

EXPLORATION DES CONDUITES D'ÉLÈVES LORS DE LA MISE EN ŒUVRE DE LA DEUXIÈME LOI DE NEWTON EN TERMINALE SCIENTIFIQUE AU BENIN

Résumé

Les lois de Newton occupent une place importante dans les programmes d'étude de physique des classes de terminales scientifiques au Bénin. Lors des résolutions de problèmes, nécessitant l'application de la deuxième loi de Newton, le passage d'un système physique modélisé ou semi-modélisé aux relations mathématiques semble poser des difficultés aux élèves. L'exploration des conduites chez ceux-ci a été faite à la lumière de la théorie des champs conceptuels. Elle révèle que certaines difficultés proviennent essentiellement de la non maîtrise de la plupart des invariants opératoires de type fonction propositionnelle, c'est-à-dire les concepts-en-acte et les propriétés-en-acte, sur lesquels repose tout le reste du raisonnement de l'application de cette loi.

Mots-clés : Loi de Newton, schème, concepts-en-acte, propriétés-en-acte, difficultés d'apprentissage.

Abstract

Newton's laws occupy an important place in the twelfth graders physical sciences study programs in the Republic of Benin. When solving problems requiring the application of the Newton's second law, the transition from a modeled or semi-modeled physical system to mathematical relations seems to pose difficulties to students. The exploration of the sources of difficulties has been made in the light of conceptual field theory. It reveals that certain difficulties stem mainly from the non-mastery of most of the operative invariants of the propositional function type, which are, the concepts-in-act and the properties-in-act, on which is based all the rest of the reasoning of the application of this law.

Keywords: Newton's law, scheme, concepts-in-act, properties-in-act, learning difficulties

Introduction

Dans le contexte béninois, lors d'une résolution de problème de physique en situation scolaire, l'élève est appelé à travailler pour la plupart non pas sur des situations réelles mais plutôt et surtout sur des situations modélisées ou semi-modélisées, qui sont généralement des modèles mathématiques ou physico-mathématiques. L'explication ou l'interprétation d'un phénomène ou d'un événement nécessitant la mise en œuvre d'une loi quantitative ou mixte de la physique, comme la deuxième loi de Newton encore appelée théorème du centre d'inertie, trouvera son efficacité dans le sens physique qu'acquièrent les résultats mathématiques, dans un système de validation de la physique, en tant que discipline. Pour Borromeo (2006), au cours de la modélisation d'une situation physique, le passage d'un modèle mathématique aux résultats mathématiques, en vue de leurs interprétations et de leurs validations pour obtenir des résultats physiques, constitue une étape importante. C'est le cas de l'application de la deuxième loi de Newton pour expliquer ou interpréter le mouvement d'un solide sur un plan incliné. Cette loi fédère un certain nombre de concepts de la physique (masse, vitesse, accélération, force) interconnectés dans une relation mathématique. Nous cherchons à savoir chez nos sujets, la (les) composante(s) de schème qui leur est (sont) difficile(s) et qui les empêchent d'appliquer correctement la deuxième loi de Newton à un solide en mouvement sur un plan incliné ?

Des recherches antérieures dans d'autres contextes se sont intéressées aux difficultés dans l'enseignement-apprentissage de ladite loi et sur les concepts scientifiques impliqués. La suite de l'article est structurée en trois grandes parties à savoir la revue de littérature et le cadre théorique de l'étude, la méthodologie et la présentation des résultats et la discussion.

1. Revue de la question dans des recherches antérieures et cadre théorique

1.1. Revue de la question dans des recherches antérieures

Nous essayons de rappeler quelques résultats de recherches antérieures afin de situer le travail qui fait l'objet de cette présentation.

L'étude de Ménigaux (1986) sur la schématisation des interactions par les élèves des classes de troisième a montré que les difficultés persistantes sont dues, en grande partie, à la démarche d'enseignement, surtout si celle-ci est systématique de la schématisation « imagée ». Elle montre en effet que cette dernière est à l'origine de deux erreurs persistantes, généralement constatées, à savoir transposition d'une force et transmission du poids. En plus de ces erreurs relevées par Ménigaux (1986), Brasquet (1999) a constaté aussi, de la part des élèves, la transformation d'une étude d'interactions en bilan de forces, due à une mauvaise analyse des situations.

Viennot (1982 & 1989), a analysé certaines difficultés des élèves et les enjeux didactiques à propos du concept de bilan de forces et la loi des actions réciproques. Elle remarque que les difficultés des élèves à faire un bilan exhaustif des forces appliquées à un corps (ou un système), objet d'étude, proviennent aussi d'une étude mal faite des interactions. Pour Viennot (1989), bien que l'étude des interactions se fasse dans le cadre de l'application de la troisième loi de Newton, la maîtrise aiderait à la réussite du bilan de forces pour l'application de la deuxième loi. Dumas-Carré et Goffard (1997) recommandent que le concept de force soit abordé par l'étude des interactions et que cette dernière soit faite avec une technique adéquate pour favoriser, chez les élèves, une bonne appropriation du concept de bilan de forces-en-acte.

La relation logico-mathématique ($\sum \vec{F} = m\vec{a}$) de la deuxième loi de Newton constitue l'élément pivot du théorème du centre d'inertie-en-acte. L'élaboration d'un modèle explicatif de cette relation a fait l'objet d'une étude menée avec des lycéens par Robardet (1995). Cet auteur a utilisé une démarche qui s'inscrit dans une perspective cognitive, pour montrer qu'en procédant à un enseignement/apprentissage par changement conceptuel progressif basé sur la résolution de situations-problèmes et l'élaboration de façon graduelle de modèles explicatifs, la majorité des élèves parvient à donner plus de sens à la deuxième loi de Newton. Il ressort également de cette étude que

le changement conceptuel est d'autant plus efficace que s'il s'opère à travers un ensemble cohérent de situations-problèmes dans une démarche de modélisation progressive au cours de laquelle on fait fonctionner les conceptions des élèves comme des pré-modèles au sens de Johsua (1989).

