

Enseignement-apprentissage du concept “force” et persistance des difficultés : Quelle influence mathématique?

SAID BOUMGHAR, DJAMEL KENDIL, SASSIA GHEDJGHOUJ, ALI LOUNIS

Laboratoire de Didactique des Sciences
École Normale Supérieure
Kouba, Alger
Algérie
sboumghar50@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La persistance des difficultés engendrées par les conceptions erronées sous-jacentes au concept force repérées chez l'apprenant, n'est pas due uniquement à ses préconceptions. Celles-ci sont parfois renforcées par la démarche mathématisée, adoptée, comme approche pédagogique, basée sur une réduction de questions de mécanique en problème de géométrie vectorielle, lors de la transposition du savoir savant au savoir à enseigner. Le plus grave dans ce contexte, est que l'acte pédagogique, au lieu de véhiculer un savoir construit, génère des conceptions erronées. Nous montrons dans cet article, avec des exemples à l'appui, que les outils langagiers (la définition de la force, la symbolisation, les situations physiques choisies, les exercices d'application) impliqués dans la théorie du contenu du savoir à enseigner, sont réduits de manière à s'adapter à ce modèle mathématique. Par conséquent, les erreurs de transmission de la force déplorées chez l'apprenant par les didacticiens, font objet d'enseignement dans les manuels scolaires de physique. De ce fait, la persistance des erreurs chez l'apprenant, n'est qu'évidente.

MOTS-CLÉS

Concept force, transposition, démarche mathématisée, difficultés des élèves, conceptions erronées

ABSTRACT

The persistence of difficulties caused by misconceptions under - underlying the concept force identified in the learner, is not caused only from his misconceptions, but also, sometimes and especially strengthened by the mathematical approach based on a reduction of the mechanical questions to vector geometry problems, during the transposition of learned knowledge to teach and taught knowledge. In this context, the worst here is that the didactic act instead of conveying knowledge built, generates erroneous conceptions. We show in this paper, with examples to support that language tools (the definition of force, symbolization, selected physical situations, and application's exercises) involved in the theory of content knowledge to teach are reduced in order to adapt to this mathematical model. Therefore, errors of transmission of force deplored in learner by didacticians are being taught in textbooks of physics. As a result, the persistence of errors in learner is than evident.

KEYWORDS

Concept force, didactic transposition, mathematical approach, students' difficulties misconceptions

INTRODUCTION

La conception et l'élaboration des projets d'enseignement sont des étapes cruciales vers le développement de stratégies efficaces d'enseignement. Cependant, il est nécessaire de procéder à un repérage et une analyse des obstacles à l'apprentissage qui peuvent être générés par le contenu du savoir à enseigner.

Dans ce contexte, la majorité des recherches en didactique sur les conceptions erronées (comme obstacles à l'apprentissage), sous-jacentes au concept force, étaient axées sur l'apprenant. Parmi elles, nous citons notamment celles faites par: Halloun et Hestenes (1985), Brasquet (1999), Ménigaux (1986), Viennot (1979, 1989, 1996), Dumas Carré et Goffard (1997). Ces recherches ont mis en évidence l'existence des préconceptions chez l'apprenant, relatives à l'interaction de contact, trahies par le point d'application de la force. Selon Ménigaux (1986), le fait que la force soit transmise ou transposée, constitue une erreur déplorée chez l'apprenant.

De notre recherche axée sur le savoir à enseigner transposé, il ressort que la démarche adoptée pour l'enseignement apprentissage du concept force, se résume en une réduction de questions de mécanique en problèmes de géométrie vectorielle. De ce fait à travers cette démarche mathématisée, les erreurs déplorées chez l'apprenant

par les didacticiens, telles que la transmission de la force, sa transposition, font objets d'un enseignement généralisé dans le contenu du savoir à enseigner, véhiculé dans les anciens manuels de physique, traitant de la mécanique. Par conséquent, le savoir à enseigner construit est erroné du point de vue physique.

Cette démarche a persisté durant tout le vingtième siècle et continue de l'être sous couvert de l'approche par compétence (Jonnaert, Ettayebi & Defise, 2009), dans certains pays, comme en Algérie, malgré les mises en garde des recherches en didactique. Selon, Jonnaert, Ettayebi & Defise (2009), le choix de l'approche par compétence, est motivé par la transformation progressive des pratiques des enseignants de modèles transmissifs vers des approches plus participatives, et la recherche du sens des apprentissages plutôt que des enseignements de contenus décontextualisés.

En effet, malgré l'échec de cette démarche traditionnelle, elle perdure au collège, pour des élèves âgés entre 14-15 ans dans le cadre de la récente refonte éducative algérienne (lancée en 2003), pour l'enseignement-apprentissage du concept « force », défini, en tant qu'entité mathématique (un vecteur libre). Ainsi, à travers cette démarche, nous relevons une appropriation de l'enseignement de la mécanique élémentaire, par les mathématiques. Cette appropriation se résume par une réduction de questions de mécanique en problèmes de géométrie vectorielles. Ces réductions affectent l'ensemble des outils langagiers du contenu du savoir à enseigner tels que la définition de la force, la symbolisation, la schématisation, les situations physique choisies, les exercices d'applications...et limitent ainsi, leurs rôles de facilitateurs pédagogiques.

Par conséquent une telle transposition ne fait que renforcer les difficultés engendrées par les conceptions erronées sous-jacentes au concept force, et soulève la problématique suivante : L'acte didactique sensé générer un savoir construit, génère, ou renforce les mêmes erreurs déplorées chez l'apprenant. L'hypothèse générale relative à la persistance des conceptions erronées chez l'apprenant, met en interrelation deux facteurs essentiels y contribuant: (a) Existence des conceptions erronées comme obstacle à la compréhension de la mécanique et (b) Renforcement des difficultés, par l'appropriation de l'enseignement-apprentissage du concept « force » par les mathématiques.

CADRE THÉORIQUE

Existence des conceptions erronées comme obstacle

Comme l'a souligné Astolfi et al. (1997): *«La didactique des sciences est un champ de recherche qui s'inscrit dans la lignée des travaux visant à préciser les objectifs de l'enseignement scientifique à en renouveler les méthodologies, à en améliorer les conditions*

d'apprentissage pour les élèves. Ce qui la fonde c'est la prise de conscience qu'il existe des difficultés d'appropriation qui sont intrinsèques aux savoirs, qu'il faut diagnostiquer et analyser avec une grande précision pour faire réussir l'élève ».

