

Aix-Marseille Université, CGGG UMR7304, ED : Cognition, langage,  
éducation (356)

Thèse de Doctorat en philosophie

Spécialité : Epistémologie

Etude comparée de l'enseignement de la théorie de la relativité dans le  
secondaire en physique et en philosophie, en France, en Italie et en Tunisie ;  
apport de l'histoire des sciences à son enseignement.

Soutenue par :

Hafedh TRABELSI

Le 21 Décembre 2019 à Aix-en-Provence

Membres de jury :

Laurence MAURINES : Président du jury, Professeur des universités à  
l'université Paris Sud.

Philippe NABONNAND : Rapporteur du jury, Professeurs des universités,  
Université de Lorraine.

Gabriella CROCCO : Directeur de Thèse, Professeur des universités à Aix-  
Marseille Université

Christian BRACCO : Co-Directeur de Thèse, INSPE de l'académie de Nice à  
l'Université de Nice.

## **Remerciement**

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de thèse ; Gabriella Crocco pour ses recommandations et ses conseils tout au long de mon travail de recherche, je tiens aussi à remercier mon co-encadreur Christian Bracco pour son soutien et son suivi de très proche tout au long de ma thèse.

Je remercie aussi Laurence Maurines et Philippe Nabonnand d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse.

Je remercie aussi M.Mohamed Bitri inspecteur principal des sciences physiques au secondaire à la retraite pour son aide et sa collaboration à réaliser avec lui un entretien ouvert.

Je remercie aussi mes collègues et les élèves de terminale sciences et informatique de l'année scolaire 2018/2019 au lycée Taha Houssein Megrine Gouvernorat de Ben Arous.

Je remercie encore les étudiants qui ont volontairement participé à la réalisation de mon questionnaire.

## Dédicaces

A la mémoire de mon père Mohamed et à la mémoire de ma mère Hamida, qui ont veillé pour mon éducation et mon bien être, paix à leurs âmes.

A ma chère femme Saloua qui n'a cessé de m'encourager tout au long de ma recherche surtout pendant les moments difficiles, que je lui souhaite tout le bonheur du monde.

A mes chers enfants Nizar et Rami que je leur souhaite la réussite dans leurs études, puis dans leurs expériences dans la vie et tout le bonheur du monde.

A mon cher frère Mounir qui m'a tellement encouragé et aidé tout au long de ma recherche et surtout pendant mes séjours à Marseille que je lui souhaite la bonne santé et tout le bonheur du monde ainsi que sa femme Madiha et ses Filles : Sana, Maha et Hana.

A ma chère sœur Saloua qui m'a tellement encouragé et soutenu tout au long de ma recherche, que je lui souhaite tout le bonheur du monde ainsi que son mari Samir et leurs enfants : Hazem, Salim et Eya.

## **Sommaire :**

Introduction générale.....p 6

### **PARTIE A**

**Chapitre I** : Description de l'état des lieux de l'enseignement secondaire tunisien et en particulier : enseignement de la physique, des mathématiques et de la philosophie.....p 25

I-1-Introduction.....p 26

I-2- La réforme éducative en Tunisie 91/92.....p 27

I-3- Cadre de l'enseignement secondaire en Tunisie.....p 28

I-4- La place de la physique au secondaire.....p 31

I-5- Concevoir une formation adéquate pour des enseignants de sciences.....p 42

I-6- Quelles places pour l'enseignement de la physique et de la philosophie.....p 45

I-7- Quelle place pour les mathématiques dans l'enseignement de la physique.....p 48

**Chapitre II** : Histoire de l'enseignement de la notion de relativité et du concept de temps dans les programmes officiels tunisiens en Physique et en Philosophie depuis 1970.....p 52

II-1- Introduction.....p 53

II-2- Histoire de l'enseignement de la physique depuis 1970 en Tunisie et place de la relativité.....p 53

II-3- Histoire de l'enseignement de la philosophie depuis 1970 en Tunisie et place de la relativité.....p 65

II-4- Analyse des programmes officiels et discussions.....p 66

**Chapitre III** : Etude comparée des contenus actuels des programmes en relativité, en physique et en philosophie dans le secondaire : en France, en Italie et en Tunisie.....p 78

III-1- Introduction.....p 79

III-2- La place de la relativité dans les programmes officiels actuels en France et en Italie..p 79

III-3- Etude comparée.....	p 104
----------------------------	-------

## **PARTIE B**

<b><u>Chapitre IV</u></b> : Histoires de la relativité et de la mesure de la vitesse de la lumière.....	p 113
---	-------

IV-1- De la relativité Galiléenne à la relativité restreinte.....	p 114
---	-------

IV-2- Histoire de la vitesse de la lumière.....	p 124
---	-------

IV-3- Conclusion.....	p 137
-----------------------	-------

<b><u>Chapitre V</u></b> : Analyse des chapitres écrits par Albert Einstein sur sa nouvelle théorie : la relativité restreinte et les problèmes de son articulation en termes de contenus des programmes d'enseignement.....	p 139
--	-------

V-1- Introduction.....	p 140
------------------------	-------

V-2- La théorie de la relativité restreinte, d'après le livre d'Albert Einstein.....	p 144
--	-------

V-3- Approche philosophique et obstacles épistémologiques de la théorie de la relativité restreinte.....	p 166
--	-------

V-4-Conclusion.....	p 169
---------------------	-------

<b><u>Chapitre VI</u></b> : Apports philosophiques à la théorie de la relativité restreinte : discussions philosophiques sur les concepts : espace et temps, théorie et vérité, mesures et observations.....	p 171
--	-------

VI-1- Introduction et problématique.....	p 173
--	-------

VI-2- Discussions philosophiques sur les concepts espace et temps.....	p 173
--	-------