Quelle que soit la qualité des modèles servant de prototypes dans l'enseignement/apprentissage d'une loi de la physique, l'expérience a montré qu'il existe toujours un écart entre les modèles enseignés et ceux réellement appris par les élèves (Lefèvre & Allevy, 1998). Afin d'explorer quelques causes de cet écart, Lefèvre et Allevy (1998) ont mené une étude sur les raisonnements d'étudiants et de lycéens à propos du plan incliné. Pour catégoriser les modèles appris par l'apprenant, ils ont emprunté à Rumelhart (1978) la notion de « schéma de connaissance », qui les a conduits à stratifier en plusieurs niveaux de modélisation les résultats des apprenants interrogés. L'analyse de ces résultats montre que la plupart des apprenants ont des difficultés à instancier des schémas de connaissance sur les situations « exotiques », c'est-à-dire des situations éloignées des prototypes ayant servi à la monstration. Au cours des entretiens d'explicitation, ils ont fait également le constat selon lequel, lorsque les élèves sont forcés à répondre, ils font généralement appel au niveau de modélisation le plus bas qu'ils estiment encore maîtriser. Selon ces chercheurs, « il semble que le modèle mental formé au point d'instanciation s'accommode mal des situations alternatives » (Lefèvre & Allevy, 1998).

Saglam-Arslan et Devecioglu (2010) ont examiné la compréhension et les modèles qui sous-tendent les raisonnements des élèves-enseignants et des lycéens sur les lois de mouvement de Newton. De cet examen, les deux chercheurs ont constaté que les élèves-professeurs, qui sont pratiquement prêts à enseigner ces lois, ont encore des faiblesses significatives à comprendre les termes de connaissance fondamentale desdites lois. Ils pensent alors que cet état de chose peut être dû à une absence, chez ceux-ci, des possibilités de relier les connaissances scientifiques à des phénomènes réels et des expériences de vie. C'est donc la question des relations modèles-réels et/ou, résultats mathématiques-résultats physiques, qui se pose dans l'enseignement/apprentissage des lois de la physique. Sur des questions relatives à la deuxième loi de Newton, adressées aux élèves, l'analyse des résultats montre que le modèle inapproprié est le plus dominant dans les raisonnements. Saglam-Arslan et Devecioglu (2010) sont parvenus à la conclusion selon laquelle ce constat est dû au fait que la deuxième loi de mouvement de Newton est généralement liée à des connaissances théoriques plutôt qu'aux applications de la vie quotidienne.

Dans une étude portant sur l'influence des éléments contextuels dans l'apprentissage de la mécanique newtonienne en classe de seconde, Koffi (2014) a exploré quelques difficultés de conceptualisation du concept de force. En comparant les productions obtenues à la conception newtonienne du concept de force, à travers la deuxième loi de Newton, il a constaté que les conceptions erronées des élèves varient d'une situation à une autre. Le chercheur conclut alors que « les objets, les événements, les phénomènes que l'on utilise dans les énoncés des situations influencent les conceptualisations des élèves » (Koffi, 2014).

Nguessan (2016) a montré que des étudiants¹ ne maîtrisent pas les structures syntaxiques dominantes des fondements des lois de mouvement de Newton. En effet, en les soumettant à des reformulations desdites lois, les résultats ont révélé qu'ils ont encore une connaissance superficielle du vocabulaire spécifique utilisé dans les différentes reformulations. Ceci pose l'épineux problème de l'association des aspects qualitatifs et quantitatifs de ces lois lors de leur enseignement/apprentissage, en ne privilégiant pas uniquement les derniers à travers les résultats mathématiques que fournissent les relations logico-mathématiques. Sans quoi, nous assisterions à une mathématisation pure et simple de la mécanique newtonienne. Par ailleurs, Nguessan (2016) a constaté aussi que ces étudiants n'ont pas une bonne maîtrise des éléments constitutifs des domaines de validité de ces lois car de l'enquête menée sur les conditions d'applicabilité des lois de mouvement de Newton, il ressort des taux de réponses incorrectes élevés. Il conclut alors que ces étudiants en fin de cycle appliquent de façon abusive ces lois, sans une connaissance adéquate des conditions d'ouverture et de fermeture de leur

¹ Ce sont des étudiants de Licence et Master professionnels en contexte ivoirien.

mise en œuvre ainsi que leurs contenus physiques.

Ces études ont montré que les difficultés des élèves et étudiants sur l'appropriation et la mise en œuvre de la deuxième loi de Newton lors de la résolution de problème sont nombreuses, que ce soit du domaine de la physique elle-même ou des mathématiques.

Dans ce travail, nous examinons dans le contexte béninois, les conduites des élèves et étudiants lors de la mise en œuvre de ladite loi. Il s'agit d'explorer comment ils articulent les différents concepts impliqués dans l'utilisation de cette loi au cours de leurs raisonnements en situation de résolution de problèmes.

1.2. Cadre théorique

Nous fondons ce travail sur la théorie des champs conceptuels (Vergnaud, 1990) pour analyser les raisonnements des élèves. Nous empruntons essentiellement les notions de concept et de schème. Pour Vergnaud (1990), il s'agit du concept scientifique en non de concepts quotidiens au sens de la vie courante. Le concept n'est pas réduit à sa définition, ni à son utilisation. Cet auteur définit un concept par un triplet de trois ensembles $C = \{s, I, S\}$ où, s est l'ensemble des situations qui donnent du sens au concept (**la référence**) ;

I est l'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationnalité des schèmes (**le signifié**) ;

S est l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept, ses propriétés, les situations et les procédures de traitement (**le signifiant**) » (Vergnaud, 1990).

Un concept-en-acte n'est pas un concept et de même, un théorème-en-acte n'est pas un théorème. Par exemple, considérons le concept de « force » pour expliciter le triplet :

Tableau n°1 : Eléments de définition du triplet des trois ensembles du concept de force.