Dans ce cadre, il ressort que des conceptions erronées repérées chez l'apprenant, comme obstacle, la plus « nocive », est celle relative à l'interprétation de l'interaction de contact. Selon Halloun et Hestenes (1985): « *Communément les étudiants interprètent souvent le terme interaction, par un conflit métaphorique. Ils voient en l'interaction une "lutte" entre forces opposées. Il s'ensuit de la métaphore que la "victoire appartient au plus fort". De là, ils trouvent la 3ème loi de Newton irraisonnable et préfèrent la version du "principe dominant"* ». En effet, cette interprétation erronée de l'interaction, mène vers la confusion existante entre l'analyse d'une interaction de contact par la paire « action-réaction » et le bilan de force fait sur un des deux objets interagissant par la même paire (Viennot, 1989).

Selon Ménigaux (1986), il s'ensuit de cette confusion deux erreurs : transposition et transmission de la force. Ainsi:

- La force exercée par un objet (A) sur un objet (B) est appliquée en (A) et non à (B) (transposition de la force-attribution de la force à l'objet),
- Les forces se transmettent par l'intermédiaire d'objets. En effet, selon Dumas Carré et Goffard (1997) beaucoup d'élèves considèrent aussi, qu'une interaction existe entre deux objets par l'intermédiaire d'un troisième (fil, ressort, objet).

Il ressort de notre étude que ce raisonnement erroné, repéré chez l'apprenant, dénoncé par Ménigaux (1986) et Viennot (1975), se retrouve dans le contenu du savoir à enseigner véhiculé dans les manuels scolaires de physique, traitant de la mécanique. De ce fait, ce savoir transposé ne répond pas à l'attente de l'élève, ni même celle de l'enseignant. Souvent il y contribue aux difficultés, comme l'a souligné Viennot (1996): « *Qu'il s'agisse des difficultés liées à un contenu particulier de la physique ou d'une grande composante du raisonnement, l'intérêt des obstacles repérées chez nos étudiants, est souvent en résonance avec ce que nous trouvons dans la littérature d'enseignement ou de vulgarisation ou encore en nous-même* ».

Appropriation de l'enseignement-apprentissage par les mathématiques

Comme nous l'avons souligné dans ce qui précède, la démarche adoptée comme approche pédagogique, se résume en une réduction des questions de mécanique en problèmes de géométrie vectorielle. De ce fait, le savoir à enseigner construit selon cette démarche, n'interprète pas les phénomènes physiques réels, relevant de la mécanique. Comme l'a souligné Chevallard (1991): « *Il est plus d'une façon, pour un concept, de perdre son tranchant. Ce qui donne sa force explicative, sa valence*

épistémologique, ce sont les usages que nous savons en faire et que nous en faisons. Un concept peut s'user à force des mésusages. Il ne suffit pas, ainsi, de poser qu'il y a transposition didactique, et de laisser les choses en ce point». Cette réduction comme nous l'avons précisé, a affecté l'ensemble des outils langagiers du contenu du savoir à enseigner (définition de la force, le point matériel, la symbolisation, les situations physiques, les exercices d'applications...), relatif à l'enseignement-apprentissage du concept « force ». En effet, lors de sa définition, le concept force est réduit en un vecteur mathématique :

- Soit en omettant le point d'application le caractérisant, comme c'est le cas dans le nouveau programme de la quatrième année du collège issu de la récente refonte éducative algérienne,
- Soit en le définissant totalement par les quatre caractéristiques, mais en occultant le rôle du point d'application. Sa conversion en vecteur mathématique est trahie dans ce cas, par les transmissions dont il fait objet. C'est ce qui caractérise le savoir à enseigner véhiculé dans les anciens manuels (d'avant les années 95) de physique, traitant de la mécanique (chapitre statique).

Ainsi, le rôle du point d'application sensé localiser la force est occulté, en le réduisant en un point géométrique. Un point géométrique qui indique d'un côté, le début de l'ensemble des points constituant la longueur du vecteur, et d'un autre, le point matériel sur lequel le vecteur force est appliqué. Par conséquent le point géométrique (début du vecteur), superposé au point matériel, tous deux fusionnés sont réduits à leur tour en un point de concours de forces. Cela suffit ainsi, pour réduire l'enseignement de la statique des corps, en un enseignement de notions de géométrie vectorielles, caractérisée par des transmissions de forces à travers des fils, des ressorts, même des tiges, vers un « point matériel » réduit à son tour en un point de concours des forces qui s'équilibrent. Ces transmissions de forces, faussent totalement l'interprétation physique de l'interaction de contact et mènent souvent, vers la confusion, déplorée par Viennot (1996) chez l'apprenant, entre l'analyse de l'interaction de contact par la paire (action-réaction) et le bilan de force fait par la même paire sur un point matériel, dont la représentativité matérielle est souvent douteuse.

En effet, ce point de concours des forces, est le point où se joignent les directions des "vecteurs force", qui se situe parfois, en dehors du corps objet d'étude, devenant ainsi un point de l'espace géométrique, indispensable pour la construction du parallélogramme des vecteurs, déterminant la résultante des vecteurs forces transmis en ce point, pour cette finalité. Par conséquent, le corps objet d'étude, réduit en point matériel (souvent représenté par le centre de gravité), sous couvert de la conception

newtonienne, ne répond plus à cette conception, suite à sa réduction en un point géométrique. De ce fait, le point d'application de la force ainsi confondu, ne joue plus son rôle d'indicateur « de qui agit sur quoi », nécessaire pour la dénonciation des conceptions erronées sous-jacentes au concept « force ».

Ainsi, ces réductions successives ont fait de la statique des corps solides, une statique de forces qui s'équilibrent au lieu de l'équilibre du corps soumis à des forces. Et en dynamique, partant de ces notions de géométrie vectorielle comme pré-requis, on recherche plutôt les lois qui lient les mouvements aux forces qui les provoquent sans trop se soucier de l'aspect interactionnelle de la force, définie simplement par ses effets statique et dynamique. On finalise la réduction du concept force en vecteur mathématique, par la symbolisation suivante: \vec{F} , \vec{F}' , \vec{R} , \vec{R}' , \vec{T} , \vec{T}' ..., à caractère muet (\vec{F} peut indiquer indifféremment $\vec{F}_{A/B}$ ou $\vec{F}_{B/A}$), pour faciliter le formalisme mathématique.