VI-3- Discussions philosophiques sur les concepts vérité et théorie physique.....	p 181
---	-------

VI-4- Discussions philosophiques sur les concepts : mesures et observateurs.....	p 189
--	-------

VI-5- Conclusion.....	p 191
-----------------------	-------

<b><u>Chapitre VII</u></b> : Les approches Didactiques et conceptuelles à partir des écrits d'Albert Einstein dans son livre la théorie de la relativité restreinte et générale.....	p 193
--	-------

VII-1- Introduction.....	p 195
VII-2- Les approches didactiques et pédagogiques à l’enseignement de la physique et de la philosophie.....	p 197
VII-3- Les approches conceptuelles utilisées pour la fondation de sa nouvelle théorie.....	p 200
<b><u>Chapitre VIII</u></b> : Propositions d’enseignement de la cinématique relativiste comme une modification de la relativité galiléenne .....	p 202
VIII-1- Visions et critiques des écrits d’Albert Einstein.....	p 203
VIII-2- Propositions d’enseignement de la cinématique relativiste au premier ordre pour les élèves de terminales.....	p 205
<b><u>Chapitre IX</u></b> : Expérimentation : Questionnaire, analyse du questionnaire, proposition d’une séquence d’enseignement, retour des élèves.....	p 215
IX-1- Introduction.....	p 216
IX-2- Choix du questionnaire.....	p 216
IX-3- Objectif du questionnaire.....	p 216
IX-4- Echantillonnage .....	p 217
IX-5- Résultats et analyse des réponses des élèves au questionnaire.....	p 217
IX-6- Première conclusion (avant séquence d’enseignement).....	p 232
IX-7- Analyse des réponses des élèves au questionnaire post-test.....	p 234
IX-8- Deuxième conclusion (après séquence d’enseignement).....	p 243
Conclusion générale.....	p 245
Bibliographie.....	p 252
Annexes.....	p 258

## **Introduction générale**

## **I- Choix du sujet :**

La théorie de la relativité restreinte a participé à l'évolution de la physique et est devenue utile dans notre vie quotidienne, mais son enseignement à des élèves semble avoir toujours posé problème (De Hosson et Kermen, 2012).

Nous allons baser notre recherche sur l'histoire de l'enseignement de la relativité galiléenne et de la relativité restreinte en Tunisie à travers une étude comparée de son enseignement actuel au secondaire aussi bien en physique qu'en philosophie en France et en Italie.

En Tunisie la théorie de la relativité restreinte a été introduite en 1992 puis abandonnée en 1998. Notons d'ores et déjà que son introduction n'avait aucun lien avec la relativité galiléenne dans les programmes.

Quant à la Philosophie, les discussions philosophiques sur les concepts de la théorie de la relativité restreinte (relativité du temps, relativité de l'espace, vérité...) étaient totalement absentes des programmes officiels tunisiens, malgré les diverses controverses philosophiques de l'époque (Meyerson, Bergson, Bachelard...).

Nous avons choisi cette théorie pour notre étude à cause de son importance scientifique et philosophique dans l'évolution de la physique et de la philosophie et du rôle important qu'elle peut ainsi jouer auprès des élèves et des enseignants pour l'acquisition des concepts.

## **II- Problématique :**

Aujourd'hui, l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte constitue une partie de la physique contemporaine à cause de ses nouvelles applications au GPS, aux accélérateurs de particules, à la cosmologie et à l'astrophysique.

Nous nous demandons :

Pourquoi les élèves tunisiens du secondaire ne bénéficient actuellement pas d'un enseignement de cette théorie, alors qu'elle est enseignée depuis longtemps en Italie, qu'elle a été réintroduite en France en 2011 et introduite en Corée de sud en 2012 (Gim, 2016) par exemple? Rappelons que l'élimination de cette théorie des programmes officiels s'est faite dans le cadre d'un allègement des programmes de physique pour les classes scientifiques en terminale suite à une décision politique.

Pourquoi les élèves tunisiens du secondaire ne sont-ils pas confrontés aux obstacles épistémologiques rencontrés par l'évolution de la théorie de la connaissance à partir des liens entre la théorie de la relativité restreinte et la relativité classique (enseignée actuellement) ? Surtout que l'enseignement de la relativité galiléenne présente aussi des difficultés d'acquisition par les élèves du secondaire (de Hosson et Kermen, 2012 ; Dimitriadi et Halkia, 2012 ; Baglio, 2005).

Pourquoi ne propose-t-on pas aux élèves tunisiens du secondaire de faire les liens entre physique et philosophie dans le cadre d'une démarche d'interdisciplinarité qui les rende conscients du caractère incontournable de l'importance des idées philosophiques (Lévy et Bourquin, Paroz, 2005) ?

Pourtant les fondamentaux telles que l'invariance de la vitesse de la lumière et l'équivalence masse/énergie sont enseignées en classe de Terminale scientifique. Mais quel sens prêter à cet enseignement si l'élève n'est pas conscient des liens historiques, scientifiques et philosophiques entre les différents concepts dans la mise en perspective d'une évolution des idées ?

C'est pourquoi nous entamons cette recherche afin de contribuer au processus de la réforme éducative en cours, en Tunisie, qui devrait conduire à un changement des programmes officiels de physique en classes de terminales.

## **II- Objectifs de la recherche :**

Notre approche est originale car elle touche aux processus Enseignement/Apprentissage de deux disciplines (la physique et la philosophie) et quelle s'articule autour d'une triple approche :

Approche didactique (Rosmorduc, 1985 ; Balpe, 1987 ; Robardet, 2001 ; Viennot, 2012 ; Weisbush, 2014) : Transposition didactique : Construire un savoir à enseigner de la théorie de la relativité restreinte simple et fiable, accessible à l'acquisition de nos élèves, sans formalisme mathématique complexe.

