présentés comme des modèles permettant de décrire des objets physiques.

Ainsi, il apparaît que le lien entre mathématiques et physique est peu abordé, et encore de façon assez anecdotique. Cependant, il l'est dans quelques manuels, ce qui présente une situation nouvelle.

Nous allons à présent analyser les deux cas présents dans les manuels de troisième de la collection DIMATHÈME édition Didier 2003 et de seconde de la collection DECLIC édition Hachette 2004

Structuration des deux manuels

L'organisation didactique qui semble présider à la conception de ces deux manuels s'articule autour de six rubriques, ceci constitue une structure classique dans la mesure où on retrouve les trois parties traditionnelles : activités, cours, exercices. Ces cinq rubriques apparaissent dans chaque chapitre. Cette organisation didactique relève plutôt des contraintes venues du système d'enseignement répondant ainsi aux instructions actuelles qui sont orientées vers la description des activités des élèves. Comme le remarque Rouchier (2001) à propos de l'analyse d'un manuel de mathématiques :

> Cette référence est en accord avec la lettre des instructions officielles, qui trouvent leur traduction à travers la promotion d'une organisation didactique générale centrée sur une dualité opératoire entre activités et institutionnalisation. Cette organisation est destinée à permettre un enseignement centré sur l'élève. Dans cette perspective, l'étude d'un thème mathématique du programme s'effectue selon un cycle *activité, institutionnalisation (définition du savoir), exercices d'application et d'entraînement, évaluation*. (Op. cité, p.148)

Analyse des différentes séquences du manuel de 3e Dimathéme 2003

La première rubrique, intitulée « *avant de démarrer* » rassemble les prérequis nécessaires pour aborder un nouveau chapitre.

Une deuxième rubrique propose des *activités* qui permettent de motiver l'introduction et la découverte de notions principales du cours, sous forme de problèmes « concrets » à résoudre. C'est le moment de la première rencontre avec les notions visées par le chapitre.

Dans la troisième rubrique appelée « *retenir le cours* », les auteurs présentent les résultats exigibles du programme en illustrant par plusieurs exemples les notions fondamentales. C'est ici que les auteurs donnent les définitions et les propriétés des différentes notions à retenir. Cette rubrique correspond au moment de l'institutionnalisation.

Les deux rubriques suivantes que les auteurs désignent par *Connaître les outils et choisir les outils* s'attachent à la dimension outil (Douady 1986) de la connaissance. *Connaître les outils* est l'étape qui donne la marche à suivre pour acquérir les savoir-faire exigibles du programme que sont le calcul, la construction et le raisonnement déductif. Dans *Choisir les outils* les auteurs entendent proposer des exercices-types résolus à valeur de méthode.

La dernière rubrique concerne les *exercices* répartis selon une progression allant d'exercices plus simples en passant par des QCM jusqu'aux exercices et problèmes de synthèse. C'est dans cette rubrique que les auteurs proposent la sous rubrique *d'une discipline à l'autre* qui est sans doute d'un intérêt particulier pour le sujet qui nous préoccupe ici.

Dans le manuel en question, c'est le chapitre 12 intitulé *Vecteurs et translations* qui va faire l'objet d'une analyse selon la structuration décrite précédemment.

Avant de démarrer

Il s'agit ici de mettre les élèves en situation de rappel à travers des Questions à Choix Multiples (QCM) par rapport à la notion de translation déjà rencontrée en quatrième.

Activités

C'est la première rencontre avec les notions visées par le chapitre que les auteurs déclinent en deux parties : *Vecteurs et composée de deux transformations.* Dans la partie *Vecteurs* les auteurs essaient de lier la notion de vecteur à celle de translation. L'égalité de vecteurs est aussi abordée dans l'objectif de définir un vecteur par ses trois caractéristiques de direction, de sens et de norme. Quant à *la composée de deux transformations,* les auteurs entendent introduire l'addition des vecteurs par la composée de deux translations.

Retenir le cours

Cette partie est structurée en quatre séquences reprenant les différentes notions rencontrées dans les *activités*. C'est ici que les définitions et les propriétés sur les vecteurs sont exposées.

RETENIR LE COURS

1 Vecteurs

DÉFINITION

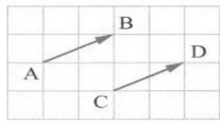
La translation de vecteur $\overrightarrow{AB}$ est la translation qui transforme A en B.

Il ne faut pas confondre les notations (AB), AB et $\overrightarrow{AB}$. En effet :
- (AB) désigne la droite passant par les points A et B ;
- AB désigne la longueur du segment [AB] ;
- $\overrightarrow{AB}$ désigne le vecteur de la translation qui transforme A en B.

2 Égalité de vecteurs

PROPRIÉTÉS

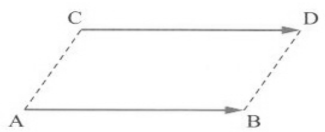
$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$ revient à dire que :
- **$\overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{CD}$ ont la même direction**
(c'est-à-dire que les droites (AB) et (CD) sont parallèles) ;
- **$\overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{CD}$ ont le même sens ;**
- **$\overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{CD}$ ont la même longueur.**



PROPRIÉTÉS

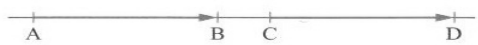
$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$ revient à dire que :
- **D est l'image de C par la translation de vecteur $\overrightarrow{AB}$;**
- **ABDC est un parallélogramme (éventuellement aplati) ;**
- **[AD] et [BC] ont le même milieu.**

Cas où A, B et C ne sont pas alignés



ABDC est un parallélogramme.

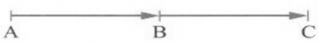
Cas où A, B et C sont alignés



ABDC est un parallélogramme aplati.

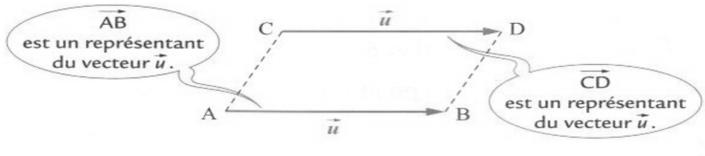
PROPRIÉTÉ

$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{BC}$ revient à dire que B est le milieu de [AC].

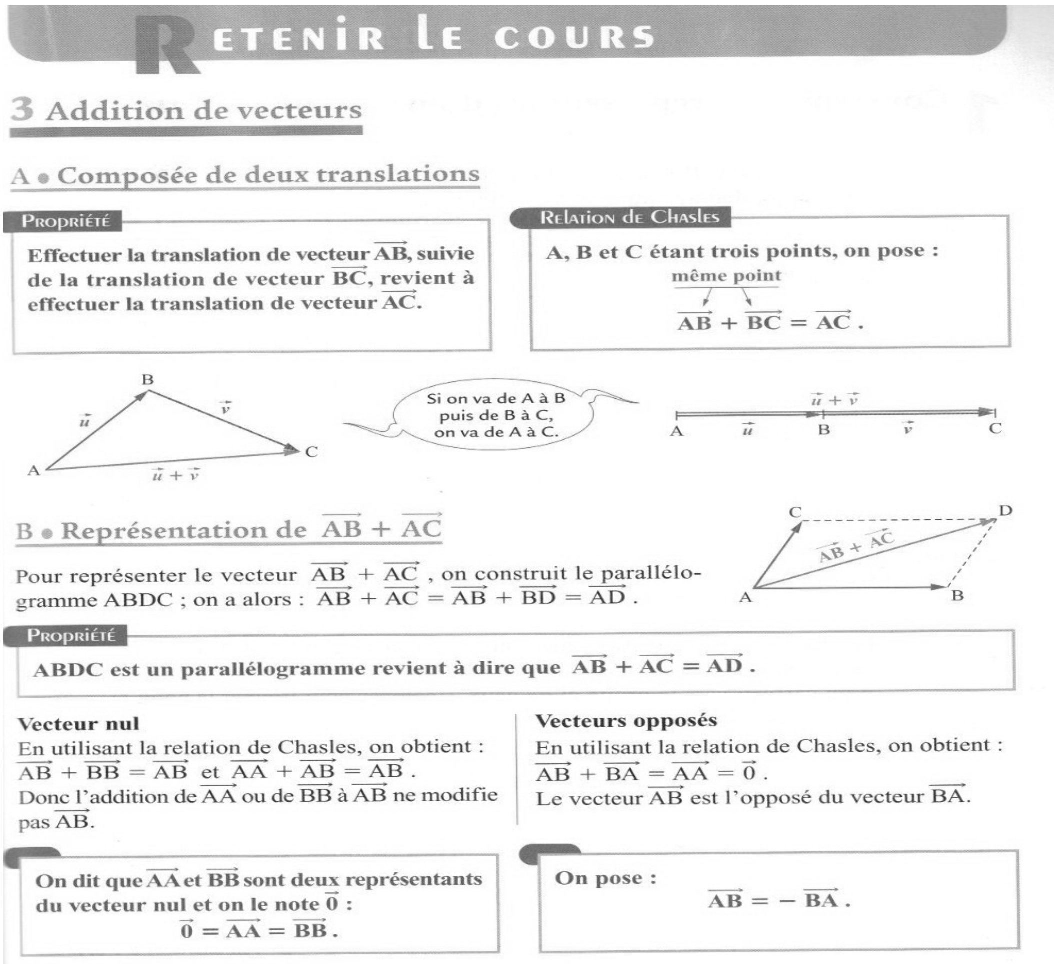


NOTATIONS

Dans les exemples ci-dessus, $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$. On pose : $\vec{u} = \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$.



208 CHAPITRE 12 · VECTEURS ET TRANSLATIONS



RETENIR LE COURS

3 Addition de vecteurs

A • Composée de deux translations

PROPRIÉTÉ

Effectuer la translation de vecteur $\overrightarrow{AB}$, suivie de la translation de vecteur $\overrightarrow{BC}$, revient à effectuer la translation de vecteur $\overrightarrow{AC}$.

RELATION DE CHASLES

A, B et C étant trois points, on pose :

même point

$$\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AC}.$$

B • Représentation de $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AC}$

Pour représenter le vecteur $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AC}$, on construit le parallélogramme ABDC ; on a alors : $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AC} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BD} = \overrightarrow{AD}$.

PROPRIÉTÉ

ABDC est un parallélogramme revient à dire que $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AC} = \overrightarrow{AD}$.

Vecteur nul

En utilisant la relation de Chasles, on obtient : $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BB} = \overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{AA} + \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{AB}$.

Donc l'addition de $\overrightarrow{AA}$ ou de $\overrightarrow{BB}$ à $\overrightarrow{AB}$ ne modifie pas $\overrightarrow{AB}$.

On dit que $\overrightarrow{AA}$ et $\overrightarrow{BB}$ sont deux représentants du vecteur nul et on le note $\vec{0}$:

$$\vec{0} = \overrightarrow{AA} = \overrightarrow{BB}.$$

Vecteurs opposés

En utilisant la relation de Chasles, on obtient : $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BA} = \overrightarrow{AA} = \vec{0}$.

Le vecteur $\overrightarrow{AB}$ est l'opposé du vecteur $\overrightarrow{BA}$.

On pose :

$$\overrightarrow{AB} = -\overrightarrow{BA}.$$

Commentaires

Ces deux pages de cours portant sur l'égalité des vecteurs et l'addition vectorielle, illustrent les quelques représentations sémiotiques attachées de l'objet mathématique vecteur. Ces représentations sémiotiques sont des piliers de l'activité mathématique, car comme le note Duval (1993) « c'est seulement par le moyen de représentations sémiotiques qu'une activité sur des objets mathématiques est possible. […] En effet, les objets mathématiques ne sont pas directement accessibles dans la perception, ou dans une expérience intuitive immédiate, comme le sont les objets communément dits "réels" ou "physiques" ! Il faut donc pouvoir en donner des représentants. »

Il faut remarquer aussi qu'il est difficile de comprendre ce que les auteurs entendent par vecteur. Le passage de la composition des translations à l'addition vectorielle semble être artificiel et aucun commentaire ne l'explique.

Connaître les outils et les choisir

Comme un des objectifs majeurs des programmes est que l'élève sache mobiliser ses connaissances pour résoudre des problèmes, il est important pour atteindre cet objectif de ne pas se limiter à la connaissance formelle des définitions et des propriétés, mais de proposer des situations mettant en jeu des savoirs comme outils. C'est le rôle que les auteurs semblent assigner à cette partie. Les types de tâches travaillés sont :

- Construire un représentant d'un vecteur
- Utiliser la relation de Chasles
- Construire une somme de vecteurs
- Utiliser des vecteurs pour démontrer qu'un point est milieu d'un segment et qu'un quadrilatère est un parallélogramme.

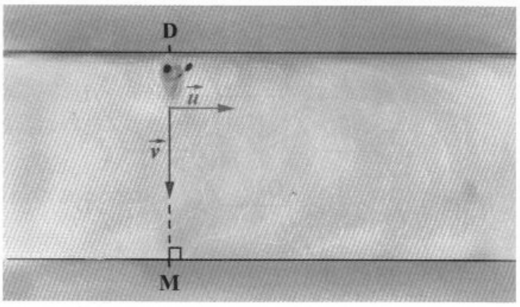
D'une discipline à l'autre (Math et sciences physiques)

Le souci des auteurs du manuel pour ce qui concerne cette rubrique est de souligner le sens et l'intérêt des connaissances mathématiques en interaction avec les autres disciplines et particulièrement avec la physique pour les entités vectorielles. La partie du manuel reproduite ci-dessous met en œuvre, dans deux situations différentes, la construction de la somme de deux vecteurs représentant des forces.

D'une discipline à l'autre

Math et sciences physiques

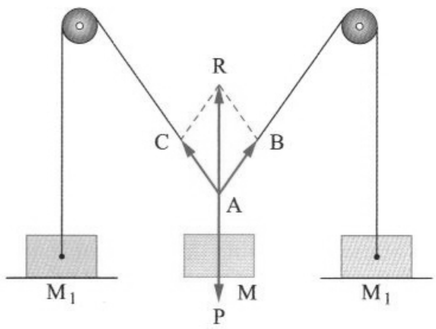
61 Un indien veut traverser en canoë une rivière dont les deux berges sont parallèles. Le canoë est soumis à deux forces : la force du courant représentée par le vecteur $\vec{u}$ et la force exercée par le rameur représentée par le vecteur $\vec{v}$.



On considère que le canoë part du point D et se déplace dans la direction du vecteur $\vec{w}$ défini par l'égalité $\vec{w} = \vec{u} + \vec{v}$. Dans la suite de l'exercice, on suppose que la longueur de $\vec{v}$ est le double de la longueur de $\vec{u}$.

1. Reproduire le schéma ci-dessus puis représenter le vecteur $\vec{w}$ et le trajet suivi par le canoë.
2. On appelle A le point d'arrivée du canoë et on suppose que la largeur de la rivière est 35 m. Calculer la mesure de l'angle $\widehat{MDA}$ puis la longueur DA (arrondir au m).

62 En physique, les forces sont représentées par des vecteurs. Le schéma ci-dessous représente un fil passant par deux poulies. On y accroche une masse M et deux plateaux portant une masse M_1.



Les deux masses M_1 donnent des forces schématisées par les vecteurs $\overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{AC}$ sur le fil, et le poids est schématisé par le vecteur $\overrightarrow{AP}$. Le point R est défini par $\overrightarrow{AR} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AC}$.
L'ensemble est en équilibre lorsque $\overrightarrow{AP} = -\overrightarrow{AR}$.

1. Faire un schéma sur papier millimétré pour représenter le quadrilatère ABRC lorsque : $AB = AC = 10$ cm et $\widehat{RAB} = \widehat{RAC} = 30°$.
2. Sachant que 5 cm représentent 5 newtons, calculer le poids en newtons.

On voit que l'objectif des auteurs à travers les tâches proposées dans ces deux situations, est de faire construire la somme de deux vecteurs déjà mis en scène par les énoncés. On remarque que les tâches dévolues à l'élève sont en fait dépouillées de la problématique physique attachée aux situations. La prise en charge par les auteurs de la mathématisation de celles-ci avec le choix et l'explicitation des différentes représentations sémiotiques, ne semble pas laisser de place à une véritable interaction entre les disciplines. C'est pourtant ce qui paraît être l'objectif visé à travers le titre de la séquence «D'une discipline à l'autre (Math et sciences physiques) ». On assiste donc ici à ce qu'on peut apparenter à un effet Topaze, qui consiste d'une manière ou d'une autre, à se mettre à la place d'un élève pour lui faire surmonter une difficulté qu'il peut rencontrer. La phase de modélisation est totalement prise en charge par les auteurs qui semblent accorder plus d'importance au traitement des objets mathématiques. Que reste-t-il alors pour l'élève ? Dans ce contexte, on peut s'interroger sur le bien fondé du lien présenté entre mathématiques et physique. Notons de plus que la situation est très différente, selon que les élèves auront ou non déjà rencontré les objets physiques en jeu (vitesse d'une part et forces de l'autre). En France en seconde ce ne sera pas le cas, contrairement au Sénégal. Dans le premier cas, il est possible que la situation proposée soit confuse pour les élèves, qui n'auront comme seule planche de salut que d'essayer de décoder en termes de vecteurs, les attentes de l'enseignant pour pouvoir répondre. Dans le second cas, à supposer que leur enseignement de physique leur suffise pour pouvoir mieux comprendre le contexte en jeu, les problèmes auront au moins le mérite de décloisonner momentanément les deux enseignements. Auront-ils pour si peu une meilleure compréhension du vecteur, des forces ou des vitesses ?

Analyse du manuel de seconde, collection Déclic, édition 2004

Présentation du manuel

Le manuel a une organisation didactique similaire au précédent avec une structure classique : activités, cours, exercices que les auteurs répartissent en différentes rubriques comme suit :

Une page de sommaire et son problème ouvert, que les apprenants sauront résoudre à la fin du chapitre.

Une page de tests préliminaires, pour revoir seul les techniques utiles.

Une page d'activités courtes, afin d'introduire les notions abordées dans ce chapitre.

Le cours, en page de gauche, présente tout ce que les élèves doivent apprendre: les définitions, **les théorèmes accompagnés de leurs démonstrations et diverses remarques;** il se prolonge dans la partie exercice par des petites questions en QCM ou Vrai-Faux.

Les méthodes, en page de droite, donnent tous les savoir-faire que les élèves doivent acquérir; elles sont accompagnées d'un exercice entièrement résolu et se prolongent par des exercices d'applications directes qui permettent de s'entraîner à celles-ci.

La page Faire le point, véritable fiche-mémo, va aider les élèves à mémoriser l'essentiel du cours et des savoir-faire.

La page de calcul est en étroite relation avec la page de tests préliminaires et les techniques de base.

Les exercices sont ordonnés suivant la progression du cours: toujours des petites questions pour vérifier les savoirs (QCM ou Vrai-Faux), puis les applications directes des méthodes; enfin des exercices pour approfondir les connaissances.

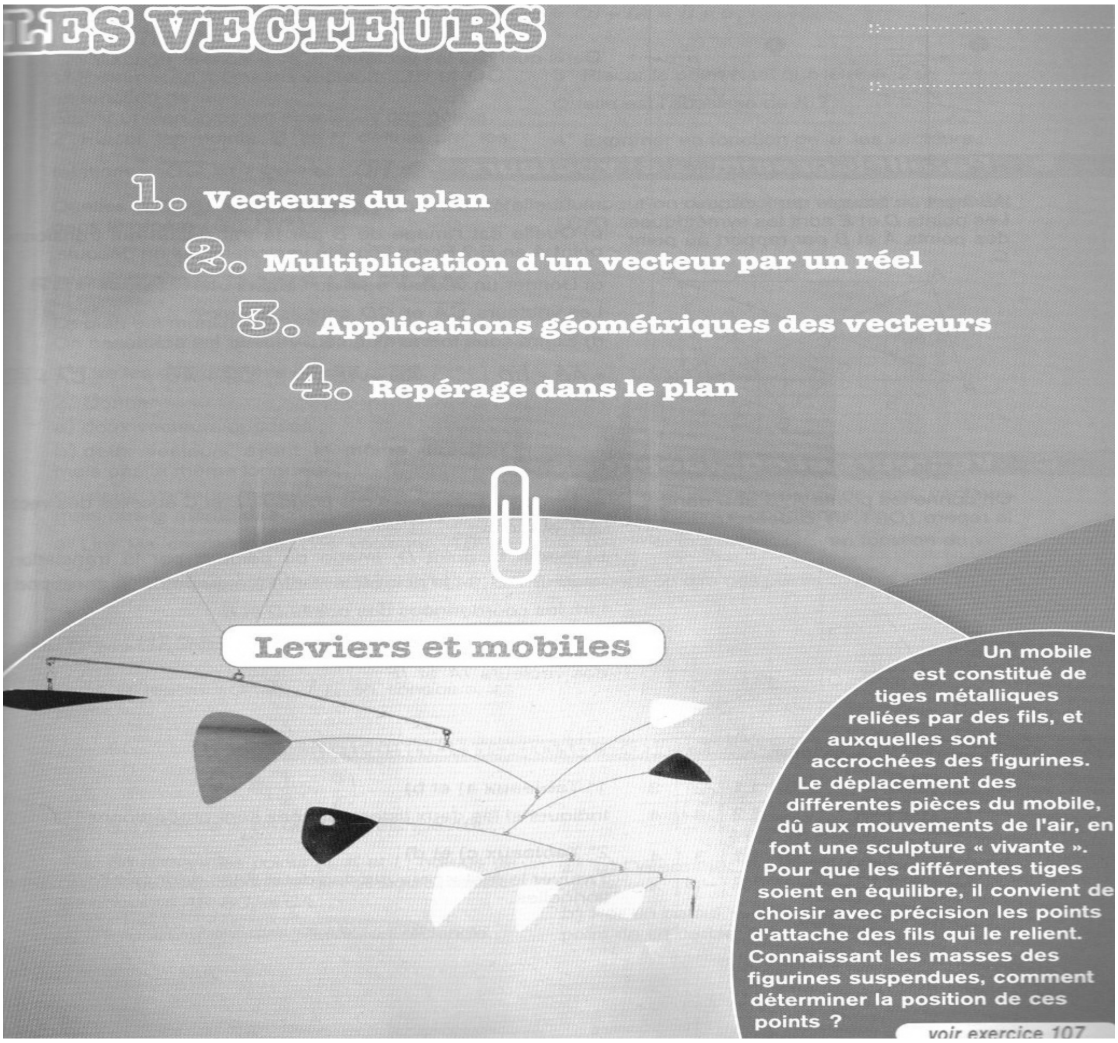
Les Travaux mettent en pratique ailleurs ou autrement les notions vues dans le chapitre: soit dans d'autres disciplines ou des situations plus concrètes, soit dans un contexte historique, soit à l'aide de logiciels ou de la calculatrice.

On remarque un changement de cap sur la présentation du cours où la démonstration des théorèmes retrouve ses lettres de noblesse. Les auteurs tiennent à respecter les textes officiels :

> Contrairement à l'image que certains manuels scolaires relatifs aux programmes de 1990 ont pu contribuer à laisser transparaître, l'enseignement ne peut pas être réduit au simple énoncé de définitions et de propriétés admises, accompagnés d'exercices d'applications très répétitifs. **La démonstration doit tenir la place qui lui convient** en classe et ne pas être réservée au seul cadre d'un devoir : démontrer une propriété, c'est l'occasion de travailler le raisonnement, d'aborder des questions de logique, de préciser les définitions et surtout, d'aider à mieux comprendre les notions en jeu. (Document d'accompagnement du programme de 2nde / Juin 2000, 3)

La dernière rubrique montre que les auteurs accordent une place aux liens avec les autres disciplines pour donner du sens aux concepts étudiés et à l'utilisation d'outils technologiques modernes, informatiques notamment.

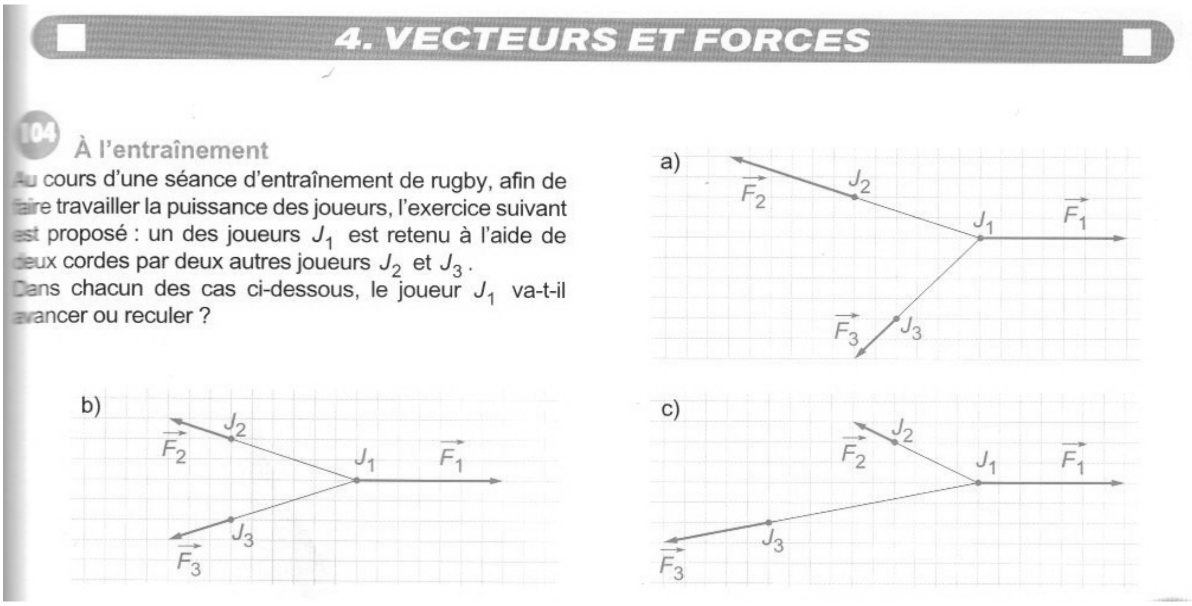
Les vecteurs qui nous intéressent ici sont présentés dans le chapitre 6. La page suivante nous indique le sommaire du chapitre ainsi qu'une situation problématique en physique dont le traitement fait appel aux vecteurs.



Les liens entre vecteurs et forces que les auteurs présentent sous forme d'exercices dans la rubrique *travaux*, nous semblent essentiels pour sortir le fonctionnement de l'enseignement des mathématiques de son monde clos, qui fait rarement appel aux autres disciplines pour donner sens aux concepts.

Voici des situations proposées par les auteurs, mettant en jeu la construction de la somme de deux vecteurs modélisant des forces.

La dernière image intitulée *Leviers et mobiles* est une esquisse de solution du problème ouvert posé dans la première page du chapitre.



4. VECTEURS ET FORCES

104 À l'entraînement

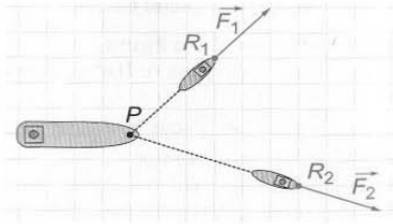
Au cours d'une séance d'entraînement de rugby, afin de faire travailler la puissance des joueurs, l'exercice suivant est proposé : un des joueurs J_1 est retenu à l'aide de deux cordes par deux autres joueurs J_2 et J_3.
Dans chacun des cas ci-dessous, le joueur J_1 va-t-il avancer ou reculer ?

Cet exercice est assez surprenant. Il s'apparente effectivement à des connaissances de physique, mais il est remarquable que la modélisation est considérée comme totalement transparente. Dans le texte en langue naturelle on parle de puissance des joueurs, sans du tout la définir, ni dire par quoi elle est représentée. C'est à l'élève de comprendre que c'est dans le dessin, ce qui est représenté par un vecteur. Mais ceci a plus de chance de se faire par un jeu de contrat didactique, que par une réflexion enrichissante de l'élève sur l'intérêt des vecteurs pour modéliser de telle situation. Reste ensuite à comprendre que l'on peut (on doit d'ailleurs) ramener les trois vecteurs en un même point (J_1 est le meilleur candidat) et que répondre à la question posée revient à comparer $\overrightarrow{F_1}$ à la somme $\overrightarrow{F_2}+\overrightarrow{F_3}$. Cette tâche nécessite de faire graphiquement la somme de 2 vecteurs, ce qui semble bien être le réel enjeu attendu par les auteurs. Pourtant la question de la comparaison aurait pu amener à des questionnements intéressants, puisqu'en effet, il est plus difficile de comparer des vecteurs que des scalaires. Mais ici tout est court-circuité par le fait que les trois exemples éludent la question puisque la somme $\overrightarrow{F_2}+\overrightarrow{F_3}$ est toujours dans la même direction que $\overrightarrow{F_1}$, ramenant la discussion dans les trois cas aux trois cas habituels de comparaison de grandeurs scalaires. Cet exercice est donc une parodie de modélisation, où le seul enjeu véritable, outre qu'il faut savoir décoder les attentes des auteurs, est de construire graphiquement la somme de deux vecteurs et comparer des longueurs.

105 Les remorqueurs

Un bateau à la dérive est tiré par deux remorqueurs de puissances différentes, schématisés sur la figure par les points R_1 et R_2.
La Longueur des flèches représentant les forces $\overrightarrow{F_1}$ et $\overrightarrow{F_2}$ est proportionnelle à la force de traction de chacun des remorqueurs.

Dans quelle direction le bateau va-t-il se déplacer ?

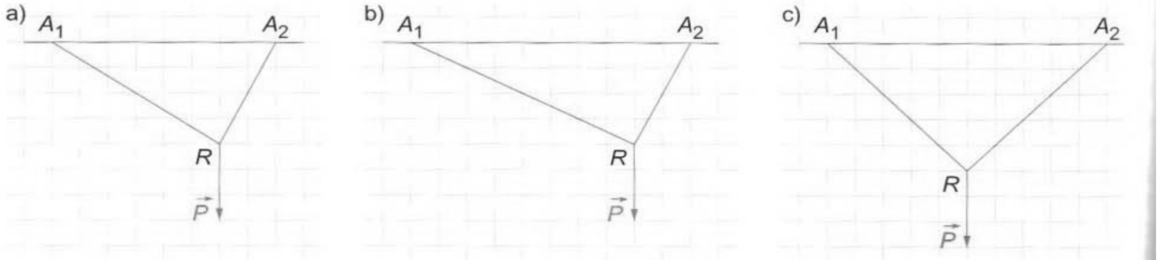


106 Objets en équilibre

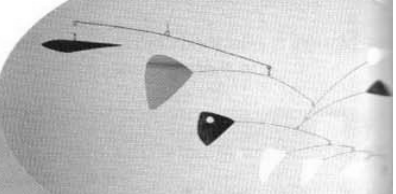
Un objet est accroché au plafond par deux fils tendus $[RA_1]$ et $[RA_2]$.
Cet objet est en équilibre, c'est-à-dire que son poids P est compensé par les deux forces de tension $\overrightarrow{T_1}$ et $\overrightarrow{T_2}$ exercés par les fils.

1° Dans chacun des cas suivants, reproduire la figure sur un papier quadrillé et dessiner les forces $\overrightarrow{T_1}$ et $\overrightarrow{T_2}$.

2° Dans la figure c, déterminer les normes de $\overrightarrow{T_1}$ et $\overrightarrow{T_2}$ (l'unité est le carreau).

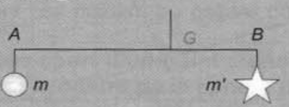


Leviers et mobiles



107 1° **Une seule tige**

L'équilibre de la tige dépend des masses m et m' suspendues en A et B.



La loi d'*Archimède* pose le principe régissant le rapport entre les masses suspendues et la position du point G.
Pour qu'il y ait équilibre, il faut :

$$m \times GA = m' \times BG.$$

a) **Traduction vectorielle**

Comparer les directions, les sens et les longueurs des vecteurs $m\overrightarrow{GA}$ et $m'\overrightarrow{GB}$.
En déduire que la loi d'Archimède se traduit vectoriellement par l'égalité :

$$m\overrightarrow{GA} + m'\overrightarrow{GB} = \vec{0}.$$

(On dit que G est le **barycentre** des points A et B affectés des masses m et m'.)

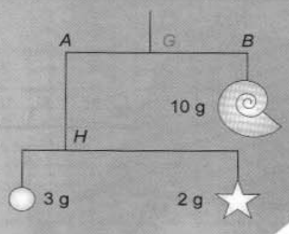
b) **Position du point G**

En partant de la relation vectorielle et en utilisant la relation de Chasles : $\overrightarrow{GB} = \overrightarrow{GA} + \overrightarrow{AB}$, montrer que l'on a :

$$\overrightarrow{AG} = \frac{m'}{m+m'}\overrightarrow{AB}.$$

c) Où doit-on placer G si $m = 4{,}2$ g et $m' = 6{,}3$ g ?

2° Le schéma ci-contre décrit un mobile supportant trois figurines. On suppose que la masse de la tige $[EF]$ est négligeable. Déterminer la position exacte des points H et G.



La situation des remorqueurs est similaire à celle relative à l'entraînement au rugby, sauf qu'elle ne mobilise que deux forces. Ici aussi, la somme est telle qu'elle se trouve dans la direction du déplacement du bateau.

L'exercice suivant est plus complexe. Ne serait-ce que parce qu'il fait intervenir des tensions de fils qui sont des forces beaucoup moins tangibles que des forces de traction comme dans les deux exemples précédents. Il faut également avoir des notions sur les principes d'action et de réaction. En l'absence d'un réel questionnement physique, dont on ne voit pas trop comment il pourrait s'opérer sur une telle situation en classe de mathématiques avec des élèves n'ayant pas les connaissances de physique nécessaires, la seule façon de s'en sortir consiste encore à décoder les attentes du professeur. Il s'agit ici de façon plus ou moins clair de décomposer un vecteur selon deux directions fixes. Tâche intéressante, mais strictement mathématique dont l'habillage proposé ici a toutes les chances de rester confus pour une majorité d'élèves.

L'exercice sur les mobiles n'échappe pas aux critiques précédentes. La loi d'Archimède étant donnée, tout le travail est prémâché. Reste peut-être la question c) où le vecteur n'intervient plus vraiment, mais où l'élève peut encore trouver un certain enjeu, à condition qu'il sache retrouver où sont les points E et F !!!

III.3.2 Conclusion

On voit donc que le lien entre mathématiques et physique à propos des vecteurs a beaucoup de difficultés à vivre dans les chapitres sur les vecteurs, que ce soit au collège ou au lycée. Le rapport institutionnel au vecteur dans la classe de mathématiques ne laisse que peu d'espace pour des situations issues de la physique. Quand elles existent, celles-ci restent subordonnées à un rapport inadéquat à la modélisation et apparaissent comme un prétexte à faire faire des mathématiques, tout ce qui relève de la modélisation étant considéré comme transparent et conduit soit à des simplifications drastiques, soit à laisser comme seule possibilité à l'élève de pouvoir deviner les attentes du professeur.

Afin de valider notre analyse, nous avons proposé les situations relatives au canoë, à l'entraînement au rugby et à l'objet en équilibre à des élèves de seconde en classe de physique et en classe de mathématiques pour déterminer quel type de contrat est en œuvre dans ces différentes classes. Certains énoncés ont été modifiés de façon à faire prendre en charge par les élèves l'activité de conversion (au sens de Duval, 1993) qui consiste à transformer une représentation d'un registre sémiotique (ici, énoncé physique en langue naturelle) en une autre représentation d'un registre sémiotique (en écriture vectorielle). Avant de présenter les résultats de ce travail, nous analysons dans le paragraphe suivant les programmes de sciences physiques du lycée en France et au Sénégal.

III.4 Analyse des programmes de physique

III.4.1 Programmes de physique du lycée en France

Nous allons analyser très brièvement ici les différents habitats des grandeurs physiques vectorielles et des mouvements de translation dans les programmes actuels de physique au lycée dans les filières scientifiques. En effet, c'est à partir de la classe de seconde que les élèves rencontrent des objets physiques en relation avec le modèle vectoriel (vitesse et forces). Il est vrai qu'ils ont rencontré ces notions au collège, mais essentiellement sous leur aspect qualitatif, l'enseignement se bornant à la description qualitative des phénomènes. Dans les objectifs du programme de seconde, les concepteurs des programmes tout en privilégiant la dimension culturelle de l'enseignement de la physique dans cette classe, expriment clairement cette rupture entre les deux ordres d'enseignement que sont le collège et le lycée.

> Par rapport au collège, l'approche de ces disciplines (*chimie et physique*) au cours des années de lycée doit marquer une certaine rupture : c'est en effet au lycée qu'il faut amener les élèves à comprendre que le comportement de la nature s'exprime à l'aide de lois générales qui prennent l'expression de relations mathématiques entre grandeurs physiques bien construites. L'utilisation du langage mathématique qui, selon le mot de Galilée, est celui de la nature, mérite un soin particulier : même si, à un stade avancé d'analyse d'une situation physique c'est ce langage qui permet de faire des prédictions quantitatives ou de découvrir des effets qualitatifs inattendus, il ne se substitue pas à l'utilisation de la langue naturelle, qui demeure celle de la question que l'on se pose et de la compréhension qualitative d'un phénomène. (B.O, 2001, p. 7)

Comme on le voit dans ce commentaire, les rédacteurs des programmes de physique mettent en exergue l'importance du rôle de l'outil mathématique dans l'expression des lois physiques en tant que simple langage. Cependant, l'insistance sur cet aspect permet de mettre à distance les mathématiques.

Une potentialité d'utilisation des vecteurs en classe de seconde apparaît dans la partie intitulée *mouvements et forces*.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
La trajectoire d'un corps qui tombe est-elle la même pour tous les observateurs ? *Analyse d'un mouvement par rapport à différents corps de référence** *(étude à partir d'images vidéo, chronophotographie)*	1.1. Relativité du mouvement	Décrire le mouvement d'un point dans deux référentiels différents.
Expériences montrant l'influence d'une force sur le mouvement d'un corps (action d'un aimant sur une bille qui roule, modification de la trajectoire d'une balle lorsqu'on la touche, forces entre corps électrisés…)	1.2. Principe d'inertie 1.2.a. Effets d'une force sur le mouvement d'un corps. Rôle de la masse du corps	Savoir qu'une force s'exerçant sur un corps modifie la valeur de sa vitesse et/ou la direction de son mouvement et que cette modification dépend de la masse du corps.
	1.2.b. Enoncé du principe d'inertie pour un observateur terrestre : "tout corps persévère. dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les forces qui s'exercent sur lui se compensent"	Enoncer le principe d'inertie Savoir qu'il est équivalent de dire : "un corps est soumis à des forces qui se compensent" et "un corps n'est soumis à aucune force".
Peut-il y avoir mouvement sans force dans un référentiel terrestre ? Etude d'exemples de la vie courante provenant de films ou de bandes dessinées illustrant le principe d'inertie	1.3. La gravitation universelle 1.3.a. L'interaction gravitationnelle entre deux corps. 1.3.b. La pesanteur résulte de l'attraction terrestre. Comparaison du poid d'un même corps sur la Terre et sur la Lune.	Utiliser le principe d'inertie pour interpréter en termes de force la chute des corps sur Terre Calculer la force d'attraction gravitationnelle qui s'exerce entre deux corps à répartition sphérique de masse, et représenter cette force. Cas du poids en différents points de la surface de la Terre
Pourquoi la Lune "ne tombe-t-elle pas" sur la Terre ? *Influence de la vitesse initiale sur la chute d'un corps* (simulation, étude à partir d'images vidéo..)* *Observation du mouvement circulaire uniforme d'un corps soumis à une force centrale*	1.3.c. Trajectoire d'un projectile. Interprétation du mouvement de la Lune (ou d'un satellite) par extrapolation du mouvement d'un projectile.	Prévoir qualitativement comment est modifié le mouvement d'un projectile lorsqu'on modifie la direction du lancement ou la valeur de la vitesse initiale.

Extrait du programme de physique de seconde (B.O n°6 hors série du 12 août 1999, p. 20)

Cependant, l'objectif assigné au programme de se focaliser sur les principes de relativité du mouvement et d'inertie tout en limitant leur application à la gravitation universelle, réduit au minimum la portée de la modélisation vectorielle à ce niveau d'étude.

En revanche, en classe de première scientifique, on introduit une perspective plus scientifique fondée sur la construction de la physique à plus long terme avec l'acquisition d'une certaine technicité, tant sur le plan théorique, qu'expérimental. Le contenu du programme de cette classe fait apparaître l'usage des vecteurs dans trois parties :

1. *mouvement d'un solide indéformable*
2. *Forces macroscopiques s'exerçant sur un solide*
3. *Lois de Newton*

Parmi les compétences mises en œuvre dans ce programme, on en note neufs liées aux mathématiques :

Compétences liées aux mathématiques :

- comprendre l'intérêt du calcul littéral,

- utiliser les puissances de 10,

- utiliser un axe orienté et des mesures algébriques

- utiliser les vecteurs et le produit scalaire de deux vecteurs,

- construire un graphique à la main et savoir l'utiliser,

- utiliser quelques notions de géométrie,

- utiliser les notions simples de statistiques du programme de mathématique (valeur moyenne et largeur),

Bien que les connaissances et savoir-faire liés aux mathématiques soient clairement explicités dans la colonne de droite au fur et à mesure de leur apparition dans le programme, ces compétences seront à mettre en oeuvre tout au long de l'année. (B.O n°7 hors série du 31 août 2000, p. 185)

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
Observation du mouvement du centre d'inertie. Observation des mouvements des autres points (vidéos, chronophotographies...) *. Réalisation et exploitation d'enregistrements: table à coussin d'air, table à digitaliser, vidéos, capteurs chrono-cinés*... Détermination de vecteurs vitesses à partir d'enregistrements. Étude du mouvement du centre d'inertie d'un solide dans diverses situations (projectiles, satellites).	**1 - Mouvement d'un solide indéformable** **1.1** Vecteur vitesse d'un point du solide **1.2** Centre d'inertie d'un solide **1.3** Mouvement de translation d'un solide **1.4** Mouvement de rotation d'un solide autour d'un axe fixe; vitesse angulaire	*Sur un enregistrement réalisé ou donné, déterminer et représenter le vecteur vitesse V d'un point mobile* Savoir que le vecteur vitesse V est le même pour tous les points d'un solide en translation. Savoir que chaque point d'un solide en rotation autour d'un axe fixe a une trajectoire circulaire. Pour un solide en rotation autour d'un axe fixe, relier la vitesse d'un point à la vitesse angulaire.
Recherche de forces sur des exemples variés (expériences, vidéos, logiciels...)*. Utilisation du principe d'inertie pour analyser les forces qui agissent sur un solide, en mouvement ou non.	**2 - Forces macroscopiques s'exerçant sur un solide** Actions exercées sur un solide; exemples d'effets produits (maintien en équilibre, mise en mouvement de translation, mise en mouvement de rotation, déformations).	Identifier et représenter les actions qui s'exercent sur un solide. Prévoir dans des cas simples la possibilité de mise en rotation d'un solide autour d'un axe fixe.
Mettre en relation la variation du vecteur vitesse V_G d'un mobile avec la somme des forces appliquées dans des situations simples et variées. Expliquer pourquoi il y a des ceintures de sécurité dans les voitures. Analyser comment le principe d'inertie s'applique à un véhicule qui monte une côte rectiligne à vitesse constante. Expliquer le rôle des roues motrices et du sol dans le mouvement d'une voiture.	**3 - Une approche des lois de Newton appliquées au centre d'inertie** **1ère loi** : Principe d'inertie Ce principe n'est vrai que dans certains référentiels. Ces référentiels sont dit galiléens. **2ème loi** : Aspect semi-quantitatif: comparaison de la somme des forces et de la variation du vecteur vitesse du centre d'inertie dans un référentiel galiléen. **3ème loi** : Principe des actions réciproques	Connaître et appliquer les lois de Newton: - Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse V_G du centre d'inertie ne varie pas, la somme $F = \sum f$ des forces qui s'exercent sur le solide est nulle et réciproquement. - Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse V_G du centre d'inertie varie, la somme $F = \sum f$ des forces qui s'exercent sur le solide n'est pas nulle. Sa direction et son sens sont ceux de la variation de V_G entre deux instants proches. - A et B étant deux corps, soient $F_{B/A}$ la force exercée par B sur A et $F_{A/B}$ la force exercée par A sur B. Quel que soit l'état de mouvement de A par rapport à B on a toujours l'égalité vectorielle : $F_{A/B} = -F_{B/A}$ Analyser un exemple où une force de frottement sert à la propulsion.

Extrait du programme de physique de première S (B.O n°7 hors série du 31 août 2000, p. 187)

Le tableau ci-contre fait voir l'importance qui est donnée aux expériences et aux mesures d'enregistrement. Toutefois, on note que très peu de choses sont dites sur la notion de vecteur vitesse, dont on peut se demander quelle place elle pourra trouver dans cette approche, tant on connaît la propension de l'enseignement de la physique à rabattre les tâches sur la vitesse aux seules propriétés scalaires

Par ailleurs, la vitesse (instantanée) est ramenée à une vitesse moyenne sur un court intervalle de temps.

> **Vitesse d'un point d'un solide.**
>
> La valeur de la vitesse moyenne est introduite comme le quotient de la distance parcourue par la durée. La mesure approchée de la valeur de la vitesse d'un point est obtenue par le calcul de la valeur de la vitesse moyenne entre deux instants voisins. (Op. cité, 187)

Parallèlement, pour ce qui concerne le mouvement de translation, on peut se demander aussi comment les enseignants feront vivre la connaissance et le savoir faire exigible qui lui est relatif : *savoir que le vecteur vitesse est le même pour tous les points d'un solide en translation.* A moins de se limiter à une validation expérimentale ce qui est loin de prouver l'assertion ci-dessus. Rappelons que, dans l'analyse des travaux antérieurs nous avons vu dans le paragraphe sur le mouvement de translation et ses liens avec la translation mathématique, qu'il était possible avec les connaissances des élèves de montrer que le *vecteur vitesse est le même pour tous les points d'un solide en translation.*

III.4.2 Conclusion sur l'analyse des programmes de physique en France

La noosphère de l'enseignement de la physique fait bien appel aux compétences mathématiques des élèves dans l'élaboration des programmes en particulier l'utilisation des vecteurs. Cependant, la conception des mathématiques comme langage ne risque-t-elle pas de masquer l'intrication des deux disciplines ? En tous cas, Levy-Leblond (1982) semble s'inscrire en faux contre cette conception quand il affirme que *réduire les mathématiques à la manipulation du quantitatif constitue une erreur de même nature que de les considérer comme un simple langage.*

Récemment, un positionnement similaire est défendu par le professeur Jacques Treiner responsable de la rédaction de programmes de physique pour la rentrée 2000 quand il dit : « Le rôle des mathématiques ne se réduit pas, pour les physiciens, à la simple représentation formelle d'un phénomène déjà identifié. Ne voir dans les mathématiques qu'un outil masque l'essentiel, qui est l'intrication de deux disciplines. Le miracle, c'est le suivant : on écrit une équation pour un cas particulier, mais les solutions sont plus générales, et peuvent conduire à d'authentiques découvertes. Il y a plus, dans les équations, que ce qu'on a mis pour les écrire. »

On voit aussi qu'on essaie de faire vivre les vecteurs dans le programme de la physique au lycée, sans pour autant que ces derniers occupent toute la place qu'une intégration réussie devrait leur assurer. Dans le paragraphe suivant, nous allons examiner la place que le vecteur occupe dans les programmes de physique du lycée au sénégal.

III.4.3 Programmes de physique de 2^e^ S au Sénégal

Les programmes de sciences physiques sont sous la responsabilité de la commission nationale de sciences physiques qui regroupe des enseignants du moyen et secondaire général et technique et des enseignants de l'enseignement supérieur. L'enseignement des sciences physiques au Sénégal débute au collège et se poursuit jusqu'en terminale. Chaque secteur du programme est présenté dans un tableau en trois colonnes : à gauche les contenus, au centre les activités d'apprentissage qui fixent les approches didactiques et les limites à donner aux contenus et à droite les compétences des élèves correspondant à ces contenus.

La partie du programme qui nous intéresse ici est la *mécanique* que l'on rencontre au lycée en classe de seconde scientifique (S). Elle est structurée en 5 chapitres listés de P_8 à P_{12} avec l'horaire correspondant dans la dernière colonne du tableau suivant.

	MECANIQUE	
P_8	**Généralités sur le mouvement**	**5**
P_9	**Généralités sur les forces**	**4**
P_{10}	**Le poids – La masse – Relation entre poids et masse.**	**5**
P_{11}	**Equilibre d'un solide soumis à des forces non parallèles**	**6**
P_{12}	**Equilibre d'un solide mobile autour d'un axe**	**5**

Extrait du programme de physique de seconde scientifique (CNSP, p. 56)

Comme on peut le constater, ce programme correspond à celui de la classe de seconde en France en 1992. Cependant les approches et commentaires sont sensiblement différents.

III.4.3.1 Sur les mouvements et vitesses

En seconde, l'étude de la mécanique débute par les généralités sur les mouvements englobant les notions de vitesse, de mouvement de translation et de mouvement de rotation.

CHAPITRE :. P8 Généralités sur le mouvement. Vitesse	Durée : 5 h	CLASSE : 2° S

Contenus	Activités d'apprentissage	Compétences
Mouvement. Exemples. Relativité du mouvement **Référentiels. Translation et rotation.** .concept de référentiel et exemples (héliocentrique, géocentrique et terrestre) Repères d'espace et de temps. Trajectoire et référentiel. Translation et rotation. **Vitesse**. Vitesse d'un point mobile Vecteur vitesse. .Vitesse angulaire	Observations (chute des corps,véhicule, tapis roulant) Observations. Exploitation d'enregistre--ments (voir documents CN) Observations. Calculs. Exploitation d'enregis--trements(voir documents CN). Schématisation.	Illustrer la notion de mouvement par des exemples. Illustrer la relativité du mouvement par des exemples. Relier trajectoire d'un mobile et réfé-rentiel. Faire un choix judicieux du référentiel et du repère pour l'étude d'un mouve-ment. Exploiter des enregistrements Distinguer translation et rotation. Déterminer la mesure de la vitesse (calcul, exploitation de documents et d'expériences). Déterminer le vecteur vitesse d'un point mobile. Déterminer la vitesse angulaire

Extrait du programme de sciences physiques de seconde S (CNSP, p. 66)

L'étude de ces deux types de mouvements – bien que raccourcis en « translation » et «rotation » dans le programme – ne semble pas évoquer les liens avec les notions de translation et de rotation en mathématiques, ou alors les suppose identiques. Or, comme nous l'avons vu dans notre analyse épistémologique ce lien existe mais n'est pas aussi évident qu'on pourrait le croire a priori, même si les élèves ont à ce niveau les connaissances mathématiques suffisantes pour le comprendre (voir l'analyse des programmes de mathématiques). De plus, les expliciter engage dans un raisonnement où les arguments de nature mathématique et de nature physique se complètent.

La confusion possible entre mouvement de translation et mouvement de rotation est bien signalée, mais les auteurs du programme suggèrent seulement qu' « *à partir d'exemples on pourra faire la distinction entre translation et rotation* ». Aucune approche plus théorique de cette question n'est proposée, pas plus qu'une distinction entre type de trajectoire et nature du mouvement.

Pour ce qui concerne, la notion de vitesse les commentaires sur les programmes précisent :

> La vitesse pourrait être introduite à partir du mouvement d'un point matériel.
>
> L'exploitation de résultats de mesures ou d'enregistrements devrait permettre **d'asseoir les concepts**[9] de vitesse moyenne, vitesse instantanée et vecteur vitesse mais aussi de la notion de vitesse angulaire et de sa mesure (dans des cas simples de rotation). (CNSP, p. 66)

On comprend bien l'importance qui est donnée aux expériences et aux mesures d'enregistrement. Toutefois, on note que très peu de choses sont dites sur la notion de vecteur

[9] C'est nous qui soulignons.

vitesse, dont on peut se demander comme pour le programme de première S français, quelle place elle pourra trouver dans cette approche.

III.4.3.2 Sur la notion de force

Contenus	Activités d'apprentissage	Compétences
Interaction entre objets.	Observations simples	Identifier certaines interactions entre objets
Interaction de contact	Expériences	
Interaction à distance		Distinguer interaction de contact et interaction à distance.
système		
La force	Expériences	
Effets	Schématisation.	Identifier une force par ses effets.
Caractéristiques et représentation : tension d'un fil ou d'un ressort, réaction d'un support.		Rappeler les caractéristiques d'une force. Représenter une force.
.Forces localisées et forces réparties.	Illustrations	
.Forces extérieures et forces intérieures.		Utiliser le principe des interactions.
Le principe des interactions		
Enoncé du principe		
Exemples d'illustration.		

Extrait du programme de sciences physiques de seconde S (CNSP, p. 67)

La colonne « Activités d'apprentissage » du tableau ci-dessus illustre bien la primauté que le programme accorde à l'observation et à l'expérimentation. On introduit les forces sans référence aux vecteurs. Et les auteurs semblent penser que la représentation vectorielle des forces est transparente. En effet, dans la troisième colonne la compétence « représenter une force » fait bien référence à la représentation vectorielle, comme c'est souligné dans les commentaires :

> Les caractéristiques d'une force pourraient être dégagées à partir de l'analyse d'un exemple simple de force tel que force s'exerçant par l'intermédiaire d'une tige ou d'un câble. La représentation vectorielle de la force suivra. (CNSP, p. 67)

Or, on voit que le modèle vectoriel apparaît distinctement à travers les caractéristiques d'une force, caractéristiques qui ont permis par ailleurs de présenter la notion de vecteur en mathématiques depuis la classe $4^{ème}$ au collège. On ne parle de représentation vectorielle que dans la partie du programme consacrée à la notion de poids.

Comme dans les programmes français, on remarque ici aussi que les grandeurs vectorielles physiques sont étudiées sans référence aux vecteurs mathématiques qui sont abordés eux aussi comme une étude intéressante en soi plutôt que comme outils en physique, malgré une injonction du programme de mathématiques.

Très souvent des rappels de mathématiques sont faits par des professeurs de physique sans référence précise à des applications ou significations physiques comme le recommande d'ailleurs les rédacteurs du programme (bien que sans évoquer explicitement la notion de vecteur) :

> Si cela n'a pas été fait en début d'année il sera nécessaire de faire des rappels mathématiques (formules de trigonométrie, relations métriques dans le triangle rectangle, éléments de géométrie, choix d'échelles…), rappels dont on se servira dans le cours et particulièrement dans la résolution d'exercices par les méthodes graphique, géométrique et analytique. (CNSP, p. 69)

Après l'étude des généralités sur les forces, les auteurs proposent deux chapitres consacrés uniquement à la notion d'équilibre : un sur l'équilibre d'un solide sous l'action de forces non parallèles et le deuxième sur l'équilibre d'un solide mobile autour d'un axe fixe qui est axé plutôt sur les moments que nous n'étudierons pas ici. Là aussi, le seul examen du tableau du programme sur l'équilibre d'un solide sous l'action de forces non parallèles fait apparaître la difficulté à contourner tout traitement vectoriel des notions physiques en jeu (forces parallèles et non parallèles, conditions nécessaires d'équilibre, couples de forces, composition des forces, règle du parallélogramme). Cependant, aucun commentaire ne fait le lien avec les connaissances des élèves sur les vecteurs vus en cours de mathématiques depuis la 4$^{\text{ème}}$ au collège.

Contenus	**Activités d'apprentissage**	**Compétences**
* **Equilibre sous l'action de forces non parallèles** : - Forces non parallèles - Forces coplanaires - Conditions nécessaires d'équilibre. - Couple de forces * **Loi de composition des forces** : - Résultante de deux forces Résultante de plusieurs forces	Observations Schématisation Expérience : équilibre d'un solide Observations Représentation :règle du parallélogramme Expérience Schématisation.	Identifier des forces non parallèles, des forces coplanaires. Réaliser l'équilibre d'un solide à l'aide de forces non parallèles. Traduire la condition d'équilibre d'un solide soumis à des forces non parallèles. Exploiter la condition d'équilibre d'un solide soumis à des forces non parallèles. Appliquer la règle de composition Des forces. Déterminer les caractéristiques de la force de tension d'un ressort ou d'un fil, la réaction d'un support, la force de frottement…..