Cette symbolisation, contribue aussi à son tour, au doute de « qui agit sur quoi ? », et par conséquent, constitue une difficulté pour l'enseignant lors de son évaluation. Ainsi, tout est réuni pour faciliter la réduction des questions de mécanique en problèmes de géométrie vectorielle : le vecteur force réduit en une entité mathématique, représenté par un symbole muet, et un point matériel réduit en un point géométrique. Comme conséquence de ces réductions, une construction d'exercices d'application sensés favoriser la compréhension de l'interaction, réduits à leurs tours en applications sur les notions de géométrie vectorielle, dont l'objectif est la détermination graphique de la résultante qui ne constitue pas en elle même une difficulté pour l'apprenant, par rapport à la détermination des « justes forces » la constituant, compte tenu des conceptions erronées sous-jacentes au concept « force ». De ce qui précède, cette démarche mathématisée, limite ainsi, le rôle des différents outils langagiers en tant que facilitateurs pédagogiques.

Malgré l'échec de cette démarche, qui a montré ses limites, il ressort que lors de l'introduction de l'enseignement-apprentissage du concept « force » au collège lors de la récente refonte éducative algérienne, lancée par le Ministère de l'Éducation National en 2003 (MEN, 2003), inscrite dans le cadre de l'approche par compétences, le concept force est définie simplement par trois éléments qui caractérisent le vecteur mathématique : sens, direction et intensité.

Omettre le point d'application dans la définition comme caractéristique dans le programme officiel du Bulletin Officiel de l'Éducation National (MEN, 2003), c'est négliger son rôle incontournable, faisant du vecteur force un vecteur lié, le différenciant du vecteur mathématique d'un coté, et d'un autre, comme élément dénonciateur des conceptions erronées. Réduire ainsi le vecteur force, en tant qu'entité mathématique pour des collégiens, âgés de 14-15 ans, c'est légitimer les transmissions et les transpositions qui en découlent, et par conséquent, assoir les

préconceptions des collégiens sur le sujet, qui vont être ainsi mobilisées en résolution de problèmes.

Cette démarche adoptée dans le cadre de cette nouvelle approche n'est autre qu'un maintien d'une manière implicite de la « traditionnelle démarche », malgré les orientations tracées dans le référentiel du programme émanant du Ministère de l'Éducation National (MEN, 2003), dans le cadre de cette refonte.

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie suivie, consiste en une analyse, du contenu du savoir à enseigner relatif au concept force, véhiculé dans les différents manuels scolaires de physique, français, algériens (anciens, nouveaux), mettant en exergue, l'influence de la démarche mathématisée dans la persistance des difficultés chez l'apprenant.

Le choix d'anciens manuels français de physique du secondaire, traitant de la mécanique, justifie quant au cheminement historique de la démarche adoptée, dans les manuels algériens, car les programmes algériens, ainsi que les manuels (même traduits), des sciences physiques sont généralement identiques aux programmes français. Par conséquent les concepteurs (enseignants, inspecteurs...), actuels des programmes de physique et des manuels scolaires, faisant parti des Groupes Spécialisés Disciplinaires (GSD), ont subi ces programmes et utilisé ces manuels. A titre d'exemple les manuels de physique Français de Cessac et Trèherne (1958, 1966), des classes de seconde et de terminale scientifiques, tout comme celui de Guinier et Guimbal (1970), étaient traduits, et utilisés, comme manuels officiels au delà des années 90.

Notre analyse concerne aussi, le contenu du programme officiel (M.E.N, 2003), pour l'unité mécanique, ainsi que le contenu du manuel scolaire (M.E.N, 2006-2007), issus de la dernière refonte éducative algérienne, destinés pour des collégiens, âgés de 14-15 ans, mettant en évidence, les retombées des recherches en didactique, sur la démarche adoptée pour l'enseignement-apprentissage du concept « force », dans le cadre de cette nouvelle approche (Jonnaert, Ettayebi & Defise, 2009).

RÉSULTATS

De notre analyse, on a fait ressortir, tout ce qui s'écarte d'une compréhension de la théorie, telle qu'on pourrait l'attendre de l'enseignement, ainsi que les erreurs induites par la réduction de questions de mécanique en problèmes de géométrie vectorielle, déplorées chez l'apprenant.

Les manuels concernés par l'analyse sont des anciens manuels de physique, du collège et lycée, traitant de la mécanique. Ils sont considérés comme anciens par

rapport aux résultats et aux orientations des recherches en didactique des sciences sur la mécanique et en particulier sur le concept force. _ titre d'exemples, les travaux de:

- Ménigaux (1986), sur la schématisation des interactions,
- Viennot (1996), proposant le schéma éclaté, facilitant le choix du système d'étude et la représentation de la force,
- Dumas Carré et Goffard (1997), proposant le Diagramme Objets Interaction (DOI), mettant en évidence à travers un inventaire, toutes les interactions existantes entre objets qui participent à la situation décrite par l'énoncé,
- Jiménez-Valladares et Perales-Palacios (2001), sur les difficultés des lycéens, liées à la représentation graphique du concept force,

Partant de toutes ces résultats de recherches, nous avons analysés les manuels de physique français, traitant de la mécanique, utilisés en Algérie, tels que ceux de : Lafay (1953), Cessac et Treherne (1958, 1966), Guinier et Guimbal (1970), Basquin (1971), Martinuzzi (1973), Gaspard et Mols (1992). Pour mettre en évidence l'incidence de la démarche adoptée dans ces manuels, sur les manuels algériens.

Dans ce cadre, comme anciens manuels de physique, algériens traitant de la mécanique, nous avons analysé les suivants : le manuel scolaire de physique destiné pour les lycéens, âgés de 15-16 ans, édité par l'Institut de Publication National (M.E.N, 1986), le manuel scolaire de physique destiné aussi pour les lycéens, âgés de 15-16 ans, édité par l'Office National des Publications Scolaires algériens (M.E.N, 1999), le manuel de physique et de l'éducation technologique pour des collégiens algériens, âgés de 11-12 ans (M.E.N, 2000), le manuel scolaire de physique destiné pour des lycéens âgés de 16-17 ans (M.E.N, 1998), le manuel scolaire de physique, destiné pour des lycéens âgés de 17-18 ans (M.E.N, 1993).

Comme nouveaux manuels algériens, issus de la dernière refonte éducative, nous avons analysé le manuel de physique et de technologie, destiné pour des collégiens, âgés de 14-15 ans édité par (M.E.N, 2006-2007), où est introduit l'enseignement-apprentissage du concept force dans « l'unité mécanique ».