Approche historique (Dupin, 2006 ; Fillon, 1991 ; Guedj, 2005 ; Maurines, 2005, 2011 ; Martinand, 1993) : Revenir à l'histoire des sciences, non pas de manière stéréotypée ou anecdotique, mais de manière détaillée et profonde, en mettant en avant des parties de l'histoire de la relativité dont l'importance a parfois échappé aux historiens ou aux philosophes des

sciences eux-mêmes, afin de montrer aux élèves les liens entre relativité classique et théorie de la relativité restreinte.

Approche interdisciplinaire (Gerini, 2005 ; Lévy et al. 2005 ; Paty, 1989, 2007, 2009 ; Parrini, 2009 ; Renoirte, 2005) : Présenter aux élèves, à partir de la relativité, les discussions physiques et philosophiques et les liens entre ces deux disciplines afin d'assurer une meilleure illustration des concepts (relativité du temps et relativité de l'espace) de la théorie de la relativité et de leurs évolutions et ainsi encourager la motivation des élèves dans les deux disciplines.

C'est pourquoi nous allons aborder plusieurs questions telles que :

- Quels sont les enjeux de la théorie de la relativité, dans le cadre de l'enseignement d'une discipline donnée (physique, philosophie...) ?
- Comment l'inadéquation entre les enjeux théoriques et l'enseignement favorisera -t- elle le développement de ces disciplines ou, éventuellement, l'entravera-elle ?
- Qu'en est- il dans d'autres pays ?
- A-t-on aujourd'hui réellement pris la mesure du sens à donner à l'invariance de la célérité de la lumière (second postulat d'Einstein pour fonder la théorie de la relativité restreinte) ?

Pour répondre à ces questions nous nous sommes référés au contexte relatif au débat scientifique et philosophique sur le principe de relativité, avec des textes et des articles de l'histoire et de la didactique des sciences (de Hosson, 2011) et de la philosophie des sciences (Poincaré, 1902, 1905 ; Bergson, 1922).

Cette recherche n'est ni une recherche sur l'histoire des sciences ni sur la philosophie des sciences mais comme elle s'interroge sur la possibilité de transmettre un savoir relatif à la physique, il nous a semblé nécessaire d'utiliser l'histoire des sciences et la philosophie des sciences pour trouver une solution aux problèmes pédagogiques de l'enseignement de la relativité. Je ne prétends pas d'avoir donné une analyse exhaustive du contexte historique de l'élaboration de la théorie de la relativité restreinte, ni non plus avoir traité toutes les implications philosophiques de cette théorie scientifique, mais j'espère avoir pris en compte tous les aspects cités plus haut pour que l'enseignement de la relativité restreinte puisse trouver sa place dans l'enseignement transdisciplinaire pour les classes de Terminale, en Tunisie et ailleurs.

### **III- Plan de la recherche :**

Cette thèse s'organise en deux parties :

#### **La première partie (Partie A) :**

Cette partie est constituée de trois chapitres consacrés aux différentes questions pédagogiques et didactiques de l'enseignement de la physique, de la philosophie et des mathématiques avec les réformes éducatives réalisées jusqu'à maintenant dans le secondaire :

- la description de l'état des lieux de l'enseignement secondaire tunisien et en particulier l'enseignement de la physique, des mathématiques et de la philosophie et les liens qui peuvent exister entre ces disciplines et des difficultés rencontrées dans la pratique.
- un retour sur l'histoire de l'enseignement de la physique et de la philosophie en Tunisie depuis 1970 et un point sur l'histoire de l'enseignement de la notion de relativité (galiléenne et restreinte) et de la vitesse de la lumière.
- la réalisation d'une étude comparée avec l'enseignement actuel de la relativité au secondaire en France et en Italie et en particulier de la théorie de la relativité restreinte en physique et en philosophie en classe de terminale.

#### **La deuxième partie (Partie B) :**

Cette partie est constituée de six chapitres consacrés à l'analyse historico-conceptuelles de la théorie de la relativité restreinte et aux différentes discussions philosophiques, avant une proposition concrète d'une séquence de son enseignement avec les élèves de terminale sciences et de son évaluation, avec successivement :

- La description de l'histoire des différentes phases d'évolution du principe de relativité de Galilée à Einstein, de la mesure de la vitesse de la lumière et de sa constance par rapport à tout référentiel galiléen (ce qui constitue le deuxième postulat de la nouvelle théorie).
- l'analyse des chapitres rédigés par Albert Einstein sur la théorie de la relativité restreinte dans son livre publié en 1916 intitulé *La théorie de la relativité restreinte et générale*, en le considérant non seulement comme un ouvrage aux riches implications physiques et philosophiques, mais aussi sur un plan didactique et pédagogique, afin de détecter les problèmes

d'articulation de cette théorie en terme de programme d'enseignement en physique au secondaire.

- l'exposé de différentes discussions philosophiques sur les notions : espace-temps, vérités des théories physiques, mesures et observations.

- enfin, la proposition d'une méthode pédagogique et didactique d'enseignement de cette nouvelle théorie, par la réalisation d'une séquence d'enseignement avec les élèves, loin des formules mathématiques complexes (les transformations de Lorentz de 1905 avec leur facteur de contraction) ou abstraites ou géométriques (l'espace-temps de Minkowski), qui soit compréhensible par les élèves de terminales, en s'appuyant sur leurs connaissances antérieures et en faisant le lien avec la relativité galiléenne déjà enseignée dans les classes précédentes.

Pour rentrer plus dans le détail, la première Partie A est elle-même constituée de trois chapitres :

### -1- Le premier chapitre :

Dans ce premier chapitre, nous rappellerons les différentes grandes réformes éducatives réalisées depuis l'indépendance de la Tunisie (1956), essentiellement la réforme de 1991. Celle-ci vise en particulier les disciplines scientifiques, en cherchant à donner une nouvelle vision des sciences aux élèves à partir de quelques questions : Quelle image a l'élève de la science ? Qu'est-ce que la science ? L'objectif est de changer leurs conceptions erronées tirées du sens commun.