La référence	<ul style="list-style-type: none"> - Situations mettant en jeu l'équilibre d'un corps ; - Situations provoquant ou modifiant le mouvement d'un corps ; - Situations provoquant la déformation d'un corps ; - etc.
Le signifiant	<ul style="list-style-type: none"> - Définition d'une force ; - Les caractéristiques d'une force : point d'application, droite d'action ou direction, sens et intensité ; - Les théorèmes faisant impliquer le concept de force ; - etc.
Le signifié	<ul style="list-style-type: none"> - La différence entre les notations de la force et de son intensité ; - Les langages mathématiques des forces et leurs intensités ; - Modélisation d'une force par un vecteur : conversion de l'intensité de la force en longueur de segment de droite (à l'aide d'une échelle), tracé de segment de droite et son orientation, mesure d'angle, etc. ; - etc.

Un schème est une « organisation invariante de la conduite pour une classe de situations donnée » (Vergnaud, 1990 :136). Le schème comporte à la fois l'organisation des gestes, des formes langagières et non langagières, des opérations de pensées, des interactions sociales qui permettent de traiter une

classe de situations. Nous suivons cet auteur pour qui, un schème est formé de quatre composantes. Ces quatre composantes sont explicitées par Dufour (2011) ainsi qu'il suit :

Tableau n°2 : Définition des composantes d'un schème (Dufour, 2011).

Éléments composants le schème	Définitions des éléments
Les buts, les sous-buts et les anticipations	Attentes en termes de résultats produits grâce à cette activité.
Les règles d'action, de prise d'information et de contrôle, dont la fonction est de générer la conduite	Règles de mise en œuvre de l'activité pour traiter la tâche. Actions et opérations permettant de réaliser concrètement l'activité.
Les invariants opératoires (concepts-en-acte, théorèmes-en-acte) qui permettent de sélectionner l'information pertinente et de la traiter	Conceptualisations de la situation, de la tâche et de l'activité à partir des représentations telles que : - les connaissances, valeurs, théories, principes ... - les concepts utiles voire indispensables, pour « penser » cette activité. Parmi l'ensemble des invariants opératoires, certains sont plus saillants que d'autres : il s'agit des invariants opératoires pivots.
Les possibilités d'inférences	Ajustements de la mise en œuvre de l'activité à partir des paramètres qui caractérisent de manière spécifique la situation (prise en compte d'éléments circonstanciels) dans laquelle se déroule l'activité.

Rabardel (1995) complète la modélisation d'un schème par la notion d'instruments. Ces instruments sont appelés « artéfacts » et permettent de médiatiser le schème. En effet, pendant que l'individu mène son activité, il utilise des instruments, des outils, des médias : ce sont les artéfacts. Ils se caractérisent autant par des outils « matériels », physiques, concrets, que par des outils « mentaux », des représentations, des principes, des symboles (Dufour, 2011). Dans la mise en œuvre de la deuxième loi de Newton, le concept de bilan de forces-en-acte et celui de force-en-acte constituent des invariants opératoires pivots (Dufour, 2011). Les concepts de système d'étude et de bilan qualitatif des forces extérieures appliquées au système-en-acte constituent les briques avec lesquelles le théorème du centre d'inertie-en-acte sera fabriqué (Vergnaud, 2007).

2. Méthodologie

Notre méthodologie consiste à rechercher essentiellement si tous les indicateurs essentiels de composantes prévus pour la résolution de certaines situations-problèmes, impliquant la mise en œuvre de la deuxième loi de Newton, sont présents dans les productions de nos sujets (apprenants). Nous établissons le nombre d'élèves qui mobilisent chaque indicateur de schème dans chacune des composantes du schème. Cela nous permet de faire ressortir les composantes qui constituent des sources d'inertie ou d'erreur pour eux lors de l'application de ladite loi.

2.1. Outils de collecte et sites de recherche

Notre étude s'inscrit dans une démarche d'exploration qui a pris en compte trois collèges d'enseignement général (CEG) du Bénin qui sont loin des grands centres urbains que constituent Cotonou et Porto-Novo. Le CEG Akodéha (55 élèves) au sud-ouest, le CEG1 de Dassa-Zoumè (165

élèves) au centre puis le CEG Hubert MAGA et le Lycée Mathieu Bouké de Parakou situés dans le nord du pays avec 243 élèves. Soit un échantillon de 463 élèves. C'est un questionnaire papier-crayon que les apprenants ont reçu et qui leur a permis de faire les productions que nous avons examinées à l'aide d'une grille d'analyse. Pendant l'administration du questionnaire, des films vidéo ont été pris en vue d'explorer comment les élèves utilisent les instruments de géométrie.

2.2. Grille d'extraction des indicateurs de composantes de schème

Les résultats obtenus sont dépouillés grâce aux éléments de réponses attendues et à la confection d'une grille d'extraction des indicateurs de composantes de schème ci-dessous :

Tableau n°3 : Grille d'extraction des indicateurs de composantes de schème étudié.

Eléments composants le schème	Indicateurs d'explicitation des composantes du schème : « appliquer la deuxième loi de la dynamique de Newton à un chariot en mouvement sur un plan incliné : de l'équation vectorielle aux équations algébriques ».
Buts et anticipations (BA)	<ul style="list-style-type: none"> - Ecrire une équation vectorielle par application de la deuxième loi de la dynamique de Newton au chariot en mouvement sur le plan incliné. (BA₁) - Exploiter des représentations graphiques des forces extérieures appliquées au chariot sur le plan incliné. (BA₂) - Ecrire des équations algébriques issues d'une équation vectorielle par projection suivant les axes du repère. (BA₃)
Règles d'actions (RA)	<ul style="list-style-type: none"> - Préciser le système d'étude. (RA₁) - Préciser le référentiel d'étude. (RA₂) - Préciser le repère d'étude. (RA₃) - Faire le bilan qualitatif des forces extérieures appliquées au système d'étude. (RA₄) - Représenter sur les schémas (situations 1, 1bis, 2 et 2bis) les forces ci-dessus citées. (RA₅) - Préciser la relation à utiliser : le théorème du centre d'inertie. (RA₆) - Projeter les forces représentées suivant les deux axes du repère. (RA₇) - Exploiter les projections pour écrire les équations algébriques que donne le théorème du centre d'inertie suivant les axes du repère. (RA₈)
Invariants opératoires (IO)	<ul style="list-style-type: none"> - Le concept de système d'étude-en-acte. (IO₁) - Le concept de bilan qualitatif des forces extérieures appliquées au système-en-acte. (IO₂) - Le concept de force-en-acte : représentation graphique des forces extérieures (le poids \vec{P} du chariot, la réaction normale \vec{R}_n du plan incliné, la tension \vec{T} du fil et la force \vec{f} de frottement) appliquées au système avec leurs caractéristiques bien définies. (IO₃) - Le théorème du centre d'inertie-en-acte : $\vec{P} + \vec{T} + \vec{R}_n + \vec{f} = m\vec{a}$. (IO₄) - Le concept de projection orthogonale-en-acte : <ul style="list-style-type: none"> ❖ 2- situations 1 et 2 : faire la projection orthogonale du poids \vec{P} du chariot suivant les deux axes du repère ; (IO₅) ❖ 2- situations 1bis et 2bis : ★ Faire la projection orthogonale de la tension \vec{T} suivant les deux axes du repère ; (IO₆)