Résultats de l'analyse des manuels français

Nous donnerons quelques exemples, relevés des contenus des savoirs à enseigner des manuels, mettant en exergue, les réductions des questions de mécanique en problèmes de géométrie vectorielle. Ces réductions affectent l'ensemble des outils langagiers comme nous l'avons souligné ci-dessus tels que : la définition de la force, les situations physiques choisies, le point matériel, la symbolisation de la force, les exercices d'applications.

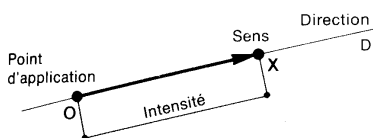
Définition de la force

Dans la majorité des manuels de physique français, cités ci-dessus, la force est définie par ses quatre caractéristiques (point d'application, direction, sens et grandeur), mais cela ne l'empêche pas d'être transmise. Le rôle du point d'application, faisant de la force un vecteur lié, localisé est occulté. Par la suite on ne parle que de ses effets statiques (déformation) ou dynamique (provoquant un mouvement ou contribuant à l'équilibre).

L'exemple suivant (figure 1), extrait du manuel de Gaspard et Mols (1992), illustre bien la situation. Nous avons en premier lieu, une définition de la force par les quatre caractéristiques à la page suivante (p. 34) du manuel, malgré la définition complète de la force donnée, nous constatons, des transmissions des forces, des masses, à travers des fils, vers un point géométrique (o), (figure 2). Ainsi le rôle du point d'application de la force est occulté.

FIGURE 1

4.1.2. Représentation vectorielle de ces forces



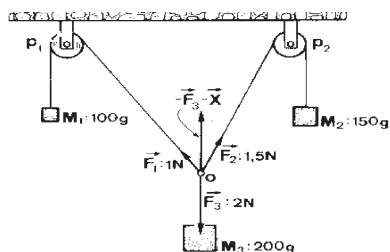
Ces forces sont schématisées par des flèches appelées **vecteurs**. Ce mode de représentation est très commode : il permet de stocker dans un dessin très simple les quatre caractéristiques de l'action d'une force :

- la **direction** ou ligne d'action de la force (la droite D),
- le **sens** selon lequel s'exerce la force,
- le **point d'application** de la force (origine O du vecteur),
- l'**intensité** de la force, sa grandeur (longueur du segment OX)

Le symbole \vec{F} utilisé pour désigner une force rappelle le caractère vectoriel de cette grandeur physique.

Définition de la force par les quatre caractéristiques, extraite du manuel de physique de B. Gaspard et J. Mols, (1992), p. 33

FIGURE 2



Dans le **montage expérimental** ci-contre, reconstituant la situation de forces dans laquelle se trouvent les doigts de l'archer, le **point O est dans une position d'équilibre stable** : si on l'écarte de cette position en soulevant une des 3 masses par exemple, le système va osciller et très rapidement reprendre sa position initiale. La position adoptée par le point O n'est donc pas due au hasard : elle est régie par une loi physique que nous allons nous efforcer de découvrir.

Situation physique courante, illustrant la réduction des questions de mécanique en problème de géométrie vectorielle, extraite du manuel de physique de B. Gaspard et J. Mols, (1992), p. 34

En effet, nous constatons de la figure 2, que les poids sensés être appliqués sur les masses suspendues sont réduits en forces, transmises vers un point (o), un point géométrique, pour en faire un équilibre de trois forces concourantes.

Point matériel réduit en un point de concours des forces

De ce qui précède, le point matériel dans ces considérations ne répond plus à la conception newtonienne, car il n'a pas une représentativité matérielle. Ce point matériel, ainsi réduit en un point géométrique (lieu de concours des forces), disparaît en tant que tel.

La visée pratique de cette réduction est bien explicitée dans le cadran de la (figure 2), par les auteurs : « La position adoptée par le point (o) n'est donc due au hasard : elle est régie par une loi physique que nous allons efforcer de découvrir ». La loi physique dont les auteurs font allusion, n'est autre que la loi du parallélogramme, qui

FIGURE 3

Analyse de cette réalité physique

- Le système est libre de se mouvoir et pourtant il reste en équilibre ; on n'observe ici aucun des effets d'une force ; ce qui est étrange, car le point O est soumis à l'action de 3 forces bien réelles \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 qui sont les forces pesanteurs respectivement des masses M_1 , M_2 , M_3 .

On peut donc dire ici que les forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3 s'équilibrent. (Remarque : ces 3 forces sont transmises au point O par l'intermédiaire des cordes et des 2 poulies fixes qui ne font que changer les directions des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2). Vous avez appris, pendant votre degré d'observation, que la pesanteur terrestre s'exerçant sur une masse de 100 grammes a comme intensité environ 1 Newton (1 N) \Rightarrow les grandeurs respectives de \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3 sont 1 N, 1,5 N et 2 N. Ces 3 forces sont représentées à l'échelle dans le schéma ci-avant.

- Le point O adoptant une position d'équilibre stable, on peut supposer que \vec{F}_3 contrecarre l'action conjuguée des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 .

Appelons \vec{X} la force unique (appelée Résultante) exerçant la même action que les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 réunies.

Dans ce système en équilibre \vec{F}_3 contrebalance l'action de \vec{X} résultante de \vec{F}_1 et \vec{F}_2 . La force \vec{F}_3 serait donc la force opposée à \vec{X} vectoriellement parlant.

Dessignons ce vecteur \vec{X} opposé à \vec{F}_3 (même direction, même point d'application, même grandeur que \vec{F}_3 mais de sens contraire).

Notre hypothèse explicative peut se traduire vectoriellement par :

$$\vec{X} = -\vec{F}_3 \Rightarrow \vec{X} + \vec{F}_3 = \vec{0} \Rightarrow (\vec{F}_1 + \vec{F}_2) + \vec{F}_3 = \vec{0} \Rightarrow \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$$

La justification de l'équilibre stable observé peut s'énoncer comme suit :

« Le point O est en équilibre parce que la résultante des forces qui s'y appliquent est nulle. »

- Sur le schéma, la force \vec{X} résultante de \vec{F}_1 et \vec{F}_2 apparaît comme étant la diagonale issue de O du parallélogramme construit sur \vec{F}_1 et \vec{F}_2 . L'hypothèse émise donne donc naissance à une règle très commode permettant de trouver la résultante de 2 forces issues d'un même point :



« La Résultante de 2 forces issues d'un même point est la force issue de ce même point et dont la direction, le sens et la grandeur sont donnés par la diagonale du parallélogramme construit sur les 2 forces composantes. »

Réductions des questions de mécanique en problème de géométrie vectorielle, extraite du manuel de physique de B. Gaspard et J. Mols (1992), p. 35

permet la détermination vectorielle de la résultante des forces concourantes, explicitée en page 35.