Pour cela, de nouvelles méthodes pédagogiques ont été introduites et un certain équilibre entre les disciplines (pour rapprocher notamment les coefficients des différentes disciplines, et modifier le nombre d'heure d'apprentissage) a été recherché afin d'éviter qu'une discipline ne soit négligée par rapport à une autre ; or cet équilibre a abouti à la diminution du nombre d'heures en sciences physiques par rapport aux mathématiques.

Du point de vu structurel et depuis la réforme de 1991 à aujourd'hui, le système éducatif est constitué d'un enseignement de base de 9 ans et d'un enseignement secondaire de 4 ans avec cinq sections dans trois filières : science et technique, économie et gestion, littérature.

Malgré le fait que cette réforme de 1991 était accompagnée d'aménagements et de la mise en chantier de nouvelles constructions de collèges et de lycées, ainsi que d'équipement des laboratoires scientifiques et techniques, elle n'est pas parvenue à améliorer le processus

enseignement /apprentissage. Ainsi, beaucoup de problèmes et de difficultés sont apparus, tels que le niveau très faible d'acquisition des connaissances scientifiques, mis en évidence par les études internationales sur l'éducation en Tunisie (PISA : Programme International pour le Suivi des Acquis, 2003, 2012, 2015), la faiblesse de la maîtrise linguistique, y compris de la langue arabe, l'abandon des études par un grand nombre d'élèves (de l'ordre de 100 000 élèves par année scolaire pour une population de deux millions d'élèves, soit 5%), etc.

Ces difficultés se manifestent aussi spécifiquement dans l'apprentissage de la physique, c'est pourquoi d'autres réformes en 2002 (sur l'orientation) et en 2010 (sur le contenu des programmes) ont visé plus particulièrement cette discipline en se basant essentiellement sur l'allègement du contenu des programmes de physique pour les recentrer sur l'essentiel, diminuer le nombre d'heures d'apprentissage, diminuer son coefficient, renforcer les liens entre la physique et les autres disciplines comme les mathématiques, la philosophie et la biologie.

En philosophie, ce n'est qu'en 2006 que les nouveaux programmes ont été mis en vigueur leur objectif étant d'aider les élèves à penser par eux-mêmes, à développer leurs capacités d'observation, d'analyse et de synthèse. L'enseignement de la philosophie en Tunisie reste malgré tout toujours loin d'une approche interdisciplinaire.

En mathématiques, les élèves tunisiens rencontrent des difficultés d'acquisition des nouvelles connaissances et un grand nombre d'élèves choisissent des filières littéraires ou économiques rien que pour fuir les matières scientifiques et en particulier les mathématiques et les sciences physiques.

Des réformes aussi ont touché les mathématiques, au primaire comme au secondaire ; son enseignement s'est focalisé sur la démarche et le raisonnement de l'élève mais malheureusement il ne tient pas compte des liens avec d'autres disciplines comme la physique ou la philosophie.

Nous donnerons dans ce chapitre quelques exemples se rapportant aux difficultés rencontrées par les enseignants des sciences physiques et par les élèves au moment de l'énoncé de lois ou l'obtention d'équations utilisant des formules mathématiques nouvelles non encore vues en mathématiques.

## -2-Le deuxième chapitre :

Dans ce chapitre, nous reviendrons en détail sur l'histoire de l'enseignement de la physique et de la philosophie dans le secondaire en Tunisie, en ce qui concerne son poids dans les programmes, l'évolution de la répartition horaire depuis 1970 et la place de la relativité.

Nous avons trouvé que l'élève tunisien débute l'apprentissage de la physique à l'âge 16 ans en quatrième année du secondaire.

La méthode d'enseignement pour les classes de quatrième, cinquième et sixième année est une méthode inductive (qui permettra à l'élève de réaliser quelques expériences et aboutir à des résultats qui l'invitent à généraliser et formuler des lois physiques) et pour la classe de septième année (Baccalauréat) elle devient déductive (ce qui permettra à l'élève, à partir d'une loi physique, de déduire un certain nombre de résultats expérimentaux).

Depuis 1970, la relativité galiléenne et la théorie de la relativité restreinte étaient absentes des programmes de physique, et ce n'est qu'en 1993, au début d'une grande réforme éducative (1991), qu'il y a eu :

- révision de la structure de l'enseignement primaire et secondaire et création de deux cycles d'enseignement : un enseignement de base formé de six ans de primaire et trois ans de collège et un enseignement secondaire de la première année secondaire jusqu'à la quatrième année (Baccalauréat).
- introduction pour la première fois dans l'histoire de l'éducation tunisienne depuis l'indépendance de l'enseignement des sciences physiques au collège.
- réduction du nombre d'heures de sciences physiques dans le secondaire (pour les deux premières années).
- introduction, pour la première fois, de la partie cinématique et de la notion de relativité du mouvement pour les élèves de première année (à partir de 16 ans).
- introduction de la théorie de la relativité restreinte pour montrer aux élèves du Baccalauréat l'insuffisance de la mécanique newtonienne dans le cas d'un choc élastique proton-proton.

C'est en 1998 que le chapitre se rapportant à la théorie de la relativité restreinte a été supprimé des programmes de physique et nous reviendrons sur les raisons avancées pour cette suppression. En ce qui concerne la philosophie, depuis 1970 son enseignement était pour les élèves de Terminales, en langue française.

C'est à partir de l'année scolaire 1979/1980 que son enseignement commence en langue arabe et c'est à partir de 1993 (d'après la grande réforme 1991) que la philosophie est enseignée sur deux années (troisième et quatrième année du secondaire).