	<ul style="list-style-type: none"> ★ Faire la projection orthogonale de la réaction normale \vec{R}_n suivant les deux axes du repère ; (IO₇) ★ Faire la projection orthogonale de la force \vec{f} de frottement suivant les deux axes du repère. (IO₈) <p>- Le concept de translation vectorielle-en-acte : faire la translation vectorielle de \vec{T} et de \vec{R}_n (4-situations 1, 1bis, 2 et 2bis) pour ramener leurs points d'applications au centre de gravité du chariot. (IO₉)</p> <p>- Les concepts d'angles alternes internes, d'angles correspondants, d'angles à côtés respectivement perpendiculaires, etc.-en-acte : identification de l'angle α dans les triangles rectangles obtenus après les projections orthogonales. (IO₁₀)</p> <p>- Des propriétés trigonométriques-en-acte :</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ 2- situations 1 et 2 : $\begin{cases} P \sin \alpha \text{ suivant } (Gx) \\ P \cos \alpha \text{ suivant } (Gy) \end{cases}$ (IO₁₁) ❖ 2- situations 1bis et 2bis : $\begin{cases} T \cos \alpha \text{ suivant } (Gx) \\ T \sin \alpha \text{ suivant } (Gy) \end{cases}$ (IO₁₂) $\begin{cases} R_n \sin \alpha \text{ suivant } (Gx) \\ R_n \cos \alpha \text{ suivant } (Gy) \end{cases} \quad (\text{IO}_{13})$ $\begin{cases} f \cos \alpha \text{ suivant } (Gx) \\ f \sin \alpha \text{ suivant } (Gy) \end{cases} \quad (\text{IO}_{14})$
<p>Inférences (I)</p>	<p>- Le chariot étant en mouvement, la force nette est dans la direction du mouvement pour chacune des situations. (I₁)</p> <p>- Frottement non nul, donc précision de la réaction normale \vec{R}_n et non la réaction \vec{R} tout court. (I₂)</p> <p>- Modifications de sens de déplacement et de repère ; donc raisonnement sur les signes des grandeurs algébriques :</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ 2- situations 1 et 2 : $\begin{cases} P_x = -P \sin \alpha \\ T_x = T \end{cases}$ (I₃) $\begin{cases} P_x = P \sin \alpha \\ T_x = -T \end{cases}$ <ul style="list-style-type: none"> ❖ 2- situations 1bis et 2bis : $\begin{cases} T_x = T \cos \alpha \\ R_{nx} = -R_n \sin \alpha \\ f_x = -f \sin \alpha \end{cases}$ (I₄) $\begin{cases} T_x = -T \cos \alpha \\ R_{nx} = R_n \sin \alpha \\ f_x = f \sin \alpha \end{cases}$ <p>- Combinaison des grandeurs algébriques obtenues pour écrire les deux équations algébriques issues de l'équation vectorielle par projection. (I₅)</p>
<p>Artéfacts (A)</p>	<p>- Les représentations graphiques des forces sont faites à l'aide d'un crayon à papier.</p>

	<p>(A₁)</p> <p>- Le traceur (double décimètre) est utilisé dans le tracé des droites d'action de \vec{T} et de \vec{f}. (A₂)</p> <p>- L'équerre est utilisée dans le tracé des droites d'action de \vec{P} et de \vec{R}_n. (A₃)</p> <p>- L'équerre est utilisée lors des projections orthogonales de vecteurs-forces suivant les axes du repère. (A₄)</p> <p>- L'utilisation des instruments comme compas, traceur lors des translations de \vec{T} et de \vec{R}_n (4-). (A₅)</p> <p>- La rédaction du raisonnement est faite avec un stylo. (A₆)</p>
--	---

3. Résultats, interprétations et discussions

3.1. Résultats indiquant les taux de mobilisations des indicateurs du schème

Nous présentons dans les tableaux qui suivent le nombre d'élèves qui mobilisent chaque indicateur du schème et le pourcentage de l'effectif correspondant.

3.1.1. Résultats relatif aux buts et anticipations

Tableau n°4 : Proportions d'élèves mobilisant des indicateurs relatifs aux buts et anticipations.

	BA ₁	BA ₂	BA ₃
effectifs	420	197	259
%	90,1	42,6	55,9

3.1.2. Résultats relatif aux règles d'actions

Tableau 5 : Proportions d'élèves mobilisant des indicateurs relatifs aux règles d'actions

	RA ₁	RA ₂	RA ₃	RA ₄	RA ₅	RA ₆	RA ₇	RA ₈
effectifs	441	441	441	454	454	347	208	208
%	95,3	95,3	95,3	98,1	98,1	75,0	44,9	44,9

3.1.3. Résultats relatif aux invariants opératoires

Tableau n° 6 : Proportions d'élèves mobilisant des indicateurs relatifs aux invariants opératoires

	IO ₁	IO ₂	IO ₃	IO ₄	IO ₅	IO ₆	IO ₇	IO ₈	IO ₉	IO ₁₀	IO ₁₁	IO ₁₂	IO ₁₃	IO ₁₄
effectifs	133	151	40	372	187	72	163	94	21	93	139	49	49	71
%	28,7	32,6	8,6	80,3	40,5	16,6	35,2	20,3	4,5	20,1	30,0	10,6	10,6	1,0

3.1.4. Résultats relatif aux inférences

Tableau 7 : Proportions d'élèves mobilisant des indicateurs relatifs aux inférences.

