

Utilisation de dispositifs simples dans l'enseignement-apprentissage du moment d'une force par rapport à un axe fixe

Aboubacar Sidiki DRAME^{1,2,*}, Douga NASSOKO^{1,2}, Tamba CAMARA^{1,2}, Oumar HAMADOUN^{1,2}, Boubacar Abdramane DOUMBIA¹, Farima SINAYOKO¹

¹Département d'Enseignement et de Recherche de Physique et Chimie (DER-PC), École Normale Supérieure de Bamako, Rue du 22 Octobre 1946, Quartier du fleuve,

²Laboratoire Pluridisciplinaire des Sciences et de Didactique des Sciences (LPSDIS), Bamako, Rue du 22 Octobre 1946, Quartier du fleuve, BP : 241, Tél : 20222189, Fax : 20230461

Auteur correspondant : magass10@yahoo.fr

INFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 22 octobre 2024

Reçu en format révisé le : 12 juillet 2025

Accepté le : 05 août 2025

Mots-Clés: dispositifs simples, enseignement-apprentissage, investigation, moment d'une force, 10^{ème} Commune Générale

RESUME

L'enseignement-apprentissage des Sciences Physiques, notamment celui du chapitre sur le moment d'une force, semble être difficile en Afrique et particulièrement au Mali. Cet article suggère des stratégies nouvelles afin de rendre facile l'assimilation (enseignement-apprentissage) du moment d'une force par rapport à un axe fixe en classe de 10^e Commune Générale. A cet effet, nous avons procédé à des investigations dans les Académies d'Enseignement de Bamako et de Koulikoro auprès des enseignants sur la concrétisation de la notion de moment d'une force par rapport à un axe fixe. Aussi les investigations auprès des élèves sont portées sur des notions de compréhension du moment d'une force par rapport à un axe fixe. Les résultats de ces investigations ont révélé que 102 enseignants sur 167, soit 61,07% disent ne pas concrétiser la leçon sur le moment d'une force par rapport à un axe fixe. 96 enseignants sur 167, soit 57,48% des enseignants affirment avoir des difficultés à enseigner ce chapitre. Ces enseignants se plaignent du manque de laboratoire dans les établissements d'enseignements secondaires et de manuels scolaires pour la préparation du cours. Au niveau des élèves 1190 élèves sur 1909, soit 62,34% n'arrivent pas à définir le moment d'une force par rapport à un axe fixe. 1155 élèves sur 1909, soit 60,50% ne savent pas l'expression du moment d'une force par rapport à un axe fixe. 1453 élèves sur 1909, soit 76,11% ne peuvent pas définir le bras de levier. Cependant, pour remédier à ces difficultés nous avons confectionné et proposé des dispositifs simples (le levier) à partir du bois pouvant faciliter l'illustration du phénomène physique du moment d'une force. Nous avons, par la suite, vérifié l'impact de ces dispositifs simples sur l'enseignement-apprentissage du moment d'une force par rapport à un axe fixe dans trois lycées de Koulikoro. Les résultats de l'évaluation des classes pilotes sont meilleurs que ceux des autres classes. 353 élèves sur 446, soit 79,14% parviennent à définir le moment d'une force par rapport à un axe fixe. 374 élèves sur 446, soit 83,85% savent définir le bras de levier.