Le concept de relativité n'apparaît pas dans les programmes de philosophie, sauf dans la réforme de 1991 où la notion de relatif et d'absolu font une apparition succincte à travers la lecture de quelques ouvrages sur la relativité.

### -3-Le troisième chapitre :

Dans ce chapitre, nous procédons à une étude comparative du processus enseignement/apprentissage de la physique et de la philosophie en Tunisie, en France et en Italie. Nous remarquerons tout d'abord que les trois pays n'ont pas le même cursus scolaire au secondaire, c'est pourquoi nous avons choisi de résumer les trois cursus dans le tableau ci-dessous :

	Tunisie	Age	France	Age	Italie	Age
Collège	3 ans : 7 <sup>ème</sup> , 8 <sup>ème</sup> et 9 <sup>ème</sup> année	De 12 à 15 ans	4 ans : 6 <sup>ème</sup> , 5 <sup>ème</sup> , 4 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> année	De 11 à 15 ans	3 ans (scuola media) : prima, seconda et terza	De 11 à 14 ans
Lycée	4ans : 1 <sup>ère</sup> , 2 <sup>ème</sup> , 3 <sup>ème</sup> et 4 <sup>ème</sup> année	De 15 à 19 ans	3ans : seconde, première et terminale	De 15 à 18 ans	5 ans : prima, seconda, terza, quarta et quinta	De 14 à 19 ans
Filières	Quatre filières : Technologie, Sciences Expérimentales, Economie-		Terminale scientifique, Economie et sociale et Littéraire		Six types de Lycée : artistique, classique, linguistique,	

	Gestion et Lettres				musique et dance, sciences humaines. En plus des instituts techniques (économie et technologie) et des instituts professionnels (service et artisanat).	
--	-----------------------	--	--	--	---	--

Ayant une idée du déroulement du cursus scolaire dans chaque pays, nous donnerons dans ce chapitre les objectifs fixés pour l'enseignement de la physique et de la philosophie, qui nous ont paru être presque identiques, concernant l'amélioration des compétences scientifiques des élèves pour mieux s'adapter aux évolutions technologiques et sociétales et aussi concernant les liens de ces disciplines (physique et philosophie) entre elles et avec les autres disciplines telles que les mathématiques, les S.V.T et les NTIC...

Au-delà des objectifs, nous donnerons aussi les contenus des programmes de physique et de philosophie dans les trois pays et en particulier les contenus qui se rapportent à la relativité galiléenne et à la théorie de la relativité restreinte.

Nous remarquons que, actuellement, seule la Tunisie n'a pas introduit la théorie de la relativité restreinte dans les programmes officiels, alors qu'elle avait été introduite en 1993/94 avant d'être éliminée en 1997/98. Pourquoi ? Nous discuterons ce point particulier important avec Monsieur Mohamed Bitri, ex-inspecteur principal, aujourd'hui à la retraite, à la suite d'un entretien constitué d'un ensemble de questions (annexe n°1). M. Bitri a participé à la construction des contenus des programmes officiels en sciences physique durant la période 1982-2007.

Nous remarquerons que l'enseignement de la philosophie au secondaire diffère d'un pays à un autre : trois ans d'enseignement de la philosophie en Italie, deux ans d'enseignement en Tunisie et une année seulement en terminale en France.

Ceci a bien évidemment des répercussions sur l'enseignement de la philosophie ; par exemple, en Italie les programmes paraîtront plus riches puisqu'ils s'intéressent à la philosophie antique et médiévale (Platon, Aristote...) et à la philosophie moderne (Galilée, Descartes, Kant, Hegel, Bergson...) alors qu'en France, le programme propose une série d'auteurs d'époques différentes et incite l'enseignant de philosophie à choisir les auteurs et les époques correspondantes sans insister sur l'apport de chaque époque.

Une fois dressé l'état des lieux de l'enseignement de la relativité, galiléenne et restreinte, dans les programmes de lycée dans les pays concernés par notre étude, nous nous proposons dans la partie II de cette thèse, de reprendre en quelque sorte à la source les questionnements sur l'enseignement de la relativité. Il nous a semblé pertinent de revenir sur le premier ouvrage exposant cette théorie en détail à un public cultivé, rédigé de manière accessible, avec un minimum de formalisme et qui visait à diffuser cette théorie. Nous nous sommes ainsi investis dans l'analyse des chapitres écrits par Albert Einstein sur la théorie de la relativité restreinte dans son livre *La théorie de la relativité restreinte et générale* publié en 1916 (édition 2010), que nous avons complété par quelques sources bien connues en histoire et en philosophie des sciences. Nous consacrerons en partie le chapitre IX, à l'expérimentation de cette démarche avec modification dans l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec les élèves tunisiens de Terminale

#### **-4-Le quatrième chapitre :**

Dans ce chapitre nous avons focalisé notre recherche d'une part sur l'importance des liens existants entre la relativité galiléenne et la théorie de la relativité restreinte en réalisant, d'une part, une étude approfondie de l'histoire du concept relativité et en revenant, d'autre part, sur l'importance de l'histoire de la mesure de la célérité de la lumière, en lien avec l'évolution des idées sur la théorie de la relativité.

Nous avons commencé par expliquer le principe de relativité galiléenne : notion de référentiel galiléen, transformation galiléenne puis la relativité newtonienne qui constitue le fondement de la mécanique classique. Cette dernière appelée aussi la mécanique newtonienne était constituée de trois grandes parties de la physique :

- Partie Cinématique : mouvement, trajectoire, vitesse...
- Partie Statique : conditions d'équilibre d'un solide.

- Partie Dynamique : Forces, Relation fondamentale de la dynamique.