Extrait du programme de sciences physiques seconde S (CNSP, p. 69)

Contenus	Activités d'apprentissage	Compétences
* **<u>Rotation autour d'un axe</u>** : - Axe et sens de rotation, - Force orthogonale à un axe, - Distance de la ligne d'action d 'une force à l'axe.	Observations, Schématisation.	Identifier axe et sens de rotation ; Evaluer le moment d'une force. Réaliser l'équilibre d'un solide Susceptible de tourner autour d'un axe. Traduire la condition d'équilibre d'un
* **<u>Moment d'une force par rapport à un axe</u>**. : - Facteurs dépendants, - Expression algébrique.	Expérience : disque mobile autour d'un axe.	solide mobile autour d'un axe ; Exploiter la condition d'équilibre d'un solide mobile autour d'un axe ; Traduire les conditions générales d'équilibre d'un système.
* **<u>Equilibre d'un solide mobile autour d'un axe</u>**. - Théorème des moments. - Conditions générales d'équilibre.	Expérience : équilibre d'un solide autour d'un axe.	Exploiter les conditions générales d'équilibre d'un système. Déterminer les caractéristiques d'un
* **<u>Couples de forces</u>** : - Notion de couple. - Couple de torsion	Représentation. Expérience : pendule de torsion	couple de forces (sens et moment du couple). Donner des applications pratiques du théorème des moments : balance et machines simples.
* **<u>Applications</u>** : - Balance. - Machines simples : poulie, levier, treuil….	Expérience	

Extrait du programme de sciences physiques de seconde S (CNSP, p. 70)

III.4.4 Conclusion sur l'analyse des programmes de physique au Sénégal

Dans notre analyse des programmes de mathématiques, nous avons vu que les vecteurs sont abordés depuis les classes de quatrième et de troisième, donc bien avant l'étude des grandeurs vectorielles en mécanique, mais comme le fait remarquer Lounis (1989), les difficultés relèvent plutôt de l'articulation réciproque dans les deux types d'enseignement et en particulier des questions liées au vocabulaire.

Dans la partie consacrée à la mécanique que nous avons analysée, aucun commentaire évoqué par la noosphère de l'enseignement des sciences physiques, ne fait allusion à cette interaction dialectique entre les notions mathématiques de translation et de vecteur et les notions physiques de mouvement de translation et de grandeurs vectorielles. On ne s'étonnera pas alors que l'utilisation des vecteurs soit réduite au minimum. On note d'ailleurs qu'en seconde, l'approche des notions étudiées dans le programme reste essentiellement expérimentale et qualitative.

III.5 Analyse de manuels de physique

III.5.1 Introduction

Nous nous sommes principalement intéressés à deux collections françaises récentes (collection TOMASINO, année 2001 et collection PARISI, année 2005) de manuels de physique de première S. TOMASINO est la collection la plus utilisée au Sénégal par les enseignants pour le programme de sciences physiques de seconde S[10] (cf. résultats de l'enquête par questionnaires). L'intérêt pour la collection PARISI (la plus récente) est d'être en phase avec les programmes de première S en France qui ont récemment évolué.

III.5.1.1 Analyse du manuel de la collection TOMASINO

Présentation générale du manuel de la collection TOMASINO

Dans cette section, nous nous focaliserons essentiellement sur les passages (cours et exercices) qui concernent les grandeurs vectorielles physiques (vitesses et forces) et les mouvements qui sont tous étudiés dans la partie mécanique.

Le manuel est composé de dix neuf chapitres dont trois traitent des grandeurs vectorielles physiques (vitesses et forces) et des mouvements de translation et de rotation qui nous intéressent ici :

Chapitre n° 3 Mouvements d'un solide

Chapitre n° 4 Forces s'exerçant sur un solide

Chapitre n° 5 Les lois de Newton

Dans l'avant-propos du manuel, les auteurs dégagent la structure de chaque chapitre comme suit :

- *Un cours se terminant par la rubrique **l'essentiel** qui regroupe les résultats fondamentaux exigibles ;*
- *Des **activités expérimentales** présentant un protocole pour les manipulations à réaliser et des questions d'analyse et de synthèse ;*
- *Une page **Info-Sciences** présentant des documents historiques ou d'actualités. Souvent un **Exercice à caractère documentaire** peut être utilisé pour contrôler la compréhension d'un texte.*
- *Un **exercice résolu** et commenté comportant, souvent, un **Point-Méthode**, destinée à faire acquérir les modes de réflexion et de résolution des sciences physique ;*
- *Des **exercices** nombreux, classés par difficulté et répartis en trois catégories :*

[10] Rappelons qu'il existe un décalage entre la France et le Sénégal, qui fait que les concepts en rapport avec les vecteurs sont enseignés en seconde au Sénégal.

– ***Je vérifie mes connaissances*** *: exercices simples essentiellement destinés à l'élève pour le contrôle de ses connaissances ;*
– ***Je m'entraîne*** *: exercices en relation directe avec le cours pouvant être utilisés comme exercices en classe ou exercices à chercher à la maison ;*
– ***Je pratique une démarche scientifique*** *: exercices plus complexes nécessitant une bonne connaissance du cours et des qualités de réflexion.*

Etude des mouvements d'un solide

Analyse du cours de ce chapitre

Les objectifs assignés au chapitre 3 sont :

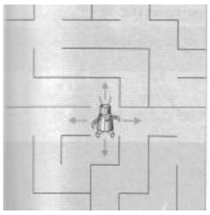
- Savoir que le vecteur vitesse $\vec{v}$ est le même pour tous les points d'un solide en translation.
- Savoir que chaque point d'un solide en rotation autour d'un axe fixe a une trajectoire circulaire.
- Pour un solide en rotation, relier la vitesse d'un point à la vitesse angulaire.
- Sur un enregistrement réalisé ou donné, déterminer et représenter le vecteur vitesse $\vec{v}$ d'un point mobile.

Le cours de ce chapitre est divisé en deux parties.

La première partie s'intitule *Mouvement et vitesse* (p. 40-41). Les auteurs commencent par préciser la différence entre *grandeur scalaire* et *grandeur vectorielle* en considérant la vitesse moyenne d'un point comme une notion s'exprimant par un nombre et la vitesse comme un vecteur. Ils donnent la définition d'un vecteur vitesse (qui est rapidement raccourci dans le langage en « vitesse ») dont ils soulignent les trois caractéristiques :

– Une direction qui est celle de la trajectoire du point considéré
– Un sens qui est celui du mouvement
– Une valeur (ou longueur ou norme) qui caractérise la rapidité du mouvement

Les auteurs donnent alors une situation empirique mettant en évidence les différentes représentations des caractéristiques d'un vecteur, visant à permettre de saisir la différence entre les concepts de direction et de sens que les apprenants ont tendance à amalgamer comme cela a été montré dans des recherches antérieures (Lounis, 1989) et (Lê Thi, 1997). C'est une situation qui modélise un petit robot télécommandé. Pour que ce petit robot sorte d'un labyrinthe, il faut lui indiquer à chaque embranchement quel couloir prendre et dans quel sens progresser.



Illustrations des caractéristiques d’orientation d’un vecteur (Tomasino 2001, p.41).

On peut remarquer que la modélisation que les auteurs font de la vitesse correspond à un vecteur au sens mathématique de vecteur libre.

La deuxième partie s’intitule *Le solide, un corps indéformable*, les auteurs y présentent non seulement la définition d’un solide indéformable et du centre d’inertie mais aussi les mouvements de translation et de rotation.

Le solide est défini comme un corps indéformable à l’échelle microscopique.

Après quelques considérations sur le centre d’inertie, les auteurs présentent le mouvement de translation qui est défini en s’appuyant sur trois exemples illustrant les cas d’un mouvement rectiligne (ascenseur), circulaire (nacelle de grande roue) et curviligne (cabine de téléphérique).

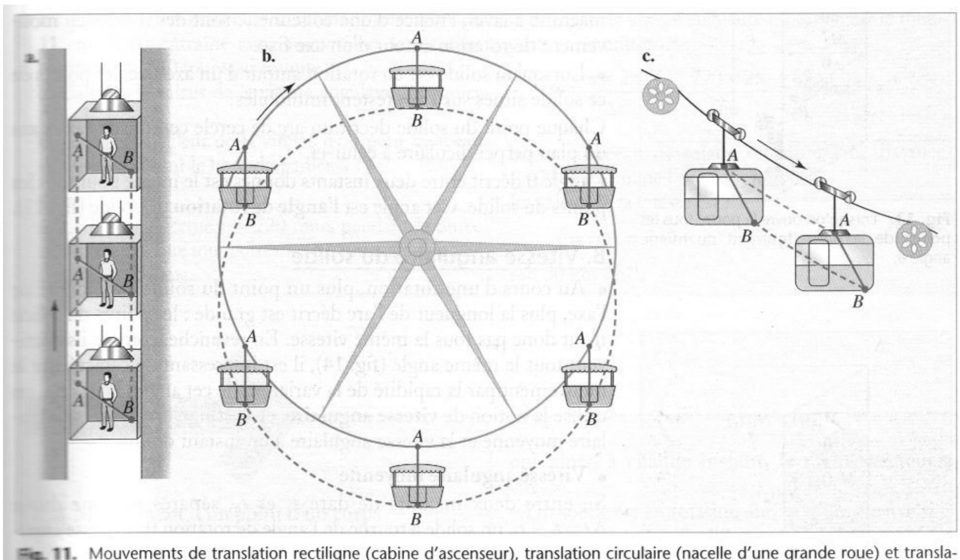


Fig. 11. Mouvements de translation rectiligne (cabine d’ascenseur), translation circulaire (nacelle d’une grande roue) et translation quelconque (cabine de téléphérique).

Illustration des différents mouvements de translation (Tomasino 2001, p.43).

A l’appui de l’observation de ces trois cas, les auteurs donnent la définition suivante :

> Un solide est en mouvement de translation si tout segment liant deux points du solide reste parallèle à lui-même au cours du mouvement.

Dans cette définition, pas plus que dans les illustrations, il n’est fait allusion à des vecteurs.

De plus, les auteurs font remarquer que :

La trajectoire d'un solide en mouvement de translation peut être quelconque et qu'il ne faut pas confondre mouvement de « translation » et mouvement « rectiligne ».

Cette remarque importante n'est cependant pas plus argumentée. En particulier, les auteurs ne profitent pas de l'exemple de la grande roue pour bien faire la distinction entre mouvement de translation circulaire et mouvement de rotation (qui est étudié plus loin).

Ils déduisent ensuite sur simple constatation à partir des figures des exemples donnés les propriétés importantes de « la translation » (notons qu'à ce stade les auteurs font le glissement sémantique qui consiste à remplacer « mouvement de translation » par « translation ») :

Tous les points suivent des trajectoires identiques, qui se déduisent les unes des autres par une translation (trajectoires « parallèles ») ; rectiligne alors le solide est animé d'un mouvement de translation rectiligne.

Tous les points ont, à chaque instant, le même vecteur vitesse (même direction, même sens et même valeur).

Il suffit de connaître le mouvement d'un seul point du solide (par exemple, celui du centre d'inertie) pour connaître le mouvement du solide.

Ces propriétés ne sont ni commentées ni démontrées.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du mouvement de rotation. Dans un premier temps, les auteurs donnent la définition de « la rotation » autour d'un axe fixe en s'appuyant sur l'exemple d'une porte qu'on ouvre (notons que le même glissement sémantique que pour le mouvement de translation s'opère pour le mouvement de rotation) . Ils font voir alors à travers un schéma que :

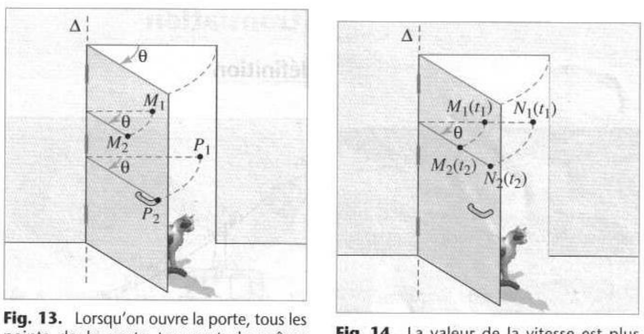


Fig. 13. Lorsqu'on ouvre la porte, tous les points de la porte tournent du même angle θ.

Fig. 14. La valeur de la vitesse est plus grande pour le point le plus éloigné de l'axe

Illustrations du mouvement de rotation (Tomasino 2001, p.44).

Lorsqu'un solide est en rotation autour d'un axe fixe, les points de ce solide situés sur l'axe restent immobiles et que chaque point du solide décrit un arc de cercle centré sur l'axe dans un plan perpendiculaire à celui-ci.

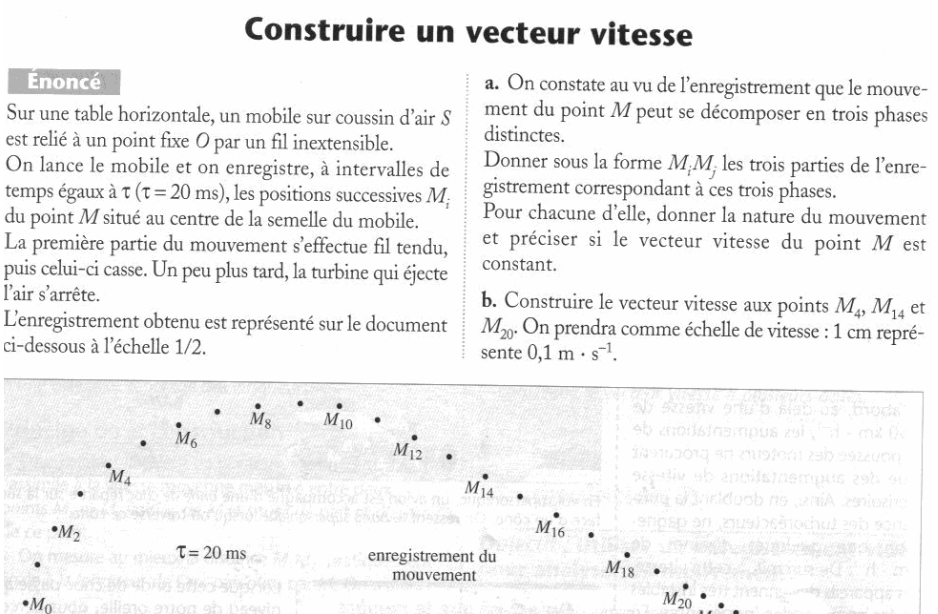
L'angle décrit entre deux instants donnés est le même pour tous les points du solide. Cet angle est l'angle de la rotation du solide.

Il est à noter que la distinction entre mouvement de translation circulaire et un mouvement de rotation n'est pas clairement mise en évidence dans le manuel. En effet, il semble important de faire voir explicitement cette distinction qui permet à travers la notion de vitesse de ne pas confondre grandeur scalaire et grandeur vectorielle. C'est d'ailleurs ce que préconisait la noosphère de l'enseignement des sciences physiques pour les programmes de 1996 :

> On souligne le cas du mouvement de translation pour lequel le vecteur vitesse ne dépend que du temps. Le mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe fait apparaître que le vecteur vitesse dépend du point du solide et varie dans le temps. **Cette étude permet d'insister sur la distinction entre variation de la valeur numérique de la vitesse (mouvement uniforme ou non) et variation du vecteur vitesse[11].** (CNDP, 52)

Analyse des exercices donnés dans ce chapitre

Sur les 31 exercices proposés par les auteurs dans cette partie sur le mouvement d'un solide, on en note 4 qui évoquent la vitesse en tant que notion physique modélisée par le vecteur et la tâche qui y est demandée concerne toujours la construction graphique de la vitesse. Cette construction se faisant le plus souvent après une expérience d'enregistrement de mouvement typiquement illustrée ici par l'exercice résolu proposé par les auteurs.



Construire un vecteur vitesse

Énoncé

Sur une table horizontale, un mobile sur coussin d'air S est relié à un point fixe O par un fil inextensible.
On lance le mobile et on enregistre, à intervalles de temps égaux à τ ($\tau = 20$ ms), les positions successives M_i du point M situé au centre de la semelle du mobile.
La première partie du mouvement s'effectue fil tendu, puis celui-ci casse. Un peu plus tard, la turbine qui éjecte l'air s'arrête.
L'enregistrement obtenu est représenté sur le document ci-dessous à l'échelle 1/2.

a. On constate au vu de l'enregistrement que le mouvement du point M peut se décomposer en trois phases distinctes.
Donner sous la forme M_iM_j les trois parties de l'enregistrement correspondant à ces trois phases.
Pour chacune d'elle, donner la nature du mouvement et préciser si le vecteur vitesse du point M est constant.

b. Construire le vecteur vitesse aux points M_4, M_{14} et M_{20}. On prendra comme échelle de vitesse : 1 cm représente 0,1 m · s^{-1}.

Illustration par un exercice résolu d'une construction de vecteur vitesse (Tomasino 2001, p.48).

Tout le reste des exercices évoquent la vitesse avec sa caractéristique de valeur numérique. Cette tendance à privilégier l'utilisation du vecteur par sa seule caractéristique numérique

[11] Ce sont les auteurs qui soulignent.

(près de 80% des exercices) n'est-t-elle pas une des sources de la tendance de la plupart des élèves à réduire les grandeurs vectorielles à une leur caractéristique scalaire ? On remarque au passage que les définitions et propriétés données par les auteurs, relatives au mouvement de translation ne font l'objet d'aucun exercice. Tout au plus proposent-ils trois exercices dans la rubrique « je m'entraîne » de reconnaissance visuelle de ce type de mouvement à partir d'un schéma (exercices 6, 7 et 8, p. 50).

Etude du chapitre « Forces s'exerçant sur un solide »

Analyse du cours donné dans ce chapitre

Les auteurs visent deux objectifs dans ce chapitre du manuel traitant des forces :

- Identifier et représenter les actions mécaniques qui s'exercent sur le solide ;
- Prévoir les effets produits par les actions exercées sur un solide.

Ce cours est divisé en 3 parties.

La première partie s'intitule « Actions mécaniques exercées sur un corps ».

En physique, les actions macroscopiques sont modélisées par la notion de force qui est elle aussi représentée à son tour par un vecteur notent les auteurs. Ceux-ci font voir à travers l'exemple d'un skieur nautique les différentes caractéristiques qui en font un vecteur. Le fil exerce une action mécanique sur le système mécanique constitué par la poignée et le skieur : il exerce donc une force sur ce système qui a :

- Une direction : celle du fil
- Un sens : celui de l'action mécanique exercée ici du skieur vers le bateau
- Une valeur : elle caractérise l'intensité de la force et est exprimée en newton (N)

Ce vecteur est représenté à partir du point d'application de la force. C'est l'exemple d'un vecteur lié en mathématique. Cette notion de point d'application semble tellement importante en physique que les auteurs en ont fait un titre de paragraphe à part entière. Comme une action localisée s'exerce en un point, la force modélisant cette action a pour point d'application ce point même. Cependant, pour des forces de contact modélisant des actions réparties, les auteurs semblent laisser implicite la localisation du point d'application de la force résultante : *on peut également associer un point d'application à la force résultante des forces réparties,* disent-ils.

La notation $\vec{F}_{A/B}$ est utilisée pour représenter la force exercée par le corps A sur le corps B.

Après avoir présenté les actions et leur modélisation par les forces, les auteurs en arrivent à une description des effets d'une force illustrée par des exemples. On peut citer entre autres :

> Une force peut empêcher le mouvement d'un corps. (On dit que le corps est à l'équilibre.)
>
> Une force peut modifier la forme d'un corps.
>
> Une force peut modifier le vecteur vitesse des points d'un solide.

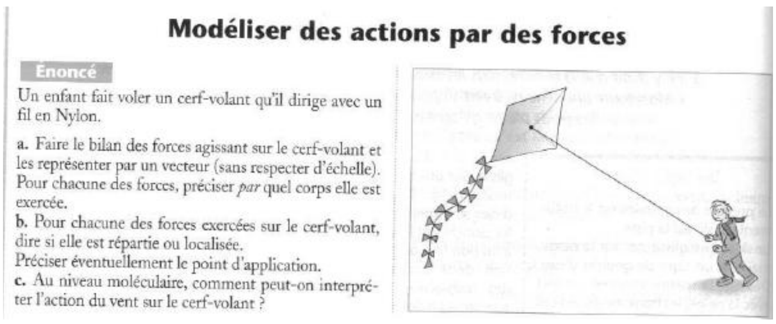
On voit que dans cette partie, les auteurs se limitent à une description le plus souvent qualitative des situations physiques proposées. Description reposant essentiellement sur la perception immédiate (lecture de photos, observation immédiate d'objets, etc.). Peu de situations comportent une entrée vers le formalisme mathématique.

Analyse des exercices donnés dans ce chapitre

L'option de réduire au minimum tout recours au formalisme mathématique visée par les auteurs dans le cours se ressent aussi au niveau des exercices. Dans les 20 exercices proposés, on peut relever essentiellement trois types de tâches :

- Faire le bilan des forces agissant sur un objet ;
- Représenter graphiquement une force par un vecteur avec le schéma proposé dans la situation;
- Calcul simple de forces et le plus souvent du poids d'un corps.

L'exercice résolu ci-dessous donne une illustration de cette tendance à la description qualitative des situations physiques proposées.



Modéliser des actions par des forces

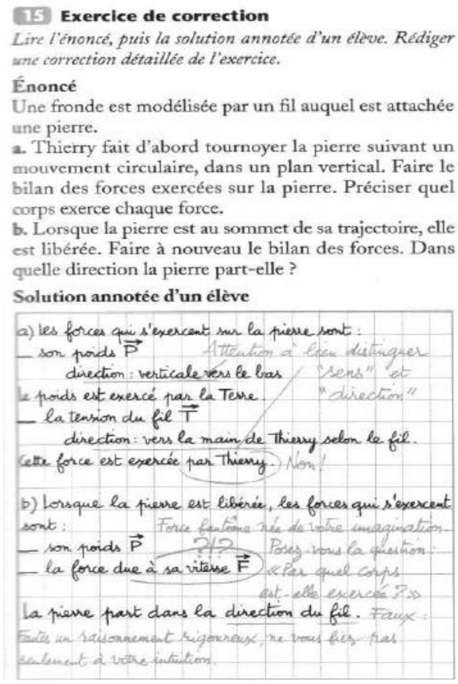
Enoncé

Un enfant fait voler un cerf-volant qu'il dirige avec un fil en Nylon.

a. Faire le bilan des forces agissant sur le cerf-volant et les représenter par un vecteur (sans respecter d'échelle). Pour chacune des forces, préciser *par* quel corps elle est exercée.
b. Pour chacune des forces exercées sur le cerf-volant, dire si elle est répartie ou localisée.
Préciser éventuellement le point d'application.
c. Au niveau moléculaire, comment peut-on interpréter l'action du vent sur le cerf-volant ?

Extrait de (Tomasino 2001, p.64).

On remarquera ici que les auteurs n'ont pas occulté les caractéristiques de direction et de sens des grandeurs vectorielles. D'ailleurs, dans toutes les situations proposées, la tâche de représenter une force par un vecteur est présente avec une demande de description détaillée des caractéristiques de direction et de sens de ces forces. La situation ci-dessous que les auteurs appellent *exercice de correction* avec une *solution annotée d'un élève* en est une bonne illustration.



15 Exercice de correction

Lire l'énoncé, puis la solution annotée d'un élève. Rédiger une correction détaillée de l'exercice.

Énoncé

Une fronde est modélisée par un fil auquel est attachée une pierre.

a. Thierry fait d'abord tournoyer la pierre suivant un mouvement circulaire, dans un plan vertical. Faire le bilan des forces exercées sur la pierre. Préciser quel corps exerce chaque force.

b. Lorsque la pierre est au sommet de sa trajectoire, elle est libérée. Faire à nouveau le bilan des forces. Dans quelle direction la pierre part-elle ?

Solution annotée d'un élève

a) les forces qui s'exercent sur la pierre sont :
— son poids $\vec{P}$ Attention à bien distinguer
direction : verticale vers le bas "sens" et
le poids est exercé par la Terre "direction"
— la tension du fil $\vec{T}$
direction : vers la main de Thierry selon le fil.
Cette force est exercée par Thierry. Non !

b) Lorsque la pierre est libérée, les forces qui s'exercent sont : Force fantôme née de votre imagination.
— son poids $\vec{P}$?!? Posez-vous la question :
— la force due à sa vitesse $\vec{F}$ « Par quel corps est-elle exercée ? »
La pierre part dans la direction du fil. Faux : Faites un raisonnement rigoureux, ne vous fiez pas seulement à votre intuition.

Extrait de (Tomasino 2001, p.67).

Etude du chapitre « Les lois de Newton »

Analyse du cours donné dans ce chapitre

Pour ce chapitre relatif aux lois de Newton, l'objectif est de connaître et de savoir utiliser les trois lois que sont le principe d'inertie, la deuxième loi de Newton et le principe des actions réciproques.

Ce qui nous intéresse dans cette étude, c'est l'analyse des différentes utilisations du vecteur compte tenu du rôle fondamental et pratique de la somme vectorielle dans cette partie du programme.

L'objectif de ce chapitre est de connaître les trois lois de Newton, dont chacune fait l'objet d'une partie et que les auteurs présentent comme suit :

Enoncé du principe d'inertie

> Dans un référentiel galiléen, si la somme des forces extérieures qui s'exercent sur le solide est nulle ($\vec{F} = \sum \vec{f} = \vec{0}$), son centre d'inertie a un mouvement rectiligne uniforme ($\overrightarrow{v_G} = \overrightarrow{cte}$).
>
> Réciproquement, dans un référentiel galiléen, si le centre d'inertie d'un solide a un mouvement de rectiligne uniforme ($\overrightarrow{v_G} = \overrightarrow{cte}$), alors la somme des forces qui s'exercent sur ce solide est nulle

$(\vec{F} = \sum \vec{f} = \vec{0}\ ).$

$\overrightarrow{v_G} = \overrightarrow{cte}$ permet donc de dire que $\sum \vec{f} = \vec{0}$, on peut déterminer alors les caractéristiques d'une force inconnue.

Autrement dit dans un référentiel galiléen, un solide est en mouvement de translation rectiligne uniforme si et seulement si la somme des forces qui s'exercent sur ce solide est nulle.

Quant à la deuxième loi de Newton, elle s'énonce ainsi :

> Dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse $\overrightarrow{v_G}$ du centre d'inertie G d'un solide varie, la somme $\vec{F} = \sum \vec{f}$ des forces qui agissent sur le solide n'est pas nulle. La direction et son sens sont ceux de la variation de $\overrightarrow{\mathrm{v}_G}$ entre deux instants proches.

Les auteurs font remarquer que *les lois de Newton relient les forces aux changements de la vitesse et pas à la valeur de la vitesse elle-même.*

La troisième loi énonçant le principe des actions réciproques qui est celle de l'égalité de l'action et de la réaction dit que :

> A et B étant deux corps en interaction, $\vec{F}_{A/B}$ la force exercée par A sur B et $\vec{F}_{B/A}$ la force exercée par B sur A vérifient toujours l'égalité vectorielle : $\vec{F}_{A/B} + \vec{F}_{B/A} = \vec{0}$.

Les auteurs font remarquer que cette égalité reste vraie dans tout référentiel et quel que soit l'état de mouvement de A et de B.

De plus, pour amener les élèves à surpasser la difficulté conceptuelle liée au principe de l'action et de la réaction soulignée par le programme, les auteurs proposent diverses illustrations dont celle-ci :

Fig. 13. Le chariot avance. Pourtant, la force exercée par le chariot sur la personne a même valeur que la force exercée par la personne sur le chariot.

Extrait de (Tomasino 2001, p.75).

<u>Analyse des exercices relatifs aux lois de Newton</u>

Les types de tâches en jeu dans ces exercices sont :

- Faire le bilan des forces agissant sur un objet ;
- Appliquer le principe d'inertie ;
- Déterminer la direction et le sens du vecteur variation $\Delta\vec{v}_G$ de la vitesse du centre d'inertie (il s'agit d'appliquer la deuxième loi de Newton) ;
- Expliquer des situations mettant en jeu le principe des actions réciproques.

Notons que dès la première page de cette parie, les auteurs montrent par un exercice résolu la voie à suivre en ce qui concerne les méthodes mathématiques à utiliser dans les exercices de physique. C'est ce qu'ils appellent le « point méthode » destiné à indiquer la spécificité des modes de résolution en physique.

POINT-MÉTHODE

Déterminer le vecteur $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$

1. Méthode géométrique

- Mettre les segments fléchés représentant $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ « bout à bout » : conserver exactement les directions et les sens des vecteurs. L'extrémité du premier doit être à l'origine du second. On obtient le segment fléché représentant $\vec{F}$ en joignant l'origine du premier vecteur à l'extrémité du second.
- Si on connaît l'échelle de représentation, la valeur de $\vec{F}$ se mesure directement sur la figure. Les relations trigonométriques permettent aussi de déterminer F par le calcul.

2. Méthode analytique

- Choisir un repère orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j})$. Deux axes suffisent lorsque les vecteurs sont dans un même plan.
- Déterminer les coordonnées (F_{1x}, F_{1y}) de $\vec{F}_1$ et (F_{2x}, F_{2y}) de $\vec{F}_2$. Les coordonnées de $\vec{F}$ sont :
$$F_x = F_{1x} + F_{2x} \,;\, F_y = F_{1y} + F_{2y}$$

Extrait de (Tomasino 2001, p.80).

On remarque que seule la règle du triangle est mise en œuvre dans les procédures de constructions graphiques. Cette règle consiste à mettre bout à bout les représentants des vecteurs à additionner, en faisant coïncider l'origine de l'un avec l'extrémité de l'autre ; la somme étant représentée par le troisième côté du triangle ainsi formé, en prenant pour origine celle du premier vecteur considéré. Les auteurs ne font nulle part mention de la règle du parallélogramme qui est pourtant familière aux élèves depuis la troisième dans le calcul vectoriel du cours de mathématiques. Ceci est toutefois surprenant dans la mesure où deux forces à additionner n'ont pas en général le même point d'application, ce qui est d'ailleurs le cas de l'exemple du livre !

III.5.1.1 Analyse du manuel de la collection PARISI

Présentation générale du manuel de la collection PARISI

Les auteurs présentent le manuel comme adapté au programme de 1re S avec *un cours à la fois rigoureux et synthétique* et pour chaque chapitre du manuel, ils structurent la partie consacrée aux exercices en quatre rubriques :

Exercice résolu où les auteurs proposent une solution modèle d'un exercice en faisant le point sur les conseils méthodologiques nécessaires pour résoudre un exercice de physique.

Exercices d'application : il s'agit d'exercices où l'élève est appelé à appliquer directement les définitions et propriétés apprises dans le cours. Ce sont des exercices simples destinés à l'élève pour le contrôle immédiat de ses connaissances.

Exercices à caractère expérimental : ce sont des exercices présentant des enregistrements et des protocoles en vue des questions d'analyse et de synthèse.

Problèmes ou exploitation de documents ce sont des exercices plus complexes nécessitant une bonne connaissance du cours et un bon niveau de réflexion.

Le manuel est composé de 16 chapitres dont trois traitent des grandeurs vectorielles physiques (vitesses et forces) et des mouvements de translation et de rotation qui nous intéressent ici :

Chapitre 3 Mouvements d'un solide
Chapitre 4 Forces et effets des forces
Chapitre 5 Les lois de Newton

Comme le manuel précédent nous procédons à une analyse du cours et des exercices proposés par les auteurs dans chaque chapitre en rapport avec l'utilisation du vecteur avec les notions physiques de vitesse, de force et de mouvement de translation.

Etude du chapitre « mouvement d'un solide »

Analyse du cours donné dans ce chapitre

Dès la première page, les auteurs mettent en exergue les notions clés du chapitre (mouvement, solide, référentiel, repérage, position, trajectoire, vecteur vitesse, translation et rotation) et annoncent les objectifs visés dans cette partie :

- Connaître les définitions de la vitesse moyenne et la vitesse instantanée d'un point dans un référentiel donné.
- Savoir déterminer et représenter le vecteur vitesse d'un point sur un enregistrement.
- Savoir identifier les mouvements de translation et de rotation d'un solide. Connaître leurs propriétés.

Dans cette même page, une photo d'une grande roue de fête foraine donne une entrée dans la problématique de caractérisation des mouvements de translation et de rotation.

Après avoir exposé quelques éléments relatifs à la caractérisation d'un mouvement (Relativité du mouvement, notion de référentiel, trajectoire d'un point, date et durée) les auteurs en viennent à la notion de vitesse d'un point dans un référentiel. Ils passent alors en revue les notions de vitesse moyenne d'un point, de vitesse instantanée d'un point et de vecteur vitesse.

Tout d'abord, il faut relever l'ambiguïté attachée à l'utilisation du mot vitesse. En effet, il est assez souvent employé seul pour désigner des entités aussi distinctes que la vitesse moyenne, la vitesse instantanée, le vecteur vitesse.

Voici la technique illustrée par les auteurs pour évaluer la vitesse instantanée d'un point A_i à l'instant t_i :

> Considérons deux positions A_{i-1} et A_{i+1} d'un point A sur sa trajectoire, atteintes aux instants t_{i+1} et t_{i-1}. Si la durée $t_{i+1} - t_{i-1}$ est suffisamment petite, la portion de trajectoire reliant ces deux points peut être assimilée au segment de droite reliant A_{i-1} et $A_{i+1.}$ La vitesse moyenne sur ce segment est approximativement égale à la vitesse instantanée du mobile à l'instant t_i en $A_{i.}$ (Parisi, p. 37)

La méthode consiste à mesurer la longueur du segment $[A_{i-1}A_{i+1}]$ que l'on divise par la durée $2\tau = t_{i+1} - t_{i-1}$. Soit $v_i = \dfrac{A_{i+1}A_{i-1}}{2\tau}$.

Cette formule de calcul approché de la vitesse instantanée permet d'éviter l'utilisation prématurée de la notion de dérivée ; ce qui est en cohérence avec l'objectif du programme qui est de savoir déterminer et représenter le vecteur vitesse d'un point sur un enregistrement.

Pour l'étude du vecteur vitesse, les auteurs rappellent que *pour étudier le mouvement d'un point, il est intéressant de disposer d'un outil mathématique qui renseigne non seulement sur la valeur de la vitesse instantanée à un instant, mais aussi sur la direction et le sens du mouvement au point de la trajectoire atteint à cet instant. Cet outil est le vecteur.*

La caractérisation du vecteur vitesse est alors donnée comme suit :

> Direction : tangente à la trajectoire à la position du mobile à la date t.
>
> Sens : celui du mouvement.
>
> Valeur : celle de la vitesse instantanée du mobile à la date t.

Ici aussi on voit que la modélisation de la vitesse correspond à un vecteur au sens mathématique de vecteur libre.

La dernière section concerne les définitions et propriétés de mouvements simples d'un solide indéformable.

Ainsi, on y trouve la définition suivante :

> Un solide est en translation dans un référentiel lorsque tout segment reliant deux points quelconques du solide se déplace parallèlement à une direction fixe dans ce référentiel.

De plus, ils précisent que :

> Dans le cas d'un solide en translation dans un référentiel donné et dans ce cas seulement, tous les points du solide ont le même vecteur vitesse à l'instant t par rapport à ce référentiel.
>
> Si la direction du vecteur vitesse commun à tous les points du solide ne change pas au cours du temps, alors le solide est en **translation rectiligne.** Les trajectoires de tous les points du solide sont des droites parallèles.
>
> Dans les autres cas, il est dit en **translation curviligne**[12]. (Parisi, p. 39)

On peut remarquer comme dans le manuel précédent que nous avons ici aussi l'énoncé des définitions et propriétés sans démonstrations, ni commentaires sur les liens qu'elles entretiennent entre elles.

Le cas de la grande roue de fête foraine est donné en illustration sous forme de schéma où chaque nacelle est représentée par un rectangle. C'est un exemple intéressant permettant de percevoir la différence entre mouvement de translation circulaire et mouvement de rotation, mais encore une fois cela reste sous silence.

Analyse des exercices relatifs au mouvement d'un solide

Etude du mouvement d'un solide

Il y a tois grands types de tâches :

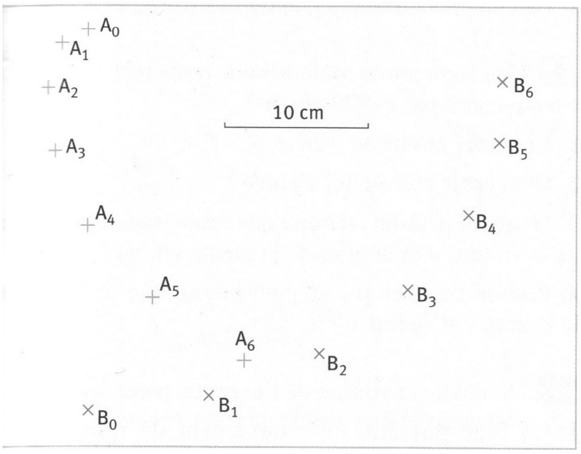
- Calculer la vitesse d'un point donné d'un solide en mouvement, à certains instants
- Représenter le vecteur vitesse à ces mêmes instants
- Déterminer la nature du mouvement d'un solide.

En revenant aux exercices donnés dans le manuel, on remarque que pour déterminer la direction du vecteur vitesse sans disposer de la notion de dérivée, les auteurs demandent de l'approcher par la direction du segment de droite joignant A_{i-1} et A_{i+1} du point aux instants t_{i-1} et t_{i+1}. Le représentant du vecteur vitesse choisi a pour origine la position occupée par le point à l'instant t.

[12] Ce sont les auteurs qui soulignent.

Etude du mouvement d'un solide

On a enregistré le mouvement de deux points A et B d'un même solide se déplaçant sur une surface plane horizontale. Le dispositif d'enregistrement est fixe par rapport à la table. À l'instant $t = 0$ correspondent les positions A_0 et B_0 de A et B. Entre deux repérages successifs, il s'écoule une durée $\tau = 40$ ms.



Reproduire l'enregistrement sur une feuille. On pourra également le télécharger puis l'imprimer depuis le site Internet www.editions-belin.com

1. Calculer la vitesse instantanée du point A aux instants t_2 et t_5. Représenter le vecteur vitesse de A aux instants t_2 et t_5 avec l'échelle 1 cm pour 0,5 $m \cdot s^{-1}$.

2. Calculer la vitesse de B aux mêmes instants.

3. Le centre d'inertie G du solide est situé au milieu du segment AB. Déterminer les positions de G aux différents instants de l'enregistrement.

4. Montrer que G possède un mouvement particulier. Indiquer le nom de ce mouvement.

5. Le solide est-il en translation dans le référentiel de la table ? en rotation autour d'un axe fixe ? Justifier la réponse.

Extrait de la collection (Parisi, p.43)

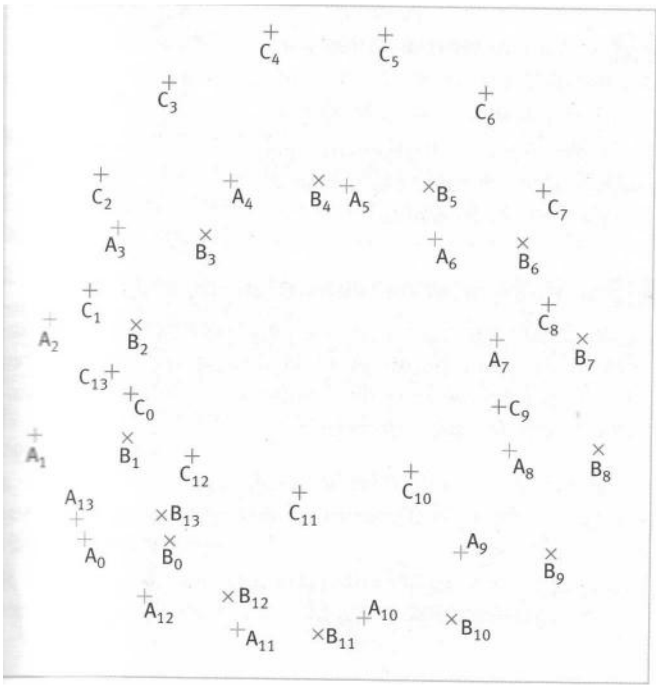
Enfin pour qualifier certains mouvements d'un point, des critères sur la valeur du vecteur vitesse sont donnés. Par ailleurs nous remarquons que dans tous les exercices relatifs à cette partie, toutes les tâches proposées portent essentiellement sur le calcul de la vitesse (valeur du vecteur vitesse). En revanche, les caractéristiques d'orientation ne sont traitées que sous l'aspect graphique ce qui semble leur donner moins d'importance que la caractéristique scalaire qui fait elle l'objet de calculs.

Mouvement d'une nacelle de grande roue

L'exercice ci-après à caractère expérimental extrait du manuel résume à lui seul les types de tâches attendus pour ce qui concerne le mouvement de translation d'un solide.

Mouvement d'une nacelle de grande roue

Le document représente l'enregistrement, dans un référentiel terrestre, du mouvement de trois points A, B et C de la nacelle d'une grande roue de fête foraine, considérée comme un solide indéformable. L'échelle est : 1 cm $\Leftrightarrow$ 1 m, et la durée entre deux pointés est = 800 ms. Les points A et B sont les extrémités du plancher de la nacelle, tandis que le point C est le point d'attache de la nacelle.



Extrait de la collection (Parisi, p. 45)

1. Comment montrer graphiquement que la trajectoire des points A, B et C est un cercle?
2. a. Déterminer les centres des trajectoires, que l'on notera respectivement O_A, O_B et O_C.

b. Calculer les rayons de chaque trajectoire, puis les comparer.

3. Comparer les trajectoires des points A, B et C. Tracer quelques segments A_iB_i; que remarque-t-on? Même questions pour les segments A_iC_i et C_iB_i.
4. Calculer la vitesse angulaire du point A, du point B et du point C.
5. Tracer un vecteur vitesse sur chaque trajectoire, soit $\vec{v}_A$, $\vec{v}_B$, $\vec{v}_C$ (par exemple au point 4), et les comparer. **Conclure et qualifier le mouvement de la nacelle**[13].

Pour résoudre les tâches proposées dans cet exercice typique du mouvement de translation et particulièrement les tâches contenues dans la question 5, il faut utiliser la caractérisation du mouvement de translation par le vecteur vitesse : *Dans le cas d'un solide en translation dans un référentiel donné et dans ce cas seulement, tous les points du solide ont le même vecteur vitesse à l'instant t par rapport à ce référentiel*. Cependant, on peut aussi conclure sur la nature du mouvement à partir des la question 3 en utilisant la caractérisation par des trajectoires superposables. Mais, les auteurs ne justifient ni dans le cours ni dans les exercices pourquoi ils se restreignent à l'étude de trois points pour conclure sur la nature du mouvement du solide. On voit que la technique consistant à justifier que le mouvement n'est pas un mouvement de translation ou de rotation est plus facile à mettre en œuvre car étant la contraposée de l'autre technique. Il suffit dans ce cas par exemple de mouvement de

[13] C'est nous qui soulignons

translation, d'exhiber deux points qui n'ont pas les mêmes vecteurs vitesse à chaque instant ou dont les trajectoires ne sont pas identiques pour conclure que le solide n'est pas en mouvement de translation. On peut remarquer aussi que la définition évoquée dans le cours (à savoir *qu'un solide est en translation dans un référentiel lorsque tout segment reliant deux points quelconques du solide se déplace parallèlement à une direction fixe dans ce référentiel)* est non vital dans le traitement des exercices proposés.

Etude du chapitre « Forces et effets de forces »

Analyse du cours donné dans ce chapitre

Les objectifs fixés par les auteurs dans ce chapitre s'énoncent comme suit :

- Identifier les actions qui s'exercent sur un solide.
- Représenter ces actions en les modélisant par un vecteur force.
- Prévoir les effets des forces s'exerçant sur un solide.

Le cours est structuré en trois parties :

Actions s'exerçant sur un système

Le vecteur force

Les effets des forces

Dans la première partie *Actions s'exerçant sur un système*, les auteurs passent en revue la notion de système qu'ils définissent comme *une partie délimitée de l'univers* et les notions d'action à distance et d'actions de contact. La deuxième partie concerne le vecteur force que les auteurs présentent comme la modélisation d'une action d'un système sur un autre système. Ce vecteur force ou force possède les caractéristiques suivantes :

Direction et sens : ceux de l'action qu'il modélise

Valeur : exprimée en newton (N), elle caractérise l'intensité de l'action

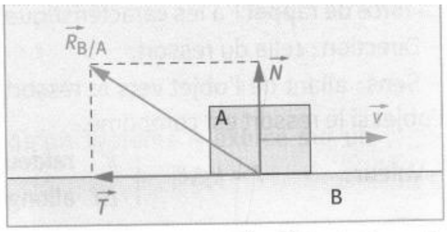
Les auteurs notent :

Il est possible pour certaines forces de définir un **point d'application**. Ainsi, pour le poids d'un objet, force à distance modélisant l'action gravitationnelle de la terre sur l'objet, est considéré comme s'appliquant au centre de gravité G de l'objet.

Pour les **forces de contact**, il n'est pas possible de définir **a priori** un point d'application, sauf dans le cas particulier d'un contact ponctuel, comme pour la force exercée par un fil ou un ressort.

Sauf précisions contraires, la force modélisant l'action d'un système A sur un système B est notée $\vec{F}_{A/B}$.

Après cette présentation générale d'une force, les auteurs proposent des exemples de forces en mettant en valeur toutes leurs caractéristiques citées précédemment. Prenons le cas par exemple de la force de contact exercée par un solide sur un autre solide. C'est une situation où le point d'application est choisi arbitrairement sur la surface de contact.



Doc. 9. Composantes $\vec{T}$ et $\vec{N}$ de la force de contact $\vec{R}_{B/A}$ quand A possède la vitesse $\vec{v}$ par rapport à B.

Extrait de la collection (Parisi, p. 55)

La troisième partie traite des effets des forces :

Déformation d'un objet

Modification de la vitesse du centre d'inertie d'un solide

Mise en rotation d'un solide autour d'un axe fixe

On peut remarquer comme dans le manuel précédent que les auteurs se limitent à une description le plus souvent qualitative des situations physiques proposées. Description reposant essentiellement sur la perception immédiate (lecture de photos, observation d'objets schématisés, etc.).

Analyse des exercices relatifs aux « forces et effets de forces »

L'ensemble des exercices regroupe les types de tâches suivants :

- Faire l'inventaire des forces agissant sur un système
- Représenter sur un schéma les forces s'appliquant sur un objet
- Appliquer le principe d'inertie vu en seconde
- Calculer la valeur d'une force
- Calculer certains paramètres liés aux forces (masse d'un objet, masse volumique, constante de raideur, longueur d'un ressort, angle, etc.)
- Interpréter un phénomène physique lié aux forces.

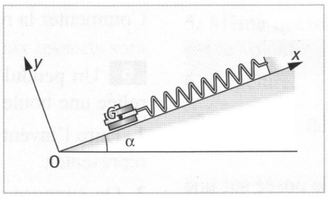
Remarquons qu'il y a un glissement de vocabulaire au niveau des exercices, l'expression « vecteur force » est systématiquement remplacée par le seul mot « force », ou plus rarement le seul mot « vecteur ».

Les deux exercices résolus respectivement intitulés *Ascension d'une montgolfière et Solide accroché à un solide sur un plan incliné,* peuvent être considérés comme des exemples de point de départ de types de tâches et techniques que les auteurs vont mettre en œuvre dans la série des 27 exercices proposés.

Exercice résolu 2 → *Voir aussi l'exercice* 23

Solide accroché à un ressort sur un plan incliné

On considère un support plan incliné d'un angle $\alpha = 20{,}0°$ par rapport à l'horizontale. L'extrémité d'un ressort de raideur $k = 12{,}5\ \mathrm{N \cdot m^{-1}}$ est fixé au support, tandis qu'à l'autre est accroché un palet autoporteur de masse $m = 410$ g et de centre d'inertie G. Le ressort est parallèle au support.



Un petit compresseur placé dans le palet envoie un jet d'air par un orifice situé au centre de la semelle du palet, afin de générer un coussin d'air entre le palet et le support. Soit $\vec{R}$ la force exercée par le coussin d'air sur le palet.

Quand l'ensemble est immobile, le ressort est allongé de $\Delta L = 110$ mm. On prendra $g = 9{,}81\ \mathrm{N \cdot kg^{-1}}$ pour la pesanteur au lieu de l'expérience.

1. Reproduire le schéma. Représenter la force de rappel $\vec{F}$ exercée par le ressort sur le palet. Calculer sa valeur F.

2. Même question pour le poids $\vec{P}$ du palet.

On considère le repère Oxy dans le plan de figure. Les coordonnées du vecteur $\vec{R}$ sont notées R_x et R_y.

3. Le palet étant immobile, indiquer en la justifiant la relation vectorielle vérifiée par $\vec{R}$, $\vec{F}$ et $\vec{P}$.

4. Calculer R_x et R_y. Ajouter la force $\vec{R}$ sur le schéma, en choisissant un point d'application quelconque sur la semelle du palet.

5. Expliquer en conclusion le rôle du coussin d'air.

Extrait de la collection (Parisi, p.59)

La méthode de résolution par projection sur des axes de coordonnés judicieusement choisis est typique des méthodes employées en physique. Dans un encadré réservé aux conseils pour la recherche de la solution les auteurs renvoient l'élève à une fiche technique intitulée *savoir manipuler les vecteurs en physique*. Le fait qu'elle se situe à la fin du manuel est un indice du contrat de non articulation des savoirs mathématiques et des savoirs physiques en vigueur dans la classe de physique.

Etude du chapitre «Les lois de Newton »

Analyse du cours donné dans ce chapitre

Comme annoncé dans le manuel précédent, notre intérêt porte sur l'analyse des différentes utilisations du vecteur compte tenu du rôle fondamental et pratique de la somme vectorielle dans cette partie du programme.

Dans ce chapitre les auteurs visent les objectifs suivants :

- Savoir appliquer le principe d'inertie.
- Connaître le principe des actions réciproques.
- Savoir appliquer la relation entre les forces exercées sur un système et les variations du vecteur vitesse de son centre d'inertie.

Le cours est structuré en 4 parties.

Dans la première parie, après un bref rappel historique sur le principe d'inertie, les auteurs présentent la notion de référentiels galiléens et énoncent la première loi de Newton ou principe d'inertie.

> Dans un référentiel galiléen, si la somme vectorielle des **forces extérieures** appliquées à un système est **nulle**, alors le **centre d'inertie** G du système est animé d'un mouvement rectiligne uniforme : le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ du point G est un **vecteur constant**.
>
> La réciproque est vraie : dans un référentiel galiléen, si le vecteur vitesse du centre d'inertie d'un système est un vecteur constant, alors la somme vectorielle des forces extérieures au système est nulle.

En marge de la page, les auteurs rappellent qu'*un vecteur est constant s'il conserve sa valeur, son sens et sa direction au cours du temps.*

La deuxième partie du cours concerne la deuxième loi de Newton qui s'énonce comme suit :

> Dans un référentiel galiléen, si un mobile est soumis à un ensemble de forces extérieures dont la somme vectorielle $\sum \vec{F}_{ext}$ est non nulle, alors le vecteur vitesse $\vec{v}_G$ centre d'inertie G de ce mobile varie au cours du temps en valeur, direction ou sens, et : $\Delta\vec{v}_G(t) = \vec{v}_G(t+\Delta t) - \vec{v}_G(t-\Delta t)$ et $\sum \vec{F}_{ext}$ ont même direction et même sens.

Les auteurs donnent ensuite quelques exemples d'application de cette loi sur la chute libre et sur mouvement circulaire uniforme.

Quant à la troisième loi de Newton appelée aussi principe des actions réciproques, elle fait l'objet de la troisième partie du cours. Voici son énoncé :

> Lorsqu'un corps A et un corps B sont en interaction, A exerce une force $\vec{F}_{A/B}$ sur B et B exerce une force $\vec{F}_{B/A}$ sur A quelque soit leur mouvement. Ces forces ont même direction, même valeur mais sont de sens contraires : $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$

Dans la quatrième partie du cours, les auteurs expliquent le démarrage d'une automobile par application des lois de Newton.

Analyse des exercices relatifs aux lois de Newton

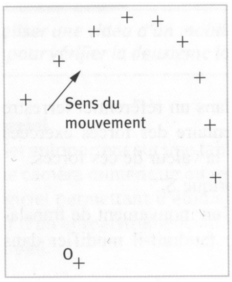
Les exercices présentent les types de tâches suivants :

- Faire l'inventaire des forces agissant sur un système ;
- Appliquer le principe d'inertie ;
- Représenter sur un schéma les forces appliquées à un système ;

- Tracer le vecteur variation de vitesse au point G ;
- Expliquer des situations mettant en jeu le principe des actions réciproques ;

La mise en œuvre de ses types de tâches est illustrée par l'exercice résolu 2 que nous reproduisons ci-dessous.

Étude d'un enregistrement



Voici l'enregistrement du mouvement du centre d'inertie G d'un palet autoporteur sur une table horizontale. Le palet est fixé à l'une des extrémités d'un ressort, l'autre extrémité étant accrochée à un point fixe O.

1. Faire l'inventaire des forces exercées sur le mobile, et les représenter sur un schéma (on néglige les frottements et la poussée d'Archimède).

2. Déterminer les caractéristiques du vecteur $\vec{F} = \Sigma\vec{f}_{ext}$.

3. Quelle est la nature du mouvement du palet dans le référentiel terrestre supposé galiléen ?

4. Tracer le vecteur variation de vitesse au point G_3. L'échelle est choisie de façon à ce que la longueur du vecteur vitesse en G_i soit égale à celle de la corde $G_{i-1}G_{i+1}$.

5. Quels sont la direction et le sens du vecteur $\vec{F}$ à la date t_3 ? La deuxième loi de Newton est-elle vérifiée ?

6. Le ressort casse brutalement : quel sera alors le mouvement de G ?

MÉTHODE. Obtenir la direction et le sens du vecteur variation de vitesse

I Numéroter les positions du centre d'inertie G_1, G_2...G_i.

II Tracer le vecteur vitesse $\vec{v_i}$ au point G_i. Le vecteur $\vec{v_i}$ est tangent à la trajectoire. Avec une bonne approximation, on le représentera parallèle au segment $[G_{i-1}G_{i+1}]$.

III Pour tracer le vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v_i} = \vec{v}_{i+1} - \vec{v}_{i-1}$, reporter le vecteur $\vec{v}_{i+1}$ au point G_i. À l'extrémité de ce vecteur, reporter alors le vecteur $(-\vec{v}_{i-1})$. On appelle E_i l'extrémité de ce dernier vecteur. Le vecteur $\Delta\vec{v_i}$ correspond au vecteur $\overrightarrow{G_iE_i}$.

Extrait de la collection (Parisi, p. 75)

III.5.2 Conclusion sur l’analyse des manuels

Nous avons vu à travers cette analyse des manuels de physique de première S, que l’utilisation du vecteur est incontournable pour modéliser certaines notions physiques en jeu dans ce niveau d’étude. Par ailleurs toutes les notions intervenant dans les définitions et les propriétés du mouvement de translation et des forces sont modélisées par des objets de nature mathématique : segments, trajectoires parallèles, vecteur, somme vectorielle, etc. Dans ce contexte, il semble difficile d’occulter tout traitement mathématique. Cependant, la forte injonction des programmes de physique de privilégier les aspects qualitatifs liés à l’expérimentation, semble contraindre les auteurs de manuels à ne se limiter qu’à cet aspect. Sous cet angle, il est difficile de faire vivre la demande institutionnelle d’établir des liens entre les différentes disciplines et en particulier entre la physique et les mathématiques. Dans ce sens, on voit que les connaissances des élèves sur les vecteurs ne sont pas réinterrogées par les nouveaux liens qu’ils ont avec les grandeurs physiques. L’enjeu de connaissance porte sur les grandeurs physiques, jamais sur le lien que celles-ci entretiennent avec les objets mathématiques. Ce constat est encore plus frappant pour ce qui concerne le mouvement de translation et la translation, dans la mesure où tout se passe comme si ces deux objets étaient identiques. On les aborde donc dans les deux disciplines, comme une nécessité d’avoir les deux points de vue, sans interroger la question du lien, qui poserait a priori la question des différences.