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
effectifs	2	67	24	25	56
%	0,4	14,5	5,2	5,4	12,1

3.1.5. Résultats relatif aux artefacts

Tableau n° 8 : Proportions d'élèves mobilisant des indicateurs relatifs aux artefacts.

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
effectifs	463	441	191	167	0	457
%	100	95,3	41,3	36,1	0,0	98,7

3.2. Interprétations des productions écrites et discussions des résultats

Les résultats des contenus des productions discursives et schématiques des apprenants montrent que des buts et anticipations, qui précèdent et accompagnent l'activité de résolution du problème, ont été mobilisés à plus de 50% de façon globale. Quant à la partie proprement génératrice du schème d'application que sont les règles d'action, de prise d'information et de contrôle, les élèves les ont majoritairement mobilisés. Ceci pourrait nous amener à dire que tous ces élèves devraient pouvoir bien hiérarchiser de façon séquentielle et temporelle leurs productions dans la résolution du problème posé.

Examinons les résultats relatifs aux autres composantes du schème d'application.

Nous considérons que la concrétisation ou la matérialisation de l'action ou de l'activité permet d'apprécier le degré de conceptualisation. Sur l'accomplissement des indicateurs relatifs aux invariants opératoires nous avons constaté que nos sujets ont de sérieuses difficultés à identifier et à reconnaître les objets, leurs propriétés, leurs relations et leurs transformations, donc des difficultés de conceptualisation. Cela nous fait dire comme Maarouf et Kouhila (2001) que, ces difficultés sont en partie dues au fait que les apprenants ne sont pas initiés aux processus intellectuels spécifiques à la physique, notamment aux activités de modélisation et de mathématisation.

La conceptualisation de la notion de force constitue un invariant opératoire pivot dans les situations de la mécanique newtonienne. L'analyse des contenus des productions discursives relatives à la conceptualisation de cette notion de force, révèle que des élèves éprouvent de difficulté déjà en début de résolution de problème : la notion de système, objet d'étude, n'est pas maîtrisée (voir en annexes par exemples les encadrés AE 1-1, AE 3-1, et BE 12-1).

Malgré la précision que le système à étudier est le chariot, beaucoup de nos sujets d'étude semblent avoir du mal à découper, par la pensée, la situation physique qui leur est présentée en système à étudier et milieu extérieur à celui-ci. La conséquence immédiate est que le concept de système d'étude-en-acte ne pourra pas être bien cerné. Il s'en suit alors que le concept de bilan qualitatif des forces extérieures appliquées au système d'étude-en-acte, qui n'est qu'une activité de modélisation consistant à répertorier les actions mécaniques du milieu extérieur sur le système à étudier, ne sera pas facilement réussi. Cela amène ces élèves dans leurs bilans des forces extérieures au système, à ignorer soit l'existence de la tension \vec{T} du fil et/ou soit, la présence des forces de frottement, à confondre la réaction totale du plan incliné sur le chariot à sa composante normale. C'est le cas par

exemple dans les productions (BE 18-1) et (BE 20-1) en annexes. Ainsi, lors de l'écriture du théorème du centre d'inertie-en-acte, donnant lieu à l'écriture d'une équation vectorielle dont la résolution permettra d'atteindre les buts visés par l'activité, la plupart des apprenants sont confrontés aux difficultés relatives au concept de bilan qualitatif des forces extérieures appliquées au système-en-acte. Celui-ci est lui-même conditionné par la réussite du système d'étude-en-acte.

La résolution de l'équation vectorielle passe d'abord par le concept de forces appliquées-en-acte c'est-à-dire « l'activité physico-mathématique qui consiste à représenter par des vecteurs, les forces modélisant les actions mécaniques qui s'exercent sur le système étudié » (Maarouf & Kouhila, 2001). L'analyse des productions schématiques de ces élèves montre que ces derniers éprouvent de difficultés quant à la concrétisation de cette activité relative au concept de forces appliquées-en-acte. (Voir des exemples en annexes : AE 5-1, BE 12-2, BE 17-1, BE 17-2 et BE 32-2). Ces exemples exposent des difficultés de représentations vectorielles de forces : la droite d'action oblique du poids du chariot, l'omission de la tension du fil malgré que le chariot soit fixé à ce dernier, l'existence d'une tension de fil d'un côté où ne figure pas celui-ci, la droite d'action verticale d'une réaction sur un plan, une force de frottement orientée dans le même sens que le mouvement ou même qui n'est pas dans la direction de celui-ci.

La réussite du quasi reste des concepts-en-acte et propriétés-en-acte impliqués dans l'activité de résolution du problème est conditionnée par celle du concept de projection orthogonale-en-acte. L'analyse des productions schématiques indique que ce concept est loin d'être cerné par la majorité de nos sujets. (Exemples en annexes : AE 3-3, AE 5-3, BE 16-3, BE 32-3).

Le passage en revue des films vidéo pris lors des activités d'élaboration des productions par les sujets d'étude nous révèle qu'au cours de la mise en œuvre du concept de projection orthogonale-en-acte, des élèves se sont heurtés à des difficultés de choix et d'utilisation d'artéfacts adéquats comme l'équerre. Cet artéfact est même remplacé, dans son rôle, par le double décimètre chez certains. Du coup, le concept-en-acte et / ou la propriété-en-acte relatifs aux triangles rectangles, qui devraient être obtenus à partir des projections orthogonales suivant les axes du repère des forces représentées, se solde(nt) par un échec à cause de l'inexistence desdits triangles rectangles.

En somme, les faibles taux de mobilisation des invariants opératoires chez nos sujets d'étude s'expliquent par l'interdépendance très accentuée entre eux.