ABSTRACT

The teaching-learning of Physical Sciences particularly that of the chapter on the moment of a force, seems to be difficult in Africa and particularly in Mali. This article suggests new strategies in order to make it easy to assimilate (teaching-learning) the moment of a force in relation to a fixed axis in the 10th General Common class. We carried out investigations with teachers in the Teaching Academies of Bamako and Koulikoro on the concretization of force moment notion in relation to a fixed axis. Also, others investigations with students are focused on understanding of force moment notions in relation to a fixed axis. The results of these investigations revealed that 102 teachers out of 167, or 61.07%, say they do not concretize the lesson on the moment of a force relative to a fixed axis. 96 teachers out of 167, or 57.48% of teachers declared to have difficulty teaching this chapter. These teachers complain about the lack of laboratories in secondary schools and textbooks for preparing the course. At the student level, 1190 students out of 1909, or 62.34%, cannot define the moment of a force relative to a fixed axis. 1155 students out of 1909, or 60.50%, do not know the expression of the moment of a force relative to a fixed axis. 1453 students out of 1909, or 76.11%, cannot define the lever arm. However, to overcome these difficulties, we have made and proposed simple devices (the lever) from wood that can facilitate the illustration of the physical phenomenon of the moment of a force. We have subsequently verified the impact of these simple devices on the teaching-learning of the moment of a force in relation to a fixed axis in three high schools in Koulikoro. The results of the evaluation of the pilot classes are better than those of the other classes. 353 students out of 446, or 79.14%, manage to define the moment of a force in relation to a fixed axis. 374 students out of 446, or 83.85% know how to define the lever arm.

I. Introduction

La physique, selon Albert Einstein, est composée d'un groupe de sciences de la nature qui fondent leurs concepts sur des mesures [1]. Ces concepts peuvent être formulés mathématiquement [1]. Les difficultés de l'apprentissage de la science physique résident au niveau de la compréhension de ces concepts. D'après plusieurs travaux en didactique sur les conceptions et les représentations mentales des élèves ([2] ; [3] ; [4] ; [5] ; [6] ; [7] ; [8] ; [9] ; [10] ; [11]), il ressort que ces conceptions sont un ensemble de croyances et d'intuitions que les élèves utilisent pour décrire, interpréter et expliquer les phénomènes de la nature. Ce sont des conceptions basées sur leurs expériences de la vie quotidienne. Elles sont souvent incompatibles avec les connaissances et les théories scientifiques selon les auteurs [12].

Pour certaines études antérieures ([13], l'une des causes de la difficulté qu'éprouvent les élèves dans la compréhension des concepts de la physique, est dû au fait qu'ils n'arrivent pas à faire le lien entre les notions et concepts qui leur sont enseignés. Ce problème de compréhension au niveau des élèves est causé par le manque de travaux pratiques. Cette thèse est validée par plusieurs études à savoir : l'étude sur le manque d'activités expérimentales ([14] ; [15]) et sur le matériel scientifique dans les laboratoires scolaires [16]. L'usage très limité des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans la pratique des enseignants [17] et l'absence de formation continue des enseignants en matière d'intégration des TIC [18] sont d'autres facteurs qui influent sur la compréhension des élèves. Les expérimentations dans les laboratoires servent à amener les élèves à observer et manipuler les phénomènes afin de comprendre les notions et les concepts qui les sous-tendent et permettent de les expliquer [19].

L'initiation à la méthode expérimentale participe à la formation de l'esprit et offre à l'élève le sens de la réalité, la notion de loi qui permet d'entrevoir les phénomènes en apparence les plus dissemblables. De ce fait, l'élève devient actif, autonome dans son raisonnement avec un esprit critique. "Apprendre à observer et à mesurer" [20]. L'appui sur la conduite d'expériences et la manipulation de dispositifs par les élèves lors des travaux pratiques sont une nécessité affirmée depuis longtemps pour l'enseignement des sciences physiques : « la physique et la chimie sont des sciences expérimentales et doivent être enseignées comme telles » [21].

Le manque d'expériences en classe de 10^e Commune Générale sur la notion des moments de forces est une source de difficultés d'apprentissage pour les élèves. La concrétisation sur l'équilibre permet facilement aux élèves de comprendre comment rompre l'équilibre d'une planche au bord d'un mur et en posant une charge sur la partie en porte-à-faux. La capacité de cette charge à faire basculer la planche n'est pas la même suivant qu'elle est posée près du mur et ou au bout de la planche. De même on peut, au même endroit, placer une charge plus lourde et constater une différence de basculement [22]. On intègre ces trois