III.6 Conclusion sur l'analyse institutionnelle

Dans cette partie, nous avons tenté de cerner le rapport institutionnel à travers les programmes et de certains manuels de mathématiques et de physique. De ces analyses, on peut retenir globalement en mathématiques que :

Le vecteur dont l'introduction est liée à la translation, prend rapidement son indépendance de celle-ci et se constitue ainsi en thème autonome dont la niche essentielle est celle d'outil pour la résolution de problèmes géométriques liés aux configurations planes. Par ailleurs, il apparaît de plus en plus lié au cadre analytique. Cependant, comme nous l'avons constaté dans l'analyse de l'évolution de l'enseignement des vecteurs dans les programmes français, les programmes sénégalais restent aussi attachés au modèle de l'algèbre linéaire qui, même si elle a disparu officiellement des programmes du secondaire, continue de marquer l'organisation mathématique autour du vecteur. Par ailleurs, les aspects algébriques plus spécifiques du vecteur géométrique, comme le lien avec le théorème de Thalès, sont passés sous silence. On note là une certaine carence des programmes qui semblent liés implicitement à la niche algébrique par la référence à la structure d'espace vectoriel. La niche « outil pour les autres disciplines », paraît plus difficile à faire vivre. La référence par exemple à la physique est quasi inexistante, sauf un peu en première S en France et une vague injonction en seconde S des programmes sénégalais à montrer l'utilité du calcul vectoriel dans les autres disciplines.

Ainsi, le rapport institutionnel au vecteur dans la classe de mathématiques ne laisse que peu d'espace pour des situations issues de la physique. Quand elles existent dans les manuels, celles-ci restent subordonnées à un rapport inadéquat à la modélisation et apparaissent comme un prétexte à faire faire des mathématiques. Le plus souvent, on trouve dans les manuels des habillages plus ou moins cachés de situations pseudo physiques. Tout ce qui relève de la modélisation semble considéré comme transparent et conduit à des simplifications drastiques. L'élève en est réduit à comprendre ce qu'on veut lui faire faire, faute de pouvoir avoir vraiment de prise sur la situation physique en jeu.

Ainsi, il apparaît que le lien entre mathématiques et physique est peu abordé dans les programmes et manuels, et encore de façon assez anecdotique.

En physique nous avons vu que les objets mathématiques ne sont traités que comme des outils. Les difficultés éventuelles des élèves avec les vecteurs seront ainsi mises sur le compte de déficiences de l'enseignement des mathématiques sans que la possibilité d'un questionnement propre à la nature des liens avec les objets physiques puisse être perçu comme un levier intéressant. Dans l'enseignement des mouvements de translation, le rapport à la translation est complètement transparent donc considéré comme non problématique. De fait, la confusion entre mouvement de translation et mouvement rectiligne ne peut être perçue comme liée à la conception dynamique des transformations géométriques, jamais interrogée ni en mathématiques, ni en physique. Les travaux de Gasser sont pourtant explicites sur le fait que cette confusion touche les enseignants eux-mêmes.

En définitive, on voit donc que les liens entre mathématiques et physique à propos des vecteurs ou du mouvement de translation ont beaucoup de difficultés à vivre, que ce soit en mathématiques ou en physique.

Nos analyses montrent que pour améliorer cet état de fait, il serait nécessaire que chaque discipline puisse assumer au moins une part du questionnement de l'autre et que tant qu'on reste dans un cloisonnement où le découpage séquentiel interdit tout re-questionnement sur des supposés (mal) acquis antérieurs de l'autre discipline, la situation ne peut évoluer. Sur un plan purement technique, on voit donc où il serait important d'agir en termes de curriculum. Mais on comprend aussi que les injonctions, voire même des propositions concrètes sur les contenus ne pourront rien si les enseignants des deux disciplines ne peuvent ou ne veulent pas rentrer dans un vrai travail collaboratif. Une évolution dans la perception du découpage disciplinaire par les élèves est sûrement aussi nécessaire.

Dans le sens de ces dernières remarques, la suite de notre travail va consister à analyser les rapports personnels des enseignants des deux disciplines et des élèves aux objets de savoir en jeu dans notre travail. Il s'agira non seulement d'interroger ce rapport du point de vue de la discipline où ces objets de savoir évoluent mais aussi de l'autre. Concernant les enseignants, il nous importe aussi d'évaluer le rapport aux objets de savoir de l'autre discipline et plus généralement à la question de l'interdisciplinarité.

PARTIE IV

ANALYSE DES RAPPORTS PERSONNELS

IV.1 Analyse de deux questionnaires destinés aux enseignants

IV.1.1 Introduction

Afin de mieux cerner les rapports des enseignants des deux disciplines aux objets en jeu dans notre travail et aux liens entre les deux disciplines, nous avons mené une enquête à l'aide de deux questionnaires destinés aux enseignants de sciences physiques d'une part et aux enseignants de mathématiques d'autre part. Pour des questions pratiques, nous avons recueilli des données essentiellement au Sénégal, mais nos enquêtes précédentes (Ba, 2003) nous permettrons de voir les différences éventuelles avec la situation en France. A travers ces questionnaires nous visions à recueillir des informations de la part d'enseignants de physique et de mathématiques concernant :

1. Leur connaissance du savoir à enseigner dans l'autre discipline.
2. Leur collaboration éventuelle avec les enseignants de l'autre discipline.
3. Leur connaissance de ce qu'est un mouvement de translation (pour les enseignants de mathématiques)
4. Les liens qu'ils font et qu'ils voient entre mouvement de translation et translation et vecteurs (pour les enseignants de physique)
5. Leurs pratiques en classe relatives aux liens entre les concepts de grandeur vectorielle et de mouvement de translation en physique et les concepts de vecteur et de translation en mathématiques, ainsi que les difficultés d'apprentissage de ces concepts qu'ils repèrent chez leurs élèves.

Partant de ces objectifs, nous avons construit chaque questionnaire en le subdivisant en deux parties. La première comporte des questions relatives aux trois premières rubriques citées ci-dessus et la deuxième partie traite des questions relatives aux rubriques 4 et 5.

Ce chapitre est divisé en deux sections :

- la première traite de l'analyse a priori des deux questionnaires destinés aux enseignants de physique et de mathématiques,
- la deuxième concerne l'analyse a posteriori des données recueillies.

IV.1.2 Analyse a priori des questionnaires destinés aux enseignants.

IV.1.2.1 Questionnaire P destiné aux enseignants de physique

Le texte complet du questionnaire est donné en annexe 1 Le chapeau du questionnaire concerne l'identification partielle de l'enseignant (le questionnaire est anonyme) sur son ancienneté, l'établissement fréquenté, et les classes tenues. Ces indicateurs permettent de repérer certains facteurs qui peuvent avoir une influence sur les conceptions et les pratiques d'un enseignant Il permet en particulier de savoir à quelles institutions il a été assujetti par le passé en tant que professeur ou en tant qu'élève.

Le questionnaire est ensuite subdivisé en deux parties. L'une traite de quelques aspects du rapport personnel de l'enseignant de physique au savoir à enseigner en mathématiques et à ses collaborations avec les enseignants de cette discipline. L'autre essaie de cerner certains aspects du rapport personnel avec quelques objets de savoir transversaux entre les deux disciplines.

Première partie : Aspects généraux et pédagogiques

Dans la première partie, nous avons interrogé les professeurs de physique sur leur leurs sources de travail pour la préparation de leurs cours et de leurs exercices.

Question 1

Utilisez vous couramment des manuels pour préparer votre cours de physique et choisir vos exercices ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui lesquels ? (Dans l'ordre décroissant de plus grande utilisation.)

Cette question nous aidera à déterminer les manuels les plus utilisés par les professeurs de physique. C'est donc l'occasion de voir à partir de quelles sources ils construisent un cours et choisissent des exercices qu'ils estiment être en accord avec le programme. Les réponses obtenues nous donnerons aussi un moyen de connaître les manuels les plus utilisés.

Question 2

Connaissez – vous le programme de mathématiques des classes de 2^e S et 1°S ?

Pas du tout ☐ *Peu* ☐ *Assez bien* ☐ *Bien* ☐ *En détail* ☐

Expliquez pourquoi.

Cet item nous permettra de mieux appréhender le rapport personnel du professeur de physique au savoir à enseigner en mathématiques dans les classes 2^e S et 1°S.

Il faut s'attendre à une connaissance faible du savoir à enseigner en mathématiques de la part des enseignants de physique. Ceci signifie que les modalités concernant « pas du tout » et « peu » devraient être les plus fréquentes, ce qui confirmerait du repliement disciplinaire, pour reprendre l'expression de Chevallard.

Les explications éventuelles formulées par les professeurs de physique à l'item « *Expliquez pourquoi* » nous conduiront à confirmer ou infirmer l'hypothèse du repliement disciplinaire évoquée ci-dessus.

Question 3

Par rapport à ce programme, quels sont les concepts mathématiques qui selon vous sont le plus en rapport avec votre cours de physique de 2^e S ?

Classez-les par ordre de priorité SVP.

Cette question est destinée à mettre en évidence l'importance que les enseignants de physique accordent à certains concepts mathématiques par rapport à d'autres en interaction avec leur cours de 2°S. Sachant que l'étude des grandeurs vectorielles physiques (forces, vitesses) et des mouvements (mouvements de translation et mouvements de rotation) est au cœur de ce programme de physique, le vecteur et dans une moindre mesure, la translation mathématique devraient figurer en bonne place.

Question 4

Faites-vous référence aux mathématiques dans votre cours de physique ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui sous quelle forme ? Sinon pourquoi ?

Pour ces questions, on s'attend à ce que le professeur de physique fasse référence aux mathématiques soit sous forme de rappels nécessaires à son cours en faisant prévaloir ses connaissances mathématiques, soit sous forme d'outils à la physique en supposant que ses élèves ont les connaissances mathématiques indispensables au cours de physique. Il peut être amener aussi à orienter ses élèves à faire référence à leur cours de mathématiques en correspondance avec les notions physiques étudiées ou demander à son collègue de mathématiques de traiter telle ou telle notion mathématique. En général la synchronisation interdisciplinaire est réalisée par les programmes de mathématiques.

Question 5

Rencontrez – vous souvent votre collègue de mathématiques ?

a. *Pour parler de vos élèves : Oui* ☐ *Non* ☐
b. *Pour parler des programmes de mathématiques ou de physique : Oui* ☐ *Non* ☐
c. *Pour parler des liens entre mathématiques et physique en général : Oui* ☐ *Non* ☐
d. *Pour lui demander d'exposer en cours les bases mathématiques indispensables au déroulement du programme de physique : Oui* ☐ *Non* ☐
e. *Autres (préciser SVP)……………………………………………………….….*

(Vous pouvez développer par exemple pour préciser le type de discussion que vous avez ou pour dire pourquoi vous ne rencontrez pas souvent votre collègue ou pour faire-part des difficultés que vous avez à communiquer avec lui).

Cette question à choix multiples a pour objectif de nous donner une idée de la nature des rencontres dans le cadre scolaire entre le professeur de physique et ses collègues de mathématiques. Les développements dans « *Autres* » que l'enseignant de physique fera sur le type de discussions et des difficultés qu'il a à rencontrer ses collègues de mathématiques nous indiqueront le degré de fréquence de ces rencontres tout en nous permettant de nuancer et de mieux appréhender les réponses données dans les autres rubriques.

Il faut s'attendre à la prédominance du *« non »* dans les différentes rubriques. En effet, le fait de vouloir mettre par dessus tout la spécificité de sa discipline et le refus de tout « *métissage objectal* » souligné par Chevallard (2001) ne favorisent pas le dialogue interdisciplinaire.

Néanmoins la rubrique « *Pour parler de vos élèves* » devrait recueillir plus de oui, en raison des préoccupations des enseignants pour des questions spécifiquement liées à l'évaluation des élèves.

Deuxième partie : Aspects didactiques

Cette partie est composée de six questions et de deux exercices de physique.

Les questions et le premier exercice visent à permettre d'obtenir des renseignements sur les conceptions des enseignants de physique sur le mouvement de translation et sur ses liens avec la translation mathématique. Ils visent aussi à récolter des indices sur les connaissances des professeurs à propos des liens entre mouvement de translation et translation mathématique et aussi sur la confusion classique entre mouvement de rotation et de translation circulaire.

L'autre est une variante d'un exercice classique sur un pendule, qui met en oeuvre une utilisation des vecteurs, dans un cadre graphique, pour résoudre une question d'équilibre, avec des forces en interaction.

Questions 6 et 7

Quelle définition donnez – vous d'un mouvement de translation ?

Donnez – vous d'autres caractérisations ?

Rappelons que le mouvement de translation est défini dans le cours de physique en classe en classe de Seconde S au Sénégal, avec le mouvement de rotation, dans un chapitre sur l'étude des mouvements d'un solide (indéformable).

Dans tous les manuels, on trouve de façon centrale des illustrations d'exemples de tels mouvements : train, télécabine, ascenseur … nacelle de grande roue (qui représente l'illustration classique du mouvement de translation circulaire).

A l'appui de ces représentations, on explique qu'un mouvement de translation est caractérisé par le fait que *tout segment du solide reste parallèle à lui-même lors du mouvement* (plus rarement on trouve la formulation *tout segment garde une direction fixe lors du mouvement*).

> Un solide est en mouvement de translation si tout segment liant deux points du solide reste parallèle à lui-même au cours du mouvement. (Tomasino 2001 p.41 p.43)

Sur la base de ces exemples, on fait ensuite remarquer que les trajectoires de tous les points du solide sont « identiques » ou « superposables » (ce qui revient à dire du point de vue mathématiques qu'elles sont toutes translatées les unes des autres). Il n'est cependant jamais explicitement dit que c'est en fait une autre caractérisation du mouvement de translation.

Enfin, le cours se termine en énonçant (sans démonstration) que dans un mouvement de translation, à tout instant, tous les points du solide ont le même vecteur vitesse.

> - Tous les points ont, à chaque instant, le même vecteur vitesse (même direction, même sens et même valeur).
>
> Il suffit de connaître le mouvement d'un seul point du solide (par exemple, celui du centre d'inertie) pour connaître le mouvement du solide. (Ibid., p.43)

Il n'est pas toujours clairement explicité que c'est une autre caractérisation du mouvement de translation. C'est pourtant ce dernier résultat qui est le plus efficace pour résoudre la plupart des exercices. En accord avec le programme, on fait vérifier par les élèves ce fait expérimentalement sur des graphiques dans les exercices du chapitre. Cependant le lien avec la définition initiale du mouvement de translation n'est la plupart du temps pas du tout discuté. Dans ce contexte, il est clair que les trois caractérisations d'un mouvement de translation (« *tout segment reste parallèle à lui-même* », « *trajectoires de tous les points superposables* » et « *même vecteur vitesse en tout point* ») ont toutes les chances de rester comme trois propriétés indépendantes. Les élèves peuvent donc ainsi avoir une vision complète de ce qu'est un mouvement de translation, par contre, le fait que chacune des propriétés est liée aux autres de façon logique (à tel point qu'elles sont toutes trois équivalentes) est entièrement passé sous silence. Or, de par leurs connaissances mathématiques, les élèves ont tout à fait les capacités de comprendre la nature de ces liens. De plus, les expliciter engage dans un raisonnement où les arguments de nature mathématique et de nature physique se complètent. C'est ce que nous avons explicité dans notre mémoire de DEA (Ba 2003) et rappelé dans notre partie 0.

Dans certains manuels les illustrations font apparaître des vecteurs sans qu'il n'y soit fait allusion dans le texte.

En général les apprêtages didactiques (Ravel, 2003) du savoir réalisés par les auteurs de manuels et les enseignants sont peu différents, car non seulement les auteurs de manuels ont l'obligation de respect du programme, mais le manuel est aussi l'un des outils au service du projet didactique de l'enseignant. Il est alors peu probable que les enseignants qui répondent à notre questionnaire s'écartent de la définition donnée par les manuels à savoir : *Un solide est en mouvement de translation si tout segment liant deux points du solide reste parallèle à lui-même au cours du mouvement.* A défaut, c'est la caractérisation par le vecteur vitesse qui sera choisi par les enseignants de physique qui semble présenter moins de difficultés mathématiques.

En termes vectoriels, on dira que deux points quelconques A et B du solide forment un vecteur $\overrightarrow{AB}$ constant au cours du mouvement. Nous faisons l'hypothèse que peu d'enseignants de physique donneront une caractérisation vectorielle du mouvement de translation.

Question 8

Voyez-vous un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ? Si oui lequel ?

Il ne serait pas étonnant que plusieurs enseignants répondent oui, mais ne donnent que quelques vagues explications à la suite ou disent en gros que c'est la même chose. On sait que les liens s'ils existent sont assez subtils et il sera intéressant ici de voir combien d'enseignants de physique sont capables de les expliciter.

Question 9

Faites-vous explicitement référence en cours à l'existence ou non d'un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ?

Cette question est liée à la précédente et a pour objectif de clarifier les réponses précédentes. De plus, elle nous renseigne sur l'usage que le professeur de physique fait des connaissances mathématiques de ses élèves. S'ils perçoivent un lien entre mouvement de translation et translation mathématique sans faire référence à l'existence de ce dernier dans leurs cours, cela confirmera alors l'hypothèse d'une simple proximité langagière énoncée précédemment et donc qu'il n'y a aucun gain didactique à faire appel à ce lien.

Question 10

Vos élèves vous posent-ils des questions dans ce sens ?

Cette question vient compléter la question 8. Les élèves ont déjà rencontré la notion de translation mathématique en quatrième et troisième du collège, cela devrait les interroger sur le lien entre les deux notions. Si les enseignants de physique répondent oui à cette question, sans faire référence à ce lien dans leur cours, cela signifierait que pour une bonne partie ce sont les enseignants qui sont responsables du cloisonnement de deux disciplines refusant ainsi toute mixité avec la discipline sœur. Cependant, il y à fort à parier que les élèves ont intégré ce cloisonnement et ne posent jamais de questions de ce genre.

Question 11

Utilisez-vous des vecteurs à propos des mouvements de translation ?

Si oui expliquez comment.

Cette question est destinée à mettre en évidence si l'outil vectoriel dont les élèves disposent en mathématiques est utilisé par l'enseignant de physique pour son cours sur les mouvements de translation. Dans le cas d'une réponse positive, les professeurs sont invités à dire comment ils mettent en œuvre cette utilisation des vecteurs dans leur enseignement. S'agit-il d'une simple évocation verbale ou bien s'agit-il d'une véritable mise en scène du cours de physique par la sollicitation des connaissances mathématiques des élèves sur les vecteurs ?

La science du mouvement, en particulier celle des mouvements de translation, a eu dans le passé de fortes interactions avec les mathématiques. Cependant, nous avons vu que ces interactions restent implicites dans le savoir à enseigner ainsi que dans les manuels et les mouvements de translation sont présentés sans lien avec les mathématiques. De ce point de vue, cette question permet de savoir à quel degré l'enseignant de physique participerait au cloisonnement de sa discipline.

Notons ici que si l'enseignant se focalise sur la définition du mouvement de translation, par le fait que tous les points ont même vecteur vitesse à tout instant, il peut répondre oui à cette question en référence à cet usage. La conservation des vecteurs liés au solide ou la possibilité de passer de la trajectoire d'un point à celle d'un autre par un vecteur, sont des utilisations qui nous intéressent plus ici.

Question 12

Pensez-vous que vos élèves en 2^e^S et 1^e^S ont des connaissances mathématiques suffisantes et / ou adéquates pour l'usage que vous en faites en physique ?

Détaillez votre réponse SVP.

Il faut s'attendre à ce que beaucoup de professeurs de physique évoquent les difficultés que les élèves ont à transférer des connaissances mathématiques aux autres domaines de la science et en physique en particulier. Nous faisons l'hypothèse que la plupart d'entre eux penseront que ce transfert va de soi et qu'il doit être à la charge des élèves. Il peut aussi y avoir ici une demande de la part des enseignants de physique de la prise en charge des situations physiques dans le cours du professeur de mathématiques.

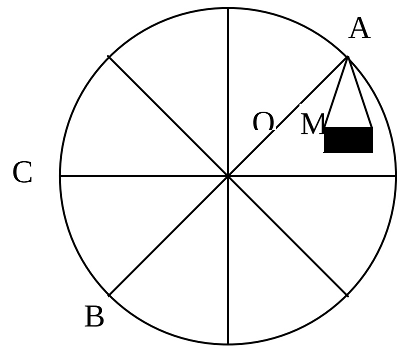
Analyse a priori de l'exercice 1

L'exercice 1 se compose de quatre questions qui portent sur un exemple classique de manège de la grande roue qui tourne à vitesse constante.

Cet exercice est prototypique d'un mouvement de translation qui n'est pas rectiligne. Les trajectoires étant circulaires, on le confond souvent avec un mouvement de rotation. Il nous a semblé intéressant de tester les réactions des professeurs de physique sur cet exemple classique. On ne s'attend bien sûr pas à ce qu'ils commettent d'erreur, mais il nous paraît important de relever les procédures qu'ils mettent en oeuvre pour justifier que c'est un mouvement de translation et s'ils font d'eux-mêmes allusion à la confusion avec le mouvement de rotation. Dans ce sens, on leur demande aussi s'ils proposeraient cet exercice à leurs élèves et les difficultés qu'ils envisagent.

Question 1

Représentez sur le dessin ci-dessous la nacelle lorsque son point de suspension, initialement en A, passe en B puis en C.



Cette question permet de s'approprier la situation.

On peut considérer deux points distincts de la nacelle en l'occurrence *A* et *M* (le point *A* étant le point d'attache de la nacelle à la roue) et on observe leur position relative au cours du mouvement. Il s'agit ici de reproduire le dessin de la nacelle en *B* et *C* en la maintenant verticale.

Question 2

Quel est le type de mouvement de la nacelle ? (Justifier votre réponse)

La première question a donné une piste pour répondre à cette question. En effet, en remarquant qu'aux différentes positions de la nacelle le segment [*AM*] reste parallèle à lui-même au cours du mouvement ou le vecteur $\overrightarrow{AM}$ reste constant, on est amené à conclure que le mouvement de la nacelle est un mouvement de translation.

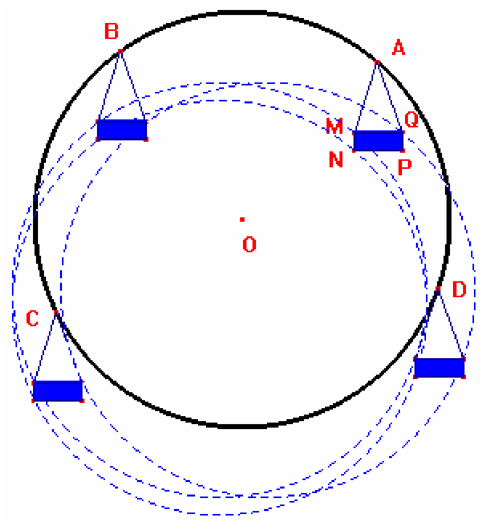
Cette justification n'est cependant que partielle, il s'agit en effet de montrer que tout vecteur de la nacelle reste constant. En considérant le problème comme plan, il suffirait de démonter en fait que deux vecteurs non colinéaires restent constants pour pouvoir conclure, moyennant des connaissances mathématiques que les élèves de ce niveau n'ont pas. Il sera intéressant ici de voir le type de justification que les professeurs de physique pourront donner.

Une autre façon de caractériser le mouvement de translation peut consister à dire que les trajectoires de tous les points sont translatées l'une de l'autre. On fait alors appel à une intuition du résultat sur le support du graphique.

La caractérisation par le fait que tous les points ont même vecteur vitesse à tout instant paraît difficile à mettre en oeuvre ici.

Question 3

Quelle est la trajectoire précise du point M ? (Justifier votre réponse). Tracez cette trajectoire en pointillés sur le dessin ci-dessus.



Dans le repère terrestre, lors que la nacelle effectue un tour complet le point *M* décrit un cercle de centre *O'* superposable au cercle de centre *O* et de rayon *OA*. Les trajectoires de tous les points de la nacelle sont des cercles de même rayon que le cercle de la grande roue (voir dessin ci-dessous).

Question 4

Donneriez-vous cet exercice à vos élèves ? Pourquoi ? (Éventuellement indiquez les modifications que vous apporteriez à l'énoncé.)

Beaucoup de professeurs estimeront nécessaire de donner cet exercice dans l'objectif de vérifier si les élèves arrivent à reconnaître un mouvement de translation circulaire car pour eux une translation s'identifie toujours à quelque chose de rectiligne. Certains peuvent suggérer de changer l'ordre des deux dernières questions, dans la mesure où la question 3 permet de donner une piste pour caractériser le mouvement de translation par le fait que les trajectoires de tous les points sont translatées les unes des autres.

Question 5

Quelles sont les difficultés que vous attendriez de vos élèves dans la résolution ? Justifiez votre réponse ?

Les professeurs de physique ne manqueront pas de relever pour leurs élèves des difficultés liées à la confusion entre mouvement de rotation et mouvement de translation induites ici dans le cas de la nacelle par le fait que les trajectoires de tous les points sont circulaires. Il sera intéressant de voir également comment ils jugeront la difficulté qu'il y a à démontrer rigoureusement que c'est un mouvement de translation.

Analyse a priori de l'exercice 2

Le but de cet exercice, est de permettre aux professeurs de physique de se prononcer sur leurs pratiques enseignantes et les difficultés qu'ils repèrent chez leurs élèves en ce qui concerne les grandeurs vectorielles. Les connaissances en jeu portent sur l'équilibre d'un objet soumis à trois forces. Le poids de l'objet et la force $\vec{F}$ d'attraction ont la même intensité $2N$, ce qui facilite la construction géométrique de la tension $\vec{T}$ par la règle du parallélogramme.

L'intérêt est de voir comment les connaissances géométriques sont mobilisées pour le traitement d'une situation physique nécessitant ces connaissances. Du point de vue mathématique, la somme de deux vecteurs et sa construction géométrique sont la clé du problème. Des connaissances élémentaires de géométrie et de trigonométrie sont aussi utiles pour résoudre l'aspect numérique du problème. La difficulté essentielle du problème est liée à la modélisation et à l'intrication entre les connaissances de physique et de mathématiques en jeu. Dans ce problème, l'usage qui est fait du dessin est hybride entre la représentation de la situation matérielle « réelle » et la modélisation mathématique. Ceci est cependant assez classique en physique, on représente une situation réaliste sur laquelle on « plaque » des ostensifs liés à la modélisation (vecteurs, points, angles, etc.). Ce qui est inhabituel ici c'est qu'un des éléments de la réalité (le fil) ne peut être dessiné qu'une fois la construction géométrique de la somme du poids et de la force d'attraction est effectuée. Le modèle semble déterminer la réalité. C'est bien qu'en fait la réalité n'est pas dans le dessin, tout est du niveau de la modélisation, mais à des degrés différents.

Le modèle mathématique en jeu permet de trouver la direction du fil, ce qui n'est pas classique dans un problème de physique. C'est un exercice proposé dans le test 2 prévu pour les élèves.

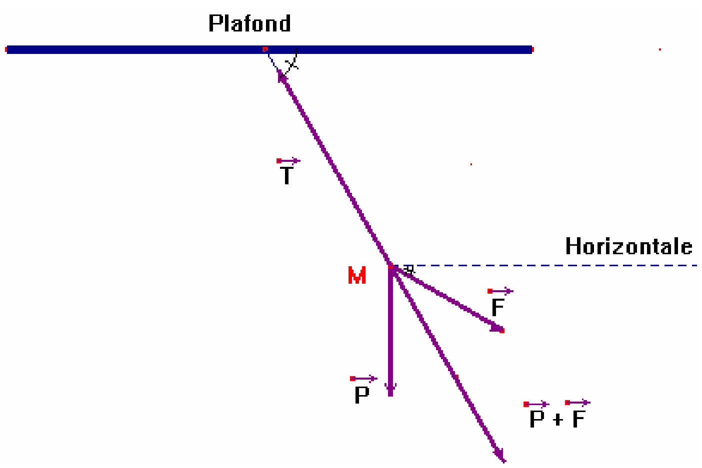
Seules, les caractéristiques proprement vectorielles que l'exercice met en évidence sont visées et principalement prises en compte par la suite lors de l'analyse des réponses.

Question 1

Complétez le dessin ci-dessous représentant la situation. (Échelle 1cm=1N)

Il faut tout d'abord déterminer le système étudié qui est ici l'objet *M*. Il est soumis aux forces extérieures suivantes :

- Son poids $\vec{P}$ appliqué en *M* de direction verticale, de sens de haut en bas et d'intensité $P = 200 * 10^{-3} * 10N = 2N$,
- La force d'attraction $\vec{F}$ appliqué en *M* faisant un angle *θ=30°* avec l'horizontale, de sens vers le bas et d'intensité $F = 2N$,
- La tension $\vec{T}$ dont les caractéristiques sont à déterminer.



A l'équilibre on a : $\vec{P} + \vec{F} + \vec{T} = \vec{0}$ c'est-à-dire $\vec{T} = -(\vec{P} + \vec{F})$

On représente d'abord $\vec{P}$ et $\vec{F}$ à partir de leur origine *M*. Ensuite on construit le parallélogramme des forces pour obtenir $\vec{P}+\vec{F}$. Enfin la tension $\vec{T}$ qui donne la direction du fil, est obtenue en traçant l'opposé du vecteur $\vec{P}+\vec{F}$.

Question 2

Quel est le poids de l'objet ?

Il s'agit ici de déterminer les quatre caractéristiques du poids $\vec{P}$ de l'objet qui sont son point d'application qui est ici *M*, sa direction qui est verticale, son sens de haut en bas et son intensité P : $P = 200 * 10^{-3} * 10N = 2N$.

Question 3

Quelle est la tension du fil ?

Cette question permet de voir comment les élèves mettent en valeur leurs connaissances géométriques dans des questions de physique où elles sont pertinentes.

Nous pensons aussi que beaucoup d'enseignants auront tendance à faire un « raisonnement monovalent » (Lounis) sur les grandeurs vectorielles physiques privilégiant l'aspect scalaire au détriment des caractéristiques d'orientation de direction et de sens.

Ainsi la tendance sera de calculer numériquement le poids et la tension du fil sans indiquer leur direction et leur sens, même si cela semble évident pour le poids.

Pour répondre à la consigne « Complétez le dessin ci-dessous représentant la situation. », il est fort probable qu'ils cherchent à calculer la valeur numérique de *T*, alors qu'il suffit seulement de partir de la condition d'équilibre qui donne $\vec{T} = -(\vec{P}+\vec{F})$ puis construire la somme vectorielle $\vec{P}+\vec{F}$ pour en déduire $\vec{T}$.

Question 4

Donneriez-vous cet exercice ? Pourquoi ? (Éventuellement indiquez les modifications que vous apporteriez à l'énoncé)

Il faut s'attendre à ce que les enseignants proposent à la place du schéma proposé, un dessin complet.

En effet il est rare que les manuels présentent des schémas à compléter, et les professeurs s'en limitent très souvent aux projections sur les axes. Certains demanderont de contextualiser davantage l'énoncé car c'est un exercice hors contrat pour les professeurs de physique.

Question 5

Quelles sont les difficultés que vous attendriez de vos élèves dans la résolution ? Justifiez votre réponse ?

Parmi les difficultés attendues des élèves pour la résolution de cet exercice, il faut noter la difficulté à compléter le dessin, difficulté liée à la construction géométrique d'une somme vectorielle (parallélogramme des forces). Il faudra s'attendre aussi à ce que la difficulté liée à la détermination de l'angle α pose problème pour la résolution cet exercice.

Le calcul de l'intensité T de la tension nous permet de tester si la difficulté mise en évidence dans les recherches antérieures à savoir le fait d'ajouter les intensités des forces qui sont données par leur direction et leur valeur sans appliquer la règle mathématique stipulant que la norme de la somme de deux vecteurs non colinéaires est inférieure à la somme des normes. Autrement dit l'élève calculera-t-il T en prenant directement la somme $P + F$?

A en croire la recherche menée chez les étudiants à l'entrée de l'université par Viennot et al. (1973), il a été remarqué que :

> Si on donne deux vecteurs par leurs composantes, 80% des étudiants les additionnent correctement. Mais la proportion de réussite devient faible si on donne les vecteurs par leur direction et leur module, surtout s'il s'agit de vecteurs physiques : on ajoute les modules (les nombres) sans se poser le problème « d'ajouter » des directions. (Op. cité, 12)

Cette question permet en conséquence d'observer l'évolution de ces difficultés avec les différents changements de programmes intervenus depuis cette recherche.

IV.1.2.2 Questionnaire M destiné aux enseignants de mathématiques

Première partie : Aspects généraux et pédagogiques

Le questionnaire destiné aux professeurs de mathématiques, est subdivisé en deux parties qui interrogent :

- les rapports de collaboration éventuelle de l'enseignant de mathématiques avec ses collègues de physique.
- les conceptions que l'enseignant de mathématiques a sur les liens entre translation mathématique et mouvement de translation.

Dans la première partie, nous avons interrogé les enseignants de mathématiques sur leur ancienneté dans l'enseignement afin de comparer les conceptions des plus anciens aux moins expérimentés par rapport aux différents changements de programmes.

Un premier bloc de questions interroge globalement le professeur de mathématiques sur ses rapports avec la physique enseignée au lycée.

Question 1

Connaissez-vous le programme de physique de la classe dans laquelle vous enseignez ?

A cette question, les réponses « pas du tout » et « peu » devraient être probablement les plus fréquentes compte tenu du repliement disciplinaire dont parle Chevallard.

Question 2

Par rapport à ce programme, quels sont les concepts physiques qui selon vous sont le plus en rapport avec votre cours de mathématiques ?

Classez les par ordre de priorité SVP.

Par rapport à cette question, les notions de force et de vitesse, compte tenu de leurs liens avec le calcul vectoriel, devraient figurer en bonne place sans que l'on sache à quel niveau scolaire du programme de physique l'enquête renvoie ces concepts de la physique.

Question 3

Faites-vous souvent référence à la physique dans votre cours de mathématiques ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui sous quelle forme ? Sinon pourquoi ?

Nous voulons savoir par cette question, comment est vécue concrètement l'interdisciplinarité dans les situations de classe. En tenant compte de l'hypothèse avancée à la question a), on s'attend à ce que les professeurs de mathématiques se réfèrent aux lointains souvenirs de leurs connaissances de physique au lycée.

Question 4

Rencontrez – vous souvent votre collègue de physique ?

a. *Pour parler de vos élèves : Oui* ☐ *Non* ☐
b. *Pour parler des programmes de mathématiques ou de physique : Oui* ☐ *Non* ☐
c. *Pour parler des liens entre mathématiques et physique en général : Oui* ☐ *Non* ☐
d. *Autres (préciser SVP)……………………………………………………….*

(Vous pouvez développer par exemple pour préciser le type de discussion que vous avez ou pour dire pourquoi vous ne rencontrez pas souvent votre collègue ou pour faire-part des difficultés que vous avez à communiquer avec lui).

Cette question a pour objectif de nous donner une idée des relations de collaboration entre le professeur de mathématiques et son collègue de physique.

Quant aux réponses aux différents items, il faut s'attendre à la prédominance du « non ». En effet, le refus de tout « métissage objectal » comme nous l'avons souligné dans l'analyse a priori du questionnaire des professeurs de physique, et le fait de vouloir mettre par dessus tout la spécificité de sa discipline ne favorisent pas le dialogue interdisciplinaire.

Deuxième partie : Aspects didactiques

Question 5 et 6

Selon les physiciens, un solide est en mouvement de translation si tout segment liant deux points du solide reste parallèle à lui-même au cours du mouvement.

Voyez –vous un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui lequel ?

Voyez-vous un lien avec d'autres notions mathématiques ?

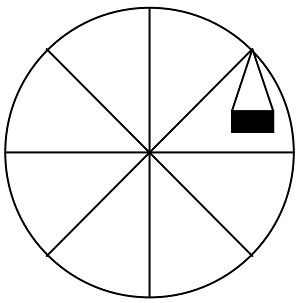
Oui ☐ *Non* ☐

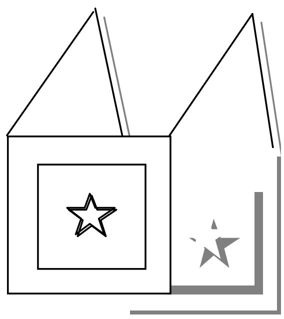
Si oui lesquelles ?

Il faut s'attendre à beaucoup de réponses positives à la première question du fait de l'évocation du mot translation dans les deux concepts, sans que cela ne renvoie à une compréhension claire du mouvement de translation. Certainement que beaucoup de professeurs de mathématiques, comme les élèves, ne verront que le cas de la translation rectiligne, conformément à la perception dynamique qu'ils ont de la translation mathématique.

Question 7

Les dessins ci-dessous représentent une nacelle d'une grande roue et un tableau fixé au mur par deux tiges rigides inextensibles de même longueur que l'on fait osciller dans le plan vertical du mur. Quelle est la nature du mouvement de chacun de ces deux objets ?





Nous faisons l'hypothèse que les professeurs de mathématiques auront tendance à chercher à déterminer le mouvement d'un point de la nacelle ou du tableau. Ce qui conduit à croire que l'on a à faire à un mouvement de rotation.

Question 9

Dans votre cours sur les vecteurs (si vous êtes concernés) faites-vous référence à la physique ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui comment ? Si non pourquoi ?

Cette question est destinée à mettre en évidence l'importance qu'accordent les enseignants de mathématiques dans leur enseignement des vecteurs aux connaissances de leurs élèves sur les grandeurs physiques vectorielles (vitesse, forces et mouvements de translation). Dans le cas d'une réponse positive, les professeurs sont invités à dire comment ils mettent en œuvre cette ouverture de leur enseignement sur les vecteurs. S'agit-il d'une simple évocation verbale ou bien s'agit-il d'illustrations réelles du cours de mathématiques par des situations tirées de la physique ?

On sait que les vecteurs constituent un thème qui a de fortes interactions avec la physique. Or dans l'analyse des programmes, nous avons vu que les vecteurs sont présentés sans référence à la physique, de ce point de vue, cette question permet de savoir à quel degré l'enseignant de mathématiques participerait au cloisonnement de sa discipline.

Nous allons à présent analyser dans la section suivante les données recueillies de ses deux questionnaires.

IV.1.3 Analyse a posteriori des questionnaires destinés aux enseignants.

IV.1.3.1 Introduction

Nous avons fait passer les questionnaires au Sénégal au cours de l'année scolaire 2004-2005, essentiellement dans les régions de Cap Vert (Dakar et sa banlieue), de Thiès et de Saint-Louis. Nous avons reçu 40 réponses venant de professeurs de sciences physiques et 46 réponses de professeurs de mathématiques. Compte tenu du fait que, dans l'ensemble du Sénégal, il y a à peu près autant de professeurs de sciences physiques que de professeurs de mathématiques dans les classes scientifiques et que les réponses recueillies proviennent de 15 lycées différents, on peut estimer que les réponses à ces deux questionnaires sont assez représentatives de l'ensemble des professeurs de physique et de mathématiques au Sénégal. Du point de vue méthodologique, nous traitons les données recueillies par le logiciel de traitement statistique SPSS à l'exception des réponses issues des exercices donnés dans les deux questionnaires qui seront examinées question par question, selon des catégories indiquées plus loin, en lien avec notre analyse a priori. Pour chaque question représentant une variable SPSS, nous présentons dans les pages qui suivent, des tableaux ou des diagrammes de synthèse reprenant l'essentiel des résultats statistiques les concernant.

Les réponses complètes ont été codées et rassemblées dans des tableaux (voir annexe 2). Par ailleurs, nous illustrerons les analyses qui suivent régulièrement par des citations tirées des réponses ou commentaires des enseignants.

IV.1.3.2 Analyse a posteriori du questionnaire P

Caractères généraux de la population

Ancienneté dans la profession

Deux enseignants ont omis de répondre à cette partie du questionnaire. Les 38 enseignants qui ont répondu à ce questionnaire en 2004-2005 ont en moyenne une ancienneté de 14 ans dans leur métier. La dispersion s'étale de 6 à 25 ans d'expérience, la médiane étant de 13 ans, ce qui est peut différent de la moyenne. On peut donc considérer que la population des enseignants ayant répondu a « en moyenne » 13-14 ans d'ancienneté.

Moyenne	14
Médiane	13
Minimum	6
Maximum	25

Statistique pour nombre d'années d'enseignement

Etablissement fréquenté

		Fréquence
	Lycée de BARGNY	1
	Lycée BLAISE DIAGNE	2
	Lycée CHARLES DE GAULLE	3
	Lycée CHEIKH OUMAR FOUTYOU TALL	3
	Lycée DEMBA DIOP	7
	Lycée GALANDOU DIOUF	1
	Lycée LAMINE GUEYE	3
	Lycée de MBAO	9
	Lycée MODERNE DE RUFISQUE	1
	Lycée SEYDINA LIMAMOU LAYE	4
	LTD	1
	Lycée MAURICE DELAFOSSE	3
	LTMD	1
	Total	39
Manquante	NR	1
Total		40

Etablissements

Parmi les 39 enseignants qui ont donné leur établissement, 25 proviennent de 10 lycées de la région de Dakar, 15 du lycée de Mbour et de 2 lycées de St Louis. Vu la concentration d'un nombre important de lycées à Dakar nous pouvons donc estimer, compte tenu de l'objectif de notre travail, que nous avons un échantillon assez représentatif de la population étudiée. A présent, analysons les résultats des différentes questions en suivant l'ordre dans lequel elles apparaissent dans le questionnaire.

Première partie : Aspects généraux et pédagogiques

Question 1

Utilisez vous couramment des manuels pour préparer votre cours de physique et choisir vos exercices ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui lesquels ? (Dans l'ordre décroissant de plus grande utilisation.)

Le tableau ci-dessous donne une vision synthétique des réponses. Nous nous sommes limités à ne classer que les 4 premiers manuels les plus cités par les professeurs de physique. On voit que Tomasino (18 sur 40 le citent à la première place) est le manuel emblématique des enseignants de physique au Sénégal. Ce manuel a fait l'objet d'une analyse détaillée dans la partie ***Analyse institutionnelle*** de ce travail.

Les manuels les plus utilisés par les enseignants de physique

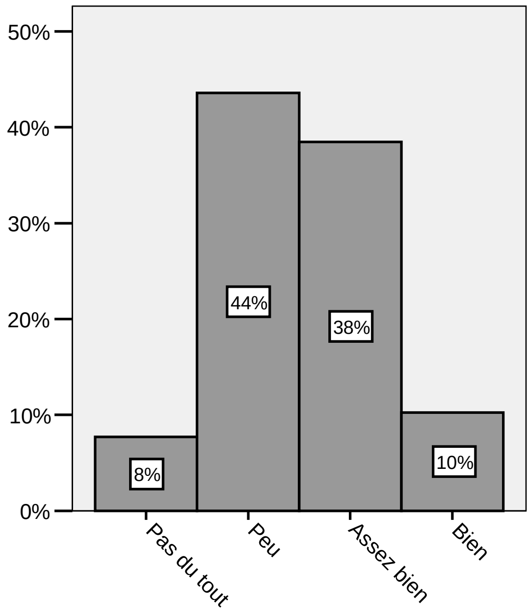
	Cité en 1er	Cité en 2ème	Cité en 3ème	Cité en 4ème	**Total**
Tomasino	18	15	1	1	**35**
Eurin Gié	8	11	12	0	**31**
G. Martin	3	3	6	1	**13**
S. Kane	4	1	2	1	**8**
Autres	7	10	6	4	**27**
Total	***40***	***40***	***27***	***7***	

Question 2

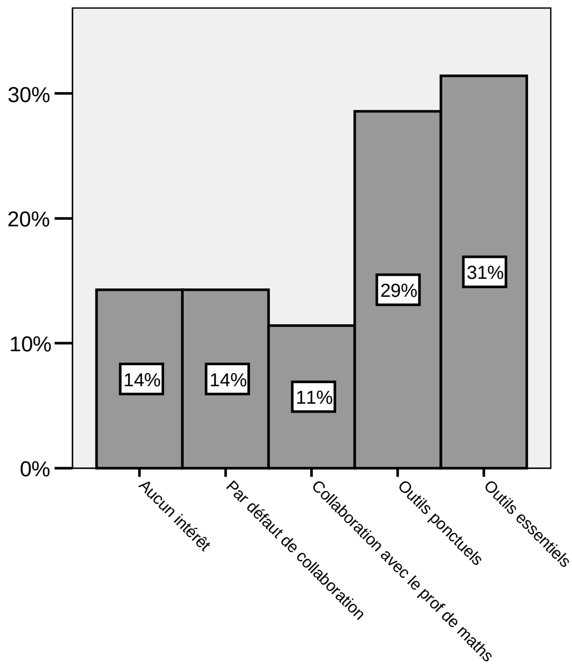
Connaissez-vous le programme de mathématiques des classes de 2^e S et 1°S ?

Pas du tout ☐ *Peu* ☐ *Assez bien* ☐ *Bien* ☐ *En détail* ☐

Expliquez pourquoi.



Niveau de connaissance des programmes de Maths



Raisons évoquées

Les réponses à ces questions sont synthétisées dans le diagramme en bâtons ci-dessus. Comme on le voit, plus de la moitié (52 %) des enseignants de physique ont une connaissance faible (regroupement des modalités : *pas du tout et peu*) des programmes de mathématiques, 38 % en ont une connaissance moyenne (modalité : *assez bien*) et 10 % seulement déclarent avoir une bonne connaissance de ces programmes (la modalité *en détail* n'a pas été observée). Ceci confirme notre analyse a priori.

Les réponses des enseignants de physique laissent apparaître deux catégories de raisons pour ce niveau de connaissance des programmes de mathématiques si on écarte ceux qui considèrent que ces connaissances n'ont aucun intérêt pour leur cours de physique :

– Le caractère de l'outillage mathématique (en termes d'outils ponctuels ou d'outils essentiels),

P007[14] *: Parce que la conduite du cours de physique nécessite qu'on fasse appel très souvent à l'outil mathématique. Ainsi, je me rapproche des collègues de mathématiques.*

P009 : D'une part les maths sont des outils majeurs pour le physicien, d'autre part j'aime les maths (elles me fascinent)

P010 : Les maths sont un outil pour la physique. Il faut s'assurer que les élèves ont les notions nécessaires.

P025 : Les mathématiques constituent l'outil de travail du physicien. On ne peut pas faire un cours de physique si certains cours de maths ne sont pas faits.

– La nature de la collaboration avec les professeurs de mathématiques.

P024 : Je travaille en collaboration avec les profs de maths avec qui je partage des classes.

P027 : Je n'ai pas beaucoup d'occasion pour rencontrer le prof de maths.

P014 : Je demande à mon collègue juste ce qui m'intéresse pour faire les calculs.

Parmi les 35 professeurs qui ont donné des raisons à leur niveau de connaissance des programmes de mathématiques, 17% pensent que ça ne présente aucun intérêt pour leurs cours de sciences physiques. 25% l'associent au type de collaboration avec les professeurs de mathématiques, 29% disent que les mathématiques sont des outils ponctuels et 31% pensent plutôt qu'elles sont des outils essentiels pour leurs cours de physique.

---

[14] Nous désignons chaque questionnaire rendu par un professeur de physique par la lettre P suivi de son n° d'ordre d'arrivée.

Tableau croisé Niveau de connaissance des programmes de Maths * Raisons évoquées pour ce niveau de connaissance

			Raisons évoquées pour ce niveau de connaissance					Total
			Aucun intérêt	Par défaut de collaboration	Par collaboration avec le prof de maths	Outils ponctuels	Outils essentiels	
Niveau de connaissance des programmes de Maths	Pas du tout	% dans Niveau de connaissance des programmes de Maths	100%	0%	0%	0%	0%	100%
	Peu	% dans Niveau de connaissance des programmes de Maths	20%	33%	0%	47%	0%	100%
	Assez bien	% dans Niveau de connaissance des programmes de Maths	0%	0%	21%	21%	57%	100%
	Bien	% dans Niveau de connaissance des programmes de Maths	0%	0%	25%	0%	75%	100%

En croisant les deux variables (niveau de connaissance des programmes de mathématiques et raisons évoquées, cf. tableau ci-dessus), on voit sans surprise, que tous les enseignants de physique qui déclarent qu’il n’y a *aucun intérêt* pour le cours de physique ont répondu n’avoir aucune connaissance des programmes de mathématiques. Les raisons avancées par ceux qui ont répondu *peu* comme niveau de connaissance, sont, une vision des mathématiques réduite à des *outils ponctuels* (47%) pour leurs cours de physique, un manque de collaboration avec les professeurs de mathématiques (33%) ou l’idée que les contenus mathématiques sont sans intérêt pour eux (20%). Dans la même logique, on voit aussi que les professeurs qui répondent *assez bien* et *bien* comme niveau de connaissance des programmes de mathématiques, considèrent majoritairement (57% pour assez bien et 75% pour bien) que les mathématiques sont des outils essentiels pour leurs cours de physique. On peut noter aussi, que les autres raisons associées à ces niveaux sont soit parce que les enseignants de physique collaborent avec leurs collègues de mathématiques soit parce que les mathématiques ne sont que des outils ponctuels pour leur cours de physique.

Il apparaît alors que l’intérêt porté aux mathématiques par les professeurs de physique pour leur cours semble lié à leur niveau de connaissance des mathématiques.

Certaines déclarations des professeurs de physique que nous avons choisies pour illustrer notre propos, montrent à quel point certains enseignants « surinvestissent la fragmentation disciplinaire de la connaissance dans le monde scolaire ». (Chevallard, 2001)

P038 : C'est au professeur de mathématiques de connaître le programme de sciences physiques.

P006 : Je ne vois pas l’intérêt pour le cours de physique et chimie.

P011 : Mon profil quand j'étais élève et j'étais étudiant. En plus, j'ai eu à enseigner les maths très souvent soit en rappel dans le cours de sciences physiques soit en cours particulier.

On voit là deux discours assez nettement opposés : d'un côté, des professeurs de physique qui ne trouvent aucun intérêt aux connaissances mathématiques des élèves pour leur cours de physique et, d'un autre, des enseignants de physique qui magnifient l'outillage mathématique et trouvent les connaissances mathématiques comme éléments indispensables pour leur enseignement de physique.

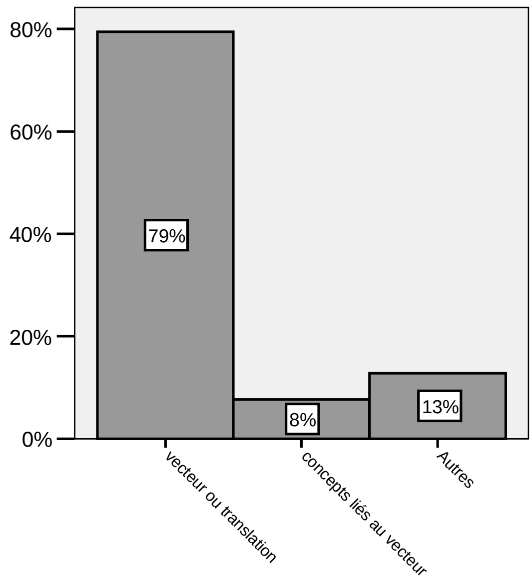
Question 3

Par rapport à ce programme, quels sont les concepts mathématiques qui selon vous sont le plus en rapport avec votre cours de physique de 2^e S?

Classez les par ordre de priorité SVP.

Nous avons intitulé la variable associée à cette question par *concepts mathématiques en rapport avec le cours de physique.* Nous avons retenu trois catégories pour le codage de cette variable :

1. vecteur ou translation (si vecteur seul ou translation seule)
2. concepts liés au vecteur (si pas vecteur ni translation, des concepts liés au vecteur comme par exemple barycentre, produit scalaire, projection etc.)
3. autres (si rien lié au vecteur par exemple équation, proportionnalité, puissance de dix, etc.)



Concepts mathématiques en cours de physique

Il apparaît clairement dans ce diagramme que la presque totalité (87%) des enseignants de physique interrogés font référence dans leur cours au concept de vecteur ou aux concepts affiliés. Ce qui semble indiquer que le vecteur est un concept emblématique du cours de physique pour ces enseignants. La déclaration de *P001*illustre ce constat : *Je dis souvent que l'inventeur de la notion de vecteur a résolu tous les problèmes de physique. Mais les notions de référentiel et de repère sont très souvent utilisées.* Ce dernier n'a cité que le vecteur comme concept en rapport avec son cours de physique.

Notons que dans les 79% de la modalité « *vecteur seul ou translation* », le concept de translation n'est cité que par deux enseignants. Ce qui laisse penser que le concept de translation est peu associé par les enseignants de physique à leur cours sur le mouvement de translation ou encore que pour eux la translation est avant tout un concept physique !

Il faut noter aussi que les autres concepts liés à l'analyse et à la géométrie ont attiré l'attention des professeurs de physique (beaucoup citent le produit scalaire certainement pour sa très forte interaction avec la notion de travail en physique).

Question 4

Faites-vous référence aux mathématiques dans votre cours de physique ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui sous quelle forme ? Sinon pourquoi ?

Tous le enseignants interrogés ont répondu oui à la question, du coup nous avons focalisé notre analyse sur les justifications qu'ils donnent à leurs réponses. Nous avons alors codé a posteriori cette variable selon 3 modalités en nous appuyant sur les différentes déclarations des enseignants :

1. Certains professeurs ne laissent voir qu'un lien d'*outil occasionnel* entre mathématiques et physique. Ils ne citent qu'un exemple précis. Les citations suivantes en sont une illustration :

P006 : Rarement. Seulement dans les formulations des formules de PC.

P013 : Symbole d'un vecteur par une seule lettre. T=kx, p=mg; t=kl-klo ; u=E-ri

P036 : Tracé d'une courbe expérimentale point par point suivi de la détermination de l'équation cartésienne- somme de forces- détermination du centre de masse.

2. D'autres en restent au niveau outil, mais l'expriment de façon plus générale que sur un seul exemple (*outil général*). Ils présentent les mathématiques comme des outils purement techniques (dans le sens instrumental) ou un simple modèle pour le raisonnement en physique. En voici quelques illustrations :

P004 : Sous forme d'outils uniquement et que le physicien utilise pour résoudre un problème de physique. (Résolution d'équations, projection de vecteurs sur les axes, calcul de surface avec les intégrales…)

P007 : Sous diverses formes; utilisation des relations algébriques, et de définitions géométriques appliquées concrètement à des grandeurs physiques.

P038 : Les maths ne sont que des outils pour les physiciens Eviter de mathématiser à outrance la physique.

3. Il y a enfin ceux qui expriment un *lien fort* des mathématiques avec la physique. En voici quelques exemples :

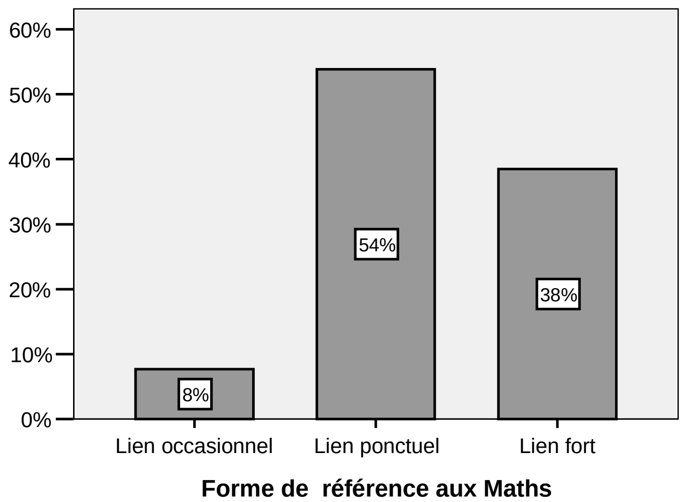
P016 : Des formes qui nous permettent de résoudre simplement nos problèmes de physique.

P029 : Pour leur montrer comment pour nous les physiciens les maths sont très importantes. Ils découvrent à travers certains exercices la puissance de l'analyse mathématique.

P037 : Après avoir expliqué les concepts physiques, j'utilise souvent le formalisme mathématique adéquat pour traduire fidèlement ces concepts.

P040 : De manière générale après avoir expliqué les concepts physiques, je fais une analogie mathématique pour traduire ces concepts.

La répartition de ces réponses est résumée dans le diagramme suivant :



Tous les enseignants enquêtés ont répondu à cette question. La plupart n'en reste pas à un lien occasionnel. Néanmoins, une nette majorité apparaît pour ne donner aux mathématiques qu'un lien d'outil pour les sciences physiques, certains enseignants précisent bien qu'il faut éviter de mathématiser à outrance. Cette position n'est d'ailleurs pas surprenante et reflète la position dominante des enseignants de physique qui partagent l'hypothèse épistémologique d'un matérialisme réaliste (Planck 1933) selon laquelle le physicien manipule des objets réels.