En effet à travers leur propos (figure 3), les auteurs mettent bien en évidence l'influence de la démarche mathématisée, adoptée comme approche pédagogique, pour l'enseignement-apprentissage du concept « force », basée comme nous l'avons souligné sur la réduction des questions de mécanique en problème de géométrie vectorielle.

Cette approche pédagogique, perpétue implicitement « l'école du fil » de la fin du XVI siècle qui cherche à tout ramener, selon Henri Poincaré (1902/1968, p. 125-128) : « à la considération de certains systèmes matériels de masse négligeable, envisagés à l'état de tension et capables de transmettre des efforts considérables à des corps éloignés, système dont le type idéal est le fil. Un fil qui transmet une force quelconque, s'allonge sous l'action de cette force ; la direction du fil nous fait connaître la direction de la force, dont la grandeur est mesurée par l'allongement du fil ».

Ce genre de raisonnement continu à être véhiculé dans tous les manuels de physique, traitant de la statique, tels que les manuels de Cessac et Trèherne (1958), classe de seconde en page 30, celui de Basquin (1971) en page 177,...

Situations physiques choisies

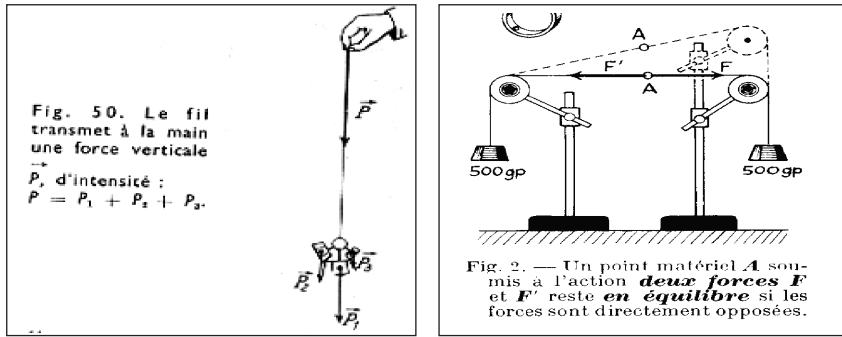
La plus part des situations expérimentales véhiculées dans les manuels de physique, traitant de la mécanique (chapitre statique), sont composées d'éléments suivants: masses, fils, poulies et support. Les masses sources des forces transmises, servent donc à tendre les fils, jouant le rôle de direction à travers lesquelles les forces sont transmises.

L'anneau, sensé représenté « le point matériel » objet d'étude, est réduit en un **point géométrique**, le point (o), où concourent les forces transmises. Les deux cas de figure ci-dessous (figure 4) illustrent bien la situation:

- Une force ayant une intensité et une direction imposée, comme sur l'image de gauche, extraite du manuel de Cessac et Trèherne classe de seconde, en page 30. Nous constatons que les poids en tant que forces, sont transmis par l'intermédiaire du fil vers la main.
- L'équilibre de deux forces (l'image du milieu), mettant en évidence, le cas d'équilibre de deux forces concourantes, extraite du manuel de Basquin page 117, (chapitre statique). Là aussi, les forces sont transmises des masses, vers le point (A), pour en faire un équilibre de deux forces directement opposées.

Dans toutes ces situations présentées, les masses des fils sont négligées. Ceci ne peut se faire qu'en mathématique où les fils représentent des directions et le point matériel, un point géométrique. Ces réductions d'objets physiques ne peuvent être acceptées

FIGURE 4



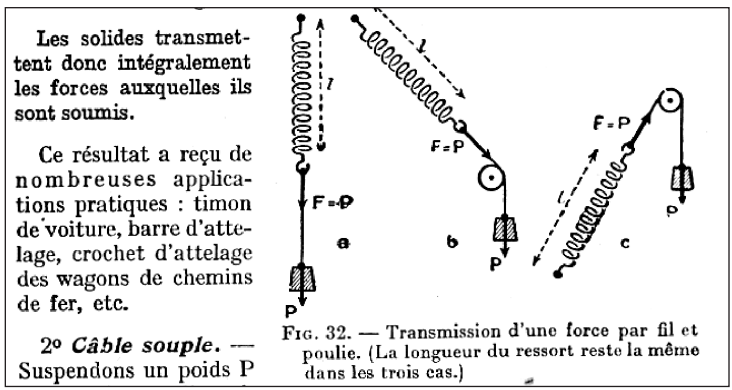
Cas de transmission de forces : l'image de gauche est extraite du manuel J. Cessac et G. Teherne (1958) classe de seconde, p. 30, celle de droite, extraite du manuel de R. Basquin (1971), p. 117

en physique, car il arrive parfois de se retrouver devant une situation de rupture de force de liaison quand la force appliquée à l'extrémité du fil est intense.

Il ressort de cette analyse, que les transmissions de force d'un corps vers un autre par l'intermédiaire d'un troisième, dénoncée par Dumas Carré & Goffard (1997) chez l'apprenant, sont belles et bien véhiculées dans le contenu du savoir à enseigner des manuels de physique.

Ce qui est grave, c'est cette généralisation de la transmission des forces par les solides considérant ainsi leur masses négligeables, quelque soit la situation, comme c'est indiqué en (figure 5).

FIGURE 5



Les solides transmettent donc intégralement les forces auxquelles ils sont soumis.

Ce résultat a reçu de nombreuses applications pratiques : timon de voiture, barre d'attelage, crochet d'attelage des wagons de chemins de fer, etc.