C'est Newton, après Descartes (et Galilée), qui a énoncé la première loi de la mécanique classique appelée le principe d'inertie ou principe de relativité (relativité galiléenne).

La physique newtonienne a dominé plus de 200 ans, jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle où elle a été confrontée à des obstacles dans de nouveaux domaines de la physique comme l'optique et l'électromagnétisme, et plus généralement l'électrodynamique des corps en mouvement. Cette confrontation a poussé les physiciens de l'époque à trouver des solutions aux tentatives infructueuses de détecter le mouvement de la Terre dans l'éther (le support prêté à la lumière pour se propager), entretenant des discussions concernant l'éther et l'espace absolu, qui trouvent un premier aboutissement dans les travaux de Lorentz de 1895 assurant une forme d'invariance aux équations de l'électromagnétisme au premier ordre en  $V/c$  ( $V$  vitesse de la Terre et  $c$  celle de la lumière) complétée par une contraction dans le sens du mouvement, mises en perspectives dans les analyses physiques et philosophiques de Poincaré, etc. Ces discussions ont poussé Einstein à fonder la nouvelle théorie de la relativité restreinte sur deux célèbres postulats :

- 1<sup>er</sup> postulat (dit principe de relativité) : toutes les lois de la physique sont les mêmes dans les référentiels galiléens

- 2<sup>e</sup> postulat : la vitesse de la lumière dans le vide est la même quel que soit l'état de mouvement de la source lumineuse,

Ils s'expriment mathématiquement par les transformations de Lorentz de 1904, exprimées de manière concise par Poincaré et Einstein en juin 1905, qui remplacent désormais celles de Galilée (le groupe de Lorentz).

Aussi dans ce chapitre nous essaierons de cerner la place de la célérité de la lumière dans les programmes officiels tunisiens au secondaire. Vu l'importance de la célérité de la lumière, nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu historique des différentes mesures réalisées depuis l'époque de Galilée et les explications et les interprétations déduites des expériences réalisées (expériences de Fizeau, 1849 et Foucault, 1850) et des mesures (aberration des étoiles, 1728). Nous avons également évalué les acquis des élèves tunisiens concernant la relativité du mouvement et la célérité de la lumière avant un enseignement de relativité restreinte en réalisant

un questionnaire ouvert avec des échantillons d'élèves, en classes de terminale de différentes sections scientifiques (voir chapitre IX).

Nous terminons ce chapitre en mettant l'accent sur la grande différence qui existe entre la richesse de l'histoire de la mesure de la célérité de la lumière d'une part et le peu de place occupé par la célérité de la lumière dans le savoir savant au programme des élèves.

### -5-Le cinquième chapitre :

Dans ce chapitre, nous avons donc cherché à analyser les chapitres rédigés par A. Einstein sur sa nouvelle théorie, la Relativité Restreinte, dans sa présentation de 1916, en espérant avec lui que « *Puisse ce petit livre être un stimulant pour beaucoup de lecteurs et leur faire passer quelques heures agréables<sup>1</sup>* ».

En se basant sur l'enchaînement historique des chapitres choisis par l'auteur concernant l'évolution de la relativité (à partir de Galilée), sur la façon dont ont été rédigés ces chapitres, loin des formules mathématiques et des expériences physiques compliquées (et alors irréalisables) pour s'adresser au maximum de lecteurs intéressés par l'évolution scientifique, nous verrons si cet enchaînement et ce contenu pourraient servir à introduire la relativité dans l'enseignement de la physique au secondaire. En d'autres termes, nous nous proposons d'analyser de manière critique le contenu didactique de l'approche d'Einstein dans son ouvrage de vulgarisation, ce qui à notre connaissance, n'a pas été fait de manière systématique.

Nous avons commencé par une analyse des chapitres 1 et 2 « Contenu physique des propositions géométriques » et « le système de coordonnées » ; nous montrerons que ces deux chapitres jouent un rôle important dans l'initiation du lecteur à la géométrie qui est une partie fondamentale de cette théorie.

Dans le troisième et le quatrième chapitre : « Espace et temps dans la mécanique classique » et « Le système de coordonnées de Galilée », Einstein insiste sur la conception newtonienne concernant la relativité du mouvement d'un mobile (la trajectoire dépend du référentiel choisi) dans des référentiels galiléens et sur le temps absolu.

---

<sup>1</sup> Einstein.A. La théorie de la relativité restreinte et générale. 1916. Dunod.

Dans le cinquième chapitre « Le principe de relativité (au sens restreint) » il décrit la loi d'inertie énoncée et validée par Galilée, Descartes et Newton appelée la première loi de la mécanique classique qui nécessite le choix d'un référentiel galiléen (repère espace + repère temps) pour décrire le mouvement de tout corps dans l'espace.

Toujours dans le cadre de la mécanique classique, Einstein expose le théorème de l'addition des vitesses dans le chapitre 6 avec l'exemple du train et du talus et explique que ce résultat ne peut pas être maintenu.

Il montre en effet dans le chapitre 7 que ce résultat est incompatible avec l'invariance de la vitesse de la propagation de la lumière et que cette incompatibilité n'est qu'apparente. Il consacre tout le chapitre 8 au concept de temps en physique pour pouvoir la résoudre.

Dans le chapitre 9 « La relativité de la simultanéité » toujours avec l'exemple du train et du voyageur, il analyse la non simultanéité de deux événements dans deux référentiels différents.

Dans le chapitre 10 « La relativité de la notion de distance spatiale », Einstein montre que la distance entre deux points déterminés du train est relative par rapport à deux référentiels galiléens différents (le train qui se déplace avec la vitesse  $v$  et le talus) ; cette relativité de distance ou d'espace constitue une deuxième objection au raisonnement du chapitre 6 : théorème de l'addition des vitesses d'après la mécanique classique.