Ainsi, les mathématiques qui ne sont pas une étude du monde réel, se présentent pour eux comme un simple instrument auquel la physique n'a pas à s'assujettir. Mais, *le physicien est très rapidement amené à quitter le domaine de l'expérimentation sur les objets de la réalité pour raisonner sur des « objets » de nature différente. […] La difficulté à toujours distinguer les objets réels des objets abstraits est si grande que le physicien arrive à les confondre, tout au moins dans son discours.* (Malafosse 2002, p.42) En effet,

> […] la physique décrit un univers où il est question de masses, de forces, de quantités de mouvement, etc. : toutes choses étrangères à la perception non physicienne de l'espace sensible. L'espace de la physique est ainsi un espace construit, peuplé de réalités que l'espace sensible n'ignore pas entièrement, mais qu'il méconnaît : nous rencontrons des corps, des objets, non des masses ; des corps en mouvement, non des quantités de mouvement ; etc. (Chevallard 1991, 52)

Il apparaît aussi dans les réponses une forte tendance au repliement sur sa discipline et une absence de collaboration entre les professeurs de physique et leurs collègues de mathématiques.

Question 5

Rencontrez – vous souvent votre collègue de mathématiques ?

a. Pour parler de vos élèves : Oui ☐ Non ☐

b. Pour parler des programmes de mathématiques ou de physique : Oui ☐ Non ☐

c. Pour parler des liens entre mathématiques et physique en général : Oui ☐ Non ☐

d. Pour lui demander d'exposer en cours les bases mathématiques indispensables au déroulement du programme de physique : Oui ☐ Non ☐

e. Autres (préciser SVP)………………………………………………………..

(Vous pouvez développer par exemple pour préciser le type de discussion que vous avez ou pour dire pourquoi vous ne rencontrez pas souvent votre collègue ou pour faire-part des difficultés que vous avez à communiquer avec lui).

Les données relatives à cette question à multiples réponses sont consignées dans le tableau suivant :

	Parler de vos élèves	Coordonner les enseignements	Demander des précisions	Parler des liens Maths Physique
	%	%	%	%
non	28%	41%	35%	34%
oui	72%	59%	65%	66%

Types de collaboration

Ces résultats montrent que les professeurs de physique rencontrent bien leurs collègues de mathématiques mais pour le plus souvent ne parler que de leurs élèves, pour la grande majorité d'entre eux (72%). Les préoccupations des enseignants pour des questions spécifiquement liées à l'évaluation des élèves, comme nous l'avons supposé dans l'analyse a priori, semblent dominer comme en témoignent les quelques commentaires dans la rubrique *autres* de certains professeurs :

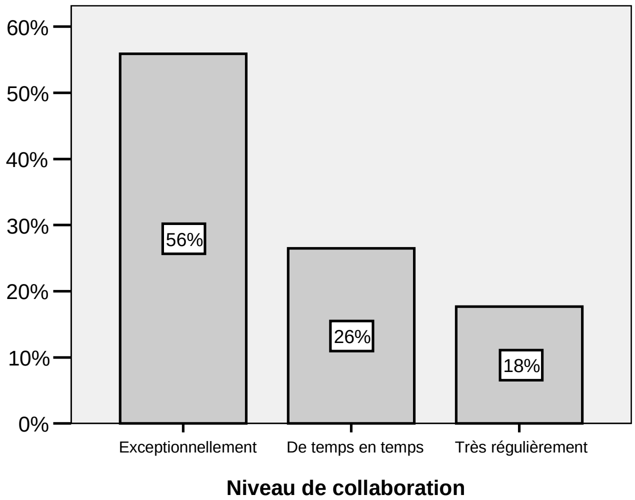
P037 : Discuter sur certains cas d'élève dont les notes en maths et en physique présentent un grand écart et essayer de comprendre le pourquoi et essayer d'y remédier.
P024 : Niveau individuel de chaque élève et comment faire pour y remédier.

En revanche, ils sont moins nombreux à motiver leur rencontre par la coordination de leurs enseignements (59%), tandis que les items « *demander des précisions au prof de maths* » et « *parler des liens entre mathématiques et physique en général* » recueillent sensiblement le même nombre de réponses « *oui* » (65% et 66%). Même si les deux tiers des enseignants de physique demandent à leurs collègues de mathématiques d'exposer en cours les bases mathématiques indispensables pour le bon déroulement de leur cours de physique et discutent avec eux des liens entre mathématiques et physique, il apparaît toutefois à travers les quelques commentaires que cette collaboration reste très superficielle. Il s'agit avant tout de s'assurer que les mathématiques utiles pour le cours de physique ont été ou seront enseignées à temps et de parler du niveau des élèves.

P040 : On se voit de temps en temps car en mécanique (2S) nous avons besoin énormément des profs de maths (utilisation des vecteurs). En somme nous demandons régulièrement au prof de maths de revenir sur telle ou telle notion pour nous faciliter la tâche. On constate ensemble que maths et physique sont très liées. Les élèves qui ont un bon niveau en maths le sont aussi en physique.
P001 : Je les rencontre très souvent pour les inciter à insister sur certaines parties des maths qui sont en relation avec mon cours de physique ou de chimie.
P007 : Très souvent c'est pour faire part au collègue mathématicien de notre difficulté de transférer les connaissances acquises en maths à la physique. Ainsi leur demande t-on d'étayer les concepts avec des applications dans les différents domaines de la physique.
P035 : Demander aux collègues de maths de faire si possible dès les premiers chapitres le calcul vectoriel et la relation barycentrique pour que les élèves puissent être en mesure de déterminer le centre d'inertie d'un système.

Pour ce dernier le transfert des connaissances mathématiques est quasi automatique.

A partir des commentaires ci-dessus apparus dans la rubrique *autres*, nous avons construit une variable intitulée *niveau de collaboration* des professeurs de physique avec les professeurs de mathématiques. On peut voir globalement que la collaboration, même si elle semble apparaître dans les réponses précédentes qui se présentent le plus souvent sous forme de demande du professeur de physique adressée à son collègue de mathématiques, est relativement exceptionnelle (56%*).*



Le point de vue reporté ci-dessous, pour dire pourquoi il ne rencontre pas souvent son collègue de mathématiques ou pour faire-part des difficultés qu'ils ont à communiquer, est assez révélateur de cette absence de codisciplinarité.

P038 : Je fais moi-même les rappels de mathématiques nécessaires à mon cours. Car je dois faire prévaloir mes connaissances mathématiques dans ma discipline.
C'est au prof de maths de connaître le programme de SP.

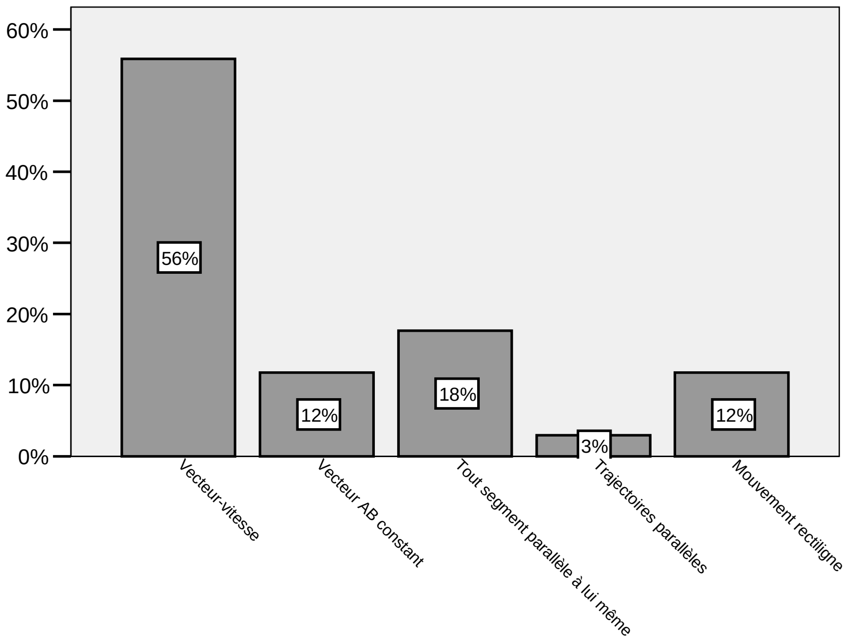
Ce point de vue est certes atypique, mais montre bien que même si le lien entre les mathématiques et la physique est perçu comme essentiel, le cloisonnement disciplinaire est toujours de rigueur. Pour la majorité des enseignants c'est à chacun son boulot, les professeurs de mathématiques doivent faire les mathématiques, les professeurs de physique, la physique et c'est aux élèves de faire les liens. Pour cet enseignant, il ne faut pas laisser les mathématiques aux seuls professeurs de mathématiques, mais la raison essentielle semble être de pouvoir montrer que le physicien sait des mathématiques et est capable de les enseigner, alors que le professeur de mathématiques ne connaît rien à la physique et est sûrement suspecté de ne pas enseigner les mathématiques d'une façon pertinente pour leur usage en physique.

Deuxième partie : Aspects didactiques

Questions 6

Quelle définition donnez – vous d'un mouvement de translation ?

6 professeurs sur 40 (15%) n'ont pas répondu à cette question ou ont donné des réponses ambiguës. Le diagramme ci-contre présente l'ensemble des données pour les 34 professeurs ayant répondu à cette question.



Défintion d'un mouvement de translation

Plus de la moitié des professeurs de physique (56%) définissent le mouvement de translation par : *Un solide est animé d'un mouvement de translation si les points ont, à chaque instant le même vecteur vitesse.* Ce résultat est surprenant si on se réfère à ce que nous avons vu dans les manuels où la définition par les segments parallèles est la première. Il est par contre moins surprenant compte tenu de l'importance donnée à la caractérisation par le vecteur vitesse dans les différents manuels de physique que nous avons analysés. (cf. partie 2). C'est aussi cette présentation du mouvement de translation qui est la plus efficace pour résoudre la plupart des exercices. Rappelons aussi que les programmes restent muets quand à la définition à adopter pour les mouvements de translation.

La définition par le fait que *tout segment reste parallèle à lui-même au cours du mouvement* n'a été donnée que par 18% des enseignants, auxquels on peut rajouter les 12% qui parlent de vecteurs constants (ce qui est surprenant, au vu de notre analyse institutionnelle).

La définition par les trajectoires parallèles est très peu populaire.

Notons enfin qu'il y a aussi un pourcentage non négligeable (12%) de professeurs de physique qui réduisent le mouvement de translation au seul mouvement rectiligne !

P013 : Un mouvement de translation est un mouvement rectiligne qui s'effectue suivant la même droite d'action.

P022 : Un mouvement de translation est un mouvement qui se fait suivant une droite.

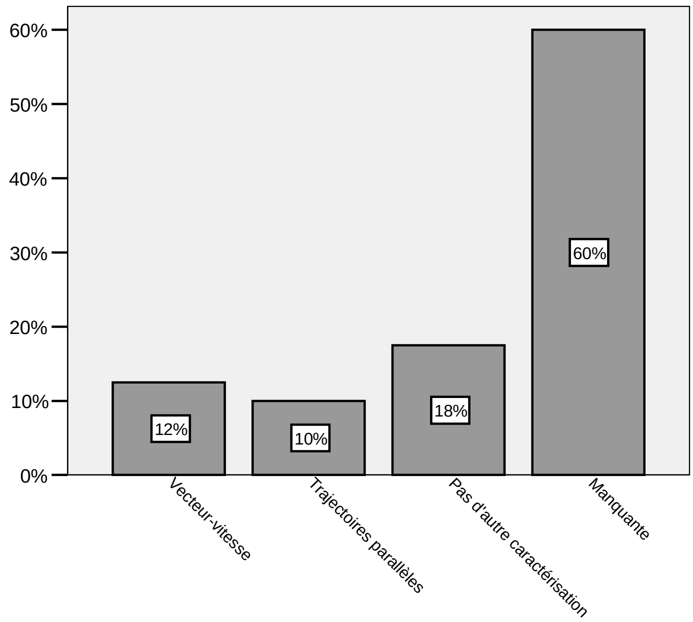
Ce dernier résultat est inquiétant et laisse planer un doute sur la qualité de la formation des enseignants de physique au Sénégal.

Les réponses à cette question montrent qu'il existe une certaine distance entre le rapport personnel des enseignants et le rapport institutionnel en ce qui concerne la définition du mouvement de translation.

Questions 7

Donnez – vous d'autres caractérisations ?

Beaucoup de professeurs de physique (60%) n'ont pas répondu à cette question ou ont interprété caractérisation comme type de mouvement (en répondant par exemple : *la distinction entre un mouvement de translation rectiligne et un mouvement de translation circulaire*. *Préciser que la translation peut être rectiligne curviligne ou circulaire*.) La question ne semble pas motiver les enseignants de physique.



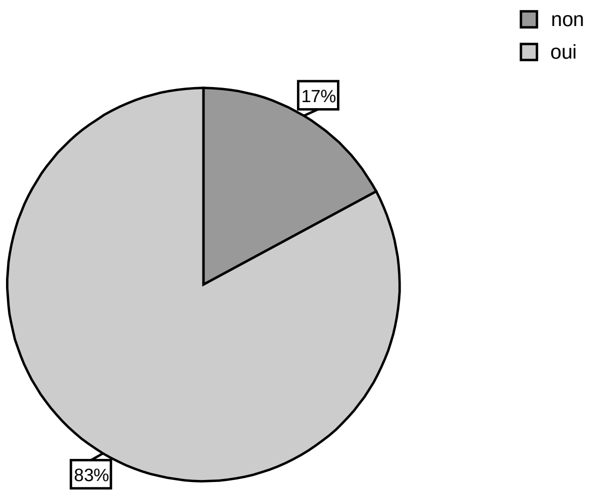
Autres caractérisations du mouvement de translation

A ce pourcentage, il faut ajouter ceux qui déclarent ne donner aucune autre caractérisation du mouvement de translation (18%). Ici aussi pour le peu de professeurs qui ont donné d'autres caractérisations, celle relative au vecteur vitesse arrive en tête (12% contre 10% pour trajectoires parallèles). Il semble donc que la caractérisation par le vecteur vitesse est de loin la plus utilisée. Il apparaît aussi que les termes de définition et de caractérisation ont peut-être un sens que nous n'avions pas anticipé pour les enseignants que nous avons interrogés. Définition renverrait à ce qui est utile et caractérisation à ce que l'on peut voir ?

Question 8

Voyez-vous un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ? Si oui lequel ?

5 enseignants n'ont pas répondu à cette question.



lien entre translation et mouvement de translation

On voit que la grosse majorité des enseignants enquêtés (83%) affirment qu'il y a un lien entre mouvement de translation et translation mathématique. Les quelques justifications (38% de ceux ont répondu) données, sans toutefois expliciter le lien, se classent selon 3 catégories :

Il y a ceux qui considèrent que le lien n'existe que dans le cas d'un mouvement de translation rectiligne. En voici quelques illustrations :

P017 : sauf s'il s'agit de mouvement de translation rectiligne

P14 : surtout pour un solide en mouvement de translation rectiligne. Le vecteur V du solide garde une même direction, cela rappelle la conservation du parallélisme de la translation mathématique.

P013 : conservation de la direction suivant laquelle la translation s'effectue.

Il y a ceux qui donnent une justification un peu obscure au niveau de l'équipollence des vecteurs (qui est synonyme pour eux de translation en mathématique) ou de l'égalité vectorielle.

P004 : On s'appuie sur la translation mathématique pour définir ce mouvement de translation en physique c'est-à-dire à partir de l'équipollence.

P038 : Equipollence des vecteurs vitesses Vi des points matériels du solide animé du mouvement de translation.

P40 : Tout vecteur est caractérisé par son point d'application sa direction son sens et son intensité. Si le vecteur vitesse V=VA=VB à une direction constante la translation est rectiligne Si la direction de V change au cours du temps la translation est curviligne.

On voit donc que la quasi-totalité des professeurs de physique interrogés sont incapables d'expliciter un lien correct entre mouvement de translation et translation, sans parler de ceux qui le limitent au cas de la translation rectiligne !

En fait, seuls deux enseignants donnent une justification qui va dans le bon sens, sans être toutefois vraiment complète. Ces deux enseignants avaient donné comme définition celle avec les segments parallèles. Voici comment ils expriment le lien qu'ils voient entre translation et mouvement de translation :

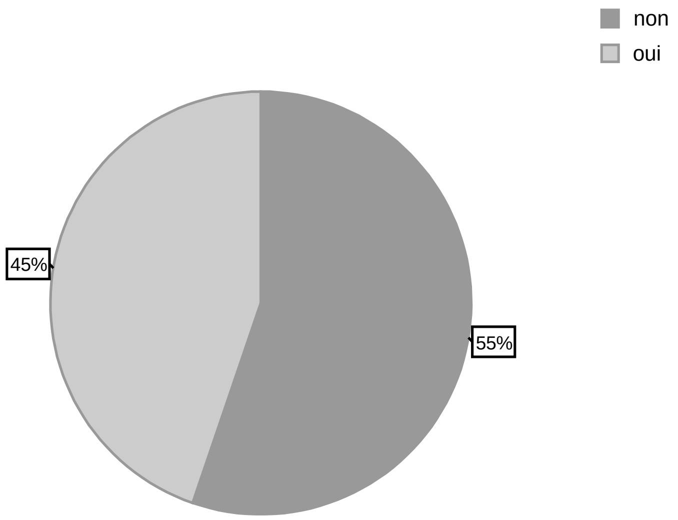
P011 : Un point du solide voit ses deux positions à deux instants différents reliés par un même vecteur quelque soit ce point.

P016 : Constance du vecteur déplacement pour tout point du solide.

On voit clairement que ces deux enseignants font le lien entre la constance du vecteur sur le solide et celle du vecteur déplacement dans le mouvement de translation. Ni la justification de ce résultat, ni le lien avec la translation mathématique ne sont clairement explicités, mais l'argument essentiel est là.

Question 9

Faites-vous explicitement référence en cours à l'existence ou non d'un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ?



Lien dans votre cours de physique

Seuls deux professeurs n'ont pas répondu à cette question. Plus de la moitié des enseignants ne font pas référence à ce lien dans leur cours de physique :

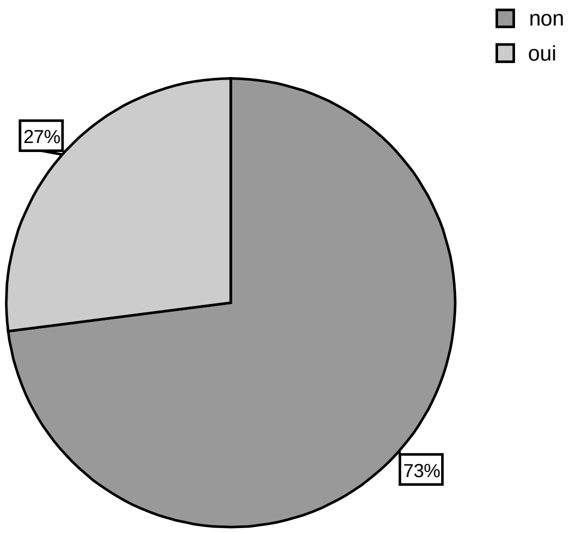
P008 : Je le vois mais je ne fais pas allusion à cela dans mon cours.

De plus même si presque la moitié disent faire ce lien, au vu des réponses à la question précédente, on est en droit de se demander ce qu'ils peuvent dire. Il y a fort à parier que pour la plupart, cela doit se limiter à une remarque anodine en début d'enseignement, du genre « Vous avez vu la translation en mathématiques, voilà comment on la définit en physique… ». Le cloisonnement disciplinaire est ainsi au comble de la contradiction, il est tellement fort, que deux enseignants de disciplines voisines sont capables d'utiliser le même mot pour parler de deux concepts bien différents, tout en croyant parler du même un peu différemment (comme d'habitude !). Restent les élèves, les réponses à la question suivante nous confirmeront que ceux-ci sont habitués à ne pas (se) poser de questions et que le même mot dans ces disciplines prend naturellement deux sens différents, qu'il serait vain d'essayer de mettre en relation.

Question 10

Vos élèves vous posent-ils des questions dans ce sens ?

Trois enseignants n'ont pas répondu à cette question.



Questions des élèves à propos de ce lien

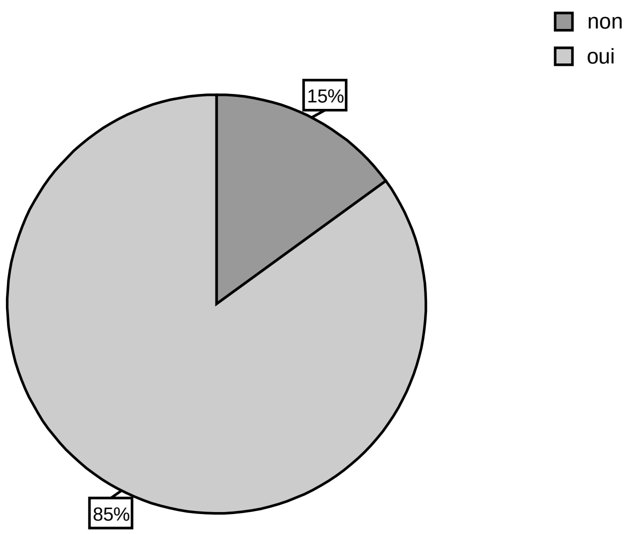
L'évocation du mot *translation* dans les expressions mouvement de translation et translation mathématique ne semble pas donc avoir eu d'effet sur le possible lien entre ces deux notions qui devrait interroger les élèves pendant le cours de physique. En effet, seuls 27% des professeurs affirment avoir reçu pendant leur cours de physique, de la part de leurs élèves des questions relatives au lien entre mouvement de translation et translation mathématique. Ce qui laisse penser que cette question motive peu leurs élèves et ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle, l'organisation didactique mise en place par le professeur est un élément favorisant le cloisonnement des disciplines que les élèves perçoivent souvent comme étrangères l'une à l'autre.

Question 11

Utilisez-vous des vecteurs à propos des mouvements de translation ?

Si oui expliquez comment.

Tous les professeurs ont répondu à cette question.



Utilisation des vecteurs à propos des mouvements de translation

Comme on le constate sur le diagramme ci-dessus, la majorité des enseignants de physique (85%) disent utiliser les vecteurs à propos des mouvements de translation. Par contre seuls 41% disent comment. Parmi eux, 79% relient ce point à l'usage du vecteur vitesse, dont 1 considère le vecteur vitesse comme le vecteur de la translation mathématique.

P39 : Le vecteur vitesse est le vecteur de la translation en mathématique

Les 21% restant tentent au départ de raisonner avec les définitions qu'ils ont données dans les questions précédentes à propos de segments restant parallèles ou à la constance du vecteur AB pour deux points donnés du solide, mais ne vont pas jusqu'au bout de leur raisonnement. Dans tous les cas, ils finissent toujours par revenir à la caractérisation par le vecteur vitesse qui leur semble l'élément le plus pertinent pour l'utilisation des vecteurs à propos des mouvements de translation.

P004 : Pour la translation rectiligne comme pour celle curviligne, on part de la définition en insistant sur la constance du vecteur AB (même direction, même sens, même norme). Pour la translation rectiligne uniforme tous les points ont même vecteur vitesse.

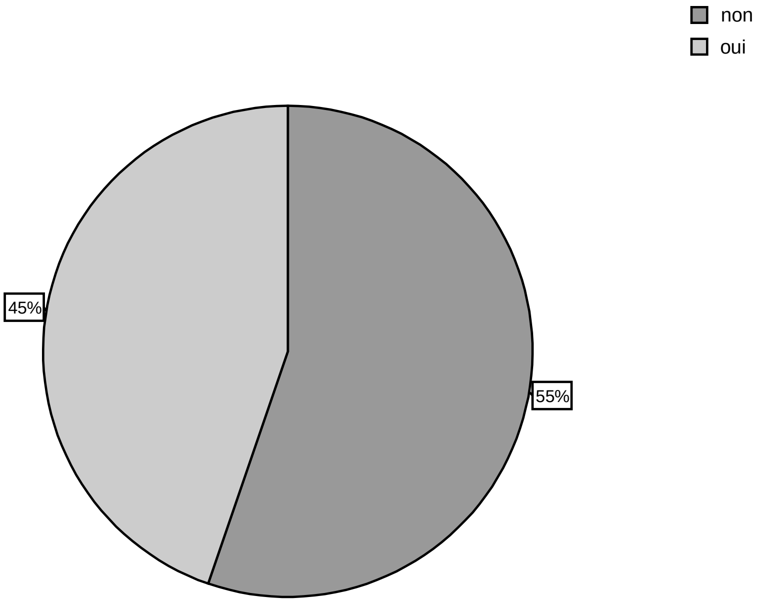
P009 : A partir du fait que quels que soient deux points A et B le vecteur AB est constant, j'en déduis que : A chaque instant tous les points ont même vecteur vitesse Les trajectoires sont superposables (elles sont déduites les unes des autres par translation)

En définitive, on peut retenir que les enseignants de physique déclarent souvent faire le lien entre translation et mouvement de translation, mais leurs réponses montrent qu'ils considèrent ce lien comme trivial et qu'il repose au plus sur le fait que dans un mouvement de translation les trajectoires des points du solide sont translatées les unes des autres. De même s'ils disent en majorité utiliser des vecteurs, c'est essentiellement en rapport avec le vecteur vitesse.

Question 12

Pensez-vous que vos élèves en 2^{e}S et 1^{e}S ont des connaissances mathématiques suffisantes et / ou adéquates pour l'usage que vous en faites en physique ?

Deux enseignants n'ont pas répondu à cette question.



Niveau mathématique des élèves en physique

On voit que les avis des professeurs de physique sont à peu près partagés (45% de réponses *oui* et 55% de réponses *non*) sur les connaissances mathématiques de leurs élèves pour l'usage qu'ils en font en physique. Il faut noter que c'est une partie du questionnaire qui a semblé le plus motiver les enseignants de physique, en raison des commentaires détaillés que chacun a donnés pour justifier le niveau mathématique de ses élèves en physique.

Ce qui revient très fréquemment dans ces commentaires, c'est le fait que les élèves ne savent pas utiliser ce qu'ils sont censés savoir en mathématiques de façon adéquate en physique.

P004 : Non seulement, ils ne maîtrisent pas certaines connaissances mathématiques mais ils ne peuvent pas les utiliser pour la résolution de certains exercices en physique. Par exemple, déterminer un coefficient directeur d'une droite pour en déduire une grandeur physique comme la vitesse v ou une force constante F. Ou bien exploiter les équations aux dimensions pour trouver les unités d'une grandeur physique.

P010 : Leur problème est l'utilisation adéquate, ils ne sont pas conscients que les maths sont un outil pour la physique.
P014 : les élèves ont souvent des lacunes en maths; ils sont déroutés quand un prof de Physique et Chimie manipule des concepts mathématiques parfois inhérents à la description des phénomènes physiques. Le calcul vectoriel, les projections…
P033 : Les notions maths sont parfois mal maîtrisées. Les élèves peuvent avoir des difficultés pour faire le pont entre les connaissances maths et leur utilisation.

On voit aussi une émergence du phénomène classique qui consiste à renvoyer sur un autre enseignement (d'une autre discipline ou d'une année antérieure) tous les maux dont souffrent nos élèves. Si certains enseignants identifient bien la question du cloisonnement disciplinaire c'est en général pour rejeter la faute sur les élèves :

P008 : Ils possèdent les connaissances nécessaires mais quand il s'agit de résoudre les problèmes ils ne ***peuvent pas faire le lien***[15]*. Pour eux il y a une* ***frontière entre les deux disciplines****. Exemple les équations du second degré qu'ils peuvent résoudre aisément en mathématiques. En physique ils ont des problèmes pour le faire. On peut tracer une fonction quelconque en fonction du temps ; on peut tracer la puissance en fonction de l'intensité (pour eux c'est toujours y=f(x) et s'il n'y a pas x et y ils sont perdus.*
P007 : En réalité le problème qui se pose est un problème de transfert des connaissances mathématiques aux autres domaines de la science. ***Inconsciemment les élèves font un cloisonnement entre les deux disciplines****.*
P001 : Tous les problèmes que nous rencontrons sont d'ordre vectoriel. Ils ont peur de manipuler les vecteurs. C'est dommage pour eux, parce que la Physique repose sur le vecteur.
P004 : (*Cf. extrait p.176**)*
P009 : A mon avis certaines notions ne sont pas claires à leur niveau. Pour citer un exemple courant on constate une ***confusion totale entre vecteurs, normes et mesure algébrique.*** *On rencontre même cette situation en TS!*
P016 : Les programmes de maths et de Physique et Chimie ne sont pas forcément en symbiose. On ne tient pas compte de manière constante de la place des maths dans les autres matières souvent dans la confection des programmes.

Ce qui ressort bien de ces commentaires à la lumière de nos analyses précédentes, c'est que si les enseignants de physique (mais ce sera sûrement pareil pour ceux de mathématiques) ont conscience qu'il y a un dysfonctionnement entre l'enseignement des deux disciplines, ils

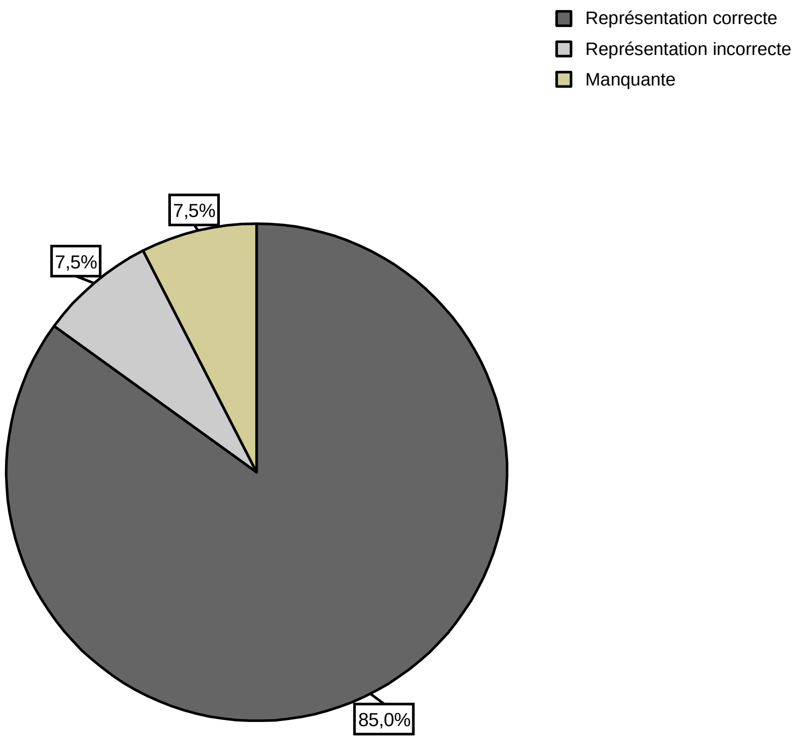
[15] C'est nous qui soulignons.

croient que sa source est essentiellement liée à des carences des élèves, ou des causes institutionnelles locales (mauvais ajustements curriculaires). Ils n'ont pas conscience à quel point leur propre représentation de leur discipline et de ses liens avec les mathématiques est une barrière encore plus forte.

Analyse a posteriori de l'exercice 1

Question 1

Représentez sur le dessin ci-dessous la nacelle lorsque son point de suspension, initialement en A, passe en B puis en C.



Représentation graphique

Trois (8%) enseignants n'ont pas répondu à cette question et 3 (8%) ne sont pas arrivés à reproduire correctement le dessin de la nacelle en A, B et C.

Question 2

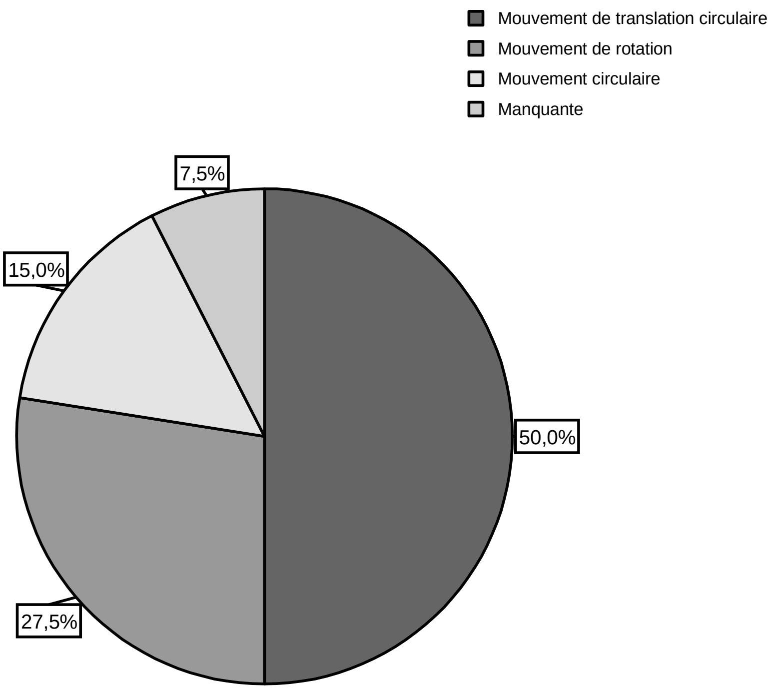
Quel est le type de mouvement de la nacelle ? (Justifier votre réponse)

Trois catégories se dégagent à la lecture des réponses, il y a :

Ceux qui qualifient le mouvement de la nacelle de mouvement de translation circulaire (c'est la bonne réponse),

Ceux qui affirment que c'est un mouvement de rotation (réponse fausse),

Ceux qui disent que c'est un mouvement circulaire sans autre précision



Type de mouvement

28% de ceux ont répondu considèrent que la nacelle a un mouvement de rotation. Cette confusion est assez étonnante de la part des professeurs de physique qui disent utiliser le plus souvent les manuels de Tomasino et Eurin-Gié, dans lesquels la nacelle de grande roue représente justement l'illustration classique du mouvement de translation circulaire. 15% qualifient le mouvement de mouvement circulaire sans qu'on sache s'il s'agit d'un mouvement de translation ou mouvement de rotation, en effet, l'adjectif circulaire ne peut qualifier un mouvement, il qualifie un mouvement de translation, c'est la translation qui est circulaire ou plutôt les trajectoires des points, pas le mouvement. 8% n'ont pas répondu à cette question. Il faut noter aussi qu'il y a un enseignant assez atypique que nous n'avons pas classé qui qualifie paradoxalement mais sans surprise, le mouvement de la nacelle comme un mouvement de translation rectiligne. En effet, pour lui, le mouvement de translation est un mouvement de translation rectiligne, voici la définition qu'il donne du mouvement de translation (Question 6 du questionnaire) : *un mouvement de translation est un mouvement rectiligne qui s'effectue suivant la même droite d'action.*

La moitié des enseignants ont donné la bonne réponse, à savoir que la nacelle a un mouvement de translation, et seuls 45% d'entre eux donnent des justifications. Notons de plus que ces justifications restent souvent au niveau du constat visuel, voire sont incomplètes.

Elles peuvent être classées en trois catégories :

30% des enseignants se réfèrent à la définition relative aux segments qui restent parallèles à eux-mêmes au cours du mouvement. Certains se contentent d'un seul segment ou de deux sans justifier que c'est suffisant. Dans la plupart des cas, l'affirmation semble aller de soi et n'est pas justifiée, ce qui laisse penser que le constat visuel tient lieu de justification. Notons également que le caractère circulaire du mouvement n'est pas toujours signifié.

P003 : C'est un mouvement de translation circulaire car chaque fil de la nacelle conserve sa direction.

P005 : Le segment AM reste parallèle à lui-même au cours du mouvement.

P009 : C'est un mouvement de translation circulaire, par exemple le segment MP reste parallèle à lui-même.

P030 : Les côtés de la nacelle sont constamment parallèles à eux-mêmes durant tout le mouvement.

P037 : C'est un mouvement de translation circulaire car tout segment se déplace parallèlement à lui-même.

P040 : C'est un mouvement de translation circulaire car le segment MM1 se déplace tout en restant parallèle à lui-même (Translation.)

10% utilisent la caractérisation *tout vecteur reste constant à tout instant*, mais en limitant à un seul vecteur :

P004 : C'est un mouvement de translation circulaire car le vecteur MM' est constant dans le temps et que tout point M de la nacelle décrit une trajectoire circulaire.

P007 : C'est un mouvement de translation circulaire car AM=BM1=CM2 (vecteurs)

Un seul enseignant (5%) fait référence à la caractérisation relative au vecteur vitesse. De fait cet enseignant n'avait donné que cette caractérisation du mouvement de translation. Or, ici aucune information n'est connue sur les vecteurs vitesses, cette justification n'est donc pas pertinente, comme nous l'avons dit dans l'analyse a priori.

P018 : C'est un mouvement de translation car tous les points ont à chaque instant même vecteur vitesse.

Enfin, aucun enseignant ne donne comme seule justification que tous les points ont des trajectoires (circulaires) superposables.

Ces résultats tendent à montrer que justifier qu'un mouvement est de translation reste au niveau du constat visuel et majoritairement en lien avec la définition que tout segment reste parallèle à lui-même. De plus, il semble bien que le fait que ceci n'a besoin d'être vérifié que sur deux, voire un seul, segments n'est pas problématisé.

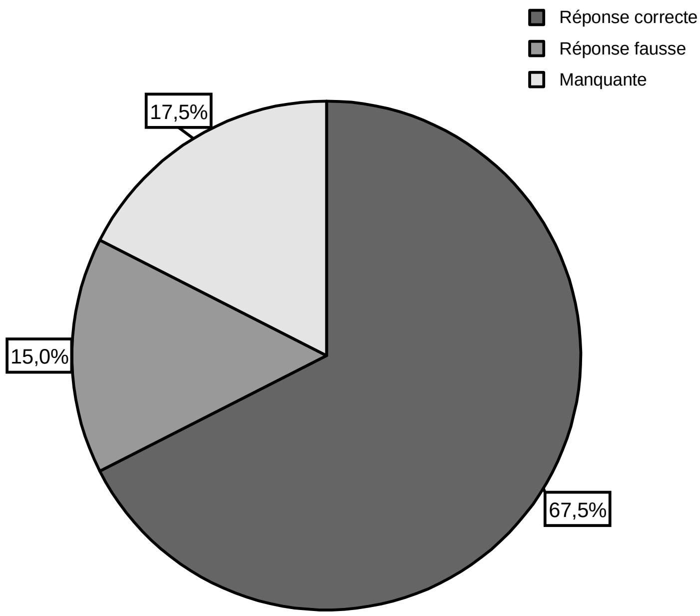
Question 3

Quelle est la trajectoire précise du point M ? (Justifier votre réponse). Tracez cette trajectoire en pointillés sur le dessin ci-dessus.

Nous avons codé cette variable selon 2 modalités :

– La réponse correcte qui correspond au cercle de diamètre [MM2], où M2 est la position de M lorsque la nacelle est en B (A est diamétralement opposé à B).

– Les réponses fausses (cercle centré en O et autres courbes non circulaires)



Trajectoire du point M

18% n'ont pas répondu à cette question et 15% n'ont pas donné la bonne trajectoire. Parmi ces derniers, un seul dit que la trajectoire est un cycloïde, le reste la caractérise comme étant un cercle centré en O. Comme on voit dans le tableau ci-dessous, trois enseignants parmi ceux qui donnent la bonne réponse (68%) considèrent le mouvement comme un mouvement de rotation. On peut penser que ces derniers assimilent la nacelle à un point matériel dans l'étude de son mouvement.

		Trajectoire du point M		Total
		Réponse correcte	Réponse fausse	
Type de mouvement	Mouvement de translation	18	1	19
	Mouvement de rotation	3	4	7
	Mouvement circulaire	5	1	6
Total		26	6	32

Tableau croisé Type de mouvement * Trajectoire du point M

Paradoxalement il y a un enseignant qui trouve que la nacelle este en mouvement de translation, mais la trajectoire du point M est pour lui un cercle de centre O et de rayon OM. D'ailleurs, la justification donnée par ce dernier pour le mouvement de la nacelle ne paraît pas claire : c'est un mouvement de *translation circulaire car il y a conservation de la verticalité du système au cours de la rotation.* Cependant, il semble exprimer l'idée de la conservation de la direction des segments.

On peut retenir donc que certains enseignants « voient » bien ce qui se passe, mais ils semblent disposer d'un vocabulaire peu adapté pour le dire.

Question 4

Donneriez-vous cet exercice à vos élèves ? Pourquoi ? (Éventuellement indiquez les modifications que vous apporteriez à l'énoncé.)

Les questions ont été associées à deux variables intitulées : exercice à donner et raisons évoquées.

A la première question, 2 enseignants n'ont pas répondu, 55% répondent oui et 40% non.

A la lecture des réponses, nous avons la variable « raisons évoquées » selon les 5 modalités suivantes :

- Illustrer le mouvement de translation circulaire,
- Illustrer le mouvement de rotation,
- Exercice plutôt mathématique,
- Modifier l'énoncé,
- Autres.

Les réponses sont synthétisées dans le tableau suivant :

	Fréquence	Pourcentage
Illustrer le mouvement de translation circulaire	16	40,0%
Illustrer le mouvement de rotation	3	7,5%
Modifier l'énoncé	8	20,0%
Exercice plutôt mathématique	3	7,5%
Autres	7	17,5%
Non répondu	3	7,5%
Total	40	100,0%

Raisons évoquées

Nous donnons ci après les 3 commentaires des enseignants qui considèrent l'exercice comme sollicitant beaucoup de compétences mathématiques (généralement assimilées à de la pure abstraction) :

P013 : Non car cette trajectoire repose sur des considérations purement géométriques. La physique c'est du concret.

P014 : Les élèves de 2nde éprouveraient des difficultés à transposer la translation en maths dans ce type d'exo.

P040 : Non car ce chapitre se traite en début d'année à ce moment là le prof de maths est en train de traiter d'autres chapitres. Le calcul vectoriel, la translation math… ne sont pas traités en début d'année. Ce qui rend difficile la tâche du prof de physique.

Les justifications données par les enseignants qui pensent que c'est un exercice qui permet d'illustrer le mouvement de translation mettent en évidence la pertinence de la situation proposée à contribuer à dissiper la confusion entre mouvement de translation et mouvement rectiligne ou avec la rotation. Confusion que même certains professeurs ont tendance à faire comme nous l'avons vu dans les questions précédentes. En voici quelques illustrations :

P009 : Oui pour vérifier s'ils savent reconnaître une translation circulaire. Fait extraordinaire, dans leur esprit une translation est un mouvement rectiligne. C'est un exo que je donne tel quel en TD.

P019 : Oui car il illustre que le mouvement de translation n'est pas forcément rectiligne. La roue n'est pas en mouvement de translation elle est en rotation et elle entraîne la nacelle dans son mouvement de translation.

P037 : Je trouve que c'est un exo assez édifiant, mais j'aurais demandé aux élèves de montrer que tout segment se déplace parallèlement à lui-même et que la trajectoire de M peut se déduire de celle d'un point de la roue par la translation de vecteur OO'.

Ce dernier argument est pertinent, cependant, il est intéressant de noter que cet enseignant n'a pas lui-même fourni une justification aussi détaillée dans les questions précédentes.

Notons aussi que trois des 7 enseignants classé dans « autres » considèrent l'exercice comme hors programme, ce qui est assez surprenant.

Question 5

Quelles sont les difficultés que vous attendriez de vos élèves dans la résolution ? Justifiez votre réponse ?

Nous avons la variable (difficultés attendues) associées à cette question en 4 modalités :

- La confusion entre mouvement de translation (MT) et mouvement de rotation (MR) ou avec un mouvement rectiligne :

Bizarrement, cette modalité est peu observée (15%) contrairement à l'hypothèse avancée dans l'analyse a priori.

- Les difficultés d'ordre mathématiques :

C'est la modalité la plus observée (43%). Ce qui revient fréquemment, c'est la difficulté à représenter la trajectoire circulaire du point M (2ème question de l'énoncé) et surtout à identifier son centre. Certaines réponses font seulement une allusion générale à la difficulté pour les élèves à transférer les connaissances mathématiques.

- Les difficultés à comprendre l'énoncé :

Cette modalité recueille 18% de réponses. Les deux arguments sont, d'une part, que la situation proposée est inconnue du contexte culturel des élèves (*la grande roue est un mécanisme inconnu de nos élèves*) et d'autre part, de façon générale, que l'énoncé n'est pas clair.

- Autres :

Ils sont 3 enseignants que nous n'avons pu classé, un considère que c'est un exercice hors programme du secondaire et 2 parlent de la difficulté à voir que c'est un mouvement circulaire. Il faut remarquer aussi qu'un nombre non négligeable d'enseignants n'ont pas répondu à cette question (18%).

	Fréquence	Pourcentage
Confusion entre MT et MR	6	15,0%
Mathématiques	17	42,5%
Compréhension de l'énoncé	7	17,5%
Autres	3	7,5%
Non répondu	7	17,5%
Total	40	100,0%

Difficultés attendues

Nous retiendrons que majoritairement les enseignants de physique situent les difficultés liées à cet exercice du côté des connaissances mathématiques de leurs élèves.

En conclusion de l'analyse des réponses à cet exercice, nous noterons que nombreux sont les enseignants de physique qui ont des problèmes avec la distinction entre mouvement de rotation et mouvement de translation circulaire. De plus, beaucoup ne semblent pas très au clair sur le bon usage de l'adjectif circulaire. En effet, celui-ci ne peut qualifier un mouvement, il qualifie un mouvement de translation, c'est la translation qui est circulaire ou plutôt les trajectoires des points, pas le mouvement. Enfin, même pour ceux, heureusement majoritaires, qui voient bien ces distinctions, peu finalement semblent retenir l'exemple de la grand roue comme pertinent.

Analyse a posteriori de l'exercice 2

Question 1

Complétez le dessin ci-dessous représentant la situation. (Échelle 1cm=1N)

La variable associée à cette question (dessin à compléter) est codée en deux modalités : soit les enseignants de physique complètent le dessin par la règle du parallélogramme en partant de la relation d'équilibre soit ils procèdent par projections sur les axes en calculant préalablement les coordonnées des différentes forces en jeu dans la situation.

		Fréquence	Pourcentage
	Par la règle du parallélogramme	23	58%
	Par projections	7	17%
	Non répondu	10	25%
Total		40	100%

Dessin à compléter

Le tableau montre que près des 2/3 des enseignants de physique ont complété le dessin en utilisant la méthode de la règle du parallélogramme en s'appuyant sur la relation vectorielle d'équilibre. On peut penser que ces derniers ont considéré les vecteurs forces comme des vecteurs géométriques intrinsèques sur lesquels ils ont raisonné directement. La procédure de construction des représentants des forces par les projections par le détour du calcul de coordonnées, qui n'est pas pertinente ici, est peu populaire (17%). Il faut noter aussi qu'il y a un fort taux de non réponses (25%). Fait surprenant, ces résultats ne confirment pas ceux que nous avons obtenus dans nos travaux antérieurs (Ba, 2003) pour la même enquête mais réalisée en France :

> Les 11 professeurs sur 15 ont estimé qu'il fallait calculer numériquement T pour pouvoir représenter la tension $\vec{T}$. Ce résultat confirme l'hypothèse émise dans l'analyse a priori, à savoir la prégnance du numérique dans la résolution des exercices de physique. (Op. cité p. 41)

Ce résultat est à prendre avec beaucoup de prudence car l'échantillon est peu représentatif (15 professeurs de la région Rhône-Alpes avaient accepter de répondre à notre enquête). Il y a aussi la différence des programmes en œuvre dans les deux pays. Rappelons qu'en France l'évolution des programmes de physique s'est caractérisée par l'insistance sur les aspects concrets et expérimentaux permettant ainsi de mettre à distance les mathématiques.

Question 2 et 3

Quel est le poids de l'objet ?

Quelle est la tension du fil ?

Nous avons codé les variables associées à ces deux questions (*détermination du poids et détermination de la tension*) en deux modalités en accord avec l'analyse a priori :

- Le calcul de l'intensité seule de la force en question,
- Le calcul de toutes les caractéristiques de la force.

	Détermination du poids		Détermination de la tension	
	Effectif	%	Effectif	%
Calcul de l'intensité seule	31	84%	15	42%
Calcul de toutes les caractéristiques	6	16%	21	58%
Total	37	100%	36	100%

Détermination des forces

A la lecture du tableau ci-dessus, on voit que pour la majorité des enseignants de physique (63%) seule l'intensité de la force compte, les autres caractéristiques de direction et de sens allant de soi. Cela est encore beaucoup plus prégnant pour le poids (84% n'ont déterminé que l'intensité). Il faut noter que la détermination de la direction de la tension (détermination de l'angle α) a posé quelques difficultés. 6 professeurs (17%) ont trouvé la valeur de l'angle α soit après un long calcul par la méthode des projections soit graphiquement. Pour le calcul de la valeur numérique de *T*, seuls deux ont pensé à utiliser les relations métriques dans un triangle, en remarquant que $\alpha = \theta = 30^\circ$ et $T = 2F\cos 30$.

Question 4

Donneriez-vous cet exercice ? Pourquoi ? (Éventuellement indiquez les modifications que vous apporteriez à l'énoncé)

4 enseignants n'ont pas répondu à cette question et la presque totalité des professeurs de physique (89%) proposeraient cet exercice à leurs élèves.

Nous avons réparti les raisons évoquées par les professeurs pour ce choix selon trois modalités en fonction des explications données par ces derniers :

Il y a ceux qui pensent que l'exercice est intéressant par la variété des méthodes de résolution qu'il permet de mettre en œuvre, par exemple :

P021 : Oui. Indiquer l'angle α ou demander une résolution graphique.

P008 : Oui. La 1° question n'est pas à sa place car il faut trouver a et T avant de les représenter sinon pour le reste pas de difficulté.

P005 : Oui Représentation d'une situation physique par un schéma. Représentation de forces à l'échelle. Ecrire les conditions d'équilibre. Modifications: préciser le sens de F.

Il y a ceux qui expriment l'idée que c'est un exercice hors contrat sollicitant beaucoup de compétences mathématiques, comme on peut le voir dans les illustrations suivantes :

P016 : Oui pour un travail de recherche. C'est un exo difficile. ***Mais la difficulté est plus mathématique que physique.***[16]

P015 : L'exo est intéressant car la plupart des exos proposés sont donnés avec la force F horizontale. ***Et ce cas permet à l'élève de sortir des schémas prédéfinis****.*

Le tableau suivant résume les réponses liées à aux raisons évoquées par les professeurs de physique. Près de 38% jugent que l'exercice est intéressant tandis que 25% trouvent qu'il est hors contrat et il est perçu comme un exercice de mathématiques.

	Fréquence	Pourcentage
Exercice intéressant par la variété des méthodes	15	37,5%
Exercice hors contrat	10	25,0%
Modifier l'énoncé	2	5,0%
Non répondu	13	32,5%
Total	40	100,0%

Raisons évoquées

On relève quand même un nombre assez important de non réponses (près de 33%).

[16] Le caractère hors contrat de l'exercice est explicitement clair ici.

Deux enseignants proposeraient de modifier l'énoncé en inversant les questions 1 et 2 ou de dire que la 1° question n'est pas à sa place, car pour eux il faut d'abord trouver l'angle α et l'intensité de la tension T avant de les représenter. Ce qui montre qu'il y a un certain malaise à traiter cette question.

Parmi les 10 réponses qu'on a classé dans « exercice hors contrat », 4 rejettent l'exercice proposé, voici leurs commentaires à ce propos :

P022 : Non. Nous préférons donner la force F horizontale et demander une résolution graphique.

P031 : Non. Parce que en physique c'est choisir un système et de faire le bilan des forces, ensuite écrire les conditions d'équilibre. ***Il faut donner le schéma de la figure****.*

P032 : Non. Ce qui intéresse le physicien c'est la compréhension des données physiques.

P035 : Non. Le choix du système à étudier non précisé..

On voit donc que ces enseignants rejettent l'exercice pour des raisons liées à la manière d'enseigner leur discipline. En revanche, l'enseignant *P016* que nous avons déjà cité qui proposerait de donner l'exercice bien qu'il juge la difficulté de celui-ci plutôt d'ordre mathématique que physique.

Question 5

Quelles sont les difficultés que vous attendriez de vos élèves dans la résolution ? Justifiez votre réponse ?

A la lecture des réponses à cette question, nous avons codé la variable associée à cette dernière (difficultés attendues des élèves) en trois modalités :

- La difficulté liée à la construction géométrique des représentants de vecteurs (43%)
- La difficulté à faire des projections et la résolution des équations qui en sont issues (28%)
- Aucune difficulté n'est attendue (18%).

	Fréquence	Pourcentage
Construction géométrique des vecteurs	17	42,5%
Projections et résolution d'équations	11	27,5%
Aucune	7	17,5%
Non répondu	5	12,5%
Total	40	100,0%

Difficultés attendues

Voici quelques commentaires relatifs à ces difficultés :

P011 : Utilisation d'une échelle. La translation d'un vecteur. Construire la somme de deux vecteurs par la méthode du parallélogramme.

P012 : Ils ont l'habitude de travailler avec la force F horizontale.

P020 : Caractéristiques de T. Confondent direction et sens. Difficulté à utiliser le rapporteur.

P031 : Faire un schéma correct respectant les données de l'énoncé, ensuite la ***projection des vecteurs forces puisque le repère de projection n'est pas donné****.*

Pour ce dernier la méthode par les projections semble la mieux indiquée.

En définitive, d’après les professeurs de physique les difficultés que cet exercice présenterait pour leurs élèves sont d’ordre plutôt géométriques.

Conclusion

Il apparaît que la quasi-totalité des professeurs de physique interrogés sont incapables d’expliciter un lien correct entre mouvement de translation et translation, sans parler de ceux qui le limitent au cas de la translation rectiligne ! De même s’ils disent en majorité utiliser des vecteurs, c’est essentiellement en rapport avec le vecteur vitesse. Tout cela montre qu’il existe une certaine distance entre le rapport personnel des enseignants et le rapport institutionnel en ce qui concerne la définition du mouvement de translation. On voit que la pertinence du vecteur n’est pas envisagée par les enseignants de physique dans l’étude du mouvement de translation. De même, ils ont tendance à ne caractériser la grandeur vectorielle physique « force » que par son intensité, au détriment des caractéristiques de direction et de sens. Il paraît régner, de plus, un certain malaise chez les professeurs de physique pour la résolution de l’exercice 2. Les enseignants de physique ont conscience qu’il y a un dysfonctionnement entre l’enseignement des deux disciplines, ils croient que sa source est essentiellement liée à des carences des élèves, ou des causes institutionnelles locales (mauvais ajustements curriculaires). Ils n’ont pas conscience à quel point leur propre représentation de leur discipline et de ses liens avec les mathématiques est une barrière encore plus forte.

Ces analyses renforcent donc le constat de repliement sur sa discipline et une absence de collaboration entre les professeurs de physique et leurs collègues de mathématiques. Pour la majorité des enseignants de physique interrogés, les professeurs de mathématiques doivent faire les mathématiques, les professeurs de physique, la physique et c’est aux élèves de faire les liens

IV.1.3.3 Analyse a posteriori du questionnaire M

Caractères généraux de la population

Ancienneté dans la profession

Deux enseignants de mathématiques ont omis de déclarer leur ancienneté. Les 44 enseignants qui ont répondu à ce questionnaire en 2004-2005 ont en moyenne une ancienneté de 15 ans dans leur métier. La dispersion s'étale de 4 à 30 ans d'expérience. Cela témoigne de la diversité des expériences de la population des enseignants ayant répondu à ce questionnaire. Ces expériences s'étalent en effet de la période des mathématiques modernes (1975) à nos jours.

Moyenne	15
Minimum	4
Maximum	30

Nombre d'années d'enseignement

Etablissement fréquenté

		Fréquence
	CESAG	1
	CP ASS	1
	CSC	1
	ENS	1
	IJA	1
	LASB	1
	LB	4
	LBD	4
	LDD	8
	LGD	2
	LLG	11
	LMB	1
	LMBK	1
	LTID	2
	LTSNT	4
	Total	43
Manquante	NR	3
Total		46

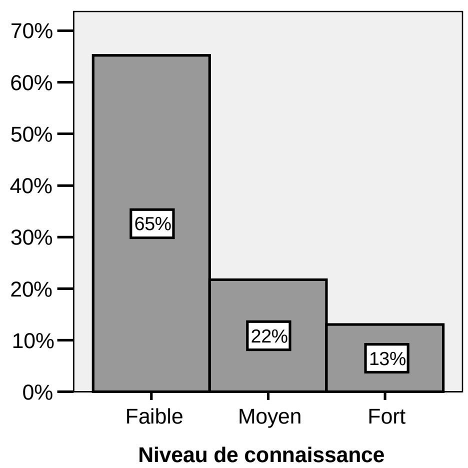
Etablissement

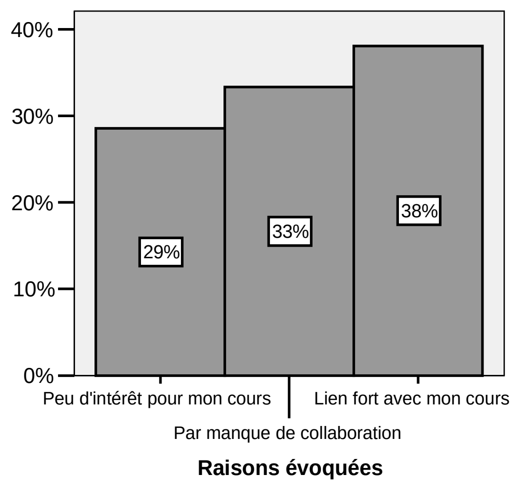
Parmi les 43 professeurs qui ont donné leur établissement, 29 proviennent des lycées de la région de Dakar et 14 des lycées des autres régions. Vu la concentration d'un nombre important de lycées à Dakar, nous pouvons donc estimer, compte tenu de l'objectif de notre travail, que nous avons un échantillon assez représentatif de la population étudiée. A présent, analysons les résultats des différentes questions en suivant l'ordre dans lequel elles apparaissent dans le questionnaire.