composantes du problème par le modèle de moment d'une force, qui représente l'aptitude d'une force à faire tourner un système mécanique autour d'un axe donné [22]. De nombreuses applications montrent son importance dans l'industrie (calcul des résistances des matériaux, fonctionnement des machines tournantes) et dans la vie courante à savoir : l'ouverture et fermeture d'une porte, action de tourner le volant d'une voiture, action de pédaler un vélo, action de desserrer avec une clé la roue d'une voiture. La présente étude a pour but de mieux faire l'enseignement du moment d'une force par rapport à un axe fixe en classe de 10^e Commune Générale en s'appuyant sur la concrétisation de ce phénomène devant les élèves. Pour ce faire, nous avons mis au point des dispositifs simples et proposer une méthode pour la concrétisation.

II. Matériels et Méthode

1. Matériels

Pour bien mener cette étude, deux modèles de dispositifs simples du levier en bois ont été mis au point, testés et validés. Il faut noter que ces dispositifs sont à moindre coût et à la portée de tous les enseignants de sciences physiques.

Modèle 1 : Dans ce modèle, le levier est une balance qui comprend trois (3) composants : une tige (bras de levier), un support vertical et un boulon (figure 1). Son coût de réalisation n'est pas très élevé.

La tige, long de 90 cm et ayant pour milieu l'axe de rotation, est percée de trous distants de 5cm où l'on peut accrocher des masses marquées. Le support vertical est long de 59 cm. Le boulon, de longueur 8 cm, permet de relier la tige au support. Les masses marquées (200 g, 300 g, 400 g, 600 g et 800 g) ont été réalisées avec du gravier par suite de pesées, emballage et étiquetage.



Fig1: Images relatives au modèle 1

Modèle 2 : Dans le second modèle, le levier comprend : une tige longue de 120 cm, un support ou pivot long de 30 cm et un boulon de 5 cm de long qui relie la tige au support. Dans ce modèle, l'axe de rotation est fixé au tiers de la longueur de la tige (levier à bras inégaux). Son coût de réalisation n'est pas aussi très élevé (figure

2). L'équilibre du levier est réalisé avec des masses marquées de 400 g et 800 g (sable).



Fig2: Images relatives au modèle 2

2. Méthode :

Nous avons procédé à des investigations dans des établissements d'enseignements secondaires de Bamako et de Koulikoro auprès de certains enseignants ainsi qu'au niveau de certains élèves, afin d'identifier les difficultés liées à enseignement-apprentissage sur le moment d'une force. Au-delà de ces investigations, nous avons confectionné deux modèles de dispositifs simples, dans le but de faciliter l'illustration du phénomène physique du moment d'une force. Nous avons expérimenté et validé les deux modèles dans le Laboratoire Pluridisciplinaire des Sciences et Didactique des Sciences de l'Ecole Normale Supérieure de Bamako (LPSDIS).

Ces modèles ont, ensuite, été utilisés dans trois lycées de l'Académie d'Enseignement de Koulikoro (voir protocole expérimental) à savoir : le lycée privé "la Nouvelle Génération", le lycée "Dioba DIARRA" et le lycée "pie XII".

Protocole experimental

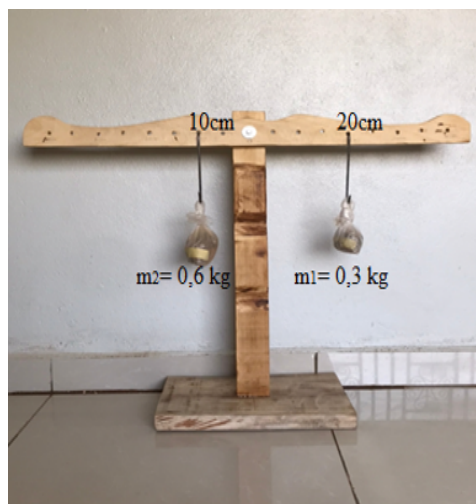


Fig.3 : Processus d'expérimentation

Accrochons deux masses marquées m_1 et m_2 de part et d'autres de l'axe de rotation du levier respectivement à des distances d_1 et d_2 .