Quant aux inférences, dans le cas des situations présentés aux élèves, elles sont fortement liées au invariants opératoires en ce sens que tout raisonnement en activité de résolution de problème en physique s'appuie sur les théorème-en-acte et les concepts ou propriétés-en-acte. Ainsi, les erreurs commises lors de la mise en œuvre des invariants opératoires impactent forcément sur les inférences comme le montrent par exemple les encadrés en annexes (BE 18-1 et BE 18-2). Chez certains élèves comme BE-18, dans la situation 1, en dehors de la confusion faite entre la composante normale de la réaction et la réaction totale exercée par le plan sur le chariot, tous les invariants opératoires et les inférences relatives à cette situation (situation 1) sont corrects. Dès qu'on a changé le sens de déplacement du chariot et celui de l'un des axes du repère (situation 2), BE-18, à l'instar de nombreux autres apprenants, a changé de sens à la tension \vec{T} du fil. Pour cette catégorie d'élèves, « la tension du fil a le même sens que celui du déplacement du système dynamique ou de l'axe parallèle au fil ». Comme la projection orthogonale, suivant un axe du repère, d'une force dont la droite d'action n'est pas colinéaire à celui-ci, donne un triangle, certains élèves se sont contentés d'utiliser un double décimètre pour joindre les extrémités des forces à n'importe quel point des axes du repère. C'est le cas par exemple de AE-10 (voir annexe). Les élèves AE-10, AE-3, BE-16, BE-32 et beaucoup d'autres, ont mobilisé lors des projections orthogonales des vecteurs-forces suivants les axes du repère, le théorème-en-acte qui suit : « la projection orthogonale d'un vecteur force suivant un axe du repère consiste à joindre son extrémité à un point de l'axe ». Conformément à leur théorème-en-acte, même s'il n'est pas vrai, nous comprenons l'utilisation du double décimètre seul au cours des projections orthogonales.

Par ailleurs, le but principal de cette activité est d'écrire les équations algébriques issues de l'équation vectorielle, obtenue à partir du théorème du centre d'inertie-en-acte, à partir des projections orthogonales des vecteurs forces représentés suivant les axes du repère. Ce but n'est pas bien cerné par bon nombre d'élèves dont AE-10 et AE-6. En effet, pour cette catégorie d'élèves, l'inférence qui devrait les amener à regrouper d'une part les valeurs algébriques obtenues suivant l'axe (Ox) et d'autre part celles obtenues suivant l'axe (Oy) afin d'en former les équations algébriques est absente dans leur production.

Nous avons constaté aussi des difficultés de conceptualisation des concepts trigonométriques, c'est-à-dire que là où il faut trouver sinus, des élèves trouvent cosinus et vice-versa. C'est le cas d'une catégorie d'apprenants auquel appartient BE-17. Pour cette catégorie d'apprenants, la propriété-en-acte utilisée peut être traduite de la manière suivante : « l'expression du projeté suivant l'axe (Ox) d'une force dont la droite d'action n'est ni colinéaire ni perpendiculaire à cet axe est fonction de $\sin\alpha$ tandis que celle suivant l'axe (Oy) est fonction de $\cos\alpha$ ». Une propriété-en-acte fautive sur laquelle toute possibilité d'inférence qui y prend appui devient non cohérente, donc également fautive. Il ressort qu'à partir de représentations de forces appliquées mal faites ou de projections orthogonales mal faites, les propriétés trigonométriques relatives aux triangles rectangles sont mal mobilisées et par conséquent toute inférence prenant appui sur ces propriétés devient fautive. Ainsi, les buts et anticipations qui doivent être retrouvés à l'aide des inférences sont très loin d'être atteints

Conclusion

Au cours de l'application de la deuxième loi de Newton, le passage d'un système mathématique c'est-à-dire un système modélisé ou semi-modélisé aux résultats mathématiques constitue une étape importante. Nous venons de constater qu'au cours de cette étape, les invariants opératoires constituent la grande source de difficultés des élèves, ce qui déteint sur le reste de l'activité de ces derniers car les inférences se font sur les invariants opératoires afin de pouvoir retrouver les buts et anticipations. Les invariants opératoires qui posent plus de difficultés aux élèves sont surtout ceux de type "proposition" et de type "fonction propositionnelle" c'est-à-dire, entre autre, les théorèmes-en-acte, les concepts-en-acte ou les catégories-en-acte. En terme claire, il s'agit beaucoup plus d'une question de mathématisation : l'appropriation et l'articulation des concepts mathématiques dans un contexte physique, de même que la modélisation des systèmes physiques à travers leurs schématisations par le maniement des instruments de géométrie. Nous estimons qu'avant l'enseignement de la deuxième loi de Newton, l'enseignant doit s'assurer, à travers un certain nombre d'activités, du niveau d'appropriation et de mobilisation par les élèves des outils mathématiques impliqués dans l'application de ladite loi. Il nous semble nécessaire de penser à une collaboration entre enseignants de mathématique et de physique pour aider à faire asseoir chez les élèves les propriétés et concepts mathématiques nécessaires, pour ensuite les adapter aux contextes d'apprentissage de la physique.

Références bibliographiques

- Borromeo, F., R. (2006). Theoretical and empirical differentiations of phases in the modelling process. *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik* 38(2), 86-95.
- Brasquet, M. (1999). Actions, interactions et schématisation. *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 816, 1221-1236.
- Dufour, F. (2011). *Approche dynamique de l'intelligence économique en entreprise : apport d'un modèle psychologique des compétences : contribution à l'élaboration de programmes d'actions de la CCI de Rennes*. Thèse de l'Université Rennes 2 et de l'Université Européenne de Bretagne, 2010.
- Dumas-Carré, A. & Goffard, M. (1997). *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique. Concepts & démarches*. Paris : Armand Colin.
- Johsua, S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*

n°8, 29-53.

Koffi, K. I. (2014). Influence des éléments contextuels dans l'apprentissage de la mécanique Newtonienne en seconde en Côte d'Ivoire. *Liens Nouvelle Série, Revue Francophone Internationale*, n°18, 38-54.

Lefèvre, R. & Allevy, P. (1998). Raisonnements simples d'étudiants et de lycéens à propos du plan incliné. *Didaskalia*, vol. 13, 81-112.

Maarouf, A. & Kouhila, M. (2001). La dynamique élémentaire dans l'enseignement fondamental marocain : analyse des difficultés d'apprentissage de la notion de force. *Didaskalia*, 18, 41-59.

Ménigaux, J. (1986). La schématisation des interactions en classe de troisième. *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 683, 761-778.