Première partie : Aspects généraux et pédagogiques

Question 1

Connaissez-vous le programme de physique de la classe dans laquelle vous enseignez ?





Tous les enseignants ont répondu à cette question. Comme on le voit dans le diagramme, le niveau de connaissance des programmes de physique pour la plupart des enseignants de mathématiques est faible (regroupement des modalités *pas du tout et peu*) (65%). Le peu d'enseignants de mathématiques qui déclarent avoir un bon niveau (*bien et en détail*) (13%) de connaissance des programmes de physique ont une formation bivalente (maths-physique) ou bien disent avoir des diplômes en physique.

			Raisons évoquées			
			Peu d'intérêt pour mon cours	Par manque de collaboration	Lien fort avec mon cours	Total
Niveau de connaissance	Faible	Effectif	12	12	2	26
		% dans Raisons évoquées	100%	86%	13%	62%
	Moyen	Effectif	0	1	9	10
		% dans Raisons évoquées	0%	7%	56%	24%
	Fort	Effectif	0	1	5	6
		% dans Raisons évoquées	0%	7%	31%	14%
Total		Effectif	12	14	16	42
		% dans Raisons évoquées	100%	100%	100%	100%

Tableau croisé Niveau de connaissance * Raisons évoquées

Il apparaît alors que l'intérêt porté à la physique par les professeurs de mathématiques pour leur cours semble lié à leur niveau de connaissance de la physique.

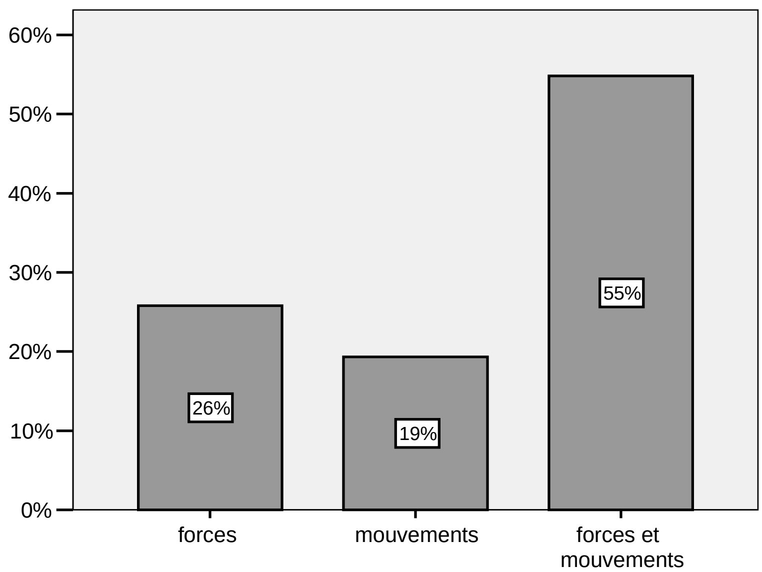
Question 2

Par rapport à ce programme, quels sont les concepts physiques qui selon vous sont le plus en rapport avec votre cours de mathématiques ?

Classez les par ordre de priorité SVP.

La variable associée à cette question *concepts physiques en rapport avec le cours de mathématiques* est codée en trois modalités :

- Forces (si forces seules)
- Mouvements (si vitesse, accélération et mouvements seuls)
- Forces et mouvements.



Concepts physiques en rapport avec le cours de maths

15 professeurs qui n'ont pas répondu à la question (souvent certains parmi eux donnent des concepts mathématiques comme vecteur, équations différentielles, courbes paramétrées, logarithmes, etc. L'un d'eux semble même sous-entendre que le vecteur est un concept physique : *le concept de vecteur me parait le plus en rapport avec nos cours de maths.*)

Le diagramme ci-dessus laisse voir que le concept de force est plus cité que celui de mouvement (81% contre 74%). Ceci laisse penser que les professeurs de mathématiques considèrent leurs cours sur les vecteurs comme éléments le plus en rapport avec la physique.

Notons qu'aucun professeur ne cite le concept de mouvement de translation. On peut supposer que l'évocation du mot translation renvoie pour eux à un concept mathématique et non physique.

Question 3

Faites-vous souvent référence à la physique dans votre cours de mathématiques ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui sous quelle forme ? Sinon pourquoi ?

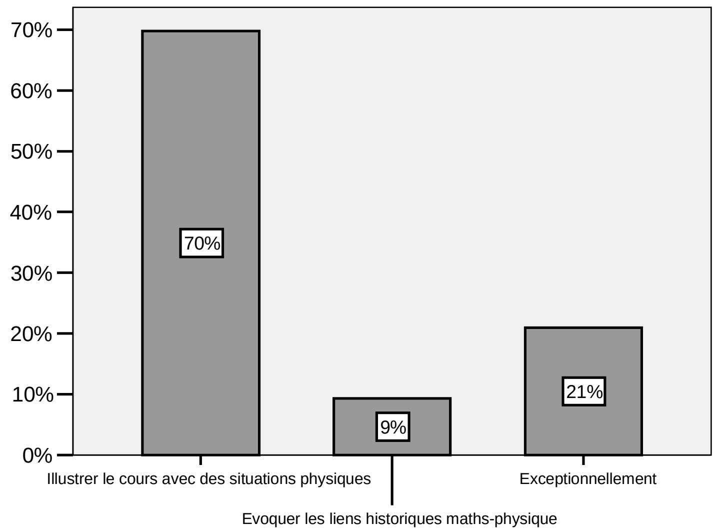
Tous les enseignants ont répondu à cette question et la quasi totalité dit faire référence à la physique (93%).

C'est assez étonnant que l'on retrouve parmi ces derniers des professeurs qui déclarent avoir un niveau faible voire nul des programmes de physique. Le tableau croisé ci-dessous montre que 90% de ces derniers affirment faire référence à la physique.

			Niveau de connaissance			Total
			Faible	Moyen	Fort	
Référence à la physique	non	Effectif	3	0	0	3
		% dans Niveau de connaissance	10%	0%	0%	7%
	oui	Effectif	26	10	6	42
		% dans Niveau de connaissance	90%	100%	100%	93%
Total		Effectif	29	10	6	45
		% dans Niveau de connaissance	100%	100%	100%	100%

Tableau croisé Référence à la physique * Niveau de connaissance

On voit dans le diagramme ci-dessous que la majorité (70%) dit illustrer leurs cours de mathématiques par des situations tirées de la physique, 9% évoquent des liens historiques entre mathématiques et physiques et 21% déclarent faire référence à la physique de façon exceptionnelle.



Question 4

Rencontrez – vous souvent votre collègue de physique ?

a. *Pour parler de vos élèves : Oui* ☐ *Non* ☐
b. *Pour parler des programmes de mathématiques ou de physique : Oui* ☐ *Non* ☐
c. *Pour parler des liens entre mathématiques et physique en général : Oui* ☐ *Non* ☐
d. *Autres (préciser SVP)………………………………………………………..*

(Vous pouvez développer par exemple pour préciser le type de discussion que vous avez ou pour dire pourquoi vous ne rencontrez pas souvent votre collègue ou pour faire-part des difficultés que vous avez à communiquer avec lui).

	Parler de vos élèves		Coordonner les enseignements		Parler des liens maths-physique	
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%
non	7	16%	24	53%	15	33%
oui	38	84%	21	47%	30	67%

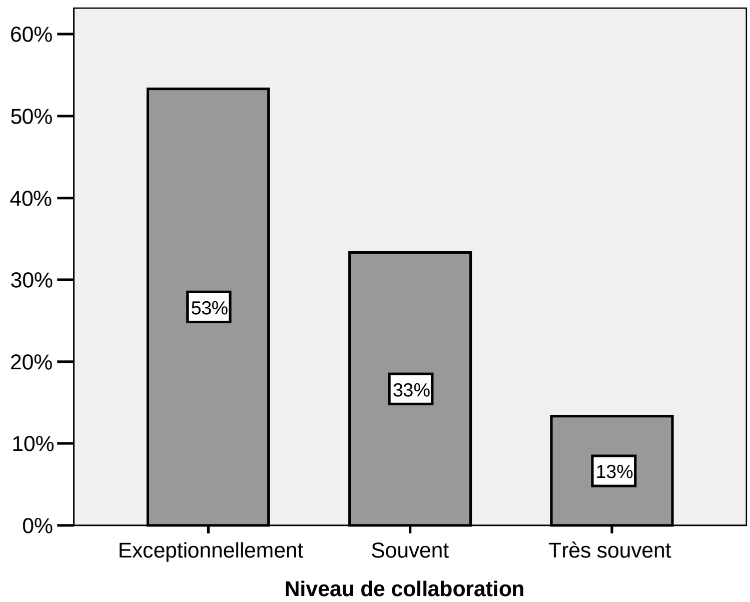
Type de collaboration avec le professeur de physique

Ces résultats sont presque identiques à ceux observés pour les professeurs de physique en ce qui concerne l'item « parler de vos élèves » et « parler des liens maths-physique ». Les professeurs de mathématiques rencontrent bien leurs collègues de physique mais pour le plus souvent ne parler que de leurs élèves, pour la grande majorité d'entre eux (84%) et des liens entre leurs deux disciplines (67%). Les préoccupations des enseignants pour des questions spécifiquement liées à l'évaluation des élèves, comme nous l'avons supposé dans l'analyse a priori, semblent dominer. Ce qui revient souvent dans les propos de ces professeurs c'est :

Nous discutons surtout du niveau des élèves, pour comparer ceux qui sont bien en maths avec ceux qui sont bien en physique, très souvent on retrouve les mêmes noms.
Niveau de la classe, comparer le niveau d'un élève en maths et en physique.

Il faut noter que les professeurs de physique ont été bien plus prolixes en commentaires sur toutes ces questions que leurs collègues de mathématiques. Ces derniers se contentent le plus souvent à ne répondre qu'aux questions fermées. Par exemple pour cette question, il n'y en a que 16 qui ont accepté de faire des commentaires expliquant le type de collaboration qu'ils ont avec leurs collègues de physique.

On peut remarquer aussi que plus de la moitié des enseignants de mathématiques (53%) affirment ne pas coordonner les enseignements avec leurs collègues de physique. Même ceux qui disent coordonner les enseignements avec les professeurs de physique (47%), c'est pour fixer les limites de chaque partie. Une intervention souvent sollicitée par le professeur de physique auprès de son collègue de mathématiques : *Qu'il précise les réalités physiques et que je montre les calculs mathématiques*, a argumenté un professeur de mathématiques. *Les profs de physique se plaignent des difficultés des élèves relativement à des notions mathématiques auprès de nous. Ils nous demandent des fois si nous pouvons aborder des parties du programme qui les intéressent* renchérit un autre. Pour la majorité des enseignants c'est à chacun son boulot, les professeurs de mathématiques doivent faire les mathématiques, les professeurs de physique, la physique et c'est aux élèves de faire les liens.



A partir des quelques commentaires de la rubrique *autres*, il est apparu que les enseignants de mathématiques exprimaient en général un certain *niveau de collaboration* avec leurs collègues de physique. On peut voir globalement que la collaboration, même si elle apparaît majoritairement dans les items « parler des élèves » et « parler des liens maths-physique », est relativement exceptionnelle (53%). D'ailleurs, ce résultat est similaire à celui que nous avons observé chez les professeurs de physique (56%).

M010 : Souvent le prof de physique de la même classe par exemple en seconde S me demande si je pourrais commencer en premier lieu, les vecteurs et le produit scalaire.

M018 : Dans la plupart des cas c'est le collègue de physique qui nous interpelle sur les difficultés des élèves dans les résolutions mathématiques.

M002 : Pour parler de progression à toute fin utile: quelle notion souhaitez-vous que l'on traite en maths pour pouvoir mieux aborder votre prochaine leçon de physique ?

Il s'agit avant tout de s'assurer que les mathématiques utiles pour le cours de physique ont été ou seront enseignées à temps, mais quasiment jamais d'échanger sur les contenus.

Deuxième partie : Aspects didactiques

Question 5 et 6

Selon les physiciens, un solide est en mouvement de translation si tout segment liant deux points du solide reste parallèle à lui-même au cours du mouvement.

Voyez –vous un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui lequel ?

Voyez-vous un lien avec d'autres notions mathématiques ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui lesquelles ?

Sept n'ont pas répondu à la question 5. On voit dans le tableau que la quasi-totalité des professeurs de mathématiques ayant répondu (97%) affirment qu'il y a un lien entre mouvement de translation et translation mathématique.

	Lien entre mouvement de translation et translation	Lien avec d'autres notions
	%	%
Non	3%	29%
Oui	97%	71%

Cependant, l'immense majorité des enseignants de mathématiques sont prisonniers de leur conception dynamique de la translation et n'envisagent que le mouvement de translation rectiligne comme en témoignent les commentaires suivants :

M042 : En maths un solide est en mouvement de translation s'il garde la même direction par rapport à une direction fixe donnée. Parallèle a même sens que direction.

M039 : Oui car un solide en mouvement de translation rectiligne définit une translation mathématique

Ceci confirme les résultats de Gasser (1996). De fait, les enseignants de mathématiques pensent le lien entre mouvement de translation et translation comme évident, puisque pour eux c'est la même chose.

M026 : Bien sûr le terme translation est en maths et en physique.

M001 : Bien sûr l'image d'un segment par une translation étant un segment de même longueur et les supports des segments sont parallèles.

M002 : La notion de translation mathématique désignant une transformation ou le déplacement d'un point ou d'un ensemble (solide par exemple), ce lien avec la conception physique est réel. Cependant la notion de référentiel à laquelle fait allusion la physique n'apparaît pas dans la conception mathématique.

Aucun professeur ne relie la définition des physiciens du mouvement de translation avec la notion de vecteur, un seul l'évoque avec la notion de parallélogramme mais de façon confuse :

M010 : Le parallélogramme explique qu'il y a lien entre mouvement de translation et translation mathématique et aussi la notion de déplacement. Une translation mathématique se fait à partir d'un mouvement et du parallélisme.

Question 7

Les dessins ci-dessous représentent une nacelle d'une grande roue et un tableau fixé au mur par deux tiges rigides inextensibles de même longueur que l'on fait osciller dans le plan vertical du mur. Quelle est la nature du mouvement de chacun de ces deux objets ?

Justifier votre réponse.

Nature du mouvement du tableau

A la lecture des réponses nous avons codé cette variable « nature du mouvement du tableau » en 5 modalités. (cf. tableau ci-dessous.)

	Fréquence	Pourcentage
Mouvement de translation	10	21,7%
Mouvement de rotation	4	8,7%
Mouvement circulaire	5	10,9%
Ne comprend pas	6	13,0%
Autres	5	10,9%
Ne répond pas	16	34,8%
Total	46	100,0%

Nature du mouvement du tableau

Le premier constat qui se dégage de ce tableau est le nombre élevé de non réponses (35%). Ce qui laisse penser que cette question ne semble pas réellement motiver les enseignants de mathématiques. En outre, le fait que le dessin du tableau ait suggéré une piste par la caractérisation du mouvement par « tout segment reste parallèle à lui-même » en exhibant deux segments non colinéaires, n'a pas empêché que 9% des enseignants qualifient le mouvement du tableau de mouvement de rotation. En plus de ceux là, il faut compter les professeurs qui considèrent le mouvement comme circulaire (11%), ce qui signifie généralement pour eux que le mouvement n'est pas un mouvement de translation :

P006 : ce ne sont pas des mouvements de translation. Ils sont circulaires.

P015 : ce n'est pas un mouvement de translation. C'est un mouvement circulaire.

Ou bien ils confondent nature du mouvement et trajectoire d'un point du solide :

P019 : mouvement circulaire car trajectoire est un cercle.

Il y a aussi ces enseignants qui disent ne pas être sûrs d'avoir compris la situation proposée (13%).

Nature du mouvement de la nacelle

Nous avons adopté le même codage que pour la question précédente et on constate de façon presque similaire que le nombre de non réponses reste très élevé (37%), comme pour le mouvement du tableau, c'est une question qui semble peu motiver les professeurs de mathématiques.

	Fréquence	Pourcentage
Mouvement de translation	6	13,0%
Mouvement de rotation	9	19,6%
Mouvement circulaire	5	10,9%
Ne comprend pas	5	10,9%
Autres	4	8,7%
Ne répond pas	17	37,0%
Total	46	100,0%

Nature du mouvement de la nacelle

Contrairement à ce que nous avons observé pour le tableau, on voit pour ce qui concerne la nacelle que beaucoup d'enseignants de mathématiques (20%) qualifient le mouvement de celle-ci de mouvement de rotation contre 13% pour le mouvement de translation. Pour le reste des modalités nous avons presque les mêmes résultats. D'ailleurs, ce sont les mêmes enseignants qui qualifient en même temps les mouvements des deux objets de « mouvement circulaire » confondant ainsi la trajectoire d'un point du solide à son mouvement.

Notons que seuls deux enseignant ont tenté de justifier la nature des mouvements des deux objets.

L'ébauche de la première justification ne paraît pas claire du fait que l'enseignant associe au solide considéré plusieurs mouvements de translation, ce qui l'amène à considérer une suite infinie de translations qui apparaît pour lui comme une translation.

P001 : Les mouvements de la nacelle sont des mouvements de translation: tout segment liant deux points de la nacelle reste parallèle au cours du mouvement (mais il y a une infinité de translations) et la composée de 2 translations est une translation). Les mouvements du tableau sont aussi des mouvements de translation: selon les mêmes principes physiques le tableau reste toujours perpendiculaire au plan du sol.

Le dernier semble associer translation mathématique et mouvement de translation rectiligne tout en focalisant son raisonnement sur les points du solide.

P023 : Selon la définition physique oui

Selon la définition math non car la conservation de la direction et du sens dans une translation math n'est pas vérifiée en tout point.

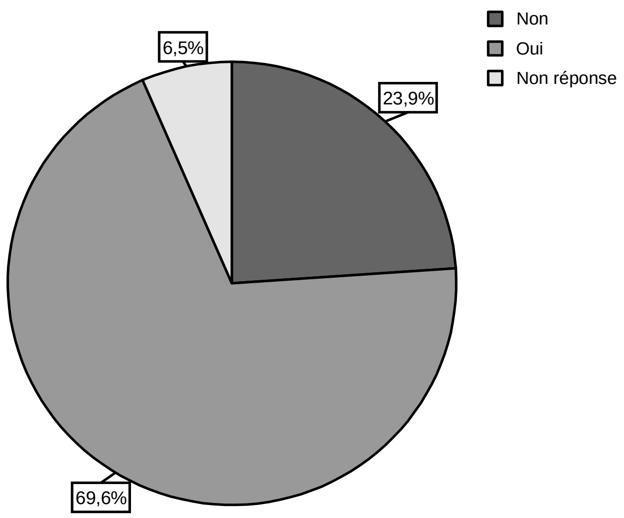
On voit, comme l'a fait remarquer Gasser (1996), que le professeur de mathématiques *a tendance à raisonner que statiquement lorsqu'il évoque l'outil des transformations… Pour lui, en fait, il n'existe pas de position intermédiaire d'une figure si on lui applique une translation : elle est en quelque sorte instantanément « télé portée » sur son image.*

Question 9

Dans votre cours sur les vecteurs (si vous êtes concernés) faites-vous référence à la physique ?

Oui ☐ *Non* ☐

Si oui comment ? Si non pourquoi ?



Référence à la physique dans le cours sur les vecteurs

70% des enseignants affirment faire référence à la physique dans leur cours sur les vecteurs tandis que 24% répondent non.

Les raisons évoquées par ces derniers sont réparties en 3 modalités comme indiquées sur le tableau ci-dessous.

	Fréquence	Pourcentage
Lien avec les forces	25	54%
Lien avec le mouvement	4	9%
Aucun intérêt pour mon cours	7	15%
Ne répond pas	10	22%
Total	46	100%

Raisons évoquées

Le premier constat est le lien avec le mouvement reste très marginal (9%) et plus de la moitié des enseignants de mathématiques (54%) déclarent faire leur cours sur les vecteurs en lien avec les forces. Cependant un nombre non négligeable de professeurs (15%) assument que faire référence à la physique ne présente aucun intérêt pour leur cours sur les vecteurs.

M005 : Je ne fais pas référence à la physique car le cours risque d'être long et parfois même un peu complexe.

M041 : Non. Je ne vois nullement l'utilité pour la compréhension des vecteurs, les élèves comprennent bien les vecteurs sans le support de la physique.

M044 : Non car je pars du parallélogramme qui est déjà connu des élèves.

Ces déclarations sont assez symptomatiques du repliement disciplinaire dont nous avons parlé plus haut, malgré l'affirmation constante dans les textes officiels de l'importance des interrelations possibles entre mathématiques et physique.

Il faut aussi remarquer que le peu d'enseignants qui disent faire le lien avec le mouvement, restent assez vagues comme en illustrent les déclarations suivantes :

M009 : Oui avec le déplacement d'objets et de solide.

M010 : Oui surtout pour le mouvement des objets.

Pour ceux qui font référence aux forces, nous avons relevé que cette référence semble se limiter à des explications formelles du professeur de mathématiques en insistant plus sur les différences entre les concepts étudiés que sur une réelle intégration des deux disciplines.

M002 : Je fais référence souvent à la physique pour signifier aux élèves que la notion de point d'application utilisée en physique n'est pas une caractéristique d'un vecteur.

M046 : Oui. En expliquant que c'est la même chose que le vecteur force en physique sauf qu'en physique le vecteur force a un point d'application ce qui n'est pas le cas pour le vecteur en maths.
M004 : Oui en montrant que l'addition des vecteurs est utilisée en Physique et Chimie pour calculer la force résultante d'un système soumis à plusieurs forces.

On voit en définitive que la référence à la physique reste très anecdotique pour les enseignants de mathématiques qui n'invoquent jamais d'illustrations réelles du cours de mathématiques par des situations tirées de la physique.

Conclusion

Ce questionnaire nous a permis de mettre en évidence les rapports des professeurs de mathématiques avec leurs collègues de physique ainsi que leurs rapports personnels avec les objets de savoir mouvement de translation et translation mathématique. Ce qui semble le plus remarquable c'est le repliement disciplinaire mettant en défaut l'injonction des programmes à une plus grande ouverture de l'enseignement des mathématiques vers les autres disciplines et plus particulièrement la physique. Nos analyses montrent que même si les enseignants de mathématiques font référence à la physique, cela reste très anecdotique puisque ne s'appuyant pas sur des illustrations réelles issues de situations physiques pour favoriser l'intégration des deux disciplines comme nous l'avons vu sur l'exemple de leur cours sur les vecteurs. En ce qui concerne les liens entre mouvement de translation et translation mathématique, nous avons vu que les enseignants de mathématiques dans leur majorité pensent le lien entre mouvement de translation et translation comme allant de soi, puisque pour eux c'est la même chose. Les résultats montrent aussi qu'ils ont une perception erronée du mouvement de translation qu'ils confondent généralement avec le mouvement de translation rectiligne et qu'ils ont des difficultés à distinguer mouvement de translation circulaire et rotation.

IV.1.4 Conclusion sur le rapport personnel des professeurs

Dans cette section, nous avons tenté de cerner le rapport effectif des enseignants aux objets de savoir en jeu et les variations existantes selon qu'on se place dans l'une ou l'autre des disciplines. Nos analyses montrent bien que globalement le dialogue entre les enseignants des deux disciplines reste très limité et en quelque sorte stérile dans la mesure où même si le manque de lien entre les deux disciplines est déploré, seul le travail de l'élève ou un manque de coordination purement temporel sont mis en cause. Si la plupart des enseignants des deux disciplines disent « collaborer » avec l'enseignant de l'autre, il apparaît toutefois que cette collaboration reste très superficielle. Il s'agit avant tout de s'assurer que les mathématiques utiles pour le cours de physique ont été ou seront enseignées à temps et éventuellement de parler des élèves, mais quasiment jamais d'échanger sur les contenus. Par exemple pour ce qui est du lien entre mouvement de translation et translation mathématique, on voit, conformément aux résultats de Gasser, qu'il n'est pas réellement construit par les enseignants de l'une ou l'autre des deux disciplines. La grande majorité des enseignants des deux disciplines sont incapables d'expliciter ce lien, voire doutent parfois qu'il existe, ou encore, sur la seule foi de la proximité de vocabulaire, pensent que c'est (plus ou moins) la même chose. Il semble bien que le manque de connaissances des objets de l'autre discipline donne à chacun l'illusion que les deux concepts sont quasiment identiques. Ces analyses renforcent donc le constat de repliement sur sa discipline et une absence de collaboration entre les professeurs de physique et leurs collègues de mathématiques. Cet état de fait *« engendre une ignorance réciproque entre disciplines enseignées, et l'incapacité pour une discipline d de prendre en compte – a fortiori de prendre en charge – les besoins d'une discipline d', parce qu'une telle prise en compte mettrait en danger la discipline d d'empiéter sur un territoire où elle ne saurait prétendre édicter sa loi. » (Chevallard 2000, 38)*

Ce qui est certainement symptomatique du manque de dialogue entre les enseignants des deux disciplines, voire du manque d'intérêt pour l'autre discipline. Mais au-delà de ce constat, on voit bien que c'est un manque de communication entre professions plus qu'entre individus qui est en jeu. Si du point de vue épistémologique, les liens entre les vecteurs et les grandeurs physiques vectoriels, ou translation et mouvement de translation existent, l'histoire du système éducatif avec ses contraintes propres a en quelque sorte tout fait pour les rendre opaques. Les enseignants des deux disciplines sont placés dans une logique, qui empêche la collaboration là où elle devrait se faire et conduit à une méconnaissance des vrais enjeux. Les élèves eux s'habituent à un discours en porte à faux : Comment leur demander dans ces conditions de réinvestir à propos leurs connaissances de mathématiques en cours de physique ? Nous allons à présent voir un peu plus en détail comment ils se positionnent dans ce double jeu.

IV.2 Analyse de deux questionnaires destinés aux élèves

IV.2.1 Introduction

Les questionnaires pour les professeurs nous ont permis d'étudier le degré de cloisonnement des deux disciplines ainsi que des rapports entre professeurs de mathématiques et professeurs de physique. Nous poursuivons cette étude du degré de cloisonnement des deux disciplines dans son versant élève à l'aide de deux questionnaires.

Ces questionnaires dont le contenu sera présenté en même temps que les résultats, ont pour but de confronter les hypothèses faites aux cours de l'analyse institutionnelle à la réalité de l'apprentissage des notions de vecteur, de translation et des concepts physiques associés. En d'autres termes, ces questionnaires visent à clarifier le rapport des élèves en fin de seconde et au début de première S à ces objets de savoir et à étudier l'évolution des difficultés déjà repérées dans la revue critique de la littérature à propos de l'enseignement / apprentissage des notions de vecteur et de translation en mathématiques et les notions de force et mouvement de translation en physique. Le premier questionnaire a été passé en France dans le cadre de mon travail de DEA, nous le repassons au Sénégal dans une perspective comparatiste. Notre objectif pour le deuxième questionnaire qui n'a été passé qu'au Sénégal est d'affiner nos hypothèses et résultats sur l'utilisation du vecteur dans des situations non classiques en classe de physique et en classe de mathématiques et en faire l'analyse en termes de contrat. Partant de là, nous avons subdivisée ce chapitre en deux parties :

– La première traite de l'analyse a priori des deux questionnaires,

– La deuxième de leur analyse a posteriori.

IV.2.2 Analyse a priori des questionnaires

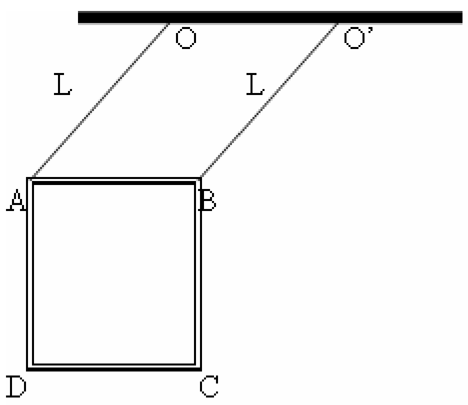
IV.2.2.1 Analyse a priori du questionnaire 1

Le questionnaire est composé de deux situations physiques portant sur :

- Le mouvement de translation
- L'équilibre d'un solide soumis à trois forces.

Analyse de la situation 1

Cette situation porte sur le mouvement de translation circulaire d'un tableau rectangulaire qui est suspendu par deux tiges rigides et de même longueur et pouvant osciller seulement dans un plan vertical. Elle met en scène des configurations géométriques simples familières à l'élève de seconde. Contrairement au cas de la nacelle de grande roue, ici le tableau n'effectue a priori qu'une partie de la trajectoire circulaire. De plus, la conservation de l'orientation des bords du tableau peut paraître plus évidente que dans le cas de la nacelle. Il semble que le risque de confusion entre mouvement de translation circulaire et mouvement de rotation soit ici réduit par rapport au cas de la grande roue. Rappelons que même certains professeurs de physique que nous avons interrogés ont parlé de mouvement de rotation pour la grande roue, c'est le cas d'une majorité de professeurs de mathématiques. Il sera intéressant ici de voir comment les élèves s'en sortent. Toutefois, nous avons orienté nos questions de façon à éviter cette confusion classique. Dans un premier temps on demande quelles sont les trajectoires de deux points. Puis on demande de montrer qu'un vecteur reste identique lors du mouvement et enfin de caractériser le mouvement. Ainsi avec la question 2, si la confusion avec le mouvement de rotation persiste ce sera un indice de sa forte prégnance chez ces élèves. De fait, ce qui nous intéresse ici c'est plutôt la capacité des élèves à justifier correctement le fait que c'est un mouvement de translation.



Question 1

Quelles sont les trajectoires des points A et B dans le référentiel terrestre ?

Les tiges étant rigides, les points *A* et *B* décrivent alors des arcs de cercles centrés respectivement en *O* et *O'* et de rayon *L*.

C'est une question simple, qui permet de s'assurer que l'élève s'est bien approprié la situation. Elle permet aussi d'évaluer la capacité à donner une justification correcte, au delà d'une bonne perception intuitive de la situation.

Bien sûr cette question soulève le problème de la confusion possible entre mouvement de rotation et mouvement de translation circulaire.

Question 2

Montrer que le vecteur $\overrightarrow{AB}$ reste constant au cours du mouvement.

Cette question fait essentiellement appel aux compétences géométriques de l'élève sur le parallélogramme. En effet, en considérant le quadrilatère *OO'BA*, on déduit que la droite (*OA*) est parallèle à la droite (*O'B*) et que *OA* = *O'B* = *L* (d'après l'énoncé) ; on en déduit alors que *OO'BA* est un parallélogramme. Ce qui permet d'écrire que $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{OO'}$, or $\overrightarrow{OO'}$ est un vecteur constant, il en résulte que, dans le référentiel terrestre, à chaque instant *t*,

$\overrightarrow{A(t)B(t)} = \overrightarrow{OO'}$ par conséquent le vecteur $\overrightarrow{AB}$ reste constant au cours du mouvement. Bien sûr la notation en fonction du temps n'est en général pas utilisée par les professeurs de physique à ce niveau et donc ne sera pas accessible à l'élève. Il sera donc intéressant de voir comment il peut s'en sortir. Il y a fort à parier que cela donnera lieu à des imprécisions langagières.

Cette question met sur la piste du mouvement de translation. Sauf que les professeurs de physique utilisent peu la formulation vectorielle pour la caractérisation d'un mouvement de translation. Nous avons toutefois choisi de formuler cette question en utilisant un vecteur (plutôt que de parler de segment qui reste parallèle à lui-même) pour mettre en avant la pertinence de cet outil.

Question 3

En déduire le mouvement du tableau.

La première chose à observer ici est la confusion possible avec le mouvement de rotation. Comme nous l'avons dit plus haut, la question précédente devrait atténuer l'effet de cette confusion classique. Sa persistance ici sera un indice de sa force. Dans le cas où l'élève verra que c'est un mouvement de translation (circulaire), restera la question de la justification.

La caractérisation par le vecteur vitesse semble ici exclue. La question précédente induit la caractérisation par la conservation de tout vecteur sur le solide. Néanmoins il reste à montrer que ce qui a été vu pour $\overrightarrow{AB}$ est encore vrai pour tout vecteur. En fait, comme le problème est plan, il suffit de montrer que c'est vrai pour n'importe quel autre vecteur non colinéaire à $\overrightarrow{AB}$, par exemple $\overrightarrow{AC}$. Comme ce vecteur est toujours perpendiculaire à $\overrightarrow{AB}$ et de longueur fixe et orienté vers le bas (le tableau ne peut pas tourner hors du plan), il est clair que le vecteur $\overrightarrow{AC}$ reste identique lors du mouvement. En fait de par l'indéformabilité du tableau, il s'en suit que l'invariance de $\overrightarrow{AB}$ suffit à justifier que c'est un mouvement de translation.

On voit donc que la justification rigoureuse est ici difficilement accessible à un élève de seconde. Il sera intéressant de voir, ceux qui soulèvent au moins le problème et le type de justification qu'ils pourront développer.

Certains élèves risquent de vouloir raisonner sur la conservation du parallélisme des segments. Le problème de la généralisation à tous les segments est identique à ce qui vient d'être dit pour les vecteurs. Revenir aux segments est un indice de la non prise en compte de la pertinence de l'outil vectoriel, ou d'un fort assujettissement au contrat didactique.

Enfin, il est possible de raisonner ici à partir de la comparaison des trajectoires des points du tableau. En effet, la première question a pu être l'occasion de remarquer que les points A et B ont des trajectoires qui se déduisent l'une de l'autre par une translation. Il resterait à montrer que cela est vrai pour tous les points du solide pour avoir une justification du fait que le mouvement est de translation. Ici aussi une justification entièrement rigoureuse est un peu complexe, mais le résultat est intuitivement facile à voir. Certains élèves risquent d'y faire appel, sauf que cette caractérisation des mouvements de translation n'est pas classique.

Analyse de la situation 2

Cet exercice a déjà été utilisé dans le questionnaire des professeurs de physique. La formulation que nous avons employée ici est un peu plus « classique ». Les connaissances en jeu portent sur l'équilibre d'un objet soumis à trois forces. Du point de vue mathématique, la somme de deux vecteurs et sa construction géométrique sont la clé du problème. Des connaissances élémentaires de géométrie et de trigonométrie sont aussi utiles pour résoudre l'aspect numérique du problème. La difficulté essentielle du problème est liée à la modélisation et à l'intrication entre les connaissances de physique et de mathématiques en jeu. Dans ce problème, l'usage qui est fait du dessin est hybride entre la représentation de la situation matérielle « réelle » et la modélisation mathématique. Ceci est cependant assez classique en physique, on représente une situation réaliste sur laquelle on « plaque » des ostensifs liés à la modélisation (vecteurs, points, angles, etc.). Ce qui est inhabituel ici c'est qu'un des éléments de la réalité (le fil) ne peut être dessiné qu'une fois la construction géométrique de la somme du poids et de la force d'attraction est effectuée. Le modèle semble déterminer la réalité. C'est bien qu'en fait la réalité n'est pas dans le dessin, tout est du niveau de la modélisation mais à des degrés différents.

Question 1

Écrire les conditions de l'équilibre.

C'est une question très classique de l'enseignement de la physique à ce niveau.

Dans le référentiel terrestre, l'objet *M*, qui est le système étudié, est soumis aux forces extérieures suivantes :

Son poids $\vec{P}$ appliqué en M de direction verticale, de sens de haut en bas et d'intensité $P = 200 * 10^{-3} * 10N = 2N$

La force d'attraction $\vec{F}$ appliqué en M faisant un angle θ =30° sous l'horizontale, de sens vers le bas et d'intensité $F = 2N$

La tension $\vec{T}$ dont les caractéristiques sont à déterminer.

A l'équilibre on a : $\vec{P} + \vec{F} + \vec{T} = \vec{0}$.

A priori la réponse à cette question ne nécessite que l'écriture de l'équation vectorielle ci-dessus et ne devrait donc pas poser de problème à des élèves de ce niveau.

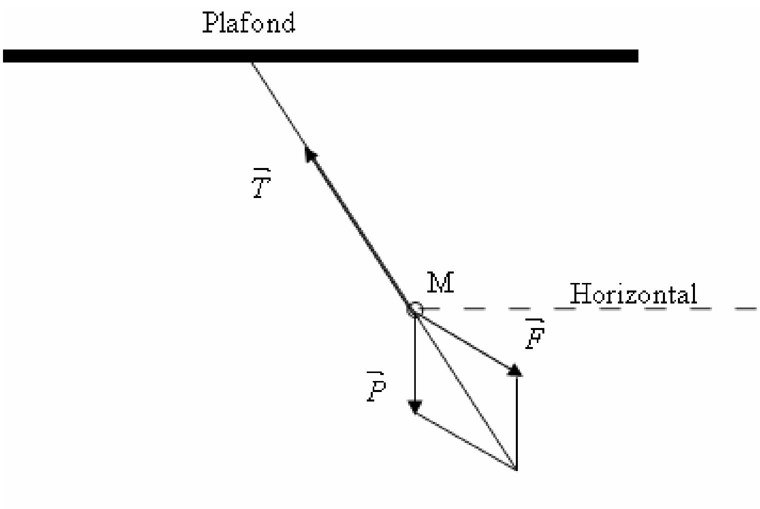
Question 2

Représenter à l'échelle (1cm=1N) les forces en présence sur le schéma ci-dessous.

On représente d'abord $\vec{P}$ et $\vec{F}$ à partir de leur origine en *M*. Ensuite on construit le parallélogramme des forces pour obtenir $\vec{P} + \vec{F}$. Enfin la représentation de la tension $\vec{T}$ qui donne la direction du fil nécessite d'interpréter la relation précédente sous la forme : $\vec{T} = -(\vec{P} + \vec{F})$. En effet, cela permet d'obtenir le tracé de la tension comme opposée de la somme du poids et de la force d'attraction : $\vec{P} + \vec{F}$. Les difficultés sont ici de plusieurs ordres :

1. Représenter correctement à l'échelle les forces $\vec{P}$ et $\vec{F}$, en particulier la direction et le sens de la force $\vec{F}$
2. Penser à interpréter la condition d'équilibre sous la forme : $\vec{T} = -(\vec{P} + \vec{F})$
3. Construire correctement la somme : $\vec{P} + \vec{F}$
4. En déduire la construction de $\vec{T}$.

On voit bien qu'ici il faut un bon contrôle sur la situation physique, même si les connaissances de physique sont simples, des compétences sur la construction d'une somme de vecteurs et surtout une bonne interprétation du dessin sont nécessaires.



Les longueurs des vecteurs forces $\vec{P}$ et $\vec{F}$ représentées à l'échelle indiquée, sont égales à 2 *cm*.

C'est une situation inhabituelle qu'on ne rencontre pas dans les manuels. En effet, dans les situations présentées dans les cours et exercices, le fil est toujours représenté et donc la direction de la tension est connue d'avance, or ici l'enjeu est la détermination de la direction du fil.

Question 3

Quelles sont les caractéristiques de la tension du fil ?

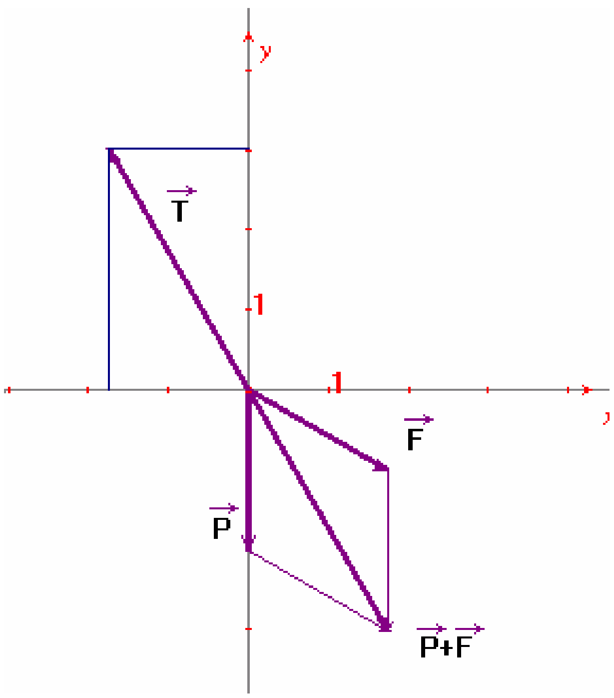
Cette question permet de voir comment les élèves mettent en valeur leurs connaissances géométriques dans des questions de physique où elles sont pertinentes. C'est surtout la détermination de l'angle α qui est la difficulté la plus attendue chez les élèves comme du reste il a été observé chez les professeurs de physique. Bien entendu, cette question ne peut être résolue correctement que si la précédente l'a elle-même été.

Or, le repliement disciplinaire constaté chez ces derniers dans l'analyse a posteriori aura une influence négative chez les élèves pour l'utilisation de leurs connaissances mathématiques en physique, ce qui fait que les élèves regardent les deux disciplines comme étrangères l'une de l'autre.

Pour ce qui est du calcul de l'intensité, l'élève dispose de plusieurs méthodes. Il peut faire une lecture graphique une fois que la construction de $\vec{T}$ est faite à partir de la relation vectorielle $\vec{P}+\vec{F}+\vec{T}=\vec{0}$. Mais cette méthode a l'inconvénient d'être peu précise. Il est possible aussi de procéder à des projections sur les axes en utilisant les coordonnées de $\vec{T}$ déterminées à partir de celles connues de $\vec{P}$ et de $\vec{F}$ ainsi que de la relation d'équilibre $\vec{P}+\vec{F}+\vec{T}=\vec{0}$. Cependant l'utilisation des relations métriques dans un triangle s'avère plus rapide et donne des résultats exacts, mais elle risque d'être peu utilisée dans la mesure où le cours de physique privilégie la technique des projections sur deux axes.

Pour la méthode graphique, on mesure la longueur approximative de $\vec{T}$ à l'aide d'une règle graduée. Ce qui donne $T \approx 3.5\ cm$, et de l'angle avec un rapporteur. Si le dessin est assez précis, il semble probable de « tomber » sur la valeur de 30°.

Par les projections sur les axes $(M,\vec{i})$ et $(M,\vec{j})$ respectivement horizontal et vertical, on obtient :



Si $\vec{T}$ (T_x, Ty)

On a : $\vec{P}$ (0, -2) et F ($Fcos30$, $-Fsin30$)

De l'équation vectorielle on obtient :

$Fcos30 + T_x = 0$

$-P\text{-}Fsin30 + T_y = 0$

On en déduit alors que $T_x = -\sqrt{3}$ *et* $T_y = 3$ *et* $T = \sqrt{T_x{}^2 + T_y{}^2} \approx 3.46$ cm donc $T \approx 3.46N$

Avec les relations métriques dans un triangle, on détermine α en remarquant que les angles α et $A\hat{O}B$ sont correspondants, mais $A\hat{O}B = \frac{1}{2} A\hat{O}C$ car $OABC$ est un losange et la diagonale [OB] en est une bissectrice, de plus $A\hat{O}C = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$, donc $A\hat{O}B = 30^\circ$ par suite α = 30°. On peut aussi mesurer α par un rapporteur, ce qui est évidemment moins précis. En prenant H comme le point de rencontre des diagonales du losange $OABC$ et en considérant le triangle rectangle OAH, on a :

$T = 2\ OH = 2Pcos30^\circ = 2\sqrt{3}N$.

On peut aussi utiliser directement la relation d'Alkashi dans le triangle OAB et on obtient $T^2 = F^2 + P^2 - 2FP\cos O\hat{A}B$ or $O\hat{A}B = 120^\circ$ donc $T^2 = 4 + 4 - 2*(-\frac{1}{2}) = 8*\frac{3}{2} = 4*3$ et on en déduit que $T = 2\sqrt{3}N$.

Ainsi la tension $\vec{T}$ du fil a pour caractéristiques :

Son point d'application est le point M

Son intensité est $T = 2\sqrt{3}N$ ou $T \approx 3.46N$

Sa direction fait 30° avec la verticale

Son sens est de bas vers le haut.

On peut remarquer qu'avec la méthode des projections sur les axes les élèves ne s'intéressent qu'au calcul de l'intensité alors que la méthode par les relations métriques dans un triangle permet non seulement de calculer l'intensité mais aussi de déterminer la direction du fil.

Le calcul de l'intensité T de la tension nous permet de tester si la difficulté mise en évidence dans les recherches antérieures à savoir le fait d'ajouter les intensités des forces qui sont données par leur direction et leur valeur sans appliquer la règle mathématique stipulant que la norme de la somme de deux vecteurs non colinéaires est inférieure à la somme des normes. Autrement dit l'élève calculera-t-il T en prenant directement la somme $P + F$?

A en croire la recherche menée chez les étudiants à l'entrée de l'université par Viennot et al. (1973), il a été remarqué que :

> Si on donne deux vecteurs par leurs composantes, 80% des étudiants les additionnent correctement. Mais la proportion de réussite devient faible si on donne les vecteurs par leur direction et leur module, surtout s'il s'agit de vecteurs physiques : on ajoute les modules (les nombres) sans se poser le problème « d'ajouter » des directions. (Op. cité, 12)

Même si les élèves ne commettent pas cette erreur, et font une construction correcte avec un bon traitement mathématique, il sera intéressant de voir s'ils donnent bien les caractéristiques d'orientation de la force de tension et ne se contentent pas seulement de donner son intensité. Cet exercice place les élèves hors du cadre familier du contrat didactique et on ne s'étonnera pas que beaucoup d'élèves prennent la force $\vec{F}$ comme horizontale comme c'est le cas dans les exercices en physique et que la recherche de la direction du fil soit problématique pour eux.

IV.2.2.2 Analyse a priori du questionnaire 2

L'enjeu de l'ensemble des situations proposées est de donner sens à la somme de deux vecteurs et à la non linéarité de la norme par des problèmes issus de la physique mettant en scène la modélisation des actions mécaniques. Ces situations sont des points de contact entre les enseignements des deux disciplines en ce qui concerne le calcul vectoriel. L'objectif est de repérer les procédures et types de constructions graphiques que les élèves mettent en œuvre pour résoudre des problèmes liés à la somme de deux vecteurs donnés. Même si cela pose moins de difficultés avec des exercices de mathématiques, que se passera-t-il avec des situations physiques proposées en classe de physique et en classe de mathématiques? La réponse à cette question nous permettra d'avoir quelques indices des contrats mis en œuvre pour ce qui est de l'utilisation du vecteur et d'avoir quelques éléments sur la disponibilité et l'efficacité de l'outil vectoriel. Dans quelle mesure les différences de contrats peuvent-ils amener des différences de traitement du modèle vectoriel en classe de physique ou en classe de mathématiques ?

Variables didactiques

Nous retiendrons sept variables didactiques de l'ensemble des situations que nous allons proposer. C'est sur ces variables que nous voulons agir.

Statut outil/objet

Pour voir comment les élèves font fonctionner le modèle vectoriel en particulier la somme de deux vecteurs il est important de rappeler ce que dit Douady (1994) à propos des objets mathématiques en général :

> ***Savoir*** des mathématiques revêt un double aspect. C'est d'une part avoir la disponibilité fonctionnelle de certaines notions et théorèmes mathématiques pour résoudre des problèmes, interpréter de nouvelles questions… Dans un tel fonctionnement scientifique, les notions et théorèmes mathématiques ont un statut d'**outil**. Les outils sont inscrits dans un *contexte*, sous l'action et le contrôle de *quelqu'un* (ou d'un groupe) à un *moment donné*. Les situations ou les problèmes dans lesquels évoluent des notions mathématiques sont générateurs de **sens** pour ces notions d'un certain point de vue que nous appellerons *sémantique*. Savoir des mathématiques, c'est aussi identifier des notions et des théorèmes comme éléments d'un corpus scientifiquement et socialement reconnu. C'est aussi formuler des définitions, énoncer des théorèmes du corpus et les démontrer. Je dis alors que les notions et théorèmes mathématiques concernés ont statut d'**objet**. Ils sont *décontextualisés, dépersonnalisés* (même s'ils sont désignés par un nom propre) *et atemporels.* Le travail de décontextualisation et dépersonnalisation participe à la **capitalisation du savoir**. *Le travail de recontextualisation et le traitement des problèmes qui en découlent permettent d'en élargir le sens.*
> *(Op. cité, 2)*

Dès lors, nous avons focalisé notre intérêt sur le statut d'outil de la notion de vecteur dans le contexte physique. Cette variable nous permettra de savoir si des notions supposées maîtrisées dans le contexte mathématique sont mobilisables dans le contexte de la mécanique. Elle (La variable) peut être une entrée pertinente pour mettre à jour de ce que Colomb et al. (1993) appelle le contrat disciplinaire.

Environnement de travail

La deuxième variable concerne **l'environnement de travail** ou espace de travail dont les valeurs sont l'environnement papier crayon ou un environnement informatique (cabri géomètre par exemple), le choix de l'une de ces valeurs change considérablement les possibilités de stratégies de résolution du problème et le mode de validation. Nous avons choisi l'environnement papier crayon comme valeur de cette variable dans les trois situations. En effet, le contexte de l'enseignement au Sénégal, ne nous permettait pas de pouvoir utiliser un logiciel informatique.

Type de papier utilisé

La troisième variable est liée au **type de papier utilisé** qui peut être quadrillé ou non. Dans la première situation nous choisissons le papier quadrillé pour permettre à l'élève qui a choisi la stratégie du registre cartésien de repérer plus facilement les coordonnées des vecteurs donnés.

Échelle

L'échelle est la quatrième variable, elle peut être laissée à la charge de l'élève ou non. Dans les différentes situations proposées, l'échelle est laissée à la charge de l'élève.

La présence ou non d'une configuration

La cinquième variable didactique concerne **la présence ou non d'une configuration** qui influe notablement sur la stratégie de résolution des problèmes proposés. Les situations ont été choisies pour donner progressivement à l'élève la charge de la conversion des données textuelles en registre graphique et inversement. Dans le cas de la première situation, où le milieu est enrichi de données graphiques sur les forces en présence, l'exploitation de cette variable didactique nous permettra de savoir quel type d'algorithmes de construction de la somme de deux vecteurs est mis en œuvre par les élèves.

Les mesures des grandeurs physiques

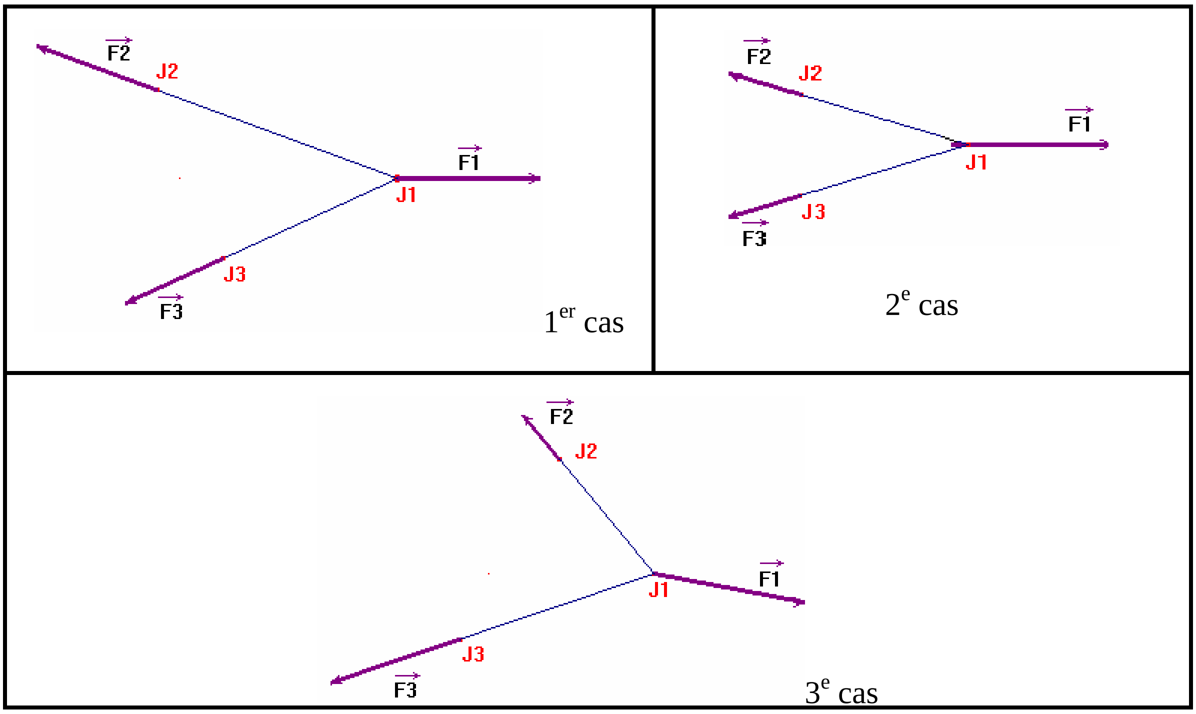
Les mesures des grandeurs physiques peuvent être fournies dans l'énoncé ou non, on sait que leur présence influence fortement la stratégie de résolution des élèves dont les conceptions sont dominées par des considérations d'ordre numérique. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de ne fournir ces mesures que dans la troisième situation. C'est notre sixième variable didactique.

Démarches de validation

Quant à la dernière variable, elle est liée **aux démarches de validation** (faire un dessin ou non), la validation sur dessin est une validation par manipulation empirique consistant à tracer, à constater et à mesurer, sinon l'élève peut être tenté de s'appuyer sur des données numériques du problème pour répondre aux questions posées. C'est par exemple le cas dans la question de la première situation : *Dans chacun des cas, qui l'emporte du joueur* J_1 *ou de l'équipe des joueurs* J_2, J_3*? Expliquez pourquoi.*

Analyse de la Situation 1

Au cours d'une séance d'entraînement de rugby, un des joueurs J_1 est retenu à l'aide de deux cordes de masses négligeables par deux autres joueurs J_2 et J_3. $\overrightarrow{F1}$, $\overrightarrow{F2}$ et $\overrightarrow{F3}$ représentent les forces de traction des joueurs. Dans chacun des cas, qui l'emporte du joueur J_1 ou de l'équipe des joueurs J_2, J_3? Justifiez votre réponse.



Analyse didactique de la situation

Cet exercice est inspiré d'un exercice que nous avons analysé dans la partie *analyse institutionnelle*. Il est issu du manuel *Déclic* de seconde. Nous en avons cependant assez largement modifié le contenu. En particulier, l'énoncé explicite le fait que les vecteurs dessinés représentent les forces de traction des joueurs, ce qui n'était pas dit dans le manuel en question.

Caractéristiques de l'énoncé de la situation

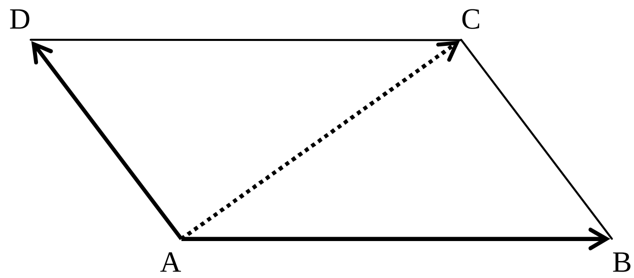
Sur la forme, l'énoncé est composé d'un texte et de figures, la résolution se fait essentiellement dans le registre graphique. Chacun des cas présente une situation différente du point de vue de la composition des trois forces : Contrairement au cas du manuel que nous avons analysé, dans le troisième cas la somme des forces $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ n'a pas la même direction que $\overrightarrow{F1}$. La résolution du problème oblige donc normalement à une discussion non seulement sur les intensités mais aussi sur les directions des forces en présence.