Ces masses exercent des forces F_1 et F_2 qui correspondent à l'intensité des poids de ces masses. Les résultats des

mesures effectuées permettent de montrer qu'à l'équilibrer, le produit $F_1 * d_1$ est égal à $F_2 * d_2$. L'expérience est reprise pour au moins trois mesures (voir tableau1).

Tableau 1: Résultat des mesures pour l'équilibre du levier

Mesures	1	2	3
d_1 (cm)	20	20	30
F_1 (N)	2	3	4
m_1 (kg)	0,2	0,3	0,4
d_2 (cm)	10	10	15
F_2 (N)	4	6	8
m_2 (kg)	0,4	0,6	0,8

Le moment d'une force par rapport à un axe Δ est égal au produit de l'intensité F de la force par la distance entre la droite d'action de la force et l'axe. Ce qui correspondent à : $F_1 * d_1$ et $F_2 * d_2$.

$$M_{\Delta}(\vec{F}) = F * d$$

F : l'intensité de la force en newton (N)

d : le bras de levier en mètre (m)

unité : Newton mètre (N.m)

Après ces expérimentations dans les classes pilotes, nous avons évalué les élèves desdites classes afin de faire une étude comparative entre les résultats des classes pilotes et ceux des autres classes n'ayant pas bénéficié de l'expérimentation avec nos deux modèles. Les investigations se sont déroulées dans vingt-deux (22) lycées des Académies d'Enseignement de Bamako et de Koulikoro du 7 novembre 2022 au 16 juin 2023.

Les enquêtes ont concerné 1909 élèves et 167 enseignants. Comme instruments d'enquêtes, nous avons utilisé, d'une part, des fiches de questionnaire pour les enseignants et d'autre part des fiches d'évaluation pour les élèves. Les élèves ont répondu aux questions sur place, quant aux enseignants ils avaient la possibilité soit de répondre sur place ou d'amener les fiches de questionnaire à domicile pour un délai de retour d'une semaine.

Tableau 2: listes des lycées par Académie d'Enseignement

	Réponses/Oui		Réponses/Non	
Q_1	65	38,92%	102	61,07%
Q_2	71	42,51%	96	57,48%

III. Résultats

Nous avons, malgré des contraintes, pu récupérer 167 fiches sur 207 distribuées au niveau des enseignants.

Les diagrammes ci-dessous nous renseignent sur la situation des fiches (distribuées et récupérées) auprès de la population cible.

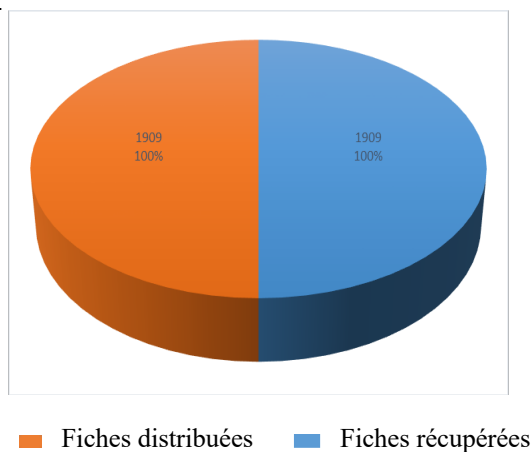
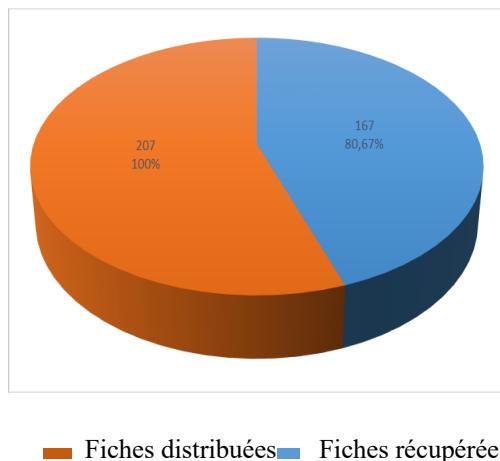


Figure 4: Situation des fiches d'évaluation auprès des élèves



Secteur 2: Situation des fiches auprès des enseignants

- Au niveau des enseignants

Les résultats obtenus à l'issue de l'enquête menée auprès des enseignants sont consignés dans le tableau 2. La question Q₁ est relative à la concrétisation de la leçon et la question Q₂ est relative aux difficultés d'enseignement du moment d'une force par rapport à un axe fixe.