L'insuffisance de la transformation galiléenne et du théorème de l'addition des vitesses en mécanique classique (chapitre 6) nécessitent l'introduction d'une nouvelle transformation appelée transformation de Lorentz (chapitre 11). Cette nouvelle transformation va être exploitée pour expliquer le comportement des règles et des horloges en mouvement de grande vitesse (proche de la vitesse de la lumière) et établir le nouveau théorème de l'addition des vitesses, qui rend compte de l'expérience de Fizeau (chapitre 12 et 13) pour de petites vitesses.

Dans le chapitre 14 « La valeur Heuristique de la théorie de la relativité », Einstein explique l'importance de l'introduction de cette nouvelle théorie en physique, qui permet d'expliquer les phénomènes qui présentent une ambiguïté dans le cadre de la mécanique classique.

Dans le chapitre 15, il insiste sur l'importance de la théorie de la relativité restreinte, qui est issue de la théorie de l'électromagnétisme, de la théorie de l'optique et de la limite de la mécanique classique, il expose quelques formules sur l'énergie des particules relativistes dans

des référentiels galiléens, il montre comment cette nouvelle théorie a réuni deux principes en un seul (équivalence masse/énergie) et a remplacé l'action instantanée à distance (loi de gravitation de Newton).

Dans le chapitre 16, Einstein a essayé de faire prendre conscience aux lecteurs que bien que la vérification de sa nouvelle théorie était difficile expérimentalement, elle est en accord avec les résultats expérimentaux des théories et des phénomènes déjà connus (aberration des étoiles, principe Doppler, théorie de Maxwell-Lorentz, expérience de Michelson).

Enfin dans le chapitre 17, le dernier que nous analyserons, Einstein introduit le concept d'événement pour décrire un phénomène physique et explique que le monde des événements physiques, appelé aussi monde de Minkowski, est à quatre dimensions : espace-temps.

### **-6-Le sixième chapitre :**

Ce chapitre est consacré à l'aspect philosophique de notre recherche, il s'intéresse essentiellement aux liens entre les discussions philosophiques de l'époque qui ont suivi l'avènement de la théorie de la relativité restreinte et même avant concernant les concepts : espace, temps, théorie, vérité, observation, mesure, etc.

Nous savons que le fondement d'une nouvelle théorie est basé sur de nouvelles lois ou de nouveaux postulats et de nouveaux concepts. La théorie de la relativité restreinte est fondée sur deux postulats, comme nous l'avons rappelé, et des concepts tels que : espace relatif, temps relatif, simultanéité, observateur, mesure, vérité.

Les concepts d'espace et de temps ont été l'objet de débats dans toutes les théories philosophiques de la connaissance ; Kant, était de l'idée de Newton, et considérait que le temps et l'espace sont deux concepts absolus et indépendants l'un de l'autre (ils sont considérés comme des données a priori). Il n'en n'était cependant pas de même de son contemporain, Leibniz, qui insistait sur l'aspect relationnel entre systèmes au fondement de la mécanique et à son caractère relatif.

Les concepts newtoniens d'absoluité ont été mis à mal par le physicien et philosophe des sciences Ernst Mach à la fin du XIXe siècle. Finalement, dans la relativité restreinte ces deux concepts sont considérés comme deux concepts relatifs et non plus absolus, ils sont interdépendants puisque les deux constituent le continuum à quatre dimensions espace-temps.

La théorie de la relativité restreinte a insisté aussi sur les concepts de mesure, d'observateur et d'instruments, l'objet de plusieurs discussions et débats philosophiques, puisque cette théorie fait appel à la règle et à l'horloge pour effectuer des mesures de distance et de temps, et qu'elle a précisé qu'une mesure ou une observation ne pourrait être déterminée que par rapport à un corps rigide choisi comme système de référence ou système de coordonnées.

Albert Einstein était bien entendu conscient des différentes discussions philosophiques sur la notion d'une vérité théorique, c'est pourquoi il a bien tenu compte de questions telles que : Qu'est-ce qu'une théorie physique ? Quels sont les critères d'une théorie physique ? Quand est-ce qu'une théorie physique est vraie ?

Ainsi, dans ce chapitre, nous avons consacré trois paragraphes indépendants, le premier paragraphe expose l'histoire des différentes discussions philosophiques sur les concepts temps et espace avant même la naissance de la théorie de la relativité restreinte, le deuxième paragraphe est consacré aux discussions philosophiques sur la vérité d'une théorie et sa définition, suite à la ruine du Dogmatisme (un courant de pensée philosophique basé sur les conceptualisations étroite, définitives et implicitement normative) sur les différentes questions philosophiques telles que celles posées par Kant : la vérité est-elle universelle ? Est-elle immuable ? Le troisième paragraphe est consacré aussi aux différentes discussions philosophiques sur les concepts mesures et observations.

### [-7-8-Septième et huitième chapitre :](#)

Dans ces chapitres, nous reprenons l'analyse des chapitres rédigés par Einstein dans son livre de 1916 pour déduire les approches didactiques et pédagogiques de ces textes du point de vue de la succession des idées d'une part et des liens entre ces chapitres d'autre part, et voir l'apport possible de cette démarche pour l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte dans le secondaire.

Nous insisterons aussi sur l'approche conceptuelle utilisée dans ces chapitres par A. Einstein pour répondre aux dilemmes posés en physique.

Nous avons donné notre vision et nos critiques suite à l'analyse des chapitres sur la théorie de la relativité restreinte pour élaborer un savoir à enseigner adéquat à nos élèves en tenant compte des obstacles épistémologiques rencontrés par les enseignants et les élèves et en pensant aux expériences possibles que nous pourrions réaliser en classe.