Nguessan, K. (2016). Les Lois de Mouvement et les Théorèmes en Mécanique Classique. Repérage de Quelques Difficultés et Obstacles Chez les Étudiants en Formation Professionnelle. *Canadian Social Science*, 12(1), 59-68.

Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies : une approche cognitive des instruments contemporains*. Paris : Armand Colin.

Robardet, G. (1995). Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique. *Didaskalia* n° 7, 29-143.

Rumelhart, D. E. (1978). *Schemata: the building blocks of cognition. Theoretical issues in reading comprehension*. Hillsdale, New Jersey, Erlbaum Associates.

Saglam-Arslan, A. & Devecioglu, Y. (2010). Student teachers' levels of understanding and model of understanding about Newton's laws of motion. *Science Learning and Teaching*, volume 11, Issue 1, Article 7.

Shaffer, P. (1993). "The use of research as a guide for instruction in physics," Ph. D. dissertation, Department of Physics, University of Washington.

Vergnaud, G. (1990) La théorie des champs conceptuels, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol.10 n°2-3, 133-170.

Vergnaud, G. (2007), Représentation et activité : deux concepts étroitement associés, *Recherches en éducation*, n°4, 9-22.

Viennot, L. (1982). L'action est-elle bien égale à la réaction ? *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 640, 479-488.

Viennot, L. (1989). Bilan de forces et loi des actions réciproques. *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 716, 951-970.

Annexes

Etude dynamique
 Système : Solide S de masse M par intermédiaire d'un fil
 Référentiel : Terrestre supposé galiléen
 Repère : (O, \vec{i}, \vec{j})
 Bilan des forces : Le poids \vec{P} du solide
 - la force de rappel \vec{T} du fil
 - la réaction \vec{R} du plan incliné
 - la force de frottement \vec{f}
 D'après le théorème du centre d'inertie, on a :
 $\sum \vec{F}_{ext} = M\vec{a}$; or $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{f} + \vec{P} + \vec{T} + \vec{R}$ donc $\vec{f} + \vec{P} + \vec{T} + \vec{R} = M\vec{a}$
 Voilà l'expression vectorielle de la deuxième loi de Newton.

(AE 1-1)

Système : Solide (S) de masse m
 Référentiel : Terrestre supposé galiléen
 Repère : (O, \vec{i}, \vec{j})
 Bilan des forces : Le poids \vec{p} du solide - la force de frottement \vec{f}
 la tension \vec{T} du fil.
 D'après T.O.L on a :
 $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$ or $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{P} + \vec{T} + \vec{f}$
 donc $\vec{P} + \vec{T} + \vec{f} = m\vec{a}$

AE 3-1

Etude dynamique
 Système : solide de masse m
 Référentiel : Référentiel Terrestre supposé Galiléen
 Repère : (O, \vec{i}, \vec{j})
 Bilan des forces : - le poids \vec{P} du solide ;
 - la tension \vec{T} du fil
 - la réaction \vec{R} du plan incliné
 - la force de frottement \vec{f} du solide
 Schéma :
 d'après le théorème de centre d'inertie appliqué au solide
 on a $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$; $\vec{P} + \vec{T} + \vec{R} + \vec{f} = m\vec{a}$

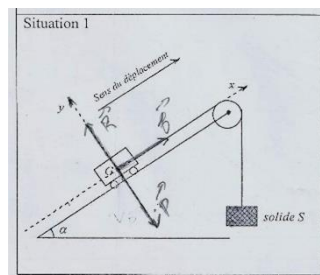
(BE 12-1)

Système : Solide chariot de masse m
 Référentiel : Terrestre supposé galiléen
 Repère : (O, \vec{i}, \vec{j})
 Schéma (voir situation)
 Bilan des forces :
 - le poids \vec{P} du chariot
 - la réaction \vec{R} du plan incliné
 - les forces de frottement \vec{f}
 - la tension \vec{T} du fil
 D'après la deuxième loi de Newton appliquée au chariot
 en mouvement on a :
 $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$ or $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{P} + \vec{T} + \vec{R} + \vec{f}$
 donc $\vec{P} + \vec{T} + \vec{R} + \vec{f} = m\vec{a}$

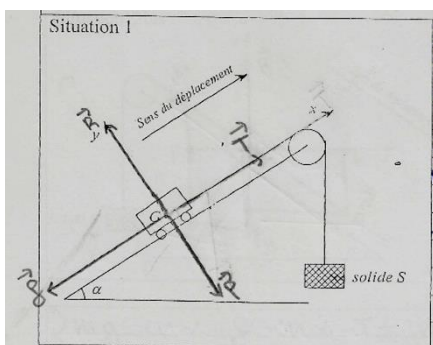
(BE 18-1)

Système : Chariot de masse m
 Référentiel : Terrestre supposé galiléen
 Repère : (O, \vec{i}, \vec{j})
 Bilan des forces :
 - le poids \vec{P} du chariot
 - la force de frottement \vec{f}
 - la réaction \vec{R} du plan incliné
 Schéma clair (voir figure)
 D'après le théorème du centre d'inertie on a :
 $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$; or $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = 0$
 $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = m\vec{a}$

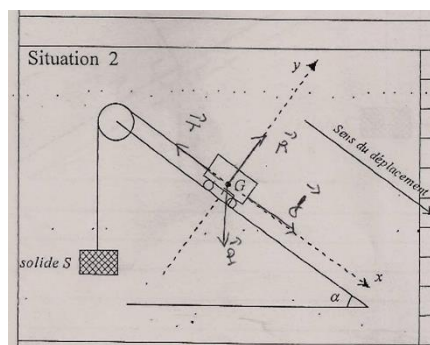
(BE 20-1)



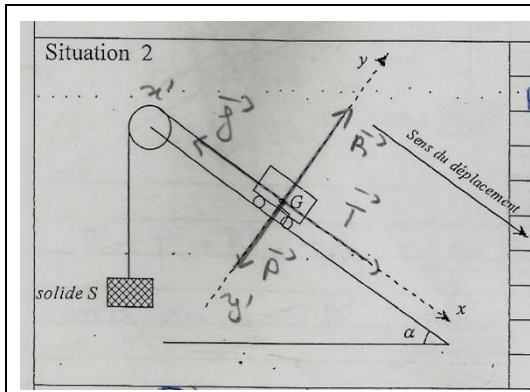
(AE 5-1)