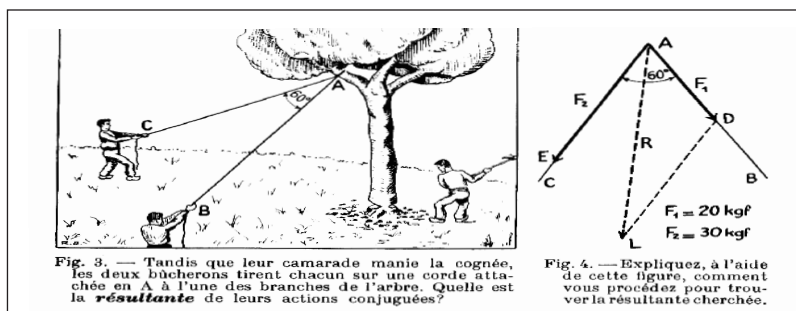
2° Câble souple. — Suspendons un poids P

FIG. 32. — Transmission d'une force par fil et poulie. (La longueur du ressort reste la même dans les trois cas.)

Généralisation de la transmission des forces par des solides, situation extraite du manuel de P. Lafay (1953), p. 19

Admettre une transmission de la force par l'intermédiaire des solides tout en négligeant leurs masses, constitue une aberration en physique. Si les situations présentées en (figure 4), sont considérées comme expérimentales, la situation présentée dans la (figure 6), extraite du manuel de mécanique de Basquin (1971), illustre un fait réel, façonné de manière à faciliter la réduction des questions de mécanique en problèmes de géométrie vectorielle.

FIGURE 6



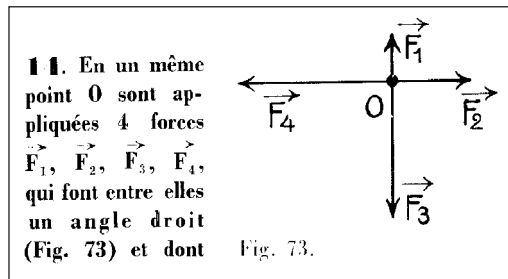
Un fait réel, illustrant l'appropriation de l'enseignement-apprentissage du concept « force » par les mathématiques, extraites du manuel de R. Basquin (1971), p. 186

Nous remarquons sur cette figure, que les forces sont transmises vers le point (A), représentant la branche, objet d'étude. Ce point (A) selon l'interprétation de l'auteur, n'a rien à voir avec la conception newtonienne du point matériel, compte tenu du poids de la branche comme force qui ne peut être négligée devant les forces appliquées par les fils. En réalité cette branche n'est pas simplement soumise aux deux forces, comme c'est indiqué, mais à trois forces, compte tenu du poids de la branche. La visée pratique de cet exemple, est l'application de la loi du parallélogramme pour la détermination de la résultante de deux forces, faisant un angle quelconque entre elles.

Nature des exercices proposés

Tous les exercices d'application, de statique ou de dynamique, proposés dans les "anciens manuels" de physique, témoignent l'appropriation de l'enseignement de la mécanique par les mathématiques en toute sa rigueur. Il est peu fréquent de relever, un exercice représentant une situation physique réelle, traduisant une interaction de contact. La majorité des exercices d'application proposés, sont sous forme de données mathématiques (un point matériel, soumis à des vecteurs forces $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots$) comme en témoigne l'exemple suivant (figure 7), extrait du manuel de Guinier et Guimbal (1970), page 60, chapitre « Equilibre d'un solide libre ».

FIGURE 7



Réduction des questions de mécanique en problème de géométrie vectorielle, extraite du manuel de G. Guinier et R. Guimbal (1971), p. 60

Cet exercice proposé n'a rien à voir avec l'équilibre d'un solide soumis à des forces concourantes, sensé être une application, mais illustre bien la réduction des questions de mécanique en problèmes de géométrie vectorielle. Ce genre d'exercices n'améliore en rien l'enseignement de la mécanique.

Simplification de langage

La simplification du langage par les auteurs de manuels n'est autre que l'expression d'un langage mathématique, exprimant leur démarche mathématisée. Cette démarche est clairement exprimée par Basquin (1971) en page 184, où il déclare : « *Pour simplifier le langage, au lieu de forces appliquées à un point matériel, nous dirons simplement forces concourantes* ». Par conséquent et par souci de « simplification de langage », l'auteur fait du point matériel, un point géométrique où les forces concourent.

Et encore, sur la même page, nous relevons comme propos : « *pour la même raison, nous dirons que des forces s'équilibrent, ou qu'elles sont en équilibre, ou encore qu'elles forment un système de forces en équilibre, lorsqu'en les appliquant simultanément à un point matériel en repos, ou en les supprimant si elles sont déjà appliquées, l'état d'équilibre du point n'est pas modifié* ». À travers ces simplifications de langage, l'auteur renforce l'idée de l'appropriation de l'enseignement- apprentissage de ce concept par les mathématiques sous plusieurs aspects :

- Il parle de forces qui s'équilibrent à la place du corps ou du point matériel qui s'équilibre, sous l'effet des forces qui lui sont appliquées.
- Dire que « *des forces s'équilibrent* » ou « *elles sont en équilibre* » par simplification de langage confirme que l'auteur manipule des objets mathématiques.
- Cette possibilité de supprimer les forces appliquées au point « *matériel* », sans pour autant modifier son état d'équilibre n'est pas possible en physique sauf en mathématique où le point matériel représentant un point géométrique, n'a pas une représentativité matérielle et les forces comme vecteurs mathématiques, sont des entités abstraites.

Symbolisation du vecteur force

D'une manière générale comme il ressort sur toutes les figures de situations ci-dessus, la symbolisation utilisée est ($\vec{F}_1, \vec{F} \dots$) ou ($\vec{F}_1, \vec{F}' \dots$). C'est une symbolisation muette, caractérisant l'entité mathématique. Elle facilite certainement, le formalisme mathématique, mais contribue au doute de quelle force agit sur quel objet ?

Résultats de l'analyse des manuels algériens

Cette analyse se situe à deux niveaux. D'un côté, nous avons les manuels algériens, qualifiés d'anciens, par rapport à la refonte éducative, lancée en 2003, pour l'ensemble des années (de l'école primaire au lycée). Ces manuels sont généralement des traductions des manuels français. Il ressort de ce fait, la même démarche mathématisée, adoptée dans les manuels algériens, pour l'enseignement- apprentissage du concept « force ». Par conséquent toutes les erreurs induites par la conception erronée de l'interaction de contact relevées dans l'analyse des manuels français, que nous avons mis en exergue précédemment, sont reproduites dans les manuels algériens, dont voici quelques exemples :

- Confusion de l'analyse de l'interaction par la paire action-réaction et le bilan de force par la même paire sur un des objets interagissant relevé du manuel de manuel de physique, pour des lycéens âgés de 15-16 ans, édité par (M.E.N, 1999) en page 172.
- La transmission de la force d'un corps vers un autre par l'intermédiaire d'un troisième, relevée dans le manuel de physique de la première année secondaire (M.E.N, 1986), en page 34.