Analyse des connaissances nécessaires pour la résolution

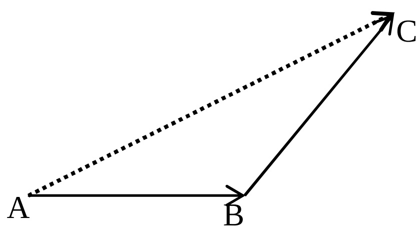
Du point de vue mathématique, la seule connaissance utile porte sur le tracé de la somme de deux vecteurs. Cette connaissance est censée être acquise à la fin du collège. Du point de vue de la physique, les connaissances en jeu portent sur les caractéristiques d'une force (droite d'action, sens, valeur et positionnement du point d'application), et le fait que la résultante de deux forces correspond à la somme vectorielle. Il y a aussi des connaissances relatives à la tension des fils : la tension est la même en tout point de la corde (masse négligeable). Au Sénégal, rappelons que ces connaissances sont enseignées dans le cours de Seconde S.

Rappelons qu'il y a deux règles pour la construction géométrique de la somme de deux vecteurs :

- La règle du parallélogramme, où l'on complète le parallélogramme formé à l'aide des deux vecteurs reportés à une même origine, pour obtenir la somme correspondant à la diagonale partant du point commun origine des deux vecteurs.



- La règle du triangle où il s'agit de mettre bout à bout les deux vecteurs à additionner, en faisant coïncider l'origine de l'un avec l'extrémité de l'autre, la somme est donnée par le troisième côté du triangle ainsi formé, en prenant pour origine celle du premier vecteur considéré.



Stratégies de Résolution

Pour résoudre ce problème dans le cadre de la modélisation proposée par l'énoncé, l'élève doit interpréter la question.

– *Stratégie scalaire*

Une première interprétation consisterait à ne pas tenir compte des directions des forces, mais seulement de leur intensité. Ainsi certains élèves pourraient mesurer les longueurs de chacune des forces, additionner les longueurs de $\overrightarrow{F2}$ et de $\overrightarrow{F3}$ et la comparer à la longueur de $\overrightarrow{F1}$.

Une telle interprétation du problème est symptomatique d'un fort rabattement des vecteurs (ou des forces) à leur seule caractéristique scalaire.

Une approche plus pertinente du problème consiste à comparer la somme $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ à $\overrightarrow{F1}$. Dans ce cas, la comparaison peut elle aussi ne porter que sur les grandeurs scalaires. On a vu que dans l'exercice tel qu'il était posé dans le manuel *Déclic*, cette stratégie pouvait permettre de répondre dans tous les cas de façon adéquate. Dans notre situation, elle est mise en défaut dans le troisième cas où la somme $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ n'a pas même direction que $\overrightarrow{F1}$.

Examinons maintenant comment on peut calculer ou représenter la somme $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$.

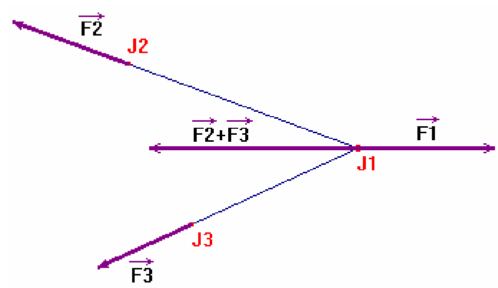
– *Constructions géométriques*

La première question qui se pose est celle du choix du point où va se faire la somme et la comparaison. A priori, l'élève peut choisir n'importe lequel des trois joueurs, le centre de gravité de l'équipe constituée des joueurs J_2 et J_3 ou un point arbitraire. Le fait que le joueur J_1 soit isolé devrait cependant conduire à le choisir de façon nettement majoritaire.

Ensuite, il faudra construire à partir du point choisi, les représentants de $\overrightarrow{F2}$ et $\overrightarrow{F3}$ qui modélisent les actions des joueurs J_2 et J_3. Ici, comme c'est le plus souvent le cas en physique, la construction privilégiée est celle du parallélogramme des deux forces. Cependant dans la classe de mathématiques en particulier, une construction par la méthode du triangle n'est pas à exclure. Dans l'un ou l'autre cas, ceci ne devrait pas poser de difficulté et ne change pas la façon d'interpréter le résultat.

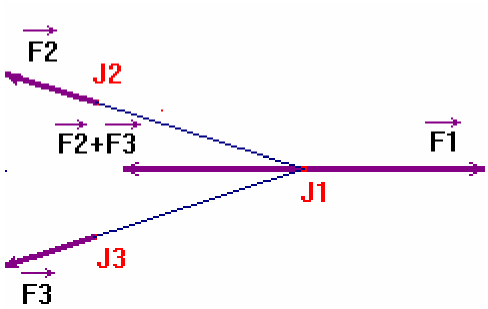
Voici les configurations qu'on obtient dans les différents cas.

Dans le premier cas :



La somme des deux forces $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ a même direction et sens opposé à $\overrightarrow{F1}$. De fait le problème se ramène à une comparaison numérique. En l'occurrence, le joueur J_1 va reculer car $\left\|\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}\right\| > \left\|\overrightarrow{F1}\right\|$, c'est donc l'équipe constituée par les deux joueurs J_2 et J_3 qui l'emporte. L'élève peut s'assurer de cette inégalité par simple observation ou au moyen d'un double décimètre.

Dans le 2^e^ cas : Comme dans le premier, la somme des deux forces $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ a même direction et sens opposé à $\overrightarrow{F1}$. De fait le problème se ramène aussi à une comparaison numérique, mais ici en comparant les longueurs sur le graphique construit on constate que $\left\|\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}\right\| = \left\|\overrightarrow{F1}\right\|$, il y a alors équilibre, moyennant l'imprécision du dessin. Ce cas permet aussi de questionner si l'égalité des normes de deux vecteurs de directions différentes (ici $\overrightarrow{F2}$ et $\overrightarrow{F3}$) peut induire l'égalité des vecteurs chez les élèves.

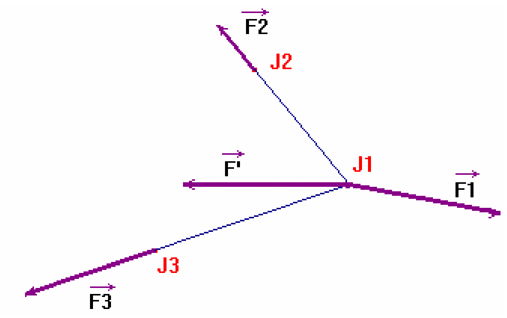


Dans le 3^e^ cas : Contrairement aux autres cas, les directions des forces $\overrightarrow{F'}=\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ et $\overrightarrow{F1}$ sont différentes.

Comme nous l'avons signalé plus haut, une première stratégie consiste à ne prendre en compte que les intensités des forces. En mesurant sur le dessin, on peut ainsi conclure que le joueur J_1 perd. Bien entendu cette stratégie n'est pas correcte, et reflète le phénomène, bien repéré par plusieurs auteurs, de rabattement des propriétés des vecteurs sur leurs seules caractéristiques scalaires.

Cette situation a été conçue pour forcer l'élève à sortir du seul cadre numérique et à s'interroger sur la signification des résultats obtenus dans le modèle par rapport à la réalité du jeu.

Si on considère que le déplacement de J_1 est induit par la somme des forces en présence $\overrightarrow{F'}+\overrightarrow{F1}$, on voit donc que ce joueur n'avance, ni ne recule, mais se déplace dans une direction presque perpendiculaire à ces deux forces qui sont quasi parallèles. C'est un choix explicite que nous avons fait pour que la question de savoir qui a gagné devienne vraiment problématique. Ainsi la réponse attendue devrait être : « on ne sait pas qui gagne ».



Remarquons que choisir un autre point d'application pour faire la somme des forces ne devrait guère changer la perception du problème. On sait qu'une réponse du type : « on ne sait pas » est souvent considérée comme hors contrat par les élèves qui vont certainement ici essayer à tout prix de répondre. Ceci peut les conduire à une stratégie scalaire.

Un autre type de stratégie peut consister à calculer des coordonnées des vecteurs en jeu.

– *Stratégie analytique*

L'élève peut choisir aussi la stratégie analytique qui consiste à choisir un repère orthonormé comme c'est le cas souvent en physique, et à projeter les vecteurs représentés sur les axes de ce repère et passer ensuite au registre du calcul sur les coordonnées.

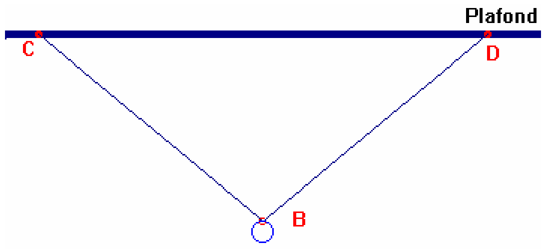
Dans le cas présent, aucune donnée numérique n'étant fournie, cette stratégie ne sera pas favorisée. Si des élèves l'utilisent ce sera un indice fort de la prégnance de l'analytique dans le rapport aux vecteurs. Notons que par le rapport institutionnel, cette stratégie a toutefois plus de chance d'apparaître en classe de physique.

Dans cette stratégie, le choix des axes est important. Nous n'envisagerons ici que le cas le plus susceptible d'apparaître, qui consiste à choisir une origine en J1 et un premier axe dans la direction et le sens de $\overrightarrow{F1}$. Dans ce contexte, les deux premiers cas ne posent pas de difficulté : Le troisième cas est bien sûr plus problématique. Une réponse possible consisterait éventuellement à ne faire jouer la comparaison que sur l'abscisse des deux vecteurs.

Analyse de la Situation 2

Luc accroche une boule B de masse m=1kg à un anneau de masse négligeable coulissant sur un fil souple au plafond de sa chambre par deux points d'attache C et D. On considérera que le plafond est horizontal. Il se demande dans quel cas la valeur de la tension sur les points C et D sera la plus forte.

Aidez le à choisir.



1. *Cas l'angle* $D\hat{C}B$=45°
2. *Cas l'angle* $D\hat{C}B$ =30°
3. *Cas l'angle* $D\hat{C}B$ =10°

Analyse didactique du problème

Caractéristiques de l'énoncé de la situation

Il s'agit d'un énoncé présentant un texte et un schéma. L'élève est appelé à convertir les données (poids de la boule, mesures de l'angle $D\hat{C}B$, et tension du fil) du registre symbolique dans le texte en registre graphique dans le schéma.

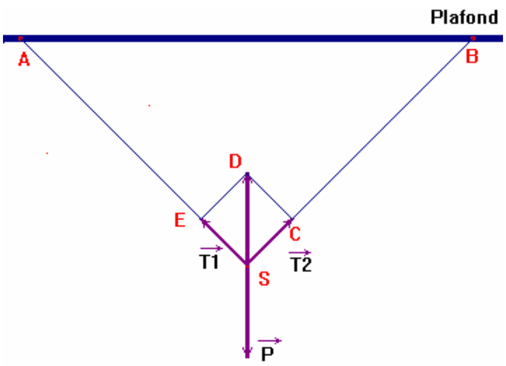
Contenu des connaissances de l'énoncé

En plus des connaissances identifiées dans la première situation, il faut ajouter la connaissance liée à la condition d'équilibre en physique

Stratégie de l'expert

Il faut d'abord remarquer que par raison de symétrie la boule *B* est équidistante des points *C* et *D*, donc les points *CDB* forment un triangle isocèle en *B*, donc la valeur de la tension du fil est la même aux points *C* et *D* (fil souple). Ceci peut aussi être sous-entendu par les élèves puisque ça relève du bon sens.

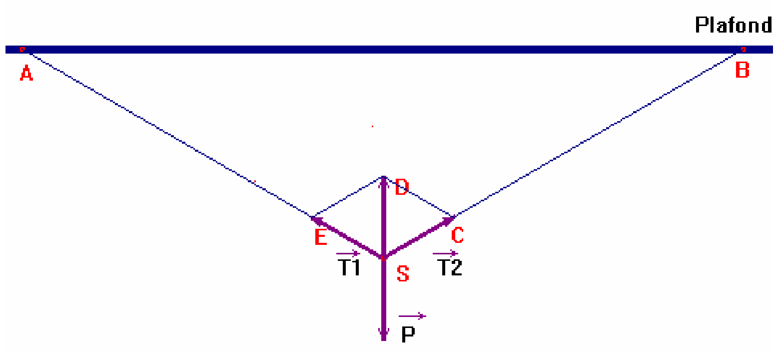
Dans le 1^er^ cas, voici la configuration qu'on obtient :



Comme le spot est en équilibre nous avons : $\overrightarrow{T1}+\overrightarrow{T2}+\vec{P}=\vec{O}$

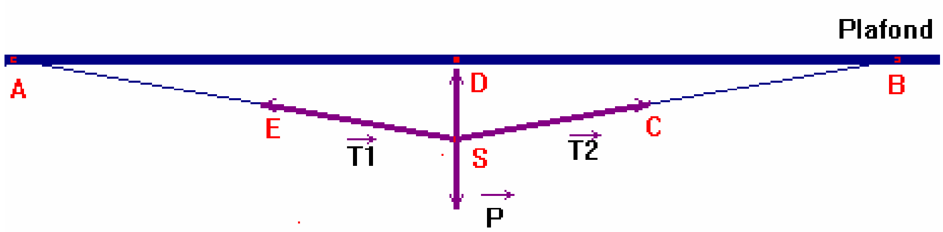
Et comme *ASB* est isocèle en *S* et $B\hat{A}S$ = 45°, donc *ASB* est isocèle rectangle par conséquent *ESCD* est un carré et *T = T1 =T2 =* $\frac{\sqrt{2}}{2}$ *P* où *P* est la valeur du poids de *S (P = mg).*

Dans le 2ème cas où l'angle $B\hat{A}S$ = 30°, on peut traduire graphiquement les données par la configuration suivante :



ASB est isocèle et $B\hat{A}S$ = 30° donc $A\hat{S}B$ = 120° il en résulte que $D\hat{S}C$ = 60° (*DS* est un axe de symétrie de *ASB*) et comme *SC = CD = T*, donc *DSC* est un triangle équilatéral il s'en suit que *T = P*.

Pour le 3ème cas : ($B\hat{A}S$ =10°), voici la représentation graphique :



Soir *H* le projeté orthogonal de *C* sur (*DS*). Dans le triangle rectangle *CHS* on a :

T = $\frac{P}{2\cos C\hat{H}S}$ avec $C\hat{H}S$ = 80°.

Ainsi, c'est dans le 3ème cas que la valeur de la tension du fil est la plus forte en effet, $\frac{\sqrt{2}}{2}$P<P<$\frac{P}{2\cos C\hat{H}S}$.

On peut aussi déterminer par simple construction en respectant la même échelle, dans quel cas la tension du fil est la plus forte.

Stratégies de résolution

Il y a deux types de stratégies de résolution :

- *Stratégie graphique* : L'élève doit choisir une échelle convenable, construire le parallélogramme des forces en utilisant la relation vectorielle d'équilibre et répond à la question en comparant les longueurs correspondant aux valeurs de la tension du fil dans les différents cas.
- *Stratégie analytique* : Avec les données numériques de l'énoncé, l'élève engage une résolution trigonométrique du problème avec ces contraintes physiques dans un registre cartésien ou purement vectoriel.

Cependant, en classe de physique il est fort à parier que la résolution par projections sur les axes d'un repère cartésien sera la plus dominante bien que la méthode géométrique exposée précédemment soit la plus efficace.

Analyse de la Situation 3

Un homme peut ramer à une vitesse de 1,6 m/s en eau calme. Si le courant d'une rivière a une vitesse de 0,8 m/s, dire, en vous appuyant sur un dessin, dans quelle direction l'homme doit-il orienter son bateau pour atteindre la rive opposée à un point directement en face de son point de départ ? On assimilera les deux berges de la rivière à deux droites parallèles.

Analyse didactique de la situation

Cet exercice est un classique, que nous avons retrouvé sous des formes diverses mais proches dans plusieurs manuels de mathématiques pour illustrer la somme des vecteurs. Le problème ici est de savoir interpréter les données. Par effet de contrat, les élèves peuvent être amenés à considérer la somme des vecteurs vitesses, mais les justifications risquent d'être plus difficiles à fournir.

Caractéristiques de l'énoncé de la situation

Nous avons là un énoncé donné exclusivement sous la forme d'un texte en langue naturelle avec des données numériques. La conversion dans le registre graphique est entièrement laissée à la charge de l'élève. Ce qui nous permet de tester une des valeurs de la variable didactique concernant l'absence d'une configuration dans un énoncé. Par ailleurs c'est une situation qui n'induit pas explicitement l'utilisation du vecteur comme c'est le cas dans les exercices précédents.

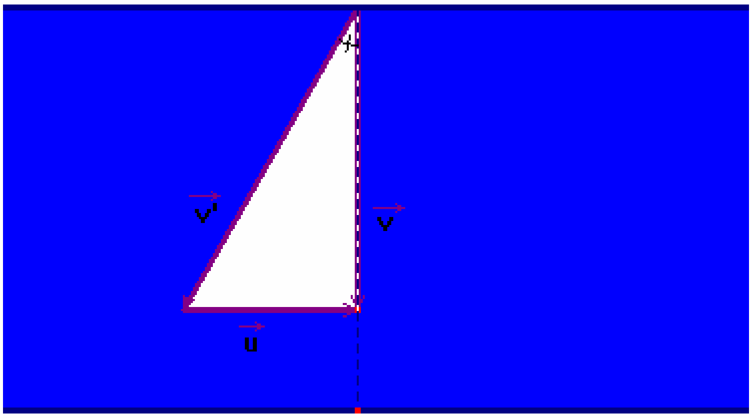
Contenu des connaissances de l'énoncé

Les connaissances de la situation liées à la physique concernent la notion importante de référentiel ici la relation entre la vitesse d'un objet (l'homme) déterminée par un observateur S (système de référence S ici la terre) et la vitesse du même objet déterminée par un autre observateur S' (système de référence S' ici le courant) en mouvement par rapport au premier à vitesse constante. Des connaissances, liées au choix de l'échelle pour une représentation des vecteurs vitesses, apparaissent aussi dans la situation.

Stratégies de Résolution

Stratégie de l'expert

Soit $\vec{u}$ le vecteur vitesse du courant par rapport à la terre avec u = 0,8 m/s, $\vec{v}$ le vecteur vitesse de l'homme vu du sol et $\vec{v}'$ le vecteur vitesse de l'homme par rapport à l'eau avec v'= 1,6 m/s. La relation $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}$ détermine la vitesse de l'homme par rapport à la terre comme l'illustre la figure ci-contre :



Trigonométrie

L'orientation que prend le bateau est déterminée par l'angle α = ($\vec{v}$, $\vec{v'}$), il est calculé par :

$\tan\alpha = \frac{u}{v}$, en effet, les supports des directions de $\vec{u}$ et $\vec{v}$ sont perpendiculaires. Et on a $v'^2 = v^2 + u^2$ donc $v = \sqrt{v'^2 - u^2}$. Le calcul numérique nous donne $\tan\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}$, d'où $\alpha = 30°$.

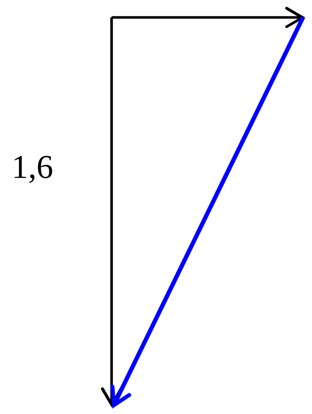
Construction géométrique

Soit ABC le triangle rectangle formé par dans la construction précédente. Posons u = AB et v = BC et v' = AC. Comme AC = 2AB, le point O milieu de [AC] centre du cercle circonscrit au triangle ABC (résultat de troisième), est tel que OAB est un triangle équilatéral, donc $B\hat{A}C = 60°$ et par conséquent $B\hat{C}A = 30°$. On retrouve ainsi la direction prise par le bateau.

Stratégies possibles

La première difficulté ici est de trouver une interprétation correcte de la situation physique. Celle-ci doit nécessairement passer par une notion de référentiel relatif à la rivière. Cet exercice si on le rencontre souvent dans des manuels de mathématiques est par contre nettement hors contrat par rapport à l'enseignement de la physique. Notre hypothèse est donc que peu (voire aucun élève) ne pourra trouver une justification correcte. En physique, les réponses risquent donc d'être majoritairement fausses. En mathématiques, on trouvera peut-être quelques dessins plus ou moins corrects, mais avec des justifications insuffisantes, voire inexistantes.

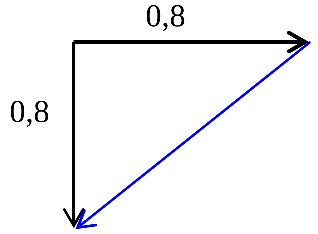
Dans ce cas, les élèves représentent deux vecteurs en lien avec les données de l'énoncé. La vitesse du courant ne pose pas de problème. Par contre pour la vitesse de l'homme dans sa barque, selon le référentiel, on a soit la direction mais pas l'intensité, soit l'intensité mais pas la direction. Il faut donc construire un triangle connaissant un côté, la longueur d'un autre et l'angle du troisième avec le premier. Une **erreur classique** consiste à représenter un vecteur perpendiculaire à la rive et de longueur correspondant à 1,6m/s : la solution consiste alors à faire la somme.



Dans l'hypothèse où le dessin est correct, avec ou sans une justification correcte, l'élève peut se contenter de cette représentation pour la réponse. Il peut aussi mesurer sur le dessin avec un rapporteur l'angle avec le bord de la rivière (ce qui se voit assez bien vu la valeur). Ceux qui verront la nécessité d'une justification autre que graphique pourront ou non utiliser la trigonométrie, bien que les valeurs particulières des angles en jeu permette une solution sans elle.

Notons enfin que la prégnance du modèle numérique, associée à la difficulté à envisager une solution, risque de conduire certains élèves à dire que la vitesse « réelle » du rameur est de 1,6-0,8=0,8 m/s.

De là, ils peuvent déduire par exemple que la direction est de 45° par rapport au bord de la rivière car ils ont un triangle rectangle isocèle.



IV.2.3 Analyse a posteriori des questionnaires

IV.2.3.1 Analyse a posteriori du questionnaire 1

Ce questionnaire a été passé en France durant de notre travail de DEA (Ba, 2003) mais le nombre d'élèves ayant répondu était peu significatif (21). Dans une perspective comparatiste et pour augmenter le nombre de nos données, nous avons choisi de faire passer ce questionnaire auprès d'un échantillon plus significatif d'élèves au Sénégal, en classe de physique de seconde S. Nous avons ainsi recueilli 100 réponses d'élèves sénégalais à ce questionnaire

Analyse a posteriori de la situation 1

Question 1

Quelles sont les trajectoires des points A et B dans le référentiel terrestre ?

A la lumière notre analyse a priori et à la lecture des réponses des élèves, nous avons retenu les catégories suivantes pour l'analyse de cette question :

- Trajectoires circulaires
- Trajectoires rectilignes
- Autres : réponses inadaptées qui parlent de trajectoires ponctuelles ou « vectorielles » ou bien répondent vaguement « de haut en bas ».
- Ne répons pas

	Pourcentage
Circulaires	22%
Rectilignes	40%
Autres	19%
Ne répond pas	19%
Total	100%

Trajectoires de A et B

Le premier constat à la lecture de ce tableau est le faible taux de réussite des élèves à cette question. Seuls 22% des élèves arrivent à donner la bonne réponse à savoir que les trajectoires des points A et B sont circulaires et plus précisément des arcs de cercles de centres respectifs O et O' et de rayons respectifs OA et O'B. Ce résultat semble assez paradoxal puisque cette question est sensée mettre l'élève sur la piste du mouvement de translation. Ceci laisse penser que peu d'élèves se sont appropriés la situation physique de manière pertinente et ont focalisé toute leur attention sur le dessin présenté. Le pourcentage élevé de réponses classées dans les modalités « trajectoires rectilignes et autres » (59%) illustre ce constat de lecture centrée uniquement sur le dessin sans une représentation correcte du phénomène physique. Le deuxième constat est le taux important de non réponses (19%).

Question 2

Montrer que le vecteur $\overrightarrow{AB}$ *reste constant au cours du mouvement.*

Rappelons aussi que c'est une question censée mettre l'élève sur la piste du mouvement de translation en utilisant les vecteurs. Vu que la question est ouverte, la lecture des réponses des élèves nous a conduit à privilégier dans notre analyse les stratégies mises en œuvre par ces derniers pour la résolution de cette question. Ainsi, nous avons classifié les stratégies selon les trois modalités suivantes :

- Stratégie « vecteur » : Elle concerne les élèves qui ont une perception correcte du vecteur et tiennent compte de toutes les caractéristiques de celui-ci dans la preuve de l'invariance du vecteur $\overrightarrow{AB}$ dans le mouvement.
- Stratégie « norme » : C'est une stratégie caractérisée par une lecteur uniquement centrée sur la longueur ou la norme du vecteur. Seule la caractéristique norme importe dans les procédures de preuve de l'invariance du vecteur $\overrightarrow{AB}$ dans le mouvement.
- Autres : Ce sont les réponses qui montrent de grosses lacunes sur les vecteurs

Procédures de résolution	Pourcentage
Stratégie « vecteur »	49%
Stratégie « norme »	38%
Autres	1%
Ne répond pas	12%
Total	100%

Constance du vecteur $\overrightarrow{AB}$

Rappelons que seule la stratégie « vecteur » peut conduire à une réponse correcte. Ainsi, le tableau montre qu'un peu moins de la moitié des élèves (49%) interrogés sont arrivés à faire une preuve acceptable de l'invariance du vecteur $\overrightarrow{AB}$ dans le mouvement, en remarquant que $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{OO'}$. Cependant, un seul élève a fait allusion à l'expression $\overrightarrow{AB}$ en fonction du temps, ce qui est en accord avec l'analyse a priori. On peut interpréter ces résultats médiocres pour cette question comme la conséquence de la faible mobilisation des connaissances vectorielles dans les situations physiques. On peut noter aussi que la quasi-totalité des réponses fausses sont dues à la seule considération de la norme du vecteur, confirmant de fait la tendance observée dans les recherches antérieures.

Question 3

En déduire le mouvement du tableau.

Comme c'est une question ouverte, nous avons aussi établi notre grille d'analyse après lecture des réponses des élèves. Ce qui nous a conduit à retenir les 5 modalités (voir tableau ci-dessous) pour la variable « nature du mouvement ». Les quatre premières modalités sont assez explicites pour qu'on ne s'y attarde pas. Dans l'item « autres », nous avons classé les réponses telles que « mouvement uniforme » ou « mouvement constant » qui feraient probablement référence à la vitesse uniforme ou constante du solide.

	Pourcentage
Mouvement de translation	10%
Mouvement de rotation	2%
Mouvement circulaire	18%
Mouvement rectiligne	48%
Autres	9%
Ne répond pas	13%
Total	100%

Nature du mouvement du tableau

On voit que la plupart des élèves (66%) ne qualifient le mouvement du tableau que de rectiligne ou circulaire. Ceci révèle une confusion entre la nature des trajectoires et la nature du mouvement. Notons que nous avons observé cette confusion chez certains enseignants eux-mêmes, il n'est donc pas surprenant de la retrouver chez les élèves. Ce qui est important ici c'est l'ampleur du phénomène. Notons en outre que seuls 2% des élèves qualifient le mouvement du tableau comme un mouvement de rotation, ce qui infirme du coup notre analyse a priori qui prévoyait un nombre important de réponses pour cet item. Toutefois, 18% parlent de mouvement circulaire et il est fort probable qu'une part importante de ceux-ci sont proches de l'idée d'un mouvement de rotation.

On remarque que seuls 10 élèves ont répondu correctement à la question à savoir que le mouvement du tableau est un mouvement de translation. Parmi ceux-ci, seuls 3 ont fournis des arguments dont voici les extraits :

E006 : On a un solide qui au cours de son mouvement tout vecteur formé par 2 de ses points reste constant donc il est parallèle à lui-même au cours du déplacement : le mouvement du tableau est donc un mouvement de translation.

E019 : $\overrightarrow{AB}$ *est constant donc le mouvement du tableau est une translation*

E037 : Ainsi que $\overrightarrow{AB}$ *reste constant au cours du mouvement on peut dire que le tableau effectue un mouvement de translation uniforme.*

Ces preuves sont insuffisantes sur le plan de la rigueur, puisque tous concluent à partir de la constance du seul vecteur $\overrightarrow{AB}$, néanmoins on voit qu'ils arrivent à une perception du mouvement de translation par une caractérisation vectorielle. Notons également que le dernier élève rajoute que le mouvement est de translation uniforme. Comme si l'invariance de $\overrightarrow{AB}$ *induisait celle du vecteur vitesse.*

Ces résultats corroborent ceux obtenus dans notre DEA. Cependant, dans cette étude il y a moins de confusions langagières car même si la majorité des élèves (19 sur 27 élèves) perçoivent le mouvement du tableau comme étant un mouvement de rotation (ce qui est une confusion classique), ils ne qualifient pas pour autant le mouvement du tableau de mouvement circulaire ou de mouvement rectiligne.

Analyse a posteriori de la situation 2

Question 1

Écrire les conditions de l'équilibre.

Nous n'avons distingué ici que trois catégories de réponses : les réponses correctes, les réponses fausses et les non-réponses.

	Pourcentage
Réponse correcte	79%
Réponse fausse	17%
Ne répond pas	4%
Total	100%

Conditions d'équilibre

Sur les conditions d'équilibre de l'objet M, on peut remarquer un fort taux de réponses correctes (79%) et on note un faible taux de non-réponse (4%). Ainsi plus des ¾ des élèves réussissent bien à écrire les conditions d'équilibre se réduisant essentiellement à l'équation vectorielle $\vec{P}+\vec{F}+\vec{T}=\vec{0}$. C'est une question classique qui constitue un point central de l'enseignement de la physique en classe de seconde. Rappelons que l'enquête menée en France auprès des élèves de même niveau dans le cadre de notre DEA avait abouti aux mêmes résultats.

Question 2

Représenter à l'échelle (1cm=1N) les forces en présence sur le schéma ci-dessous.

Pour la représentation des forces, en plus de la justesse de la réponse, nous avons retenu comme autre variable la procédure de construction faite par l'élève selon les modalités suivantes :

- Règle du parallélogramme : C'est la procédure de construction la plus efficace. En fait, il s'agit comme nous l'avons dit dans l'analyse a priori de partir de l'équation vectorielle $\vec{P}+\vec{F}+\vec{T}=\vec{0}$ pour tirer l'inconnue $\vec{T}$ et de là faire la représentation graphique demandée sans pour autant passer par les projections.
- Méthode graphique – projections : l'élève choisit et calcule d'abord les coordonnées des différents vecteurs avant de construire leurs différentes représentations.
- Autres : concernent toutes les réponses non classées parce que ne tiennent pas compte des données du problème et le plus souvent la force $\vec{F}$ est représenté horizontalement comme c'est le cas dans quasiment tous les exercices de physique.

On note en premier lieu un taux non négligeable de non-réponses (11%) par rapport à la question précédente. Il faut noter que cette question nécessite la coordination de deux types de tâches relevant l'un des mathématiques et l'autre de la physique et à cet effet, engage l'élève dans la mobilisation conjointe de connaissances mathématiques et physiques.

	Pourcentage
Règle du parallélogramme	11%
Méthode graphique -projections	52%
Autres	26%
Total	89%
Ne répond pas	11%
Total	100%

Représentation des forces

Le fort taux de réponses fausses (74%), montrent aussi les difficultés des élèves à sortir du cadre strict d'une discipline quand il s'agit de résoudre des situations nécessitant l'imbrication des savoirs mathématiques et physiques.

Parmi ces réponses fausses, la majorité (62%) utilise la méthode graphique en passant par les projections. Ce qui confirme l'hypothèse de repliement sur les modèles de résolution uniquement de la discipline, renforçant du coup le cloisonnement des disciplines. 35% n'arrivent pas à modéliser correctement le problème.

Les réponses correctes ne représentent que 15% des élèves dont 60% utilisent la règle du parallélogramme pour la construction de $\vec{T}$.

Les élèves restant (40%) ont adopté la méthode graphique en passant par les projections, mais l'examen de leurs raisonnements montre que ces élèves n'arrivent à la valeur de α qu'après de pénibles calculs trigonométriques dont la source est la résolution de deux équations à deux inconnues T et α.

Question 3

Quelles sont les caractéristiques de la tension du fil ?

Nous avons scindé cette question en deux variables :

- Stratégies pour déterminer l'intensité de la tension du fil qui peuvent se décliner en trois modalités :
  1. Stratégie géométrique : L'élève calcule l'intensité en utilisant des connaissances de géométrie du triangle et des relations trigonométriques.
  2. Stratégie « norme » : concernent tous les élèves qui ne retiennent du vecteur que sa norme et dans le cas présent calculent la norme de $\vec{T}$ comme la somme des normes de $\vec{P}$ et $\vec{F}$.
  3. Autres : Toutes les réponses non classées parce que représentant la force $\vec{F}$ comme horizontale ou partent d'une relation vectorielle fausse.
- La détermination de la direction qui correspond en fait à la détermination de α et du sens de la tension du fil : en réponse correcte ou en réponse fausse.

Intensité de la tension

On note que le pourcentage de non-réponses est assez important (18%) pour la détermination de la tension du fil, ce qui est sans doute dû au caractère hors contrat de la situation proposée.

Remarquons aussi que toutes les réponses des élèves qui sont classées dans les catégories stratégie « norme » et autres sont fausses (55% des réponses fausses), ce résultat est probablement sous-évalué compte tenu du poids des non-réponses.

	Pourcentage
Stratégie norme	30%
Stratégie graphique	45%
Autres	7%
Ne répond pas	18%
Total	100%

Détermination de l'intensité de la tension

En outre, 45% des élèves déterminent l'intensité de la tension, soit graphiquement par mesurage sur le dessin, soit par projection. Il est aussi assez significatif de noter que près d'un tiers des élèves a donné une valeur erronée de l'intensité de la tension, en la déduisant par simple substitution des intensités dans l'équation vectorielle. Tout se passe comme s'ils réduisaient l'addition vectorielle ou la composition des forces à une simple opération arithmétique sur les normes ou les longueurs. Ce qui laisse penser que ces élèves confondent le vecteur et sa norme.

Détermination de la direction et du sens

	Pourcentage
Réponse correcte	16%
Réponse fausse	68%
Ne répond pas	16%
Total	100%

Détermination de la direction de la tension

On remarque dans le tableau ci-dessus que le taux de non réponses est aussi élevé (plus de la moitié de l'effectif pour chaque caractéristique). Pour cet item, seuls 16% des élèves sont arrivés à déterminer correctement la direction et le sens de la tension du fil. Parmi ces élèves, 63% ont déterminé la valeur de l'angle α que fait la tension avec la verticale. Les 17% restant se contentant d'un simple tracé graphique.

On voit donc que les performances sont très faibles pour ce qui concerne les caractéristiques d'orientation (direction et sens).

Ces résultats confirment ceux de notre travail de DEA.

Conclusion

Il faut d'abord considérer les résultats avec beaucoup de prudence compte tendu de la taille de l'échantillon des élèves qui ont bien voulu répondre à ce questionnaire et du pourcentage de non-réponses souvent important pour certaines questions.

A travers notre analyse, il apparaît que la quasi-totalité des réponses fausses dans les deux situations portant sur les vecteurs sont dues, à la seule considération de la norme du vecteur, confirmant de fait la tendance observée dans les recherches antérieures.

Il apparaît particulièrement dans la situation2, que seule la méthode de projection sur les axes semble être mise en œuvre dans la résolution des exercices de physique. Ce qui confirme l'hypothèse de repliement sur des modèles de résolution uniquement disciplinaires.

En définitive, on voit à travers cette situation que les connaissances relatives au calcul vectoriel se révèlent insuffisantes ou mal réinvesties pour l'enseignement des forces. Cette insuffisance semble être due à une mauvaise perception et prise en compte des caractéristiques d'orientation (direction et sens) des grandeurs vectorielles.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les professeurs de physique reconnaissaient dans la situation2 que c'est un vrai exercice de physique mais, qu'il est hors contrat, trop éloigné du point de vue épistémologique de la discipline. C'est un exercice qui engage l'élève sur une mobilisation conjointe des connaissances mathématiques et physiques, sur la dualité des concepts de force et de vecteur. Cependant, cette mobilisation des connaissances des deux disciplines a peu de chance de prospérer avec la parcellisation et le cloisonnement des savoirs scolaires due essentiellement aux contraintes institutionnelles. Nous faisons l'hypothèse que ce type d'exercice ne peut vivre que s'il y a collaboration entre les professeurs des deux disciplines, dans la préparation et la mise en scène, mais aussi bien sûr, en classe face aux élèves.

En somme, les deux situations révèlent un réinvestissement insuffisant des connaissances acquises en calcul vectoriel sur des situations plus concrètes. Les élèves ne se posent pas de questions sur les liens entre les deux disciplines. Ils restent tributaires du caractère local du contrat didactique relatif à l'enseignement du vecteur et des grandeurs vectorielles physiques.

IV.2.3.2 Analyse a posteriori du questionnaire 2

Introduction

Rappelons que ce questionnaire vise à évaluer les compétences des élèves dans l'utilisation des vecteurs dans des situations physiques. Il a été passé par des élèves de 2^{nd} S et $1^{ère}$ S en cours de mathématiques et en cours de physique (de façon à évaluer les effets de contrat dans les deux disciplines).

Le questionnaire a été administré en fin d'année après les cours sur la mécanique. Les réponses aux questions sont individuelles. Des consignes ont été données au professeur responsable de la classe et présent pendant toute la durée du questionnaire sur la manière dont celui-ci doit se dérouler. Il a été rappelé aux élèves que le travail fait partie d'une recherche et ne sera pas utilisé pour les évaluer. Le but recherché est qu'ils écrivent tout ce qu'ils pensent sur les documents fournis sans utiliser de brouillon et de servir à analyser et à mieux comprendre les difficultés rencontrées, afin d'essayer d'y remédier à l'avenir, en améliorant les enseignements et les manuels.

La détermination des performances est traduite en termes de nombre de réponses correctes relativement à un item.

Après passation du questionnaire nous avons pu recueillir 67 réponses pour deux classes de physique de deux lycées de Dakar (questionnaire passé en cours de physique) et 54 réponses pour deux classes de mathématiques (questionnaire passé en cours de mathématiques).

Questionnaire en classe de physique

Analyse a posteriori de la Situation 1

Nous avons subdivisé l'analyse des réponses à cette situation en 3 parties :

- ***Procédures de résolution*** qui comprend 6 modalités de réponses :
  1. Utilisation de la règle du parallélogramme en J_1,
  2. Utilisation de la règle du parallélogramme en un autre point (y compris J_2 ou J_3),
  3. Utilisation de la règle du triangle (méthode bout à bout) en J_1,
  4. Utilisation de la règle du triangle (méthode bout à bout) en un autre point (y compris J_2 ou J_3),
  5. Utilisation la méthode graphique - stratégie longueur (l'élève ne retient du vecteur que sa caractéristique norme), les élèves qui utilisent cette méthode ne

font aucune construction se contentant de mesurer les longueurs des représentants des forces pour les additionner.

6. Autres (concernent ceux qui donnent directement le résultat sans aucune indication de la démarche suivie ou raisonnent en utilisant la langue naturelle).

– ***Notation utilisée*** qui comprend 4 modalités :

1. La notation$\| \ \|$,
2. Une lettre avec flèche au dessus,
3. Une lettre sans flèche au dessus,
4. Autres ou langue naturelle.

– ***Réponse à la question*** avec ses deux modalités :

1. Réponse correcte,
2. Réponse fausse,

Notons que tous les élèves ont répondu à cette question.

Le tableau suivant synthétise les réponses correctes ou fausses pour les différents cas de figure de cet exercice.

	Réponse cas1		Réponse cas2		Réponse cas3	
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%
Réponse correcte	17	25%	12	18%	4	6%
Réponse fausse	50	75%	55	82%	63	94%
Total	67	100%	67	100%	67	100%

Comme on le constate à la lecture de ce tableau, la majorité des élèves en classe de physique n'ont pas réussi les différents cas de figure qui sont présentés dans cette situation et comme on s'y attendait, l'écrasante majorité n'a pas pu répondre correctement à la situation liée au cas 3 (94%).

Analyse a posteriori du Cas1

Remarquons tout d'abord que les procédures de résolution telles que nous les avons listées s'appliquent à tous les cas de figure. Cette remarque est aussi valable pour la notation utilisée.

% dans Réponse cas1

	Réponse cas1		
	Réponse correcte	Réponse fausse	Total
Règle du parallélogramme en J1	8 47%	3 6%	11 16%
Règle du parallélogramme en un autre point	4 24%	1 2%	5 7%
Règle du triangle en J1	3 18%	0 0%	3 4%
Règle du triangle en un autre point	2 12%	0 0%	2 3%
Méthode graphique-Stratégie norme	0 0%	42 84%	42 63%
Autres	0 0%	4 8%	4 6%
Total	17 100%	50 100%	67 100%

Tableau croisé Procédures de résolution * Réponse cas1

Le tableau croisé ci-dessus montre que pour les réponses correctes, la procédure de construction la plus utilisée, est la règle du parallélogramme en J_1 (47% des réponses correctes). Ce résultat n'est pas étonnant en classe de physique puisque les forces à additionner sont généralement appliquées au même point, même si on note une certaine diversité des exercices proposés dans les manuels récents. C'est sans surprise aussi que les élèves qui réussissent le ***cas1*** (le quart de la population) utilisent tous les règles du parallélogramme ou du triangle. Notons que ceux qui se sont engagés dans ces procédures de construction, adoptent du coup la bonne stratégie qui consiste à considérer de façon pertinente toutes les caractéristiques du vecteur. Concernant les réponses erronées qui sont largement majoritaires (75%), on y retrouve 8% qui utilisent la règle du parallélogramme et évidemment tous ceux qui ont opté pour la méthode graphique - stratégie longueur qui constituent la grande majorité (84% des réponses fausses). Il faut remarquer que les réponses fausses provenant des schémas construits par la règle du parallélogramme, sont dues essentiellement à des erreurs sur la translation des représentants des vecteurs ou à la considération d'un point origine du parallélogramme autre que J_1 conduisant à un raisonnement non pertinent. L'autre remarque est que tous ceux qui ont utilisé la règle du triangle ou méthode « bout à bout » bien que très minoritaires (30%) sont parvenus à la réponse correcte.

D'autre part, en ce qui concerne la variable « notation utilisée », nous constatons comme l'indique le tableau ci-dessous qu'une très faible minorité d'élèves ont utilisé la notation de la norme (moins de 5% de la population totale) et tous ces derniers ont répondu correctement à la question, en fait on retrouve là des élèves qui ont une bonne compréhension du vecteur en considérant de façon pertinente ses trois caractéristiques. En revanche, la majorité (57% de la population totale) des élèves raisonne en utilisant une lettre avec une flèche dessus comme c'est le cas en physique très souvent. On remarque que la grosse majorité du peu d'élèves qui ont répondu correctement à la question provient de ceux qui ont utilisé cette dernière notation (71%) et que la même remarque s'applique aussi pour les réponses fausses (52%).

		Réponse cas1		
		Réponse correcte	Réponse fausse	Total
	Utilise la notation de la norme	3	0	3
		18%	0%	4%
	Utilise une lettre avec flèche	12	26	38
		71%	52%	57%
	Utilise une lettre sans flèche	0	11	11
		0%	22%	16%
	Autres	2	13	15
		12%	26%	22%
Total		17	50	67
		100%	100%	100%

Tableau croisé Notation utilisée * Réponse cas1

Cependant, avec cette notation, les élèves n'hésitent pas à considérer les vecteurs comme des entités numériques préconisant ainsi une relation d'ordre entre ces derniers. Il y a trois élèves qui représentent correctement le vecteur $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ mais le réduisent dans leur raisonnement à sa seule caractéristique de norme, Ce qui donne des expressions telles que $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}>\overrightarrow{F1}$ *donc l'équipe de* J_2 *et* J_3 *remporte ou* $\overrightarrow{F1}=2cm$ et $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}=2{,}5cm$ *donc l'équipe de* J_2 *et* J_3 *gagnent.* Même si ce genre de raisonnement permet d'aboutir au résultat dans les cas1 et 2 (vecteurs de même direction) moyennant un défaut de notation, il est problématique dans le cas 3 (vecteurs de directions différentes) comme on verra plus loin.

Parmi les réponses fausses pour cette notation (lettre avec flèche), 77% procèdent par méthode graphique et ne construisent pas la somme vectorielle, dès lors tout le raisonnement est fondé sur la stratégie norme c'est-à-dire que la caractéristique norme ou longueur est la seule prise en considération excluant les caractéristiques d'orientation du vecteur.

Remarquons que les élèves classés dans les catégories « utilise lettre sans flèche » et « autres » ont tous échoué à l'exception de deux pour cette dernière catégorie qui ont donné des résultats corrects (peut être seulement basés sur le dessin) sans aucune indication da la méthode suivie.

Analyse a posteriori du Cas2

Nous avons des résultats presque similaires au cas précédent. En effet, comme nous l'avons vu dans l'analyse a priori, le raisonnement à développer est le même dans les deux cas et la seule différence est l'égalité des normes dans le cas2.

% dans Réponse cas2

		Réponse cas2		
		Réponse correcte	Réponse fausse	Total
	Utilise la notation de la norme	3	0	3
		25%	0%	4%
	Utilise une lettre avec flèche	8	30	38
		67%	55%	57%
	Utilise une lettre sans flèche	0	11	11
		0%	20%	16%
	Autres	1	14	15
		8%	25%	22%
Total		12	55	67
		100%	100%	100%

Tableau croisé Notation utilisée * Réponse cas2

Parmi les réponses correctes, la majorité (67%) des élèves utilise une lettre avec flèche. Remarquons que tous ces élèves construisent correctement la résultante demandée mais la réduisent à sa seule caractéristique longueur dans leur raisonnement.

Notons aussi que parmi les réponses fausses, cette catégorie reste la plus observée (54%) comme nous l'avons vu dans le cas1 et la plupart des raisonnements tenus (53% de ceux qui utilisent une lettre avec une flèche dessus) dans ce cas-là ne retient de la somme des vecteurs que sa norme (intensité de la force). Pour eux, la norme de la somme des vecteurs est la somme des normes des vecteurs considérés, c'est le cas par exemple de cet élève *p002* qui écrit :

$\overrightarrow{F1} = 1{,}9 * 5N = 9{,}5N, \overrightarrow{F2} = 1 * 5N = 5N, \overrightarrow{F3} = 1 * 5N = 5N$ *et* $\overrightarrow{F2} + \overrightarrow{F3} = 10N$ *donc c'est l'équipe F2 et F3 qui l'emporte.*

Analyse a posteriori du cas3

Remarquons tout d'abord le très faible taux de réponses correctes pour ce cas de figure (6%) confirmant ainsi notre analyse a priori.

% dans total

		Réponse cas3		
		Réponse correcte	Réponse fausse	Total
	Utilise la notation de la norme	2	1	3
		3%	1%	4%
	Utilise une lettre avec flèche	2	36	38
		3%	54%	57%
	Utilise une lettre sans flèche	0	11	11
		0%	16%	16%
	Autres	0	15	15
		0%	22%	22%
Total		4	63	67
		6%	94%	100%

Tableau croisé Notation utilisée * Réponse cas3

C'est dans ce seul cas ou on retrouve un élève qui a utilisé la notation de la norme et a échoué à la question. En fait comme les vecteurs $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ et $\overrightarrow{F1}$ ne sont pas colinéaires, il est impossible de décider de la réponse sur la base de la seule caractéristique norme comme c'est le cas dans les autres situations, ce qui explique d'ailleurs le très fort pourcentage de réponses fausses (94%). Concernant ces réponses fausses, on voit comme dans les cas précédents que la notation utilisant une lettre avec flèche au dessus est largement mise en œuvre par les élèves (57%). Aucune réponse correcte ne concerne les autres modalités qui ont tous adopté la stratégie réduisant le vecteur à sa seule caractéristique norme.

En définitive, bien souvent en classe de physique, les élèves réduisent le vecteur à sa seule caractéristique valeur ou norme bien que l'énoncé proposé ici ne donne explicitement aucune valeur numérique. Pour ces élèves les caractéristiques d'orientation (direction et sens) ne semblent avoir que peu d'importance.

Analyse a posteriori de la Situation 2

Pour cette situation, nous avons retenu deux catégories :

- La réponse à la question :
    1. Réponse correcte
    2. Réponse fausse
- Les procédures de construction mises en œuvre qui comprennent 5 modalités :
    1. Règle du parallélogramme – méthode trigonométrique,
    2. Règle du parallélogramme – méthode graphique,
    3. Règle du parallélogramme – méthode analytique,
    4. Méthode analytique seule,
    5. Autres.

Notons d'abord qu'il y a un faible pourcentage de réponses correctes (18%). On peut remarquer comme l'indique le tableau croisé ci-dessous que trois modalités des quatre concernant la règle du parallélogramme ne sont pas du tout observées et même celle qui est observée reste peu populaire (1 réponse correcte et 2 réponses fausses) .

D'autre part, parmi le peu d'élèves qui ont répondu correctement à la question, la grande majorité (75%) a résolu le problème par la méthode des projections, se fondant uniquement sur des calculs, sans construction rigoureuse des forces en présence. Cette méthode reste aussi la plus utilisée (53%) parmi les nombreuses réponses fausses. Suit la modalité « autres », avec 44% parmi les réponses fausses et 17% (2 élèves) parmi les réponses correctes. Les élèves classés dans « autres » raisonnent généralement de manière intuitive sur la base du dessin obtenu par les données numériques des angles ou donnent le résultat sans indiquer la méthode suivie.

% dans Réponse exo2

		Réponse exo2		Total
		Réponse correcte	Réponse fausse	
	Règle du parallélogramme-Méthode graphique	1	2	3
		8%	4%	4%
	Méthode des projections seule	9	29	38
		75%	53%	57%
	Autres	2	24	26
		17%	44%	39%
Total		12	55	67
		100%	100%	100%

Tableau croisé Procédures de résolution exo2 * Réponse exo2

Ce qui est remarquable dans les raisonnements des élèves en classe de physique est que tous partent de l'hypothèse de la transmission de la tension dans le fil. Ce qui les conduit à admettre l'égalités des forces de tension en intensité et que ces dernières ont chacune la direction du morceau de fil la concernant. C'est un effet fort du contrat en classe de physique. Nous verrons si cela se confirme en classe de mathématiques.

Analyse a posteriori de la Situation 3

La question relative à cette situation est associée à deux variables :

– Les procédures de résolution avec 3 modalités :

1. Modèle vectoriel : concerne les élèves qui ont cherché une modélisation vectorielle du problème.
2. Modèle numérique : touche les élèves qui ne s'appuient que sur les données numériques pour résoudre le problème.

3. Autres : on s'intéresse aux élèves qui donnent directement le résultat sans indiquer la méthode suivie ou ont une intuition de la question sans parvenir à le modéliser.

Aucun élève n'a réussi à répondre correctement à la question et c'est la seule situation où l'on trouve un fort taux (18%) de non réponses, ce qui peut s'expliquer par les difficultés que les élèves ont eues face à ce problème inhabituel.

% dans Réponse exo3

		Réponse exo3		
		Réponse fausse	Ne répond pas	Total
	Modèle vectoriel	1 2%	0 0%	1 1%
	Modèle numérique	33 60%	0 0%	33 49%
	Autres	21 38%	0 0%	21 31%
	Ne répond pas	0 0%	12 100%	12 18%
Total		55 100%	12 100%	67 100%

Tableau croisé Procédures de résolution exo3 * Réponse exo3

Concernant ces réponses fausses, on remarque une tendance générale chez les élèves en classe de physique à ne s'appuyer que sur un modèle numérique (60%) ou à une approche intuitive du problème mais sans parvenir à une modélisation correcte (modalité « autres » 38%). Un seul élève a tenté une modélisation vectorielle mais sans parvenir au résultat. Ainsi, le fait de ne prendre en compte que la valeur numérique (norme ou longueur) de la vitesse, est en très grande partie responsable des réponses fausses.

En conclusion pour ce questionnaire passé en classe de physique, nos analyses montrent une tendance générale des élèves à privilégier dans leurs stratégies de résolution la seule caractéristique numérique (longueur) du vecteur mise en scène par la méthode graphique qui reste très populaire dans toutes les situations proposées. Ce faisant, beaucoup d'élèves n'hésitent pas à étendre la relation d'ordre aux vecteurs. D'ailleurs, le cas3 de la situation1 a fournie plus de réponses fausses, le vecteur $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ est choisi parce que qu'il a la plus grande longueur que $\overrightarrow{F1}$, or ces deux vecteurs n'ont pas la même direction. Notons aussi que la construction géométrique de la somme de deux vecteurs par la règle du parallélogramme qui donne une bonne partie des réponses correctes dans les deux premières situations ou elle est visiblement pertinente, s'est avérée la plus utilisée par les élèves. On voit là la marque des effets du contrat disciplinaire (Colomb, 1993).

Questionnaire en classe de mathématiques

	Réponse à la question cas1		Réponse à la question cas2		Réponse à la question cas3		Réponse à la question exo2		Réponse à la question exo3	
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%
Réponse correcte	30	56%	19	35%	7	13%	24	47%	15	31%
Réponse fausse	24	44%	35	65%	47	87%	27	53%	34	69%
Total	54	100%	54	100%	54	100%	51	100%	49	100%

Les catégories restent inchangées. Le tableau ci-dessus synthétise les réponses aux différents items du questionnaire en classe de mathématiques.

Analyse a posteriori de la Situation 1

Contrairement à ce qui a été observé pour les élèves en classe de physique, on note ici une nette performance des élèves en classe de mathématiques particulièrement dans le cas1 où plus de la moitié des élèves répondent correctement (56%).

Analyse a posteriori du Cas1

A la lecture du tableau croisé ci-dessous, on voit que plus de la moitié (56%) des élèves en classe de mathématiques construisent la somme des deux vecteurs $\overrightarrow{F2}$ et $\overrightarrow{F3}$ en adoptant soit la règle du parallélogramme ou la règle du triangle. En plus, parmi les réponses correctes on note que l'écrasante majorité (84%) est fournie par la règle du parallélogramme, et la plupart des réponses fausses proviennent de la méthode graphique et autres réponses non classées (87%). D'ailleurs, contrairement à ce qu'on a observé en classe de physique (63%), on note que la méthode graphique est peu populaire en classe de mathématiques (26%). Remarquons qu'il y a un seul élève qui a répondu correctement avec la méthode graphique, ce dernier a mesuré directement les longueurs et les angles des représentants des vecteurs sur le dessin fourni. Cette stratégie qui peut réussir dans les cas1 et 2 ne peut être gagnante dans le cas3 comme on le verra plus loin.

% dans Réponse à la question cas1

	Réponse à la question cas1		
	Réponse correcte	Réponse fausse	Total
Règle du parallélogramme en J1	14 47%	3 13%	17 31%
Règle du parallélogramme en un autre point	11 37%	0 0%	11 20%
Règle du triangle en un autre point	2 7%	0 0%	2 4%
Méthode graphique	1 3%	13 54%	14 26%
Autres	2 7%	8 33%	10 19%
Total	30 100%	24 100%	54 100%

Tableau croisé Procédures de résolution exo1 * Réponse à la question cas1

Remarquons aussi que tous les élèves qui ont utilisé la règle du parallélogramme ou celle du triangle en un autre point que J1 répondent correctement à la question tandis que parmi ceux qui ont adopté la règle du parallélogramme en J_1, trois ne réussissent pas la question. Un de ces derniers arrive à bien construire $\overrightarrow{F2}+\overrightarrow{F3}$ en J1, mais raisonne ensuite en réduisant les vecteurs pris individuellement à leur seule caractéristique de norme et fait des comparaisons hors propos. Comme illustration voilà ce qu'il dit : *dans le 1^er^ cas le joueur J_2 l'emporte du joueur J_3 car* $\overrightarrow{F2} > \overrightarrow{F3}$, $\overrightarrow{F2}$ *fournit plus de force que* $\overrightarrow{F3}$.

Concernant la notation utilisée, le tableau croisé ci-dessous montre une nette différence avec les résultats observés en classe de physique. 50% des élèves ayant répondu correctement à la question ont utilisé la notation de la norme contre 18% en classe de physique. Rappelons aussi que seuls 4,5% des élèves ont utilisé cette notation en classe de physique, alors qu'ils sont 33% en classe de mathématiques. On note aussi qu'il y a moins d'élèves en classe de mathématiques (48%) qui utilisent une lettre avec flèche qu'en classe de physique (57%). Cependant les raisonnements adoptés avec cette notation sont les mêmes ; dans ce cadre, les élèves ne se privent pas d'ordonner les vecteurs faisant abstraction de toute considération d'orientation.