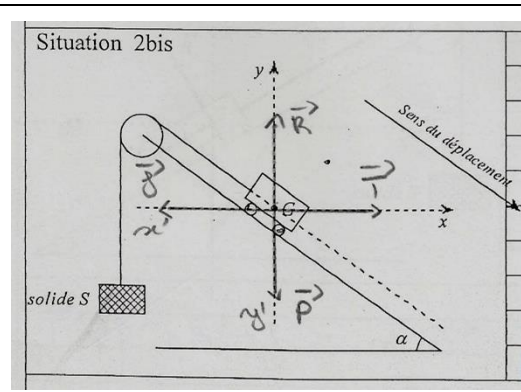
(BE 17-1)



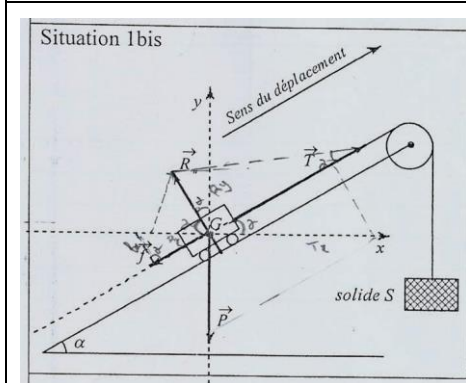
(BE 12-2)



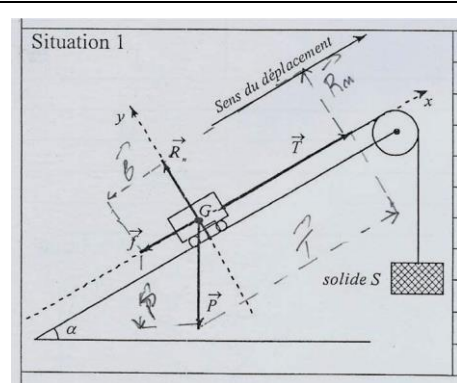
(BE 32-2)



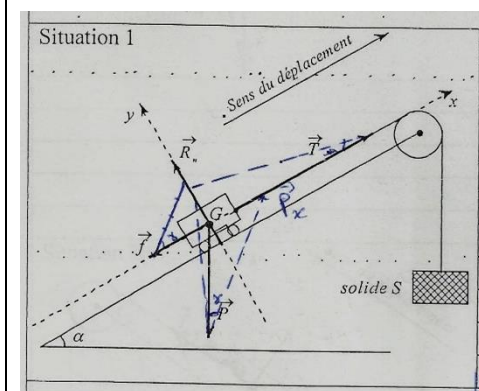
(BE 32-2)



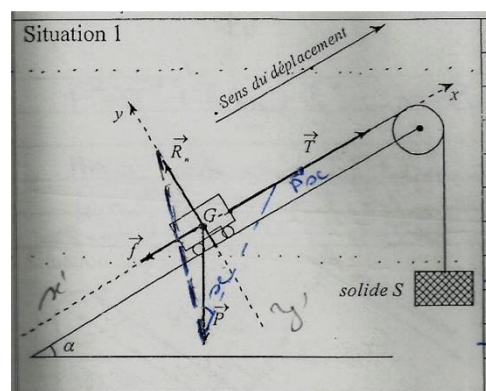
(AE 3-3)



(AE 5-3)



(BE 16-3)



(BE 32-3)

Situation 2

solide S

Sens du déplacement

α

Projection suivant (x'x)

$$P \sin \alpha + R_x + T_x + P_x + f_x = m a_x$$

$$m g \sin \alpha + T + f = m a_x$$

Projection suivant (y'y)

$$P_y + P_y + T_y + f_y = m a_y$$

$$-m g \cos \alpha + R = m a_y$$

(BE 18-2)

Situation 1

solide S

Sens du déplacement

α

Projection suivant (x'x)

$$R_x + T_x + R_x + f_x = m a_x$$

$$R_x = P \sin \alpha; T_x = T; R_x = 0$$

$$f_x = -f$$

d'où $-m g \sin \alpha + T - f = m a_x$

Projection suivant (y'y)

$$P_y + T_y + R_y + f_y = m a_y$$

(BE 18-2)

Situation 2bis

Projection sur l'axe (O, x) et l'axe (O, y) on a :

$$\sum P_x + R_x + T_x + f_x = m a_x$$

$$\sum P_y + R_y + T_y + f_y = m a_y$$

Projection sur l'axe (O, x) et l'axe (O, y) on a :

$$-P \sin \alpha + R \sin \alpha + T \cos \alpha + f \sin \alpha = m a_x$$

$$-P \cos \alpha + R \cos \alpha + T \sin \alpha + f \cos \alpha = m a_y$$

donc on a :

$$\sum (P + R + f) \sin \alpha + T \cos \alpha = m a_x$$

$$\sum (R + T + f) \sin \alpha - P = m a_x$$

(AE 10-4)

Situation 2bis

Projection sur (O, i, j)

$$T_x + R_x + R_x + f_x = m a_x$$

$$T_y = T \sin \alpha \quad \left\{ \begin{array}{l} P_x = 0 \\ P_y = -P \end{array} \right.$$

$$T_y = f \sin \alpha \quad \left\{ \begin{array}{l} R_x = R \sin \alpha \\ R_y = R \cos \alpha \end{array} \right.$$

(AE 6-2)

Situation 2bis

Suivant l'axe (O, x)

$$P_x + R_n x + T_x + f_x = m a_x$$

$$R_n \sin \alpha + T \cos \alpha + f \sin \alpha = m a_x$$

$$R_n \sin \alpha - T \sin \alpha - f \sin \alpha = m a_x$$

* Suivant l'axe (O, y)

$$P_y + R_n y + T_y + f_y = m a_y$$

$$-P + R_n \cos \alpha - T \cos \alpha - f \cos \alpha = m a_y$$

$$-P + R_n \cos \alpha - T \cos \alpha - f \cos \alpha = m a_y$$

(BE 17-4)