Tableau 2 : Résultats de l'enquête au niveau des enseignants

Les réponses des enseignants à ces questions révèlent que :

- ✓ 102 enseignants sur 167 soit 61,1% ne concrétisent pas la leçon sur le moment d'une force par rapport à un axe.
- ✓ 71 enseignants sur 167 soit 42,51% ont des difficultés à enseigner le moment d'une force par rapport à un axe fixe.

Tableau 3: listes des lycées par Académie d'Enseignement

Académie d'Enseignement (AE)	Lycées	Sigles
Bamako Rive Gauche	Lycée Fily Dabo SISSOKO	L.F.D.S
	Lycée Technique de Bamako	L.T.B
	Lycée Bilaly SISSOKO	L.B.S
	Lycée BA Aminata DIALLO	L.B.A.D
	Lycée Bouillagui FADIGA	L.B.F
	Lycée Notre Dame du Niger	L.N.D.N
	Lycée Prosper KAMARA	L.P.K
	Lycée Kodonso	L.Kodonso
	Lycée la lumière	L.L
	Lycée Mamadou BEYE	L.M.B
	Lycée Technique Ganga	L.T.G
Bamako Rive Droite	Lycée Maarif	L.Maarif
	Lycée de NIAMAKORO	L.Niama
	Lycée Ibrahima LY	L.I.LY
	Lycée Kankou Moussa	L.K.M
	Lycée Fatoumata DOUCOURE	L.FAT
	Lycée Carnot	L.Carnot
	Lycée MÉMÉ	L.MÉMÉ
Koulikoro	Lycée Privé Biya	L.P.Biya
	Lycée Dioba DIARRA	L.D.D.K
	Lycée Privé Nouvelle Génération	L.P.N.G
	Lycée Séminaire Pie XII	LPiE XII

Ces résultants montrent qu'un nombre non négligeable d'enseignants ne concrétisent pas la leçon sur le moment d'une force par rapport à un axe fixe, cela valide nos hypothèses. Faute de laboratoires équipés, les enseignants qui concrétisent la leçon utilisent seulement les battants de la porte des salles de classe pour illustrer le phénomène de moment d'une force. Mais cette méthode ne permet pas la compréhension de la condition d'équilibre. Ils peuvent aussi associer d'autres méthodes pour illustrer le phénomène physique lié au moment d'une force à savoir : les simulations (images et vidéos), la confection d'un levier en bois conformément à notre protocole.

- Au niveau des élèves

Les tableaux qui suivent, donnent un aperçu général sur les résultats de l'évaluation que nous avons menée auprès des élèves. Les questions sont relatives à la compréhension générale du moment d'une force (définition, expression, unité et condition d'équilibre d'un corps susceptible de tourner autour d'un axe fixe).

Tableau 3 : Résultats de l'évaluation des élèves d'AE de Bamako et Koulikoro

Questions	Bonnes réponses		Mauvaises réponses	
	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
Q1	353	79,14%	93	20,85%
Q2	374	83,85%	72	16,14%
Q3	265	59,42%	181	40,58%
Q4	275	61,66%	171	38,34%

Les résultats de l'évaluation des élèves nous indiquent que :

- ✓ 1190 élèves sur 1909, soit 62,34% n'arrivent pas à définir le moment d'une force par rapport à un axe fixe ;
- ✓ 1155 élèves sur 1909, soit 60,50% ne parviennent pas à donner l'expression du moment d'une force par rapport à un axe fixe ;
- ✓ 1567 élèves sur 1909, soit 82,08% ne savent pas donner l'unité du moment d'une force par rapport à un axe fixe ;
- ✓ 1453 élèves sur 1909, soit 76,11% ne connaissent pas la définition du bras de levier.