% dans Réponse à la question cas1

		Réponse à la question cas1		Total
		Réponse correcte	Réponse fausse	
	Utilise la norme	15 50%	3 13%	18 33%
	Utilise une lettre avec fllèche	11 37%	15 63%	26 48%
	Utilise une lettre sans flèche	2 7%	5 21%	7 13%
	Autres	2 7%	1 4%	3 6%
Total		30 100%	24 100%	54 100%

Tableau croisé Notation utilisée * Réponse à la question cas1

Analyse a posteriori du Cas2

On voit comme au cas1 que parmi les réponses correctes la règle du parallélogramme est celle qui conduit le plus à la bonne réponse (84% des réponses correctes). Nous avons déjà observé que ces deux cas sont similaires du point de vue des raisonnements à tenir. Notons que toutes les réponses fausses données par les élèves qui utilisent la règle du parallélogramme ou celle du triangle, sont dues au manque de précision de leur dessin.

% dans Réponse à la question cas2

	Réponse à la question cas2		Total
	Réponse correcte	Réponse fausse	
Règle du parallélogramme en J1	8 42%	9 26%	17 31%
Règle du parallélogramme en un autre point	8 42%	3 9%	11 20%
Règle du triangle en un autre point	0 0%	2 6%	2 4%
Méthode graphique	1 5%	13 37%	14 26%
Autres	2 11%	8 23%	10 19%
Total	19 100%	35 100%	54 100%

Tableau croisé Procédures de résolution exo1 * Réponse à la question cas2

Pour les notations utilisées dans les raisonnements, nous avons les mêmes tendances que dans le cas1 avec une hausse de l'utilisation de la norme pour les réponses correctes dans le cas2 (58%).

% dans Réponse à la question cas2

	Réponse à la question cas2		Total
	Réponse correcte	Réponse fausse	
Utilise la norme	11 58%	7 20%	18 33%
Utilise une lettre avec fllèche	6 32%	20 57%	26 48%
Utilise une lettre sans flèche	2 11%	5 14%	7 13%
Autres	0 0%	3 9%	3 6%
Total	19 100%	35 100%	54 100%

Tableau croisé Notation utilisée * Réponse à la question cas2

Analyse a posteriori du Cas3

C'est le cas le moins bien réussi (13% de réponses correctes), mais deux fois mieux qu'en classe de physique (6%). C'est sans surprise que toutes les réponses correctes proviennent de la règle du parallélogramme ou celle du triangle.

% dans Réponse à la question cas3

	Réponse à la question cas3		Total
	Réponse correcte	Réponse fausse	
Règle du parallélogramme en J1	5 71%	12 26%	17 31%
Règle du parallélogramme en un autre point	1 14%	10 21%	11 20%
Règle du triangle en un autre point	1 14%	1 2%	2 4%
Méthode graphique	0 0%	14 30%	14 26%
Autres	0 0%	10 21%	10 19%
Total	7 100%	47 100%	54 100%

Tableau croisé Procédures de résolution exo1 * Réponse à la question cas3

Pour les réponses fausses, c'est la stratégie norme qui a fonctionné car comme nous l'avons dit en classe de physique le fait de se limiter au seul critère de comparaison des longueurs ne permet pas de répondre correctement à la question en raison de la non colinéarité des vecteurs $\overrightarrow{F}2+\overrightarrow{F}3$ et $\overrightarrow{F}1$.

Analyse a posteriori de la Situation 2

Remarquons d'abord que contrairement à ce qui a été observé en classe de physique, la transmission de la tension sur le fil a posé quelques problèmes chez les élèves en classe de mathématiques : 67 % de ces derniers ne partent pas de l'hypothèse que les deux tensions sont égales et 55% parmi eux établissent l'égalité des deux tensions après de pénibles calculs trigonométriques. Cela est un indice fort du contrat en classe de mathématiques, où ce qui semble être acquis en classe de physique peut être remis en cause, voir mal utilisé.

% dans Réponse à la question exo2

	Réponse à la question exo2		Total
	Réponse correcte	Réponse fausse	
Règle du parallélogramme-Méthode trigonométrique	3 13%	5 19%	8 16%
Règle parallélogramme-Méthode projection	14 58%	13 48%	27 53%
Méthode projection seule	7 29%	9 33%	16 31%
Total	24 100%	27 100%	51 100%

Tableau croisé Procédures de résolution exo2 * Réponse à la question exo2

Le tableau ci-dessus montre ici aussi que la grande majorité des élèves en classe de mathématiques construisent d'abord la somme des vecteurs en jeu dans le problème avant de procéder aux calculs. En effet, parmi les réponses correctes 71% utilisent la règle du parallélogramme contre 29% pour la méthode analytique seule. Ce qui est totalement opposé à ce que nous avons observé en classe de physique où 75% des réponses correctes proviennent de la méthode analytique seule et seul un élève a construit la somme des vecteurs en jeu dans le problème en utilisant la règle du parallélogramme combinée à la méthode graphique. Ce résultat traduit fort les effets des contrats disciplinaires dans les procédures de résolution des élèves et confirme notre analyse a priori.

Analyse a posteriori de la Situation 3

Contrairement à ce qu'on a observé chez les élèves en classe de physique où aucune réponse correcte n'a été enregistrée dans cette situation, 31% des élèves en classe de mathématiques ont répondu correctement à cette question.

Parmi ceux qui ont utilisé un modèle vectoriel pour résoudre le problème, trois ont répondu correctement et 41% (11 sur 27) de ceux qui n'ont utilisé que les données numériques ont réussi à trouver la direction du bateau sans modéliser explicitement la situation en termes vectoriels. Un seul des élèves classés dans la modalité « autres », c'est-à-dire qui ont donné un résultat sans expliciter leur méthode de résolution, a répondu correctement à la question.

% dans total

		Réponse à la question exo3		
		Réponse correcte	Réponse fausse	Total
	Modèle vectoriel	3 6%	1 2%	4 8%
	Modèle numérique	11 22%	16 33%	27 55%
	Autres	1 2%	17 35%	18 37%
Total		15 31%	34 69%	49 100%

Tableau croisé Procédures de résolution exo3 * Réponse à la question exo3

Conclusion

Plusieurs points sont intéressants à relever dans nos analyses :

- Dans des tâches un peu hors contrat ou difficiles, les élèves ont encore tendance à rabattre les propriétés des vecteurs à leurs seules caractéristiques de normes. Ceci est nettement plus fort en physique qu'en mathématiques : ainsi, pour la situation1, en classe de mathématiques, les élèves réussissent en majorité à construire correctement la somme de deux vecteurs. En revanche, en classe de physique, ils restent pour la plupart prisonniers de la méthode graphique avec une tendance dans les raisonnements à réduire le vecteur à sa seule caractéristique de norme. Ainsi les élèves, même s'ils utilisent majoritairement la notation avec une flèche, écrivent assez souvent des inégalités entre vecteurs, qui ne signifient de fait que des comparaisons de normes ou d'intensité de forces.

- Il est clair qu'il existe des différences significatives de rapport aux mêmes tâches pour des élèves semblables selon qu'ils sont en classe de mathématiques ou en classe de physique. Un des exemples les plus frappants est la prédominance en classe de physique des techniques de projections sur des axes contre les constructions géométriques qui sont favorisées en cours de mathématiques. On a vu aussi qu'en classe de mathématiques les connaissances sur les tensions de fils posent nettement plus de problème qu'en classe de physique.

- Les trois situations proposées dans ce questionnaire étaient fortement inspirées d'exercices de manuels de mathématiques de seconde visant à illustrer l'utilisation du vecteur en physique. Or, on peut dire globalement, que ces exercices ont été plus problématiques en classe de physique qu'en classe de mathématiques (le cas le plus frappant est la situation3 de la barque sur la rivière). Ceci confirme nos analyses de manuels et met à jour un effet très fort du cloisonnement disciplinaire. En effet, ces exercices qui d'une façon louable veulent essayer de faire le lien, négligent des spécificités fortes de la physique enseignée au même niveau. Le rapport qu'ils proposent à la modélisation est hors contrat dans le cours de physique, même si en apparence les objets de physique invoqués sont ceux du cours de physique. Ainsi dans le cours de mathématiques, certains élèves s'en sortent en devinant en quelque sorte le jeu mathématique que l'on veut leur faire jouer. En classe de physique, c'est plus complexe car la situation prend un autre jour, sa signification « réelle » est plus forte et la transparence de modélisation avec les objets mathématiques est brouillée, ce qui peut expliquer les plus grands taux d'échec.

IV.2.4 Conclusion sur le rapport personnel des élèves

Nous avons conduit cette recherche sur le rapport personnel des élèves avec les objets de savoirs en jeu dans ce travail pour voir comment ils se positionnent par rapport aux contraintes institutionnelles que nous avons dégagées dans nos analyses précédentes. Dans nos analyses, nous avons testé des situations qui nécessitent de l'élève une mobilisation conjointe des connaissances mathématiques et physiques, sur la dualité des concepts de force et de vecteur. Les résultats montrent que les élèves ont de nombreuses difficultés dans l'accomplissement de ces tâches.

Plus précisément, nous avons constaté que les élèves en fin de seconde et en début de première S rencontraient encore des difficultés dans l'utilisation du vecteur dans des situations physiques, alors que ces concepts semblent acquis en classe de mathématiques. Ces difficultés sont pour l'essentiel dues à la tendance à ne considérer du vecteur que sa caractéristique norme ou longueur. Il apparaît ainsi des différences significatives de rapport aux mêmes tâches pour des élèves semblables selon qu'ils sont en classe de mathématiques ou en classe de physique. Un des exemples les plus frappants est la prédominance en classe de physique des techniques de projections sur des axes contre les constructions géométriques qui sont favorisées en cours de mathématiques.

En définitive, les analyses des deux questionnaires révèlent un réinvestissement inadéquat des connaissances acquises en calcul vectoriel dans des situations physiques. Les élèves sont non seulement victimes du cloisonnement disciplinaire, mais en quelque sorte participent (involontairement) à son maintien. Dans ce contexte, les élèves ne peuvent construire une vision appropriée des liens entre les deux disciplines, ils restent tributaires du caractère local du contrat didactique qui se décline de façon séparée selon qu'ils sont en cours de mathématiques ou de physique.

Au-delà de changements curriculaires, il nous semble que la situation ne peut évoluer favorablement que s'il y a collaboration entre les professeurs des deux disciplines, dans la préparation et la mise en scène de situations conjointes. Ceci plaide fortement en faveur d'une approche co-disciplinaire de l'étude des vecteurs, des grandeurs physiques vectorielles et des mouvements de translation.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

Dans ce travail, nous avons mené une réflexion didactique sur l'utilisation du vecteur en physique et sur les liens entre mouvement de translation et translation mathématique en classe de seconde S (au Sénégal) et première S (en France). Notre objectif était de savoir dans quelle mesure le cloisonnement des deux disciplines jouait sur les choix curriculaires, le travail des enseignants de deux disciplines et in fine les apprentissages des élèves.

Pour atteindre cet objectif nous avons tout d'abord fait une synthèse des conditions d'émergence historique et épistémologique du concept de vecteur et des contraintes qui ont pesé sur les différentes transpositions didactiques de cet objet de savoir dans les deux disciplines. Cet aperçu historico-épistémologique nous a permis de souligner les rôles respectifs des problématiques des deux disciplines dans le lent processus d'émergence de ce concept. Nous avons prolongé cette étude par une étude détaillée de l'évolution sur plus d'un siècle de l'enseignement du vecteur et des grandeurs physiques vectorielles, en dégageant les différents habitats et niches de ces objets dans l'évolution des programmes. Sans reprendre ici l'ensemble des conclusions de cette partie de notre travail (voir partie II), nous retiendrons que le vecteur d'abord clairement enseigné dans des habitats à la frontière (alors plus perméable) entre mathématiques et physique s'est rapidement mathématisé pour devenir, par une création didactique, un objet à la frontière entre la géométrie (où ses origines physiques se sont diluées) et l'arithmétique (comme outil de modélisation unidimensionnel des grandeurs munies d'un signe). Cette dualité du vecteur a ensuite trouvé une légitimité dans le théorème de Thalès, ce qui a conduit à privilégier une conception géométrique du vecteur, où la multiplication par un scalaire pouvait prendre sens. Durant la réforme des mathématiques modernes, le vecteur est devenu l'instrument de l'algébrisation de la géométrie et le prototype pour introduire l'algèbre linéaire (et à plus long terme l'analyse fonctionnelle). La contre réforme, en revenant à une géométrie plus traditionnelle, n'a pas su trouver une place clairement définie au vecteur, qui reste attaché, même si les programmes s'en défendent, implicitement à l'algèbre linéaire et ne peut assumer un rôle suffisant d'outil pertinent pour résoudre des problèmes géométriques. Les liens avec la physique sont eux potentiels, mais finalement peu concrétisables, au niveau d'enseignement où le vecteur est introduit en mathématiques.

Historiquement, l'usage du vecteur pour modéliser les grandeurs physiques est relativement récent et a été sujet à nombreux débats. Il est aussi important de noter que ce n'est pas dans les domaines les plus élémentaires (forces, vitesse) que le vecteur s'est d'abord imposé, mais essentiellement en électromagnétisme, pour les formules de Maxwell. Au niveau de l'enseignement, le vecteur est longtemps resté (de 1902 à 1942) dans le domaine de la cinématique (qui relevait alors des mathématiques que l'on appelle parfois mixtes). Son usage (dans l'enseignement) pour modéliser les forces est plus récent et rentre toujours en concurrence avec les aspects plus expérimentaux. Le vecteur semble nettement perçu comme un objet du domaine des mathématiques. Par l'intermédiaire des projections et des coordonnées sur les axes, il permet les calculs sur les seules grandeurs scalaires. Il a par ailleurs une vertu représentative dans le registre graphique, permettant éventuellement le tracé d'une somme. De fait, le vecteur apparaît bien comme un objet exogène à la physique qui permet de représenter ou de calculer des forces, ou des vitesses, mais dont les règles de fonctionnement obéissent à des enjeux avant tout mathématiques. Les évolutions les plus récentes de l'enseignement de la physique en France, tendent à redonner plus d'importance à l'expérience et donc mettent les mathématiques encore plus à distance.

Ainsi, on voit que le cloisonnement disciplinaire, mais aussi les effets inévitables de la transposition didactique (comme la segmentation des savoirs) ont conduit progressivement à un paysage éclaté où le vecteur reste un objet hybride, qui se cherche une raison d'être. Son lien avec les grandeurs physiques vectorielles ne peut ainsi être réellement mis en jeu, en partie à cause du décalage chronologique entre son enseignement en mathématiques en fin de collège – début de lycée et en physique en début ou milieu de lycée.

Nous avons, ensuite, mené une analyse institutionnelle axée sur les programmes et les manuels scolaires actuels en mathématiques et en physique. Celle-ci nous a permis de situer les différents habitats du vecteur et des concepts physiques correspondants en seconde et en première S, ainsi que des liens entre la translation mathématique et le mouvement de translation. Nous avons constaté alors que l'aspect de la cohérence interne des contenus de chaque discipline était prioritaire sur les liens possibles entre les deux disciplines.

Ainsi, le rapport institutionnel au vecteur dans la classe de mathématiques ne laisse que peu d'espace pour des situations issues de la physique. Quand elles existent dans les manuels, celles-ci restent subordonnées à un rapport inadéquat à la modélisation et apparaissent comme un prétexte à faire faire des mathématiques. Le plus souvent, on trouve dans les manuels des habillages plus ou moins cachés de situations pseudo physiques. Tout ce qui relève de la modélisation semble considéré comme transparent et conduit à des simplifications drastiques. L'élève en est réduit à comprendre ce qu'on veut lui faire faire, faute de pouvoir avoir vraiment de prise sur la situation physique en jeu.

En physique, nous avons vu que les objets mathématiques ne sont traités que comme des outils. Les difficultés éventuelles des élèves avec les vecteurs sont ainsi mises sur le compte de déficiences de l'enseignement des mathématiques sans que la possibilité d'un questionnement propre à la nature des liens avec les objets physiques puisse être perçu comme un levier intéressant. Dans l'enseignement des mouvements de translation, le rapport à la translation est complètement transparent et donc considéré comme non problématique. De fait, la confusion entre mouvement de translation et mouvement rectiligne ne peut être perçue comme liée à la conception dynamique des transformations géométriques, jamais interrogée ni en mathématiques, ni en physique. Les travaux de Gasser (1997) sont pourtant explicites sur le fait que cette confusion touche les enseignants eux-mêmes.

En définitive, on voit donc que les liens entre mathématiques et physique à propos des vecteurs ou du mouvement de translation ont beaucoup de difficultés à vivre, que ce soit en mathématiques ou en physique.

Nos analyses montrent que pour améliorer cet état de fait, il serait nécessaire que chaque discipline puisse assumer au moins une part du questionnement de l'autre et que tant qu'on reste dans un cloisonnement où le découpage séquentiel interdit tout re-questionnement sur des supposés (mal) acquis antérieurs de l'autre discipline, la situation ne peut évoluer. Sur un plan purement technique, on voit donc où il serait important d'agir en termes de curriculum. Mais on comprend aussi que les injonctions, voire même des propositions concrètes sur les contenus ne pourront rien si les enseignants des deux disciplines ne peuvent ou ne veulent pas rentrer dans un vrai travail collaboratif. Une évolution dans la perception du découpage disciplinaire par les élèves est sûrement aussi nécessaire.

Afin de mieux cerner les rapports personnels des enseignants des deux disciplines aux objets en jeu dans notre travail et aux liens entre les deux disciplines, nous avons ensuite mené une enquête à l'aide de deux questionnaires destinés aux enseignants de sciences physiques d'une part et de mathématiques de l'autre. Nos analyses montrent que, globalement, le dialogue entre les enseignants des deux disciplines reste très limité et en quelque sorte stérile, dans la mesure où, même si le manque de liens entre les deux disciplines est déploré, seul un manque de travail des élèves ou de coordination purement temporel est mis en cause. Si la plupart des enseignants de chaque discipline disent « collaborer » avec les enseignants de l'autre, il apparaît toutefois que cette collaboration reste très superficielle. Il s'agit avant tout de s'assurer que les mathématiques utiles pour le cours de physique ont été ou seront enseignées à temps et éventuellement de parler des élèves, mais quasiment jamais d'échanger sur les contenus. Par exemple, pour ce qui est du lien entre mouvement de translation et translation mathématique, on voit que conformément aux résultats de Gasser, la grande majorité des enseignants des deux disciplines sont incapables d'expliciter ce lien, voire doutent parfois qu'il existe, ou encore, sur la seule foi de la proximité de vocabulaire, pensent que c'est (plus ou moins) la même chose. Il semble bien que le manque de connaissances des objets de l'autre discipline donne à chacun l'illusion que les deux concepts sont quasiment identiques. Ces analyses renforcent donc le constat de repliement sur sa discipline et une absence de collaboration réelle entre les professeurs de physique et leurs collègues de mathématiques. Mais au-delà de ce constat, on voit bien que c'est un manque de communication entre professions plus qu'entre individus qui est en jeu. Si du point de vue épistémologique, les liens entre les vecteurs et les grandeurs physiques vectoriels, ou translation et mouvement de translation existent, l'histoire du système éducatif avec ses contraintes propres a en quelque sorte tout fait pour les rendre opaques. Les enseignants des deux disciplines sont placés dans une logique qui empêche la collaboration là où elle devrait se faire et conduit à une méconnaissance des vrais enjeux. Les élèves eux s'habituent à un discours en porte à faux. Comment leur demander dans ces conditions de réinvestir à propos leurs connaissances de mathématiques en cours de physique ?

Dans ce sens, la dernière partie de notre travail portant sur le rapport personnel des élèves révèle un réinvestissement insuffisant des connaissances acquises en calcul vectoriel sur des situations physiques. En effet, nous avons testé des situations qui nécessitent de l'élève une mobilisation conjointe des connaissances mathématiques et physiques, sur la dualité des concepts de force et de vecteur. Les résultats montrent que les élèves ont de nombreuses difficultés dans l'accomplissement de ces tâches et montrent un réinvestissement inadéquat des connaissances acquises en calcul vectoriel dans des situations physiques. Les élèves sont non seulement victimes du cloisonnement disciplinaire, mais en quelque sorte participent (involontairement) à son maintien. Dans ce contexte, les élèves ne peuvent construire une vision appropriée des liens entre les deux disciplines, ils restent tributaires du caractère local du contrat didactique qui se décline de façon séparée selon qu'ils sont en cours de mathématiques ou de physique.

Au-delà de changements curriculaires, il nous semble que la situation ne peut évoluer favorablement que s'il y a collaboration entre les professeurs des deux disciplines, dans la préparation et la mise en scène de situations conjointes. Ceci plaide fortement en faveur d'une approche co-disciplinaire de l'étude des vecteurs, des grandeurs physiques vectorielles et des mouvements de translation.

On ne peut se contenter à ce niveau de vagues allusions dans les programmes. Une meilleure collaboration des enseignants des deux disciplines, ainsi qu'une formation spécifique sont indispensables.

Au-delà, un prolongement de notre travail consisterait à mettre au point une ingénierie didactique de séquences communes entre les deux disciplines.

C'est dans cette perspective que nous avons organisé une expérimentation en classe de seconde S au Sénégal sur le mouvement de translation, basée sur les analyses que nous avons développées dans cette thèse. La séquence d'enseignement en question a eu lieu en classe de physique avec une participation active du professeur de mathématiques de la même classe. Les deux enseignants intervenaient de façon coordonnée et avaient préparé ensemble la séance sous notre supervision.

Dans le déroulement de la classe l'enseignant de mathématiques était régulièrement invité par le professeur de physique à « prendre la main » pour élaborer une partie du cours. Nous avions insisté auprès des deux professeurs pour que chacun affiche sa spécificité.

Malheureusement, nous n'avons pu, faute de temps, rendre compte, de façon plus détaillée dans ce travail, de cette première expérimentation, qui n'a pu être réalisée que dans des conditions extrêmes (à cause de grèves des enseignants au Sénégal à cette époque). Dans ces conditions, il est difficile d'évaluer l'impact réel qu'elle a pu avoir sur les élèves. Il apparaît néanmoins que la collaboration est possible et que les différents points que nous avons dégagés plus haut (différentes caractérisations du mouvement de translation et démonstration de leur équivalence) semblent pouvoir être compris par les élèves.

Le dispositif reste cependant assez lourd et il nous faudra dans la suite de nos travaux, penser comment il pourrait être transféré à d'autres binômes d'enseignants qui ne seraient pas forcément dans notre entourage. De plus, ce que nous proposons va à l'encontre des pratiques installées, même si ce n'est qu'une réponse très locale à un problème plus général. Ce travail ne peut donc prétendre à donner une réponse générale à un problème bien vaste. Nous espérons toutefois qu'il permettra d'ouvrir une porte et de contribuer modestement à une réflexion plus large sur le sujet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

ASSUDE T. et MARGOLINAS C. (2005), Aperçu sur les rôles des manuels dans la recherche en didactique des mathématiques. IN BRUILLARD E. (dir.) (2005) *Manuels scolaires, regards croisés* (pp. 231-240) CRDP Basse Normandie.

ARTAUD M. (1997), Introduction à l'approche écologique du didactique de l'écologie des organisations mathématiques *et* didactiques, *Actes de la IXe Ecole d'été de didactique des mathématiques*, 99-139.

BA, C. (2003), *Étude didactique de l'utilisation du vecteur en physique et des liens entre mouvement de translation et translation mathématique*, mémoire de DEA, LIRDHIST, Université Claude Bernard, Lyon1.

BA, C. et DORIER, J-L. (2006), Aperçu historique de l'évolution de l'enseignement des vecteurs en France depuis la fin du XIXe siècle, *l'Ouvert n°113*, 17-30

BACHELARD G. (1938), *La formation de l'esprit scientifique*, 13° éd., Paris : Vrin, 1986.

BELHOSTE, B., GISPERT, H. et HULIN, N. (eds.) (1996), *Les Sciences au lycée. Un siècle de réformes des mathématiques et de la physique en France et à l'étranger*, Paris : Vuibert et INRP.

BITTAR M. (1998), *Les vecteurs dans l'enseignement secondaire - Aspects outil et objet dans les manuels - Etude de difficultés d'élèves dans deux environnements : papier-crayon et Cabri-géomètre II*, thèse de l'université Joseph Fourier – Grenoble 1.

BKOUCHE R. (1991), De la géométrie et des transformations, *Repères IREM 4*, 134-155

BOULEAU N. (1999), *Philosophies des Mathématiques et de la modélisation, du chercheur à l'ingénieur*, Ed. L'Harmattan.

BOULIGAND G. (1944), *Les aspects intuitifs de la Mathématique*, Paris : Gallimard.

BROUSSEAU G. (1998), *théorie des situations didactiques*, Grenoble : La Pensée Sauvage Editions.

CASSIRER E. (1977), *Substance et fonction. Eléments pour une théorie du concept*, Paris : Editions Minuit.

CHAUVAT, G. (1988), *A propos de l'enseignement de la translation au collège*, DEA de didactique des mathématiques, Université de Bordeaux 1.

CHEVALLARD Y. (1991), *la transposition didactique*, 2° éd., Grenoble : La Pensée Sauvage Editions.

CHEVALLARD Y. et M. JULLIEN (1991), Autour de l'enseignement de la géométrie au collège, *petit* x n°27, 41-76.

CHEVALLARD Y. (1992), Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 12.1, 73-112.

CHEVALLARD, Y. (1994), Les processus de transposition didactique et leur théorisation, In ARSAC, G. et al. (ed.) *La transposition didactique à l'épreuve* (pp.135- 180). Grenoble : La Pensée sauvage.

CHEVALLARD Y. (1999), L'analyse *des* pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique, *Recherches en Didactique des Mathématiques* 19(2), 221-266.

CHEVALLARD Y. et BOSCH M. (1999), la sensibilité de l'activité mathématique aux ostensifs objet d'étude et problématique, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 19.1, 77-124.

CHEVALLARD Y. (2000), La recherche en didactique et la formation des professeurs : problématiques, concepts, problèmes, *Actes de la X^e Ecole d'été de didactique des mathématiques (Houlgate, 18-25 août 1999).*

CHEVALLARD Y. (2001), Les mathématiques et le monde : dépasser « l'horreur instrumentale », *Quadrature* n°41, 25-40.

Choppin A. (1980), L'histoire des manuels scolaires : une approche globale : histoire de l'éducation n° 9.

CHOQUET G. (1964), *L'enseignement de la géométrie*, Paris : Hermann.

CHOQUET G. (1973), Enseignement des mathématiques, *L'école libératrice n°17*.

COLOMB J. (dir.) (1993), Les enseignements en Troisième et Seconde, ruptures et continuités, *INRP*, 49-76.

CROWE, M.J. (1967), *A history of vector analysis: the evolution of the idea of a vectorial system*, Notre Dame: University Press. Rééd., New-York : Dover, 1985.

DELACHET A. (1967), *La géométrie élémentaire*, Paris : Que sais je 418.

DIEUDONNE J. (1964), *Algèbre linéaire et géométrie élémentaire*, Paris : Hermann.

DORIER J-L. (1990), analyse historique de l'émergence des concepts élémentaires d'Algèbre Linéaire, *cahier Didirem n°7*, Paris : IREM de Paris VII.

DORIER J-L. (1997a), Hermann Grassmann et la théorie de l'extension, *Repères IREM 26*, 89-108.

DORIER J-L. (éd.) (1997b), *l'Algèbre linéaire en question*, collection travaux et thèses en didactique des mathématiques, Grenoble : la Pensée Sauvage Editeur. (331pages).

DORIER, J-L. (1997c), *Recherches en histoire et en didactique des mathématiques sur l'algèbre linéaire - Perspective théorique sur leurs interactions*, Note de synthèse pour obtenir le Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches - Université Joseph Fourier - Grenoble 1. Paru sous la forme d'un cahier du laboratoire Leibniz, Cahier n°12, disponible en ligne à l'adresse suivante : http://www-leibniz.imag.fr/LesCahiers/index.html.

DORIER, J.-L. (2000), Originalité et postérité : l'Ausdehnungslehre de Hermann Günther Grassmann (1844*), Philosophia Scientae* **4(1**), 3-45.

DOUADY, R.(1986), Jeux de cadres et dialectique outil-objet. *Recherches en Didactique des Mathématiques.* **7(2).** 5-31.

DOUADY *R. (1994),* Ingénierie didactique et évolution du rapport au savoir, *Repères IREM n° 15, Topiques Éditions*

DUVAL R. (1993), Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*. 5 37-65.

EINSTEIN A. et INFELD L. (1956), *L'évolution des idées en physique*. Trad. Solovine-Flammarion-Paris.

FESTRAETS A. (1979), Vecteurs. Ministère de l'éducation Nationale et de la Culture Française.

FLAMENT D. (1997), *Le nombre, une hydre à n visages. Entre nombres complexes et vecteurs*. Paris, Éditions de la maison des sciences de l'Homme.

FLAMENT D. (2003), *Histoire des nombres complexes. Entre algèbre et géométrie.* Paris : CNRS Éditions.

GISPERT H. ET HULIN N. (2000), L'enseignement des mathématiques dans ses liens à d'autres disciplines, Une perspective historique. Communication à l'académie des sciences.

GOFFARD, M. et WEIL-BARAIS, A. (dir.) (2005), *Enseigner et apprendre les sciences : Recherches et pratiques,* Paris : Armand Colin.

HADAMARD J. (1898), *Leçons de géométrie élémentaire, T1 : géométrie plane*, Paris : Hermann, réimpression Editions Jacques Gabay, 1988.

HAMILTON, W.R. (1899), *Elements of quaternions*. Volume1. London: Longmans, Green and Co.

KAHANE J-P. (éd.) (2002), *Rapport au ministère de l'Education nationale, l'enseignement des sciences mathématiques, Commission de Réflexion sur l'Enseignement des Mathématiques* sous la direction de Jean-Pierre Kahane, Paris : Odile Jacob.

GASSER J-L. (1996), Mathématiques et Sciences physiques : translations et rotations, *Repères IREM 25*, 19-34.

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

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

LEIBNIZ G.-W., Lettre à Christian Huyghens - Hanover ce 8 Sept. 1679

LEROUGE A. (2000), La notion de cadre de rationalité. A propos de la droite au collège, *Recherches en Didactique des Mathématiques* 20(2), 171-208.

LEVY-LEBLOND, J.-M. (1982), Physique et mathématiques. In R. APÉRY *et al.* (Eds), *Penser les mathématiques* (pp. 195-211). Paris : Seuil.

LICOIS J-R. (2005), *La géométrie élémentaire au fil de son histoire dans les programmes français*, Ellipses.

LOUNIS A. (1989), *L'introduction aux modèles vectoriels en physique et en mathématiques : conceptions et difficultés des élèves, essai et remédiation*, Thèse en Didactique des sciences physiques, Université de Provence Aix-Marseille I.

MACH E. (1904), *La mécanique : Exposé historique et critique de son développement*, Paris : Hermann.

MAINGAIN A. et DUFOUR B. (2002), *Approches didactiques de l'interdisciplinarité*, Ed. De Boeck Université.

MALAFOSSE D. (2002), Pertinence des notions de cadre de rationalité et de registre sémiotique en didactique de la physique, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 22(1), 31-76.

MALGRANGE J.L., SALTIEL E. et VIENNOT L. (1973), Vecteurs, scalaires et grandeurs physiques, *Bulletin SFP. Encart pédagogique*, Janvier-Février 1973, 3-13

MERCIER A., LEMOYNE G., ROUCHIER A. (Edts) (2001), *Le génie didactique*, De Boeck Université.

NAGEL N. (1939), The formation of modern conception of formal logic in the development of geometry. *Osiris*, 7, pp.173-174

NEWTON, I. (1726), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Tome II. Paris : Desaint et Saillant.

POINCARE H. (1913), *Science et méthode*, Paris : flammarion.

PRESSIAT A. (1999), *Aspects épistémologiques et didactiques de la liaison « points-vecteurs »*. Thèse de l'université Paris VII.

PROVOST, P. (1972), Réadaptation réciproque des enseignements de mathématiques et de sciences physiques, BUP n° 545 – 1972, 927-949.

RAVEL L. (2003), *Des programmes à la classe: étude de la transposition didactique interne. Exemple de l'arithmétique en Terminale S spécialité mathématique*, thèse en didactique des mathématiques, Université Joseph Fourrier.

TAIT P. G. (1882), *Traité élémentaire des quaternions*. Paris : Gauthier-Villars

TOUSSAINT J. et al. (1996), *Didactique appliquée de la Physique-Chimie : Eléments de formation pour l'enseignement*. Paris : Nathan.

WESSEL, C. (1797), *Essai sur la représentation analytique de la direction.* traduction française de H. G. Zeuthen, Copenhague et Paris 1897.

http://www.ac-grenoble.fr/irem/CIIdidactique/marc_legrand.pdf

Références de manuels et programmes

CESSAC J. ET TREHERN E G. (1966), *Physique classe de Seconde C,* Paris : Nathan*.*

DURANDEAU, J-P. et al. (1994), *Physique 1ère S*, Paris : Hachette éducation.

LECARDONNEL J-P. et al. (1994), *Physique 1reS*, collection Galileo, Paris : Bordas.

TOMASINO A. et al. (2001), *Physique 1reS*, collection Tomasino, Paris : Nathan.

Parisi J-M et al. (2005), *Physique 1reS*, collection Parisi, Paris : BELIN.

Ministère de l'Education nationale (1982), Sciences physiques, classe de seconde et classes de première A, B, S et E, CNDP, Paris.

Ministère de l'Education nationale (1996), Physique et Chimie, classes de seconde, première et terminale Série scientifique (S), CNDP, Paris.

Ministère de l'Education nationale (2002), Accompagnement des programmes, Physique 1reS, CNDP, Paris.

Programmes de Physique Chimie série scientifique, B.O. HS n°7 du 31 août 2000.
http :/www.education.gouv.fr/bo/2000/hs7/volphys.htm

Programmes de mathématiques de la classe de 5e et de 4e, B.O. HS n°1 du 13 février 1997 et accompagnement.

Programmes de mathématiques de la classe de 3e, B.O. HS n°10 du 15 Oct. 1998 et accompagnement.

Ministère de l'Education nationale (2000), Programmes, mathématiques 2nd, CNDP, Paris.

Programmes de mathématiques de la classe de première S, HS n°7 du 31 août 2000.

Ministère de l'Education, Programmes de mathématiques du moyen secondaire au Sénégal, CNM 2006.

Programme de sciences physiques des classes de seconde S au Sénégal, juin 1999.

Annexes

Annexe 1 : Questionnaires - professeurs

Questionnaire P

Je vous serais très reconnaissant de bien vouloir consacrer un peu de votre temps pour répondre à ce questionnaire, n'hésitez pas à rajouter tout commentaire qui vous semble pertinent et à utiliser des feuilles annexes pour compléter vos réponses.

N.B : Le questionnaire est anonyme.

Nombre d'années d'enseignement : ....
Établissement : ....
Classes tenues :..

Première partie

1. Utilisez vous couramment des manuels pour préparer votre cours de Physique et choisir vos exercices ?

   Oui ☐ Non ☐

Si oui lesquels ? (Dans l'ordre décroissant de plus grande utilisation.)

....
....
....
....

2. Connaissez – vous le programme de Mathématiques des classes de 2^e^ S et 1°S ?

Pas du tout ☐ Peu ☐ Assez bien ☐ Bien ☐ En détail ☐

Expliquez pourquoi.
....
....
....

3. Par rapport à ce programme, quels sont les concepts mathématiques qui selon vous sont le plus en rapport avec votre cours de Physique de 2e S?

   Classez les par ordre de priorité SVP.

……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
....
....

4. Faites-vous référence aux Mathématiques dans votre cours de Physique ?

   Oui ☐ Non ☐

Si oui sous quelle forme ?
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………

Si non pourquoi ?
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………

5. Rencontrez – vous souvent votre collègue de Mathématiques ?
   a. Pour parler de vos élèves : *Oui* ☐ *Non* ☐
   b. Pour parler des programmes de Mathématiques ou de Physique : *Oui* ☐ *Non* ☐
   c. Pour parler des liens entre Mathématiques et Physique en général :*Oui* ☐ *Non* ☐
   d. Pour lui demander d'exposer en cours les bases mathématiques indispensables au déroulement du programme de Physique : *Oui* ☐ *Non* ☐
   e. Autres (préciser SVP)…………………………………………………...

   (Vous pouvez développer par exemple pour préciser le type de discussions que vous avez ou pour dire pourquoi vous ne rencontrez pas souvent votre collègue ou pour faire-part des difficultés que vous avez à communiquer avec lui.)

……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
....
....

Deuxième partie

6. Quelle définition donnez – vous en 2^{e}S d'un mouvement de translation ?

…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………

7. Donnez – vous d'autres caractérisations ?
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………

8. Voyez- vous un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ?

   Oui☐ Non ☐

   Si oui lequel ?

…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………

9. Faites – vous explicitement référence dans votre cours à l'existence ou non d'un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ?

   Oui ☐ Non ☐

10. Vos élèves vous posent – ils des questions dans ce sens ?

   Oui ☐ Non ☐

11. Utilisez –vous des vecteurs à propos des mouvements de translation ?

   Oui ☐ Non ☐

   Si oui expliquez comment.

………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………

12. Pensez – vous que vos élèves en 2^{e}S et 1^{e}S ont des connaissances mathématiques suffisantes et / ou adéquates pour l'usage que vous en faites en Physique ?

Oui ☐ Non ☐

Détaillez votre réponse SVP.

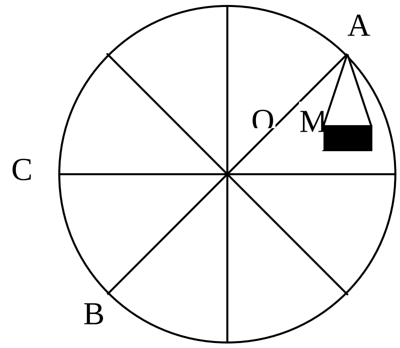
………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………
………………………………………………………………………………

Nous vous proposons ci-dessous deux exercices de niveau 2° S.

Exercice 1

Une grande roue tourne à vitesse constante.

1) Représentez sur le dessin ci-dessous la nacelle lorsque son point de suspension, initialement en A, passe en B puis en C.



…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………

2) Quel est le type de mouvement de la nacelle ? (Justifier votre réponse)

…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………

3) Quelle est la trajectoire précise du point M ? (Justifier votre réponse). Tracez cette trajectoire en pointillés sur le dessin ci-dessus.

…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………

4) Donneriez-vous cet exercice à vos élèves ? Pourquoi ? (éventuellement indiquez les modifications que vous apporteriez à l'énoncé)

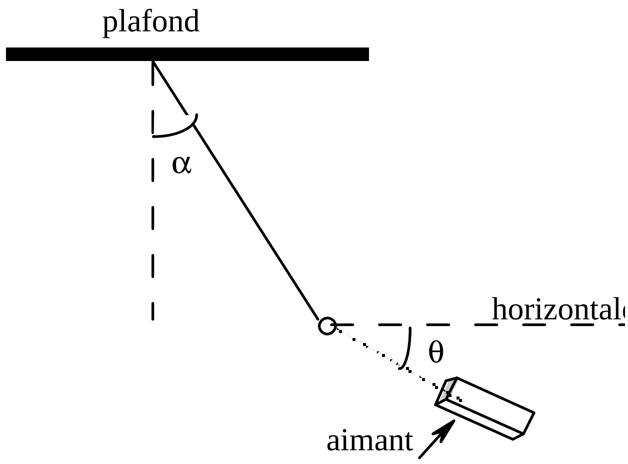
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………………

5) Quelles sont les difficultés que vous attendriez de vos élèves dans la résolution ? Justifiez votre réponse ?

……………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………………

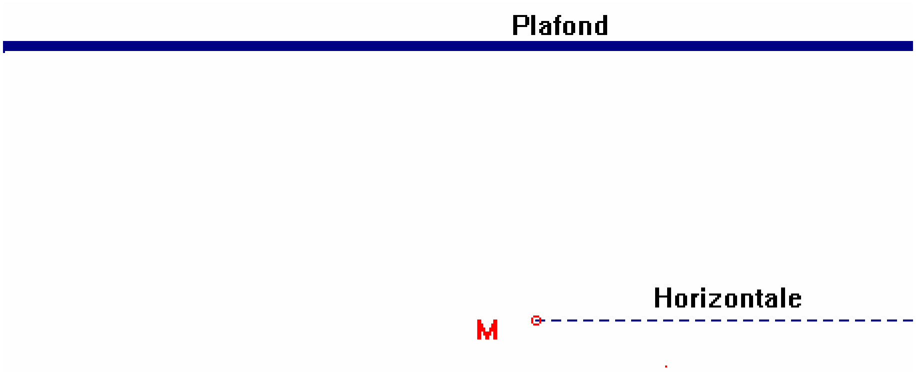
Exercice 2

Un objet en fer (assimilable à un point matériel M) de masse m est suspendu par un fil de masse négligeable à un plafond. Un aimant lui fait subir une force d'attraction dont la droite d'action fait un angle θ sous l'horizontale (cf. dessin ci-dessous) et d'intensité F. L'objet adopte alors une position d'équilibre telle que le fil tendu fait un angle α avec la verticale (cf. dessin ci-dessous). Les seules forces en présence sont le poids de l'objet, la force d'attraction exercée par l'aimant et la tension du fil.



Données : m=200g, θ=30°, F=2N, on prendra g=10N/kg.

1) Représentez le plus précisément possible les forces en présence sur le dessin ci-dessous (échelle 1cm=1N).



2) Quel est le poids de l'objet ?

……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………

3) Quelles sont les caractéristiques de la tension du fil ?

……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………

4) Donneriez-vous cet exercice ? Pourquoi ? (éventuellement indiquez les modifications que vous apporteriez à l'énoncé)

……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………

5) Quelles sont les difficultés que vous attendriez de vos élèves dans la résolution ? Justifiez votre réponse ?

……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………
……………………………………………………………………………

Questionnaire M

Je vous serais très reconnaissant de bien vouloir consacrer un peu de votre temps pour répondre à ce questionnaire, n'hésitez pas à rajouter tout commentaire qui vous semble pertinent et à utiliser des feuilles annexes pour compléter vos réponses.

N.B : Le questionnaire est anonyme.

Nombre d'années d'enseignement : ....
Établissement : ....
Classes tenues :

Première partie

1. Connaissez – vous le programme de Physique des classes dans lesquelles vous enseignez ?

Pas du tout ☐ Peu☐ Assez bien ☐ Bien ☐ En détail ☐

Expliquez pourquoi.

…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………

2. Par rapport à ce programme, quels sont les concepts physiques qui selon vous sont le plus en rapport avec votre cours de Mathématiques ?

   Classez les par ordre de priorité SVP.

…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………

3. Faites-vous souvent référence à la Physique dans votre cours de Mathématiques ?

   Oui ☐ Non ☐

   Si oui sous quelle forme ? Sinon pourquoi ?

…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………

4. Rencontrez – vous souvent votre collègue de Physique ?

a. Pour parler de vos élèves : *Oui* ☐ *Non* ☐
b. Pour parler des programmes de Mathématiques ou de Physique :*Oui* ☐ *Non* ☐
c. Pour parler des liens entre Mathématiques et Physique en général : *Oui* ☐ *Non*☐
d. Autres (préciser SVP)…………………………………………………………...

(Vous pouvez développer par exemple pour préciser le type de discussion que vous avez ou pour dire pourquoi vous ne rencontrez pas souvent votre collègue ou pour faire-part des difficultés que vous avez à communiquer avec lui).

…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………

Deuxième partie

5. Selon les physiciens, un solide est en mouvement de translation si tout segment liant deux points du solide reste parallèle à lui-même au cours du mouvement.

Voyez –vous un lien entre mouvement de translation et translation mathématique ?

Oui ☐ Non ☐

Si oui lequel ?

…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………

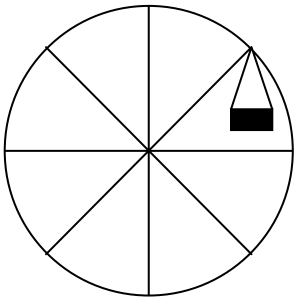
6. Voyez-vous un lien avec d'autres notions mathématiques ?

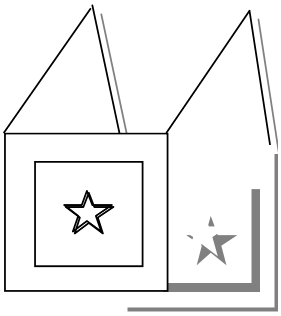
Oui ☐ Non ☐

Si oui lesquelles ?

…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………
…………………………………………………………………………………

7. Les dessins ci-dessous représentent une nacelle d'une grande roue et un tableau fixé au mur par deux tiges rigides inextensibles de même longueur que l'on fait osciller dans le plan vertical du mur. Quelle est la nature du mouvement de chacun de ces deux objets ?





Justifiez votre réponse
....
....
....
....

8. Dans votre cours sur les vecteurs (si vous êtes concernés) faites-vous référence à la Physique ?

Oui ☐ Non ☐

Si oui comment ? Si non pourquoi ?
....
....
....
....

Annexe 2 : Questionnaires - Elèves

Questionnaire1/ élève

Lycée :
Classe :

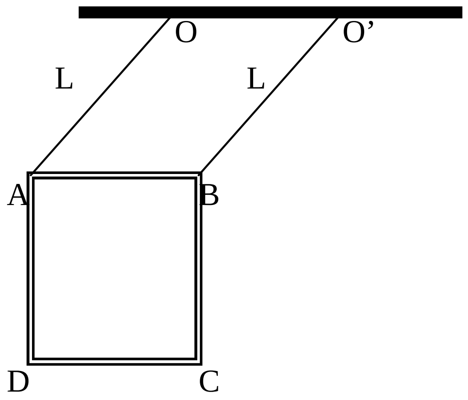
Ce travail fait partie d'une recherche et ne sera pas utilisé pour vous évaluer.
Nous voudrions que vous écriviez tout ce que vous pensez sur les documents fournis sans utiliser de brouillon (n'hésitez pas à utiliser le dos des feuilles).
Le travail doit être fait individuellement. Nous vous sommes très reconnaissants de l'attention que vous porterez pour répondre à ces questions.

N.B : Le questionnaire est anonyme.

Situation 1

Un tableau rectangulaire est suspendu par deux tiges rigides et de même longueur L, comme l'indique la figure (OO' = AB = a). Il peut osciller seulement dans le plan vertical.

Quelles sont les trajectoires des points A et B dans le référentiel terrestre ?



a) Montrer que le vecteur $\overrightarrow{AB}$ reste constant au cours du mouvement.

b) En déduire la nature du mouvement du tableau.

Situation 2

Un objet en fer (assimilable à un point matériel M) de masse m est suspendu par un fil de masse négligeable à un plafond.

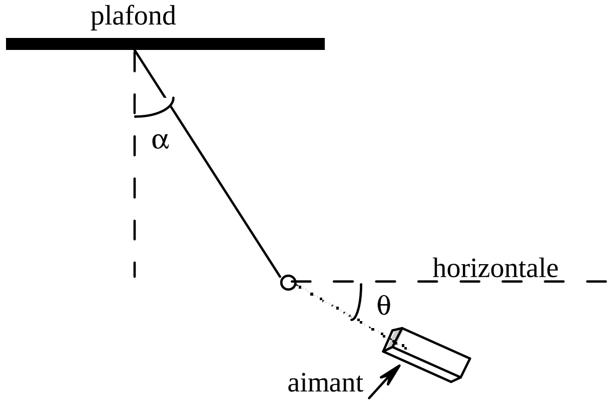
Un aimant lui fait subir une force d'attraction dont la droite d'action fait un angle θ sous l'horizontale (cf. dessin ci-dessous) et d'intensité F.

L'objet adopte alors une position d'équilibre telle que le fil tendu fait un angle α avec la verticale (cf. dessin ci-dessous).

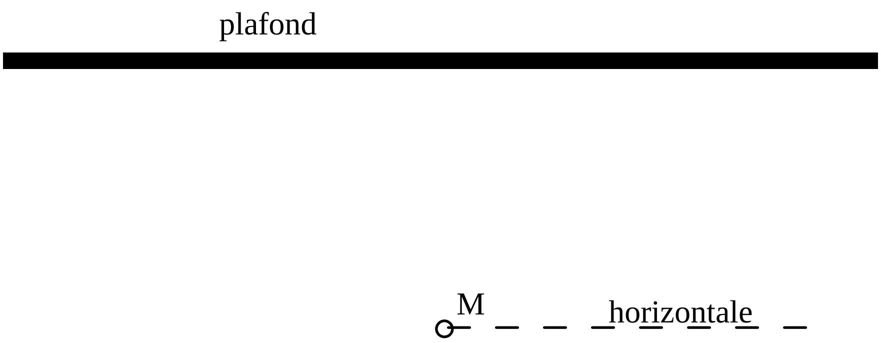
Les seules forces en présence sont le poids de l'objet, la force d'attraction exercée par l'aimant et la tension du fil.

Données : m=200g, θ=30°, F=2N, on prendra g=10N/kg.

1. Écrire les conditions de l'équilibre.



2. Représenter à l'échelle (1cm=1N) les forces en présence sur le schéma ci-dessous.



3. Quelles sont les caractéristiques de la tension du fil ?

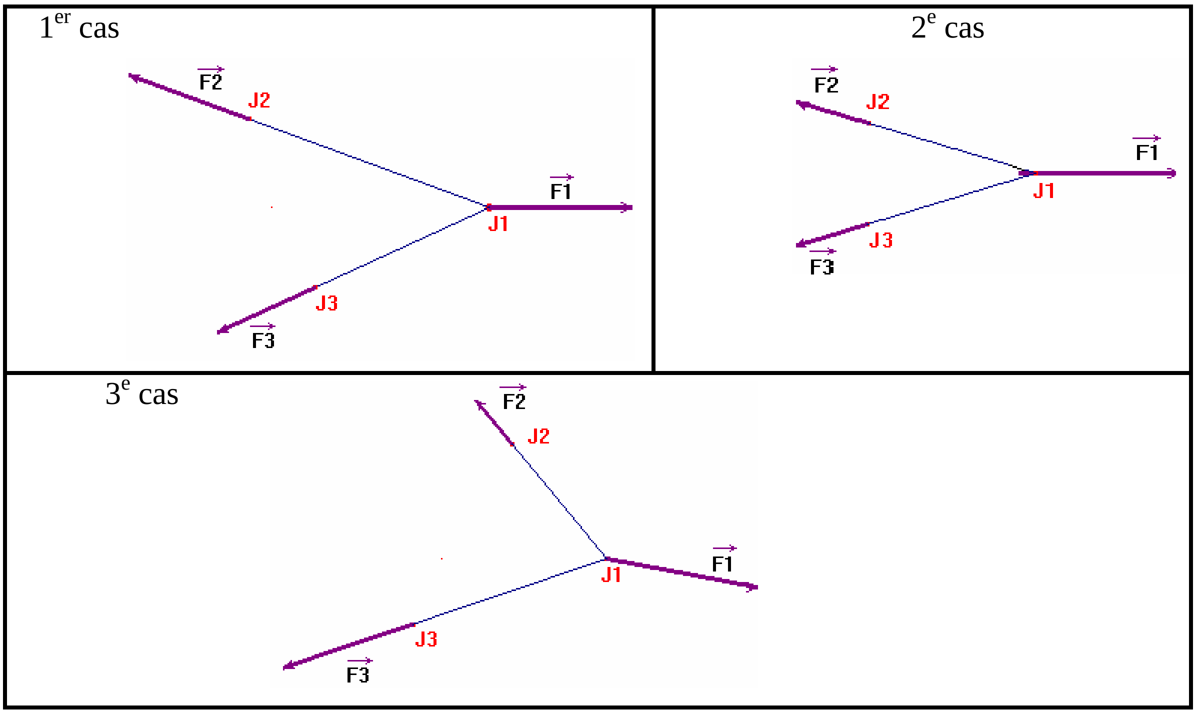
Questionnaire2 / élève

Lycée :
Classe :

Ce travail fait partie d'une recherche et ne sera pas utilisé pour vous évaluer.
Nous voudrions que vous écriviez tout ce que vous pensez sur les documents fournis sans utiliser de brouillon (n'hésitez pas à utiliser le dos des feuilles).
Le travail doit être fait individuellement. Nous vous sommes très reconnaissants de l'attention que vous porterez pour répondre à ces questions.

Situation 1

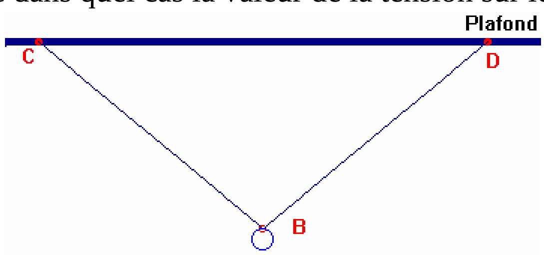
Au cours d'une séance d'entraînement de rugby, l'exercice suivant est proposé : un des joueurs J_1 est retenu à l'aide de deux cordes de masses négligeables par deux autres joueurs J_2 et J_3. $\overrightarrow{F1}$, $\overrightarrow{F2}$ et $\overrightarrow{F3}$ représentent les forces de traction des joueurs. Dans chacun des cas, qui l'emporte du joueur J_1 ou de l'équipe des joueurs J_2, J_3? Justifiez votre réponse.



Situation 2

Luc accroche une boule B de masse m=1kg à un anneau de masse négligeable coulissant sur un fil souple au plafond de sa chambre par deux points d'attache C et D. On considérera que le plafond est horizontal. Il se demande dans quel cas la valeur de la tension sur les points C et D sera la plus forte.
Aidez le à choisir.

1. cas l'angle $D\hat{C}B$=45°
2. cas l'angle $D\hat{C}B$ =30°
3. cas l'angle $D\hat{C}B$ =10°



Situation 3

Un homme peut ramer à une vitesse de 1,6 m/s en eau calme. Si le courant d'une rivière a une vitesse de 0,8 m/s, dire, en vous appuyant sur un dessin, dans quelle direction l'homme doit-il orienter son bateau pour atteindre la rive opposée à un point directement en face de son point de départ ? On assimilera les deux berges de la rivière à deux droites parallèles.

Annexe 3 : Tableaux de recueil des réponses des professeurs

Tableau des réponses au questionnaire destiné aux profs de physique

	An.	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
P001	17	1.Eurin Gié 2.Tomasino 3.Hatier 4.Bordas 5.Natan 6.Cros	Peu	Vecteur	Oui	sous forme de rappels (notion de vecteur, trajectoire, trigonométrie, produit scalaire, produit vectoriel…)	Oui NR Oui Oui	Dans le cas d'un système en mouvement, il y a translation lorsque tous les points du système ont même vecteur-vitesse à chaque instant.	ici en physique ce sont les points matériels (masse et vitesse) qui sont translatés.	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Tous les problèmes que nous rencontrons sont d'ordre vectoriel. Ils ont peur de manipuler les vecteurs. C'est dommage pour eux, parce que la Physique repose sur le vecteur.
P002	15	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.G. Martin 4.Anabac 5.Pressebac	Peu	projections sur les axes (équilibre d'un solide); produit scalaire (travail et puissance d'une force)	Oui	Sous forme analogique: en Maths y=ax et en physique U=RI	NR NR Oui Oui	Un corps est animé d'un mouvement de translation si à chaque instant chacun de ses points a le même vecteur-vitesse que son centre d'inertie.	NR	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Ils ont certes les connaissances en maths mais ne savent pas les appliquer en physique du fait le variables x et y peuvent être I et U, t et v.
P003	16	1.Tomasino 2.Hatier 3.Bordas 4.Eurin Gié	Pas du tout	Vecteur, droites et équations	Oui	sous forme d'outils	Oui Oui Oui Oui	Un vecteur AB reste constant , A et B appartenant au solide.	NR	NR	Non	Non	Oui	Oui	Par moment on a besoin de faire des rappels ou même de reprendre en partie des cours de maths.