D'un autre, l'analyse concerne :

- La démarche préconisée dans le programme officiel, dans le cadre de l'approche par compétence, pour l'unité « mécanique » (où l'étude de l'interaction est introduite au collège, pour des élèves âgés de 14-15 ans),
- Le contenu du savoir à enseigner du manuel exécutant ce programme, mettant en exergue les inconvénients de cette démarche.

Il ressort de notre analyse ce qui suit.

Résultats de l'analyse du programme officiel

Dans le programme officiel (M.E.N, 2003), en page 93, la force est définie simplement par trois caractéristiques (direction, sens et norme), précisant dans le document, que le point d'application est « hors programme ». En effet, en page 93 du programme officiel, nous lisons ceci : « La force est représentée par un vecteur dont les caractéristiques sont les suivantes (direction, sens et intensité). L'intensité de la force est mesurée à l'aide d'un dynamomètre. L'unité de la force est le Newton de symbole (N) ». Et comme

recommandation, nous trouvons ceci : «*Nous modélisons l'action mécanique (parmi les actions réciproques) par la force représentée par un vecteur. La détermination du point d'application de la force est hors programme. Toute représentation du vecteur force sur le système est acceptée. Nous symbolisons l'action du système mécanique (A) sur le système (B) par : $\vec{F}_{A/B}$* ». Selon cette définition, le fait d'omettre le point d'application, le concept force est systématiquement réduit en une entité mathématique, un vecteur libre.

Dans ce cadre, Dorier (2000), distingue les vecteurs mathématiques, géométriques (ceux qui sont utilisés au collège) des vecteurs physiques. Un vecteur mathématique est généralement défini par trois caractéristiques (norme, sens et direction). Alors qu'un vecteur physique est défini, lorsqu'il s'agit d'une force, non seulement par ces trois caractéristiques, mais également par son point d'application (c'est ce qu'on appelle un vecteur lié).

Le fait aussi, de permettre (comme s'est indiqué dans le programme officiel), « toute représentation du vecteur force sur le système », c'est permettre implicitement, les transmissions ou transpositions des forces déplorées chez l'apprenant, par les recherches en didactique citées ci-dessus. Par conséquent, cette démarche préconisée pour l'enseignement-apprentissage du concept « force », à ce niveau, dans le cadre de cette approche, fait de l'enseignement de la mécanique un enseignement impossible, compte tenu du rôle important du point d'application, dans l'étude de l'interaction de contact, qui souvent est source de difficultés, compte tenu des conceptions erronées sous-jacentes au concept « force ».

Résultats de l'analyse du manuel

Nous sommes intéressés dans notre analyse à « l'unité mécanique » du manuel issu de la refonte éducative. Cette unité est composée des chapitres suivants : L'approche primaire de la force comme vecteur ; L'action de la terre sur un système mécanique : la terre ; La force et le mouvement ; Le frottement. Comme s'est prescrit dans le programme officiel, le concept force est défini dans ce manuel, sans le point d'application, autrement dit comme une entité mathématique, un vecteur.

FIGURE 8

. يمثل التأثير الميكانيكي المتبادل بين جسم ميكانيكية بـ " مخطط أجسام متأثرة " .
 . نمذج فعل جملة ميكانيكية (A) على جملة ميكانيكية (B) بقوة تمثلها بالشعاع $F_{A/B}$:
 - حامله: منحى الفعل
 - جهته: جهة الفعل.
 - طويلته: تناسب مع قيمة القوة.
 . يمكن أحيانا قياس قيمة القوة بالريعة.
 . وحدة قياس قيمة القوة في النظام الدولي (SI) هي النيوتن. ويرمز لها بـ: (N).

Définition mathématique du concept « force » extraite du manuel M.E.N, 2006-2007, p. 14

La (figure 8), extraite du manuel de la quatrième année du collège (M.E.N, 2006-2007), illustre bien le cas.

Voici la traduction de ce qui est mentionné sur l'image de la (figure 8) :

« On représente l'action mécanique réciproque entre systèmes mécaniques par le Diagramme-Objet-Interaction. On modélise l'action du système (A) sur le système (B) par une force représentée par le vecteur $\vec{F}_{A/B}$:

- De direction : la direction de l'action,
- De sens : le sens de l'action,
- De grandeur : proportionnelle à la valeur de la force.

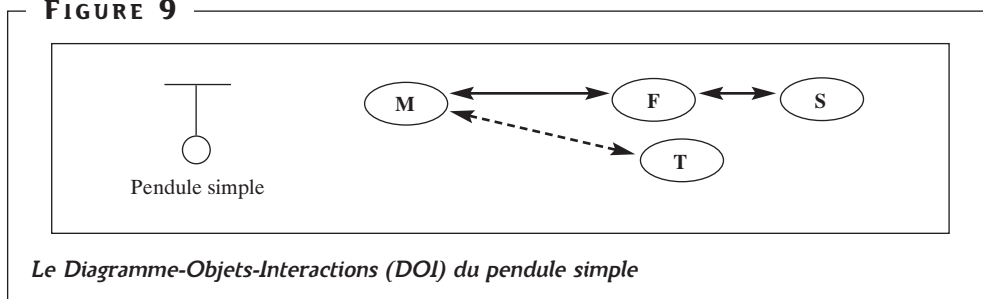
Il est possible parfois de mesurer la valeur par un dynamomètre. L'unité de mesure de la valeur de la force dans le système international (SI) est le Newton (N) ».

On dehors du fait que la force soit définie simplement par (la direction, sens et grandeur), éléments caractérisant le vecteur mathématique et comme toute représentation du vecteur « force » est acceptée selon le programme officiel, on a proposé dans ce cadre, pour la représentation de la force, le Diagramme Objet Interaction (DOI). Le DOI est une schématisation de recherche (Caillot & Dumas Carré, 1987). C'est une représentation graphique qui a pour but de préparer les apprenants à faire un choix d'un système et du bilan de forces agissant sur lui, dans le processus de résolution de problème.