L'analyse montre que les élèves évalués, en majorité, éprouvent des difficultés dans les différentes questions. Cela s'explique par la non concrétisation de la leçon sur le moment d'une force par rapport à un axe fixe par les enseignants.

Pour remédier à ces mauvais résultats, les enseignants peuvent confectionner et utiliser un levier en bois pour faciliter l'illustration du phénomène physique conformément à notre protocole. Avec ce dispositif, il suffit de chercher deux masses marquées de sorte que si l'on place ces masses à deux distances différentes on peut obtenir les conditions d'équilibre du levier, puis déterminer le moment d'une force. Aussi, devront-ils multiplier des exercices d'applications pendant le cours théorique afin de consolider les notions déjà acquises.

Tableau 4 : Résultats de l'évaluation des élèves des classes pilotes

Questions	Bonnes réponses		Mauvaises réponses	
	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
Q1	719	37,66%	1190	62,34%
Q2	754	39,49%	1155	60,50%
Q3	342	17,92%	1567	82,08%
Q4	456	23,89%	1453	76,11%

A la lumière de nos investigations, il apparaît clairement que les résultats des classes pilotes (tableau 4) sont meilleurs que ceux des autres classes (tableau 3). Lesdits résultats traduisent l'impact positif qu'engendre l'application des différentes contributions données pour chaque question dans les trois lycées pilotes.

IV. Conclusion et perspectives

Les recherches ont été menées avec abnégation. Le but recherché est d'améliorer les conditions d'apprentissage et d'enseignement du chapitre moment d'une force par rapport à un axe fixe en classe de 10ème Commune Générale. Nous avons mené nos enquêtes dans les établissements secondaires de Bamako et de Koulikoro. La méthodologie utilisée est la méthode d'investigation (l'évaluation des élèves et l'enquête auprès des enseignants). Les élèves répondants ont effectivement des difficultés de compréhension du moment d'une force par rapport à un axe fixe. 1190 élèves sur 1909, soit 62,34% n'arrivent pas à définir le moment d'une force par rapport à un axe fixe. 1155 sur 1909 élèves, soit 60,50% ne parviennent pas à donner l'expression du moment d'une force par rapport à un axe fixe. 1453 élèves sur 1909, soit 76,11% ne savent pas définir le bras de levier. 102 enseignants sur 167, soit 61,07% des enseignants disent ne pas concrétiser la leçon sur le moment d'une force par rapport à un axe fixe.

Pour améliorer ces résultats, nous avons confectionné et expérimenté deux dispositifs simples de levier pour trois lycées pilotes. Les résultats obtenus sont probants :

- ✚ 353 sur 446 élèves, soit 79,14% arrivent à définir le moment d'une force par rapport à un axe fixe ;
- ✚ 374 sur 446 élèves, soit 83,85% savent donner l'expression du moment d'une force par rapport à un axe fixe ;
- ✚ 265 sur 446 élèves, soit 59,42% parviennent à donner l'unité du moment d'une force par rapport à un axe fixe ;
- ✚ 323 sur 446 élèves, soit 72,42% connaissent la définition du bras de levier.

La concrétisation sur l'équilibre permet effectivement aux élèves de mieux comprendre la condition fondamentale de la statique d'un corps susceptible de tourner autour d'un axe fixe.