P004	NR	1.AESC S Kane 2.Tomasino 3.Eurin Gié	Peu	Trigonométrie, projections de vecteurs sur des axes,équations et inéquations du 1°et du 2° degré. Le produit scalaire, géométrie dans l'espace, translations de vecteur. volume, surfaces, les conversions...	Oui	Sous forme d'outils uniquement et que le physicien utilise pour résoudre un problème de physique.(résolution d'équations, projection de vecteurs sur les axes, calcul de surface avec les intégrales…)	Oui NR NR Oui	Deux points quelconques du solide, A et B sont tels que le vecteur AB est constant au cours du mouvement;	en d'autres termes tous les points du solide ont même vecteur vitesse à tout instant. C'est-à-dire qu'ils ont même trajectoire.	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non seulement, ils ne maîtrisent pas certaines connaissances mathématiques mais ils ne peuvent pas les utiliser pour la résolution de certains exercices en physique. Par exemple, déterminer un coefficient directeur d'une droite pour en déduire une grandeur physique comme la vitesse v ou une force constante F. Ou bien exploiter les équations aux dimensions pour trouver les unités d'une grandeur physique.
P005	18	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.Saliou Kane	Peu	Translation, vecteur, dérivé, primitive.	Oui	Etablissement des lois physiques. Démonstration des théorèmes.	NR Oui NR Oui	1°définition:A un instant t donné tous les points d'un solide en translation ont le même vecteur vitesse. 2°définition: Un solide est en translation si un segment quelconque du solide reste parallèle à lui même au cours du mouvement.	NR	NR	Non	Non	Oui	Non	les élèves ont d'énormes difficultés à utiliser les outils mathématiques en physique. Exemples: exploitation d'une courbe, traduction des données d'un problème en équation.
P006	14	1.Tomasino 2.G. Martin 3.Eurin Gié	Peu	Produit saclaire, relation barycentrique.	Oui	Rarement. Seulement dans les formulations des formules de PC.	Non Non Non Non		NR	Non	Non	Non	Oui	Oui	Les notions vectorielles et de produit scalaire sont bien connues des élèves avant d'arriver en 1S. Par conséquent ceci facilite la tâche pour faire comprendre certains concepts physiques.

P007	14	1.G. Martin 2.Tomasino 3.Eurin Gié	Assez bien	Vecteur, relations trigonométriques, égalité de deux fonctions, équations de droites, notion de proportionnalité	Oui	Sous diverses formes; utilisation des relations algébriques,et de définitions géométriques appliquées concrètement à des grandeurs physiques.	Oui Oui Oui NR	A un instant t donné tous les points d'un solide en translation ont le même vecteur vitesse.	Seulement préciser que la translation n'est pas uniquement rectiligne. On peut également parler de translation circulaire.	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	En réalité le problème qui se pose est un problème de transfert des connaissances mathématiques aux autres domaines de la science. Inconsciemment les élèves font un cloisonnement ente les deux disciplines.
P008	13	1.G. Martin 2.Tomasino 3.Eurin Gié 4.Hatier	Assez bien	Equations à une, deux ou trois inconnues, notion de limite et dérivé, somme des vecteurs, l'utilisation de figures géométriques.	Oui	Au début de l'année je fais des rappels de maths selon le niveau et à chaque fois qu'on rencontre un nouveau concept faisant appel aux maths je le souligne.	Oui Oui NR NR	Un mouvement de translation est un mouvement qui se fait suivant une droite.	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Ils possèdent les connaissances nécessaires mais quand il s'agit de résoudre les problèmes ils ne peuvent pas faire le lien. Pour eux il y a une frontière entre les deux disciplines. Exemple les équations du second degré qu'ils peuvent résoudre aisément en maths. En physique ils ont des problèmes pour le faire. On put tracer une fonction quelconque en fonction du temps; on peut tracer la puissance en fonction de l'intensité (pour eux c'est toujours y=f(x) et il n'y a pas x et y ils sont perdus.
P009	14	Manuels du programme en vigueur et quelque fois des livres du supérieur	Assez bien	Dérivation, les grandeurs proportionnelles, les angles, les fonctions, les vecteurs, la mesure algébrique, le produit scalaire, le barycentre.	Oui	En prenant un exemple en maths pour leur faire apparaître une similitude (souvent en changeant la nature de la variable). Les élèves pensent que les deux disciplines n'ont aucun rapport.	Non Non Non Non	Tout segment du solide reste parallèle à lui-même.	Les trajectoires des différents points sont superposables. Le vecteur défini par deux points est constant. A chaque instant tous les points ont le même vecteur vitesse.	Oui	Oui	Non	Oui	Non	A mon avis certaines notions ne sont pas claires à leur niveau. Pour citer un exemple courant on constate une confusion totale entre vecteurs, normes et mesure algébrique. On rencontre même cette situation en TS!
P010	15	1.Tomasino 2.G. Martin 3.Eurin Gié 4.Belin	Assez bien	produit scalaire, fonctions dérivées, suites	Oui	Rappels pour démontrer certaines formules.	Oui NR Oui Oui	Tous les points du solide ont le même mouvement que celui du centre d'inertie.	NR	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Leur problème est l'utilisation adéquate Ils ne sont pas conscients que les maths sont un outil pour la physique.

P011	16	1.Tomasino 2.G. Martin 3.Eurin Gié	Bien	Vecteurs, produit scalaire, trigonométrie, géométrie du triangle, géométrie dans l'espace, fonctions, dérivée, primitive.	Oui	manuels de maths: Déclic (1989-1992, Transmath, manuels russes ou anglo-saxons, cd, sites internet.	Oui Oui Oui Oui	A un instant t donné tous les points d'un solide en translation ont le même vecteur vitesse.	Les trajectoires des différents points du solide sont parallèles. Tout segment du solide garde la même orientation.	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Si toutefois il y a collaboration entre maths et pc pour gérer la progression dans le programme, afin que les outils dont le professeur de sc physique a besoin soient abordés auparavant par le prof de maths.
P012	10	1 Eurin Gié 2 Hachette 3 Annales	Peu	Puissances de dix Vecteurs Equations	Oui	Comparaison (résolution graphique et par le calcul) Activités (pour introduire une leçon)	Oui Non Oui Oui	NR	NR	Oui	Non	Non	Non	Non	Ils ont des problèmes pour calculer. Ils ont des problèmes pour les angles
P013	10	1 G. Fontaine 2 Tomasino		Vecteurs proportionnalité Puissance de dix Calcul numérique	oui	Symbole d'un vecteur par une seule lettre. T=kx, p=mg; t=kl-klo ; u=E-ri	Oui Oui Oui Non	Un mouvement de translation est un mouvement rectiligne qui s'effectue suivant la même droite d'action.	Un mouvement rectiligne uniforme Un mouvement rectiligne uniformément varié.	Oui	Non	Non	Oui	Non	Ces élèves ont des connaissances maths insuffisantes car elles ne sont pas installées ou mal installées par rapport à la progression du programme de physique. L'absence de diversification des notations font que ces connaissances sont inaptes pour l'usage en physique.
P014	7	1 Skane 2 Eurin Gié 3 G Martin 4 Tomasino	Peu	Vecteurs projection barycentre.	Oui	Utilisation des concepts maths pour faire des calculs projection… on ne peut s'en passer car les SP sont des sciences empirico formelles.	Oui Non Oui Oui	Tous les points d'un solide en translation ont le même vecteur vitesse.	Lorsque V a une direction constante la translation est dite rectiligne. Lorsque V change de direction on a une translation curviligne (rotation par exemple)	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	les élèves ont souvent des lacunes en maths; ils sont déroutés quand un prof de PC manipule des concepts mathématiques parfois inhérents à la description des phénomènes physiques. Le calcul vectoriel, les projections…

P015	11	1 Eurin Gié 2 Tomasino			Oui	Résolution des exercices	Oui Oui Oui Oui	Le mouvement de translation d'un corps est le déplacement de ce corps d'un point à un autre le long d'une voie rectiligne ou d'une voie circulaire. Lors d'une translation, tous les points du solide ont, à chaque instant, le même vecteur vitesse.	NR	Oui	Non	Non	Oui	Non	L'utilisation des notions mathématiques pose problème car les élèves ont souvent des difficultés en mathématiques.
P016	13	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.G. Martin	Assez bien	produit scalaire trigonométrie Vecteurs	Oui	Des formes qui nous permettent de résoudre simplement nos problèmes de physique	Oui NR Oui Non	Comme étant un mouvement de glissement et nous parlons de translation rectiligne et circulaire.	NR	Oui	Oui	Non	Non	Non	Les programmes de maths et de PC ne sont pas forcément en symbiose. On tient pas compte de manière constante de la place des maths dans les autres matières souvent à la confection des programmes.
P017	10	1.AESC Saliou Kane 2.Tomasino 3.Eurin Gié	Assez bien	Vecteurs projection barycentre produit scalaire calcul dans R équations et inéquations.	Oui		Oui Oui Oui Oui	Tous les points d'un solide en translation ont le même vecteur vitesse que le centre d'inertie.	idem Non	Non	Non	Non	oui	Oui	Problèmes de notation.
P018	20	1.Tomasino 2.Hatier 3.Eurin Gié	Peu	proportionnalité, produit scalaire, vecteurs, calcul de distance.	Oui	sous forme de rappels.	Non Non Non Non	Tous les points d'un solide en translation ont le même vecteur vitesse.	idem Non	Non	Non	Non	oui	Non	En classe de 2 s les élèves éprouvent bcp de difficultés à faire la projection d'un vecteur sur un axe, à faire la différence entre sens et direction d'un vecteur, à calculer le coefficient directeur d'une droite.

P019	17	1 Eurin Gié 2 Tomasino 3 hatier 4 fascicules PDRH	Assez bien	vecteurs, produit scalaire, trigonométrie, repère, produit scalaire.	Oui	Forme simplifiée et adaptée à la physique.	Oui Oui Oui Oui	Tous les points d'un solide en translation ont le même vecteur vitesse.	idem Non	Oui	Oui	Oui	oui	Oui	Leurs cours recoupent parfaitement le programme de PC en maths mais le niveau d'ensemble est un peu faible fait que certains ont des difficultés à assimiler l'outil mathématique d'où un handicap en physique.
P020	18	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.G. Martin	Peu	barycentre, trigonométrie, équations, Vecteurs.	Oui	Rappels en géométrie (vecteurs, projection de vecteurs, produit scalaire, égalité d'angle).	Non Non Non Non	En considérant 2 points M et N d'un solide, ce solide est en mouvement de translation. Si le vecteur MN reste constamment égal à lui-même.	Tous les points d'un solide en translation ont le même vecteur vitesse.	Oui	Non	Non	oui	Oui	Parfois ils oublient leurs connaissances en maths.
P021	12	1 Eurin Gié 2 Tomasino 3 G Martin 4 AESC Saliou Kane	Peu	vecteur, écriture scientifique d'un nombre.	Oui	En parlant des vecteurs, du produit scalaire	Oui Oui Oui Oui	Lorsque la position du mobile change au cours du temps.	On peut parler de la forme de la trajectoire. Mouvement rectiligne: droite Mouvement circulaire: cercle	Oui	Non	Non	Non	Non	La base en maths n'est pas bonne et cela entrave le bon déroulement du cours.
P022	14	1.Tomasino 2.G. Martin 3.Eurin Gié	Assez bien	Somme vectorielle, Equations, trigonométrie.	Oui	En rappelant ces notions dans mon cours	Oui Non Non Oui	Un mouvement de translation est un mouvement qui se fait suivant une droite.	Non	Non	Non	Non	oui	Oui	Ils peuvent résoudre les équations ils peuvent utiliser les sommes de vecteurs.
P023	19	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.Belin	Peu	Calcul vectoriel, projections.	Oui	Equation d'une droite Les dérivées et primitives Equation diff	Oui NR NR Oui	deux vecteurs du solide restent parallèles à une même direction.	NR	Oui	Non	Non	oui	Oui	Il arrive qu'on ait des difficultés pour résoudre un exo, dès que qu'on fait un petit rappel de ce qu'ils savent en maths immédiatement ils font le lien entre leurs connaissances en maths et ce qu'ils sont entrain de faire.
P024	25	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.G. Martin	Bien	Produit scalaire, produit vectoriel, calcul intégral, dérivée.	Oui	Formules, relations, expressions	Oui Oui Non Oui	Mouvement qui se fait sans rotation. Même distance parcourue par les points du solide.	NR	Oui	Oui	Oui	oui	Non	Souvent ils ne se rendent pas compte de l'interdisciplinarité.

P025	9	1.Tomasino 2.Bordas 3.Eurin Gié	Assez bien	Vecteurs, coefficient directeur, équations, projections.	Oui	Utilisation de la loi physique, résolution d'équations différentielles, de primitive, établissement d'équation de la trajectoire, dérivation	Oui Oui Oui Oui	si son vecteur vitesse garde la même direction et le même sens.	NR				oui	Non	Ils ne font pas le lien entre le cours de maths et PC. Ils ne savent pas que ce qu'ils apprennent en maths peut être appliqué en PC.
P026	8	1 Eurin Gié 2 Tomasino 3 G Martin	Bien	Projections, dérivée, intégrales, vecteurs, produit scalaire	Oui	Equation d'une trajectoire, équation diff, dérivées et primitives	Oui Oui Oui Oui	Directions parallèles et même sens des vecteurs.	Non	Oui	Oui	Oui	oui	Oui	Dans certains exo ils fondent de leur connaissance en maths pour sortir le lien de ce qu'ils font.
P027	7	1 G Martin 2 Jean Lacourt 3 Eurin Gié	Peu	Equations de droites, coefficient directeur.	Oui	sous forme de rapprochement	Non Non Non Non	déplacement sans changement de sens et de directions des vecteurs.	NR	Oui	Non	Oui	oui	Non	Manque de compréhension des concepts.
P028	12	1 Bourdon 2 Tomasino	Assez bien	Equations, calcul, vecteurs.	Oui	rappels mathématiques	Oui Oui Non Oui	Parallélisme des vecteurs.	Non	Oui	Oui	Oui	oui	Non	Les élèves ont des préjugés sur les maths, ce qui entraîne leurs insuffisances dans cette discipline.
P029	13	Manuels conformes aux programmes en vigueur, des manuels du supérieur	Assez bien	vecteur, proportionnalité, angle, projections.	Oui	Pour leur montrer comment pour nous les physiciens les maths sont très importantes. Ils découvrent à travers certains exercices la puissance de l'analyse mathématique.	Non Non Non Non	si tout segment conserve son orientation.	Même vecteur vitesse à chaque instant.	Oui	Oui		oui	Non	Les élèves pensent qu'il n'y a pas de lien étroit entre les maths et la physique par ailleurs leur niveau est faible.

P030	18	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.G. Martin	Pas du tout	vecteurs, trigonométrie	Oui	Résolution de systèmes d'équations, représentation de vecteurs	Non Non Non Non	Un solide est en mouvement de translation quand le vecteur défini par deux de ses points reste constamment égal à lui-même;	la distinction entre un mouvement de translation rectiligne et un mouvement de translation circulaire.	Non	Non	Non	oui	Oui	Pour moi entre les classes de 4 et 3 les élèves ont eu à acquérir des notions sur les vecteurs des notions de géométrie.
P031	18	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.Belin	Peu	vecteurs, projections, produit scalaire, dérivation, trigonométrie	Oui	Caractérisation d'un vecteur, dérivation, projection d'une somme de vecteurs, différence entre un résultat mathématique et un résultat physique.	Oui RN Oui Oui	Tous les points d'un solide en translation ont à chaque instant le même vecteur vitesse.	Préciser que la translation peut être rectiligne curviligne ou circulaire.	Oui	Non	Non	oui	Non	Enormes difficultés pour projeter un vecteur sur un axe orienté, difficulté pour passer de la variable x utilisé en maths à une autre variable (ex le temps t) que nous utilisons en physique.
P032	13	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.Belin	Assez bien	Produit scalaire, trigonométrie, Vecteurs, dérivation.	Oui	Dans la résolution d'exercices. Dans le rapport entre résultat mathématique et la signification physique.	Oui Oui Oui NR	comme étant un mouvement de glissement, en expliquer les 2 formes limites (translation rectiligne et circulaire.)	Pour une translation rectiligne même vecteur vitesse pour tous les points du solide.	Oui	Non	Non	Non	Non	
P033	15	1.Tomasino 2.Eurin Gié 3.G Martin	Peu	Vecteurs, systèmes d'équations, trigonométrie.	Oui	Rappels utilisation de lois pour résoudre des problèmes	Non Oui Oui Oui	En 2 S on étudie le mouvement d'un point matériel.	NR			Non	oui	Oui	Les notions maths sont parfois mal maîtrisées. Les élèves peuvent avoir des difficultés pour faire le pont entre les connaissances maths et leur utilisation.

P034	9	1 Eurin Gié 2 Tomasino 3 Livre S Kane	Peu	Vecteurs, systèmes d'équations.	Oui	Méthode de résolution graphique et analytique d'un problème. Résolution d'un système d'équations. Formules de trigonométrie, produit scalaire.	NR NR NR NR	Tous les points d'un solide en translation ont à chaque instant le même vecteur vitesse. Une droite quelconque du solide reste parallèle à elle-même au cours du mouvement.	Si la direction de V(t) est constante on a un mouvement de translation rectiligne. Si la direction de V(t) varie on a un mouvement de translation curviligne.		Oui	Oui	oui	Oui	Problèmes de coordination des enseignements.
P035	6	1.Tomasino 2Durupthy 3.Eurin Gié	Bien	Calcul vectoriel, barycentre, trigonométrie.	Oui	Sous forme de rappels Sous forme d'application	Oui Oui Oui Oui	C'est un mouvement pour lequel les directions initiales du système sont constantes. Translation circulaire - translation rectiligne.	Au niveau cinématique Au niveau de la trajectoire	Oui	Oui		oui	Non	Les élèves ont bcp de lacunes en géométrie notamment sur le calcul vectoriel et sur les transformations du plan.
P036	21	1 Alonso et Finn 2 Livre S Kane 3 Tomasino 4 Galileo	Assez bien	Droites, vecteurs, barycentre, taux de variation des fonctions.	Oui	Tracé d'une courbe expérimentale point par point suivi de la détermination de l'équation cartésienne-somme de forces-détermination du centre de masse	Oui Oui Oui Non	La trajectoire de A est parallèle à celle de B.	NR	Oui	Non	Non	Oui		

P037	8	1 Eurin Gié 2 Tomasino 3 Durandeau 4 G Martin	Assez bien	Equation et système d'équation, barycentre, calcul vectoriel.	Oui	Après avoir expliqué les concepts physiques, j'utilise souvent le formalisme mathématique adéquat pour traduire fidèlement ces concepts.	Oui Oui Oui Oui	Un solide est en translation si tout segment du solide se déplace parallèlement à lui même. Ensuite je définis: le mvt de translation rectiligne et le mvt de translation curviligne et en particulier le mvt de translation circulaire.	Lorsque tous le points ont des trajectoires rectilignes la translation est dite rectiligne et la translation est circulaire si tous les points du solide ont des trajectoires curvilignes superposables	Oui	Oui	Oui	oui	NR	En seconde S, souvent les élèves peuvent venir avec un niveau en maths relativement bas. Ce qui pose problème surtout si on commence par la cinématique en 1S. Ça va mieux si toutefois les collègues de maths parviennent à terminer leur programme.
P038	13	1 Durupthy 2.Tomasino	Peu	Equations, calcul numérique, barycentre.	Non	Les maths ne sont que des outils pour les physiciens Eviter de mathématiser à outrance la physique.	Non Non Non Non	A une date donnée les vecteurs vitesses sont constants et égaux au vecteur vitesse du centre d'inertie G. V1=V2=V3= …=VG à l'instant t	NR	Oui	Non	Non	Non	Non	Ils ignorent pourquoi ils font les maths.
P039	10	Manuels de physique et chimie	Assez bien	Vecteur, projections, système d'équations	Oui	Pour montrer aux élèves que les solutions physiques sont parfois d'ordre mathématique.	Oui Oui Oui Oui	Tous les points d'un solide en translation ont à chaque instant le même vecteur vitesse.	Tous les points décrivent des droites parallèles.	Oui	Non	Non	oui	Oui	Dans le programme de maths les élèves de 2S ont déjà vu les notions de vecteur de projection savent résoudre des équations.
P040	13	1 Skane 2 Tomasino 3 Eurin Gié	Peu	Représentation d'un vecteur, triangle, barycentre, résolution de système d'équation.	Oui	De manière générale après avoir expliqué les concepts physiques, je fais une analogie mathématique pour traduire ces concepts.	Oui Oui Oui Oui	Tous les points d'un solide en translation ont à chaque instant le même vecteur vitesse. Le solide se déplace parallèlement à lui-même.	Définir une translation rectiligne et une translation curviligne.	oui	Non	Non	oui	Non	

Réponses aux exercices des profs de physique

Exercice 1

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
P001	RC	Mouvement de Translation combiné à un mouvement de Rotation	TC	Oui nous mettons en évidence les 2 mouvements (rectiligne et rotation)	Surtout la verticalité de la nacelle
P002	RC	MR	TC centré en O' et de rayon O'M	Oui pour montrer que le mvt de la nacelle est la translation de vecteur AM du mouvement de la grande roue.	Réduire le mouvement de la nacelle à celui d'un point matériel M. Difficulté à transposer leurs connaissances maths en physique
P003	RC	MTC car tous les points de la nacelle décrivent des cercles chaque fil de la nacelle conserve sa direction.	TC	Oui pour montrer l'existence de ce type de mouvement.	NR
P004	RC	MTC car le vecteur MM' est constant dans le temps et que tout point M de la nacelle décrit une trajectoire circulaire.	TC car la nacelle a un mouvement de translation circulaire.	L'énoncé doit préciser la nature du mouvement (rotation autour d'un axe à préciser).	Aucune difficulté si l'énoncé est clair.
P005	RC	MT Le segment AM reste parallèle à lui-même au cours du mvt.	TC car la nacelle a un mouvement de translation circulaire.	Oui cet exo illustre bien le MT	Détermination de la trajectoire de M Position du centre du cercle décrit par M.
P006	RC	M curviligne	TC	Oui dans le cadre du calcul du travail de la force.	Dans la représentation des trajectoires de la nacelle et du point M.
P007	RC	MTC car AM=BM1=CM2 (vecteurs)	TC	Oui c'est un bon moyen d'étayer l'existence d'un MTC	La question 2) me paraît non évidente à résoudre surtout si on demande de justifier la réponse
P008	NR	Mouvement circulaire uniforme	TC car la distance au centre ne varie pas.	Non le genre d'exo qu'on donne ici est: représenter le vecteur vitesse, calculer sa norme.	Difficulté à trouver le centre du cercle décrit par M
P009	RC	MTC exemple le segment MP reste parallèle à lui-même	TC dont le centre le point O' est tq AM=OO' (vecteurs) O est le centre de la trajectoire de A	Oui pour vérifier s'ils savent reconnaître une translation circulaire. Fait extraordinaire, dans leur esprit une translation est un mouvement rectiligne. C'est un exo que je donne tel quel en TD.	Qu'ils disent que la nacelle est en MR. Qu'ils ne puissent tracer la trajectoire de M. Cependant la maîtrise de l'outil vectoriel leur permettra de se tirer d'affaire.
P010	RC	MTC	TC	Considérer le solide comme un point matériel	Idem

P011	RC	MTC	TC car le segment AM reste parallèle à lui-même au cours du mvt donc la trajectoire de M se déduit de celle de A par la translation de vecteur AM donc c'est le cercle de centre O' translaté de O par la translation de vecteur AM	Oui pour vérifier s'ils ont compris la translation curviligne. J'aurai donné une vue en 3D pour qu'ils voient que la nacelle ne va pas heurter le rayon.	Identifier le centre du cercle décrit par M.
P012	RC	MR	TC centré en O RF	Non 1 question ouverte.	Direction verticale de la nacelle.
P013	RC	Mvt rectiligne car AM//BM//CM vecteurs	TC	Non car cette trajectoire repose sur des considérations purement géométriques. La physique c'est du concret.	Ici les élèves ne verront pas que les segments sont en translation sur plusieurs directions // entre A et B. C'est confus
P014	RC	MR	TC Lors du mvt de la nacelle le côté AM se déplace en restant parallèle à lui-même.	Non Les élèves de 2nd éprouveraient des difficultés à transposer la translation en maths dans ce type d'exo.	Voir que le côté AM se déplace // à lui-même
P015	RC	MTC	TC	Oui pour expliquer la notion de mvt de translation	Tracé correct de la trajectoire.
P016	RF	MR	TC centré en O RF	Oui pour parler de la rotation d'un solide.	Le terme nacelle
P017	RC	MTC	TC	Oui les mvts de translation sont partie intégrante du programme.	NR
P018	RC	MT car tous les points ont à chaque instant même vecteur vitesse.	TC	Oui c'est un exo qui peut servir d'exemple.	tracer les trajectoires de certains points de la ancelle.
P019	RC	MTC	TC	Oui car il illustre que le MT n'est pas forcément rectiligne. La roue n'est pas en mouvement de translation elle est en rotation et elle entraîne la nacelle dans son MT	Le sujet est mal libellé.
P020	RC	MTC car ses longueurs ou sa longueur est constamment égale à elle-même	TC	Oui c'est un bon exo qui permet d'illustrer le MTC	La grande roue ne fait pas partie de leur quotidien.
P021	RC	MR	TC	Oui Dessiner la trajectoire de M et le vecteur vitesse aux points A, B, C	NR
P022	RC	MCirculaire	TC	Non on s'intéresse à la vitesse angulaire ou on demande la distance parcourue.	Pour trouver le centre du cercle décrit par M

P023	RC	MT	TC	Non. Si oui on étudiera le mvt de son centre d'inertie et l'on va considérer que la nacelle est sur une trajectoire circulaire.	Que le mouvement est un mvt de translation bien que la trajectoire soit un cercle.
P024	RC	MR autour d'un axe passant par O	Tarc de cercle	Oui pour leur permettre de mieux réfléchir	La représentation de la trajectoire car difficultés sur les mvts de rotation
P025	RF	MRU	NR	Non pas intéressant	NR
P026	RC	MT	TC	Oui car doit pouvoir projeter.	Représentation de la trajectoire
P027	RC	MR	NR	Non pour des raisons de programmes	Représentation de la trajectoire et complexité sur les rotations
P028	RC	MRU	NR	Non il dépasse le niveau de 2nde	Représentation de la trajectoire
P029	RC	MTC le segment AM conserve la même direction.	TC de rayon OA et de centre O' tel que AM=OO' vecteur	Pour savoir s'ils savent reconnaître un MT. Je leur aurai donné un exo avec les 3types de MT	Ils peuvent confondre MTC et MR
P030	RC	MTC Les côtés de la nacelle sont constamment parallèles à eux-mêmes durant tout le mvt	TC car étant à l'extrémité d'un segment lui même en TC son mvt ne peut être que circulaire	Pour montrer l'existence de la TC	Tracé correct de la trajectoire de M car la grande roue est un mécanisme inconnu de nos élèves.
P031	RC	MCU comme la roue puisque la nacelle est un solide qui se déforme pas donc tous ses points sont équidistants.	TC	Non parce que la translation certes est importante dans le programme de physique mais pas vraiment l'essentiel.	Voir que la nacelle a un MC
P032	RC	MC La nacelle est un solide tous les points sont équidistants les uns des autres	TC	Non	Retrouver les caractéristiques du mvt de la nacelle. Inverser les questions 2 et 3
P033	NR	NR	NR	NR	NR
P034	RC	MR Tous les points effectuent les trajectoires circulaires de même rayon.	TC de centre O' en effectuant une translation de vecteur AM	Oui il évalue bien le MR	NR
P035	RC	MTC car il y a conservation de la verticalité du système au cours de la rotation.	TC de centre O et de rayon OM	Non car il y a des représentations plus simples	Faire la confusion entre le Mvt d'un point et le mvt d'une section rectiligne.
P036	RF	Composition de 2 rotations (rotation et oscillation)	Cycloïde	Non pas au programme du secondaire	Idem
P037	RC	MTC car tout segment se déplace parallèlement à lui-même	TC de centre O' tel que OO'=AM vecteur de même rayon que la roue. Ce cercle est obtenu par translation du vecteur OO'	Je trouve que c'est un exo assez édifiant, mais j'aurai demandé aux élèves de montrer que tout segment se déplace //ment à lui-même et que la trajectoire de M peut se déduire de celle d'un point de la roue par la translation de vecteur OO'	De voir la Tc de la nacelle et de voir la translation permettant de voir la trajectoire de tout point de la nacelle.

P038	NR	NR	NR	NR	NR
P039	RF	MC	TC centré en O sur le dessin	Non préciser que la nacelle est entièrement fixe à la roue.	Compréhension de l'énoncé
P040	RC	MTC le segment MM1 se déplace tout en restant parallèle à lui-même (Translation)	TC de rayon OA et de centre O1' tel que OO1=AM vecteur	Non car ce chap. se traite en début d'année à ce moment là le prof de maths est en train de traiter d'autres chaps. (Le calcul vectoriel, la translation math…) ne sont pas traités en début d'année. Ce qui rend difficile la tâche du prof de physique.	comprendre la TC de la nacelle et de pouvoir représenter la trajectoire du point M.

Exercice 2

	F1	F2	F3	F4	F5
P001	RP	Intensité seule	Intensité seule	Oui en changeant l'ordre des questions. 1) le poids d'abord 2) Autre question: Déterminez l'angle a graphiquement	Représentation des vecteurs à l'échelle
P002	RP	Intensité seule	Intensité seule	Oui 1) Ecrire la condition d'équilibre 2) Déterminez graphiquement la tension et l'angle a.	Lecture et compréhension du texte. Représentations des directions des différentes forces. Des problèmes de géométrie.
P003	Projection	Intensité seule	Calcul T par proj sans valeur numérique	Oui Ecrire la condition d'équilibre Calculer l'angle a Calculer T	Représentation des vecteurs Détermination des coordonnées des vecteurs
P004	RP	Intensité seule	Intensité seule par MG T=3,3N	Oui en changeant l'ordre des questions. 1) le poids d'abord 2) RG des vecteurs forces 3) DG ou par le calcul T	La représentation de la tension.
P005	RP	Toutes les caractéristiques	Intensité seule par proj T=3,46N a=30°	Oui Représentation d'une situation physique par un schéma Représentions de forces à l'échelle Ecrire les conditions d'équilibre Modifications: préciser le sens de F	Le choix des axes et les projections sur les axes. Représentation de F préciser le sens.
P006	RP	Intensité seule	Calcul T par proj sans valeur numérique	Oui remplacer F par une force horizontale.	Représentation des forces Proj sur les axes.
P007	NR	Intensité seule	Intensité seule	NR	NR

P008	Pproj	Intensité seule	Calcul T par proj sans valeur numérique	Oui La 1°question n'est pas à sa place car il faut trouver a et T avant de les représenter sinon pour le reste pas de difficulté.	Résolution de 2 équations à 2 inconnues.
P009	CF car F horizontale	Intensité seule	Calcul T faux	Oui calculer la valeur de la tension T par MG puis MA	Valeur des mesures algébriques Projections et système d'axes
P010	NR	NR	NR	Oui	NR
P011	RP	Intensité seule	MG T=3,5N	Oui Déterminer graphiquement une force.	Utilisation d'une échelle La translation d'un vecteur Construire la somme de deux vecteurs par la MT ou la RP.
P012	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques sans valeur numérique	Oui	Ils ont l'habitude de travailler avec F horizontale
P013	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques l'angle a environ 30°	Oui Ajouter tiré par un aimant droit.	Aucune difficulté
P014	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques Par construction l'angle a=30°	NR	Construction géométrique
P015	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques a=30°	L'exo est intéressant car la plupart des exos proposés sont donnés avec F horizontal Et ce cas permet à l'élève de sortir des schémas prédéfinis.	Représentation de vecteurs et du vecteur résultant.
P016	Pproj	Intensité seule	Calcul T par proj sans valeur numérique	Oui pour un travail de recherche. C'est un exo difficile. Mais la difficulté est plus mathématique que physique.	Recherche du système d'équations à résoudre. Projection.
P017	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques Intensité de T par MT	Oui au programme	Représentation da la force magnétique
P018	RP	Toutes les caractéristiques	Toutes les caractéristiques Intensité de T par MT a=30°	Oui variété de MR par calcul ou MG	Caractéristiques de T Difficulté à montrer que (P, F)=60°ce qui permet de construire le vecteur T=-(P+F)
P019	Pproj	Toutes les caractéristiques	Toutes les caractéristiques Intensité de T par Mproj a=30°après long calcul de tanga	Oui	Représentation à l'échelle Calcul de T (On devait placer un système d'axe)
P020	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques Intensité de T fausse T=7,4N	Oui c'est un bon exo. Il faut préciser la valeur de téta	Caractéristiques de T Confondent direction et sens Difficulté à utiliser le rapporteur
P021	RP	Intensité seule	Calcul T par proj ou graphiquement sans valeur numérique	Oui Indiquer l'angle a ou demander une résolution graphique	utilisation d'une échelle

P022	CF	Intensité seule	Toutes les caractéristiques mais faux	Non Nous préférons donner F horizontale Demander une résolution graphique	Trouver T à partir du triangle quelconque. Les plus doués utilisent projection
P023	RP	Intensité seule	Réponse inachevée Direction: fait un angle de …	Oui c'est un bon exemple pour faire des projections	En utilisant une résolution géométrique par le triangle
P024	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques Intensité de T par MG	Oui sans modification	Détermination des angles Projections
P025	Pproj	Toutes les caractéristiques	Toutes les caractéristiques ne détermine pas l'angle a	Oui	Projections
P026	RP	Intensité seule	T=3,5N direction oblique, dirigée vers le plafond	Oui	Aucune difficulté
P027	RP	Intensité seule	Inclinée d'un angle a sens ascendant Norme donnée par la condition d'équilibre	Oui	Aucune difficulté
P028	RP	Intensité seule	Dirigée suivant une direction oblique vers le plafond T=3,5N par MG	Oui	Aucune difficulté
P029	NR	Intensité seule	toutes les caractéristiques mais F horizontale	Oui Demander de déterminer T par 2 méthodes (MG et MA)	Choix des axes Valeurs algébriques des forces.
P030	RP	Intensité seule	Intensité seule	Oui	Représentation des vecteurs F et T Utilisation du rapporteur
P031	NR	Intensité seule	Intensité seule	Non Parce que en physique c'est choisir un système et de faire le bilan des forces, ensuite écrire les conditions d'équilibre. Il faut donner le schéma de la figure.	Faire un schéma correct respectant les données de l'énoncé, ensuite la projection des vecteurs forces puisque le repère de projection n'est pas donné
P032	Pproj	Intensité seule	Intensité seule mais faux	Non Ce qui intéresse le physicien c'est la compréhension des données physiques	Difficultés mathématiques (Proj Trigo)
P033	NR	NR	NR	NR	NR
P034	NR	Intensité seule sans valeur numérique	Intensité seule	Oui	Aucune difficulté
P035	RP	Toutes les caractéristiques	Toutes les caractéristiques sans valeur numérique	Non le choix du système à étudier non préciser.	Calcul vectoriel et projections

P036	RP	Toutes les caractéristiques	Toutes les caractéristiques	Oui	Aucune difficulté
P037	Pproj	Intensité seule	Toutes les caractéristiques sans déterminer l'angle a Mproj	Oui en donnons la valeur de l'angle a ou demander de déterminer a	Valeur de l'angle a
P038	NR	NR	NR	NR	NR
P039	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques sans l'angle a Mproj	Oui Demander de déterminer T par 2 méthodes (MG et Méthode par le Calcul)	Construction vectorielle et projections
P040	RP	Intensité seule	Toutes les caractéristiques sans l'angle a	Oui Demander l'intensité de T par la Mproj en donnant l'angle a	Aucune difficulté

Légende

NR : Non réponse
MC : Mouvement Circulaire
MTC : Mouvement de Translation Circulaire
MR : Mouvement de Rotation
MRU : Mouvement de Rotation Uniforme
TC: Trajectoire Circulaire
MT: Mouvement de Translation
RC : Réponse Correcte
RF : Réponse Fausse
RP: Représente le Parallélogramme
CF: Construction Fausse
MG: Méthode Graphique

Tableau des réponses au questionnaire destiné aux profs de maths

	Nban	Etab	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
m001	25	LTSNT	Peu	Centre d'inertie, Forces, travail d'une force	Avec le barycentre: centre d'inertie d'une plaque homogène. Avec la notion de travail de force	Oui NR Oui	Bien sûr l'image d'un segment par une translation étant un segment de même longueur et les supports des segments sont parallèles.	Oui	Les mouvements de la nacelle sont des mouvements de translation: tout segment liant deux points de la nacelle reste parallèle au cours du mouvement (mais il y a une infinité de translations) et la composée de 2 translations est une translation) Les mouvements du tableau sont aussi des mouvements de translation: selon les mêmes principes physiques le tableau reste toujours perpendiculaire au plan du sol.	Oui notion de force appliquée à un point.
m002	10	L.Bar	Assez bien	Vitesse d'un solide en mouvement- équation horaire Oscillations mécaniques-circuit RLC	Il nous arrive souvent de prendre des exemples en physique pour illustrer un concept mathématique par exemple produit scalaire et travail d'une force.	Oui Oui Oui	La notion de translation math désignant une transformation ou le déplacement d'un point ou d'un ensemble (solide par exple), ce lien avec la conception physique est réel. Cependant la notion de référentiel à laquelle fait allusion la physique n'apparaît pas dans la conception math	NR	Le mouvement de la roue est un mouvement de rotation tandis que le tableau se déplace suivant un mouvement de translation.	Je fais référence souvent à la physique pour signifier aux élèves que la notion de point d'application utilisée en physique n'est une caractéristique d'un vecteur.
m003	5	LMBK	Assez bien	Mouvements, équilibre d'un solide, cinématique, électrostatique, dynamique, oscillations mécaniques et électriques	Sous forme d'interprétation: nombre dérivé comme vitesse instantanée, centre de gravité (point d'équilibre) comme barycentre. Montrer l'apport des maths en physique: vecteurs, équations différentielles	Oui Oui Oui	Oui l'image d'un segment par une translation étant un segment de même longueur et les supports des segments sont parallèles. Il y a un lien entre les transformations du plan qui conservent la distance ou le parallélisme	NR	Le mouvement des deux objets est un mouvement de translation.	Oui pour montrer aux élèves l'utilisation des vecteurs en physique avec les forces.

m004	17	LTSNT	Pas du tout	Equations différentielles	A l'introduction des équations différentielles.	Oui NR Oui	Oui sur le parallélisme des supports des vecteurs.	NR	Le premier est un mouvement de rotation l'autre est en oscillation.	Oui en montrant que l'addition des vecteurs est utilisée en PC pour calculer la force résultante d'un système soumis à plusieurs forces.
m005	17	LBD	Peu	Cinématique, circuit RLC, oscillations harmoniques	oui, dans le cadre des activités préparatoires ou activités de consolidation pour montrer l'interdisciplinarité	Oui Non Oui	NR	NR	Oui mouvement de translation pour le tableau dont le vecteur de la translation a la direction du plan vertical du mur.	Je ne fais pas référence à la physique car le cours risque d'être long et parfois même un peu complexe..
m006	11	LBD	Peu	Cinématique	peu (utilisation de la trigonométrie en physique)	Non Non Non	Oui	NR	ce ne sont pas des mouvements de translation. Ils sont circulaires.	Oui Forces et les circuits RLC
m007	13	LBD	Peu	vitesse-accélération.	nous faisons référence à la physique pour donner des exemples d'application ou d'utilisation de concepts mathématiques en physique.	NR Oui Oui	La notion de conservation du parallélisme n'est pas spécifique à la translation. On la retrouve avec d'autres types de transformations.	NR	Le mouvement est circulaire dans les deux cas.	Pour caractériser un vecteur, on évoque souvent un point matériel se déplaçant sur une droite d'un point A vers un point B.
m008	4	LASB	Peu	centre de gravité-force-vitesse-accélération-trajectoire-oscillations	Sous forme d'exemples pour expliquer l'application du concept étudié ou sous forme d'activités introductives.	Oui Non Oui	Oui car la translation math conserve le parallélisme.	NR	Oui mouvement de translation pour le tableau car au cours du mvt dans le plan vertical du mur le segment liant deux points du solide reste parallèle à lui-même.	Non parce que je peux faire le cours en utilisant un bipoint(A,B) et une droite D/ D//(AB)
m009	NR	NR	Assez bien	Les fonctions logarithmes-les équations différentielles, courbes paramétrées	un peu de référence (avec les équations différentielles	Oui Oui Non	Oui car la translation est un déplacement mesuré suivant une direction et un sens.	NR	NR	Oui avec le déplacement d'objets et de solide.
m010	18	LGD	Peu	Centre de gravité	pour expliquer le barycentre en 2°S, on utilise la notion d'équilibre en physique. Notion de mouvement uniforme pour la translation	Oui Oui Oui	Le parallélogramme explique qu'il y a lien entre mvt de translation et translation math et aussi la notion de déplacement. Une translation mth se fait à partir d'un mvt et du parallélisme.	NR	Non la nacelle n'est pas en mvt de translation, mais en rotation. Oui le tableau est en mouvement de translation.	Oui surtout pour le mvt des objets.

m011	28	LGD	Pas du tout	mécanique	Parfois, par exemple pour expliquer le barycentre, je parle du centre d'inertie.	Oui Non Non	La physique est une science expérimentale. Oui il y a un lien	NR	NR	Oui Forces
m012	24	LTSNT	Peu	Forces, cinématique	Oui: exercices d'application, étude comparative.	Oui Non Non	Oui	NR	oui pour la roue car tout segment reste parallèle à l'axe vertical le reste au cours du mvt. Pour la tableau ce n'est pas clair dans mon esprit.	Oui les forces sont des grandeurs vectorielles.
m013	15	LTSNT	Peu	Loi horaire d'un mouvement, équilibre des forces.	En introduisant le barycentre, et centre d'inertie, la trigonométrie, les transformations du plan	Oui Non Oui	Oui avec la translation il y a conservation du parallélisme de la longueur et du contact.	NR	Ce sont des mouvements de rotation.	Oui en 4e l'approche introductive des vecteurs est purement physique avec les notions de longueur, sens et direction. L'approche purement math faisant référence aux classes d'équivalence de bipoints.
m014	NR	NR	Peu	Non	Oui utilisation des résultats mathématiques pour la physique.	Oui NR NR	Oui	NR	Non	NR
m015	13	LTID	Assez bien	Forces, mouvements	oui en donnant par exemple des exercices de physique qu'on peut résoudre mathématiquement.	Oui Oui NR	Je ne vois pas un lien ça pourrait être une homothétie.	NR	Ce n'est pas un mvt de translation. C'est un mvt circulaire.	Oui avec le barycentre
m016	13	LLG	Peu	notion d'équilibre de moments surtout pour l'introduction du barycentre.	Je le fais souvent pour éveiller chez les élèves le sens critique.	Oui NR Oui	OUI	NR	Pour le premier objet OA non // à OA' donc il n'est pas en mvt de translation. Pour le second oui.	Pour le calcul barycentrique je fais souvent appel à la physique.
m017	10	LLG	Pas du tout	Centre de gravité, cinématique	Non j'ignore les notions abordées en physique dans les classes.	Non Non Non faute de temps	Oui puisque l'image d'un segment par une translation math est un segment parallèle.	NR	NR	Non parce que en seconde ils n'ont pas encore des notions solides en physique.
m018	25	CP Ass	Assez bien	Le concept de vecteur me parait le plus en rapport avec nos cours de maths	oui pour des exemples pratiques.	Oui Non Oui	Dans le cas général la translation est liée au mvt à un déplacement suivant une direction.	NR	NR	Oui pour la direction et le sens du vecteur. On peut parler de direction verticale et de sens de haut en bas.

m019	7	NR	Peu	force, centre d'inertie, moment, vitesse, accélération, repère géocentrique/Galiléen, équilibre.	Rarement	Non Non Non	Oui	NR	Non ce ne sont pas des mouvements de translation.	Non
m020	8	Position stage CESAG	Bien	Vitesse, accélération centre de gravité, Moments, forces.	Des fois pour donner une application des concepts mathématiques vus.	Oui NR Oui	NR	NR	NR	En faisant la comparaison des éléments caractéristiques d'un vecteur (point d'application direction sens norme)
m021	19	LLG	Peu	dynamique, cinématique	Oui concrétiser certains concepts mathématiques	Oui NR Oui	Oui il y a un lien	NR	Je ne suis pas sûr.	Oui notion de force
m022	6		Assez bien	Corps en équilibre, travail et puissance, cinématique.	Oui je trouve les deux disciplines très liées par les contenus mais surtout par l'histoire.	Oui NR Oui	Oui le segment reste parallèle à lui-même rappelle la conservation de la direction de la translation	NR	NR	Poids d'un corps
m023	23	LLG	En détail	forces, équilibre, travail d'une force	Oui illustration, introduction de concepts;	Oui Oui Oui	Oui même si la définition cache des limites car direction et sens semblent se confondre.	NR	Selon la définition physique oui Selon la définition math non car la conservation de la direction et du sens dans une translation math n'est pas vérifiée en tout point.	Oui pour illustrer pour introduire
m024	16	LLG	Assez bien	Théorème fondamental de la dynamique, Mouvement d'un projectile, illustrer le contenu mathématique	très souvent pour illustrer le contenu mathématique.	Oui Oui NR	NR	Oui	Translation	pas beaucoup
m025	30	CSC	Bien	NR	Forces	Oui Oui Oui	Il peut y avoir un lien si on ne s'occupe que du centre de gravité	NR	Oscillation	Oui pour la résultante des forces travail et produit scalaire et surtout la notion de point d'application d'une force.

m026	9	ENS	Peu	Vecteurs et produit scalaire	Oui, à l'occasion de l'étude des vecteurs, en maths il y a des problèmes d'origine physique.	Oui Oui Oui	Bien sûr le terme translation est en maths et en physique.	Oui .	Problème pour comprendre l'environnement dans lequel se passe l'expérimentation par exemple pour la nacelle.	Oui un vecteur c'est une direction un sens et une intensité.
m027	25	LLG	Peu	Forces	Non.	Non NR NR	NR	NR	NR	NR
m028	20	LLG	Peu	Souvent dynamique	De temps en temps	Oui NR NR	Oui	NR	NR	Très rarement.
m029	16	LLG	Assez bien		Oui dans le calcul vectoriel.	Oui Non Non	NR	NR	Mouvement de rotation	Oui souvent
m030	10	LLG	Peu		Oui sous forme d'exemples.	NR NR Oui	NR	NR	NR	Oui
m031	10	LLG	Bien	Forces	Les formules physiques le plus souvent je les démontre en maths	Oui Oui Oui	La translation conserve le parallélisme	NR	Mouvement de rotation	Les forces
m032	13	LLG	Pas du tout	NR	NR	NR NR NR	NR	NR	NR	NR
m033	10	LBD	Peu	Forces Mouvement uniforme	Oui Mais très souvent pour expliquer et renforcer certains résultats en physique.	Non Non Non	Oui le vecteur translation est indépendant du point où il se trouve. Non pas de lien avec d'autre notion	Non	J'avoue que je n'ai pas compris l'exo	Non
m034	6	LDD	En détail	Forces	Oui	Oui Oui Oui	oui	Oui	NR	Oui Somme de forces Mouvements
m035	13	LDD	Pas du tout		Oui	Oui Oui Oui	Oui	Oui	NR	Oui
m036	20	LDD	Bien		Oui	Oui Oui Oui	oui	Oui	Mouvement circulaire	oui (calcul sur les forces)

m037	8	LDD	Assez bien		Oui	Oui Oui Oui	oui Conservation de la direction mais non de la norme.	Oui	NR	Oui
m038	16	LDD	Peu		Oui	Oui Non Oui	Oui	Non	NR	Oui Addition vectorielle avec bilan des forces
m039	26	LDD	Peu	Incertitudes décomposition des forces	Oui Application	Oui Oui Oui	Oui Un solide en mouvement de translation rectiligne définit une translation mathématique	Non	C'est une translation	oui Pour mieux faire comprendre la notion de vecteur en utilisant des objets que je déplace.
m040	20	LDD	Peu		oui sous forme d'application d'un concept.	Oui Non Non	Oui	NR	Nacelle mouvement circulaire car trajectoire est un cercle Tableau mouvement sinusoïdal	Oui Equilibre d'un corps solide
m041	18	LDD	Pas du tout		non	Oui Non Non	oui	Oui	Je ne suis pas sûr d'avoir compris la situation	Non Je ne vois nullement l'utilité pour la compréhension des vecteurs, les élèves comprennent bien les vecteurs sans le support de la physique.
m042	13	LMB	Peu		Oui Démonstration de certaines formules utilisées en physique.	Oui Oui Oui	Oui En maths un solide est en mouvement de translation s'il garde la même direction par rapport à une direction fixe donnée. Parallèle a même sens que direction.	Oui	NR	oui bilan des forces.
m043	6	LB	Peu	principe du levier	Oui Sous forme d'application d'activités d'introduction.	Oui Oui Oui	Oui	Non	NR	Non principe du levier avec la notion de barycentre. Je ne suis pas en mesure de trouver un exercice de physique qui en prend en compte ces compétences mais j'attire l'attention des élèves sur la décomposition des

										vecteurs en rapport avec le plan incliné.
m044	9	LB	Peu	Equilibre d'un solide.	Oui Sous forme d'application pour monter le rapport des maths avec la vie quotidienne (physique et chimie)	Oui Oui Oui	oui Idée de déplacement	Oui	Mouvement de translation	Non car je pars du parallélogramme qui est déjà connu des élèves.
m045	10	LB	Assez bien	notion de force moment d'inertie	Oui Illustrer les notions mathématiques étudiées par des exemples pris de la physique	Oui Oui Oui	Oui	Non	tableau mouvement de translation et de rotation La roue subit un mouvement de rotation	oui Pour illustrer la notion de vecteur sur un exple pratique Forces
m046	15	LTID	Peu	Vitesse et accélération Oscillation forces	Oui Sous forme d'application des concepts mathématiques	Oui Oui Oui	Oui puisque l'image d'un segment est un segment de même longueur et de support parallèle. La définition ci-dessus peut être discutée.	NR	Ne comprend pas le problème	oui En expliquant que c'est la même chose que le vecteur force en physique sauf qu'en physique le vecteur force a un point d'application ce qui n'est pas le cas pour le vecteur en maths.

Complément : réponses des profs de physique à « autres »

	Q6	Autres
P001	Oui NR Oui Oui	Je les rencontre très souvent pour les insister à insister sur certaines parties des maths qui sont en relation avec mon cours de physique ou de chimie
P002	NR NR Oui Oui	La spécialisation est un handicap pour des rencontres entre collègues permettant d'harmoniser les deux programmes.
P004	Oui NR NR Oui	C'est surtout avec le prof de maths des classes de Tle qu'il m'arrive d'avoir des discussions portant sur l'opportunité de traiter telle ou telle partie du cours de maths avant telle autre car en physique on en a besoin pour aborder certaines notions. seulement les profs de maths ont aussi certaines contraintes liées à la matière. Quant aux autres profs des autres classes il nous arrive rarement de discuter avec eux car le temps nous fait défaut.
P006	Non Non Non Non	Dans le programme de 1S les concepts mathématiques n'interviennent pas beaucoup.
P007	Oui Oui Oui NR	Très souvent c'est pour faire part au collègue mathématicien de notre difficulté de transférer les connaissances acquises an maths à la physique. Ainsi leur demande t-on d'étayer les concepts avec des applications dans les différents domaines de la physique.
P008	Oui Oui NR NR	Je rencontre le prof de maths pour voir sa progression ou pour lui demander de commencer par certains chapitres qui me sont indispensables.
P009	Non Non Non Non	Je les rencontre rarement. C'est une situation déplorable que j'ai trouvée au lycée. C'est vraiment dommage.
P011	Oui Oui Oui Oui	Collaboration avec les professeurs de maths pour traiter les outils utiles pour la physique (vecteurs, produit scalaire, dérivée,…) Faire en sorte que des exemples et exercices de maths soient tirés de la physique.

P012	Oui Non Oui Oui	Je discute avec mes collègues sur certains exercices ou comment approcher une leçon.
P013	Oui Oui Oui Non	Ce n'est pas un problème de communication. Le cours de maths qui doit prendre en charge les bases mathématiques indispensables au déroulement du programme de physique est souvent fait après. Par ailleurs nous pensons que ces bases sont connues des élèves sous forme de y = f(x) uniquement; il n'y a pas de diversification. par exemple une relation du type y= f(x) peut être mise sous forme x = f(t), v=f(y). Ainsi l'élève gagnerait à voir sa capacité d'investissement développée.
P014	Oui Non Oui Oui	Les discussions tournent autour des liens entre maths et physique. Les lois physiques sont formalisées par des concepts maths. Il est important que de telles discussions aient lieu entre profs de maths et des profs de sp pour la compréhension des élèves.
P016	Oui NR Oui Non	Ordre chronologique de progression dans sa matière afin de voir les notions dont j'ai besoin.
P020	Non Non Non Non	Jamais collaborer avec le collègue de maths.
P021	Oui Oui Oui Oui	Pour lui demander de développer des notions de maths dont j'ai besoin dans mon cours de physique.
P024	Oui Oui Non Oui	Niveau individuel de chaque élève et comment faire pour y remédier.
P028	Oui Oui Non Oui	Demander au prof de maths d'insister sur certaines parties du cours.
P029	Non Non Non Non	Rencontre rarement.

P034	NR NR NR NR	Je peux poser une question précise au prof de maths
P035	Oui Oui Oui Oui	Demander aux collègues de maths de faire si possible dès les premiers chapitres le calcul vectoriel et la relation barycentrique pour que les élèves puissent être en mesure de déterminer le centre d'inertie d'un système.
P037	Oui Oui Oui Oui	Discuter sur certains cas d'élève dont les notes en maths et en physique présentent un grand écart et essayer de comprendre le pourquoi et essayer d'y remédier.
P038	Non Non Non Non	Je fais moi-même les rappels de mathématique nécessaires à mon cours Car je dois faire prévaloir mes connaissances mathématiques dans ma discipline.
P039	Oui Oui Oui Oui	pour leur demander parfois d'éviter d'encrer les élèves dans des habitudes arbitraires. Notamment le choix des axes d'un repère et les noms donnés aux variables qui sont souvent x et y au lieu de t utiliser en physique.
P040	Oui Oui Oui Oui	On se voit de temps en temps car en mécanique (2S) nous avons besoin énormément des profs de maths (utilisation des vecteurs). En somme nous demandons régulièrement au prof de maths de revenir sur telle ou telle notion pour nous faciliter la tâche. On constate ensemble que maths et physique sont très liées. Les élèves qui ont un bon niveau en maths le sont aussi en physique.

Complément : réponses des profs de maths à « autres »

Prof Maths	Q4	Autres
m002	Oui Oui Oui	Pour parler de progression à toute fin utile: quelle notion souhaitez-vous que l'on traite en maths pour pouvoir mieux aborder votre prochaine leçon de physique.
m003	Oui Oui Oui	Niveau de la classe, comparer le niveau d'un élève en maths et en physique.
m005	Oui Non Oui	Pour discuter de l'intérêt ds deux matières On a un problème de cadre pour discuter le plus largement possible car on vient au lycée uniquement pour faire cours et rentrer.
m007	NR Oui Oui	Il arrive que les collègues physiciens nous interpellent sur certains thèmes mathématiques dont ils font usage dans leur enseignement.
m009	Oui Oui Non	leçon à la fin de l'aider au niveau des élèves.
m010	Oui Oui Oui	Souvent le prof de physique de la même classe par exemple en seconde S me demande si je pourrais commencer en premier lieu, les vecteurs et le produit scalaire.
m013	Oui Non Oui	Les profs de physique se plaignent des difficultés des élèves relativement à des notions mathématiques auprès de nous. Ils nous nous demandent des fois si nous pouvons aborder des parties du programme qui les intéressent.
m018	Oui Non Oui	Dans la plupart des cas c'est le collègue de physique qui nous interpelle sur les difficultés des élèves dans les résolutions mathématiques.
m022	Oui NR Oui	Maths qu'il aurait besoin au cours de physique.
m023	Oui Oui Oui	Pour éclaircir certaines définitions transversales. Pour faciliter le cours du prof de Physique.
m026	Oui Oui Oui	Niveau des élèves. Problème mathématique rencontré en physique.

m031	Oui Oui Oui	Qu'il précise les réalités physiques et que je montre les calculs mathématiques.
m033	Non Non Non	On ne parle des élèves qu'en conseil des classes.
m039	Oui Oui Oui	Autour de ses besoins sur les leçons prioritaires pour son cours de physique.
m041	Oui Non Non	Nous discutons surtout du niveau des élèves, pour comparer ceux qui sont bien en maths avec ceux qui sont bien en physique, très souvent on retrouve les mêmes noms.
m042	Oui Oui Oui	On ne peut faire de physique sans les maths.

Annexe 4 : Quelques réponses