L'objectif est de faire l'inventaire de toutes les interactions existant entre les objets qui participent à la situation décrite par l'énoncé. Cet inventaire est présenté sous forme d'un schéma synthétique qui doit contenir un maximum d'informations, de sorte que l'élève puisse poursuivre, sa résolution. Comme le point d'application de la force est omis, dans le programme officiel, sous prétexte que c'est « hors programme », la question « de quelle force agit sur quel système ? », reste entière.

Le DOI comme nous verrons dans ce qui suit (figure 9), ne règle pas le problème de la représentation de la force. Il met en évidence, que les actions réciproques entre systèmes interagissant. À titre d'exemple, le DOI de la figure 9, représente les actions réciproques des différentes interactions entre systèmes, composant le pendule simple.

FIGURE 9



Les systèmes définis de la situation sont : le support (S), la masse (M), le fil (F), et la terre (T), comme c'est indiqué sur la figure ci-dessous.

Les actions mécaniques réciproques de l'interaction de contact, sont représentées par une double flèche à trait plein, et les actions réciproques de l'interaction à distance, par une double flèche en pointillée, avec une représentation symbolique des systèmes décrits par l'énoncé, par une sphère. Comme nous le remarquons la double flèche, quelle soit en trait plein, ou en pointillée, ne représente que la réciprocité de l'action, quelle soit de contact ou à distance. De ce fait, on ne peut la considérer comme étant la représentation de la force, du fait de l'absence du point d'application, indispensable pour sa localisation.

Comme représentation de la force, le DOI est vite abandonné en France, car selon Brasquet (1999) : « *Toutefois, ce type de diagramme devient peu lisible quand le nombre d'interactions augmente. De plus l'aspect non figuratif du schéma demande à l'élève un niveau d'abstraction supplémentaire par rapport aux autres méthodes. Enfin la question des points d'application des forces représentées reste entière.* ».

CONCLUSION

La majorité des recherches en didactique, axées sur l'apprenant qui ont eu lieu depuis les années 1980, ont porté le fardeau sur l'apprenant quant à l'existence et la persistance des difficultés engendrées par les conceptions erronées sous-jacentes à un concept donné, considérant que le savoir à enseigner construit, comme « parfait ». Quant à celles relatives au concept force, il ressort de notre étude que leur persistance chez l'apprenant peut s'expliquer entre autres, par l'implication de la démarche mathématisée, adoptée comme approche pédagogique, pour l'enseignement-apprentissage de ce concept. Comme nous l'avons mis en exergue, les erreurs trahissant les conceptions erronées déplorées chez l'apprenant, font bien objets d'enseignement dans le contenu du savoir à enseigner, sous l'influence de cette démarche. En conclusion, n'y a-t-il pas une part de responsabilité des concepteurs des manuels et de ce fait de la physique enseignée, quant à la persistance des difficultés chez les apprenants?

RÉFÉRENCES

- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y. & Toussaint, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences* (Paris-Bruxelles: De Boeck, Lancier S. A).
- Basquin, R. (1971). *Mécanique, première partie* (Paris: Librairie Delagrave).
- Brasquet, M. (1999). Action-interaction et schématisation. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 816, 1221-1236.
- Caillot, M. & Dumas Carré, A. (1987). PROPHY : un enseignement d'une méthode de résolution

- de problèmes de physique. In J.-F. Richard (Éd.) *Résolution de problèmes en Mathématiques et en Physique* (Paris: I.N.R.P), 199-244.
- Chevallard, Y. (1991). *Un exemple d'analyse de la transposition didactique* (Paris: La Pensée Sauvage).
- Cessac, J. & Trèherne, G. (1958). *Physique, classe de seconde (sections A', C, M, M')* (Paris: Fernand Nathan).
- Cessac, J. & Trèherne, G. (1966). *Physique, classe de terminale C* (Paris: Fernand Nathan).
- Dorier, J. L. (2000). Recherche en histoire et en didactique des mathématiques sur l'algèbre linéaire. Perspectives théoriques sur leurs interactions. *Les cahiers du laboratoire Leibniz*, 12 (Grenoble: France).
- Dumas Carré, A. & Goffard, M. (1997). *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique* (Paris: Armand Colin).
- Gaspard, D. & Mols, J. (1992). *Physique 3 par la méthode scientifique*. (Bruxelles: De Boeck-Wesmael S.A.)
- Guinier, G. & Guimbal, R. (1970). *Physique classe de seconde C et T* (Paris: Bordas).
- Halloun, I. & Hestenes, D. (1985). Common sense concept about motion. *American Journal of Physics*, 53(11), 1056-1065.
- Jiménez-Valladares, J.-D. & Perales-Palacios, F.-J. (2001). Graphic representation of force in secondary education: analyse and alternative educational proposal. *Physics Education*, 36(3), 227-235.
- Jonnaert, P. Ettayebi, M. & Defise, R. (2009). *Compétence : une définition toujours provisoire et une triple logique : Curriculum et compétence, un cadre opérationnel* (Bruxelles : De Boeck).
- Lafay, P. (1953). *Physique, classe de seconde C et M* (Paris: Librairie Armand Colin).
- Martinuzzi, S. (1973). *Cours de Physique, CB-BG, PCEM, DEUG* (Paris: Ediscience)
- Ménigaux, J. (1986). La schématisation des interactions en classe de troisième. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 683, 761-778.
- Ministère de l'Éducation Nationale (1986). *Manuel de physique de la 1ère année secondaire* (IPN: Alger).
- Ministère de l'Éducation Nationale (1993). *Manuel de physique de la 3ème année secondaire* (ONPS: Alger).
- Ministère de l'Éducation Nationale (1998). *Manuel de physique de la 2ème année secondaire* (ONPS: Alger).
- Ministère de l'Éducation Nationale (1999). *Manuel de physique de la 1ère année secondaire* (ONPS: Alger).
- Ministère de l'Éducation Nationale (2000). *Manuel de physique de la 7ème année fondamentale* (ONPS: Alger).
- Ministère de l'Éducation National (2003). *Curriculum officiel : programme de physique de la quatrième année moyenne du collège, et du document d'accompagnement* (BOEN-Alger).
- Ministère de l'Éducation Nationale (2006-2007). *Manuel de physique et de technologie de la classe de 4ème année moyenne du collège* (ONPS: Alger).
- Poincaré, H (1902/1968). *La science et l'hypothèse* (Paris: Flammarion).
- Viennot, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire* (Paris, Hermann).
- Viennot, L. (1989). Bilan de forces et loi des actions réciproques-Analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 951-971.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique la part du sens commun*. (Bruxelles: De Boeck).