V. Références

- [1] Milot, *Place des nouvelles technologies dans l'enseignement de la physique-chimie.*, Didaskalia 8,97-109, 1996.
- [2] A. K. Jimoyiannis, *Computer simulations in physics teaching and learning: A case study on students understanding of trajectory motion.*, Computers & Education, 36(2), 183-204., 2001.
- [3] P. T. Gaidioz, *Aider l'élève à comprendre le fonctionnement de la physique et son articulation avec la vie quotidienne*, Bulletin de l'Union des physiciens, 98(866), 1029-1042., 2004.
- [4] A. V. Tiberghien, *Etudes de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de physique.*, Cahiers du français contemporain, 10, 153-176., 2005.
- [5] J. Canal, *Conceptions des élèves sur le circuit électronique, leurs comparaisons avec d'autres modes de transfert d'énergie.*, 101, 791, 815, 2007.

- [6] k. Kouakou-Innocent, *Les conceptualisations des élèves ivoiriens concernant les interactions en physique*, 2010.
- [7] S. B. F.-M. Masson, *Les conceptions erronées des élèves en électricité ne disparaissent peut-être jamais de leur cerveau.*, 2012.
- [8] B. & L. Mazouze, *Résolution de problèmes et apprentissage des ondes: Quels types de difficultés rencontrent les élèves.*, Review of Science, Mathematics and ICT Education, 9(2), 25-40-40, 2015.
- [9] G. Borst, *Raisonnement et apprentissage des sciences: Résistance cognitive, heuristiques et conceptions naïves.*, Administration Education, N° 1525425631, 2016.
- [10] K. Nguessan, *Contribution à l'Analyse du mode d'Evaluation des Connaissances des ELèves dans le Manuel Intitulé Physique Chimie (Collection Arex, les Classiques Africains): Exemple de la Mécanique en Classe de Seconde Scientifique.*, Canadian Social Science, 12(9), 79-84, 2016.
- [11] B. B.-M. Jemaa, *Impact de la démarche d'investigation par simulation des ondes mécaniques sur le raisonnement des élèves.*, Actes des 9èmes rencontres de l'ARDIST, 7, 2016.
- [12] H. Demba, *L'impact de l'utilisation des simulations informatiques sur la compréhension des concepts de physique en situation d'enseignement en classe entière au collège en Côte d'Ivoire. Etude du cas d'un simulateur d'oscilloscope.*, Thèse de doctorat, 2020.
- [13] C. Buty, *Richesses et limites d'un "modèle matérialisé" informatisé en optique géométrique.*, Didaskalia 23, 39-63, 2003.
- [14] W. F. Houssaini, *Importance des expériences dans l'enseignement et l'apprentissage du système nerveux au collège: Etude de cas.*, European Scientific Journal, 10(28), 155-168., 2014.
- [15] M.-I. Chekour, *Comment remédier au problème du manque de matériel scientifique dans les laboratoires marocains: cas de l'électricité.*, Info-CRDE, 19, 30-32, 2016.
- [16] M.-I. Chekour, *Vers l'introduction du simulateur Pspice dans l'enseignement de l'électricité : cas du tronc Commun Sciences.*, EpiNet : Revue électronique de l'EPI, 175., 2015a.
- [17] O. B. N. Alj, «Intégration des TIC dans l'enseignement des sciences physiques au Maroc dans le cadre du programme Génie : difficultés et obstacles.» *Revue Internationale des Technologies en Pédagogie Universitaire*, pp. 38-48, 2013.
- [18] M.-I. Chekour, «Distance training for physics teachers in Pspice simulator.» *Mediterranean Journal of Social Sciences*, pp. 6(3 S1) 232-238, 2015b.
- [19] P. C. Marzin, *L'utilisation d'un arbre des tâches pour concevoir et analyser des situations d'apprentissage : Trois TP intégrant la conception d'un protocole expérimental par les élèves, en géologie, chimie et physique.* 8, P. 265, 2007.
- [20] L. Louis, *L'expérimental en Sciences physiques*, p. 41., 1902.
- [21] J.-P. Joel, *Nécessité de l'expérimentation et conception de quelques matériels didactiques pour l'enseignement des sciences physiques au lycée.*, MINI MEMOIRE PROFESSIONNEL, 2011.
- [22] Benson, «Expression valable lorsque l'axe de rotation est l'un des axes principaux d'inertie du corps considéré,» pp. 337-340, 2009.