Nous pensons que l'introduction de la théorie de la relativité restreinte au secondaire est bénéfique à l'évolution des connaissances des élèves puisqu'elle constitue une partie importante de la physique contemporaine. En France et en Italie les élèves du secondaire apprennent la théorie de la relativité restreinte mais en Tunisie elle n'est pas encore réintroduite.

Nous proposerons d'enseigner cette théorie juste après la relativité galiléenne pour permettre à l'élève de comprendre les liens entre les différentes théories et voir comment la science n'est pas figée mais au contraire qu'elle évolue. Pour introduire la relativité restreinte, nous proposons de passer par une « relativité galiléenne modifiée » qui fait évoluer progressivement les notions vues par les élèves en relativité galiléenne. En redonnant une perspective historique et conceptuelle à cette évolution, nous espérons que l'élève trouvera le passage de l'une à l'autre mécanique plus naturel et ne sera pas confronté à un « obstacle épistémologique » (au sens de Bachelard) insurmontable qui proviendrait d'un changement de paradigme radical (au sens de Kuhn).

Nous insistons aussi dans ce chapitre sur l'importance du concept de célérité de la lumière afin d'éliminer les conceptions erronées des élèves qui la considèrent comme une constante tombée du ciel pour remplir des égalités mathématiques sans connaître sa place réelle dans l'évolution de la physique.

Cela nous conduira à la proposition pédagogique suivante : quelle est la modification la plus simple à apporter aux transformations de Galilée, connue des élèves de lycée, pour assurer l'invariance de la vitesse de la lumière ? En écrivant l'équation d'un rayon lumineux dans un référentiel, puis dans un autre référentiel inertiel (les coordonnées spatiales des deux référentiels étant liées par les transformations de Galilée considérée comme toujours valide), nous verrons que le temps n'est plus absolu mais dépend du lieu où se déroule un événement. Nous donnerons à ce « temps local » introduit par Lorentz en 1895 le sens d'un temps conventionnel obtenu par le processus de synchronisation d'horloges par des signaux lumineux, suivant en cela l'analyse de Poincaré de 1900, basée sur l'invariance de la vitesse de la lumière à l'ordre  $V/c$ . De là, nous discuterons du rôle des observateurs et de la notion de simultanéité, puis nous prendrons conscience d'une nouvelle cinématique et d'une nouvelle loi de composition des vitesses, qui permet d'interpréter l'expérience de Fizeau et la formule d'entraînement de Fresnel. Cette proposition d'enseignement pourra être l'objet d'une expérimentation en classe.

## -9- Chapitre IX :

Dans ce chapitre nous allons essayer d'introduire à un groupe d'élèves la théorie de la relativité restreinte, d'une manière plus claire et plus simple après avoir répondu à un questionnaire qui se rapporte à la relativité galiléenne et la théorie de la relativité restreinte.

Ce questionnaire vise quelques questions de recherche :

**Q1** : Est-ce que les élèves de terminale ont bien assimilé les concepts de la relativité galiléenne avant d'entreprendre l'apprentissage de la théorie de la relativité restreinte, ou présentent-ils encore des conceptions erronées ?

**Q2** : Est-ce que les élèves de terminale connaissent bien les liens entre concepts de la relativité galiléenne et concepts de la théorie de la relativité restreinte tels que l'invariance de la vitesse de la lumière  $c$  dans le vide et la loi de composition des vitesses ?

**Q3** : Est-ce que les élèves de terminale sont au courant des questions philosophiques imposées par la théorie de la relativité restreinte à l'époque et par la suite les liens entre physique et philosophie ? Ceci nous permettra d'analyser les réponses des élèves avant et après enseignement de cette théorie.

Ce que nous proposons dans notre recherche est un premier pas dans le but d'ouvrir un débat avec les collègues philosophes, physiciens et historiens, pour renouveler les pratiques d'enseignement.

Il y a en effet un enjeu majeur qui va au-delà du problème de l'enseignement de la Relativité Restreinte et qui concerne les rapports des élèves tunisiens aux savoirs scientifiques et les obstacles culturels qui peuvent empêcher ces apprentissages.

Nous considérons que la théorie de la relativité restreinte n'est qu'un cas d'étude pour résoudre ces problèmes beaucoup plus généraux, mais qu'elle constitue un cas d'étude très intéressant, touchant aux problèmes profonds de la vérité et de l'évolution des théories scientifiques.

Nous nous sommes limités dans notre étude à l'étude de l'analyse comparative des systèmes éducatifs, dans trois pays méditerranéens. Il serait intéressant d'élargir cette analyse comparative à d'autres pays du Maghreb et à d'autres pays européens. Cela dépasse pour l'heure largement le cadre de notre travail, mais nous espérons indiquer une méthodologie fructueuse d'analyse qui pourrait être poursuivie.

## PARTIE A

## Chapitre I :

Description de l'état des lieux de l'enseignement secondaire tunisien et en particulier :  
enseignement de la physique, des mathématiques et de la philosophie

## I-1-Introduction

En Tunisie et depuis son indépendance (Mars 1956), il y a eu trois grandes réformes de l'éducation (1958<sup>2</sup>, 1991<sup>3</sup> et 2002<sup>4</sup>), sans parler des petites réformes, dans le but d'améliorer les acquis des élèves et surtout en sciences et techniques, de proposer des programmes disciplinaires qui suivent les évolutions technologiques et sociétales du pays, de résoudre le problème du chômage et de vaincre les problèmes du redoublement et de l'abandon d'étude dans les établissements scolaires.

Dans la réforme de 1991, il y a eu introduction, pour la première fois, de la physique pour les élèves du collège (deuxième partie de l'enseignement de base). L'enseignement de la physique est pour la première fois présenté en langue arabe ce qui a mené le ministère de l'éducation à proposer des séances de formation pour les enseignants des sciences physiques qui avaient une formation initiale en langue française. Dans celle de 2002, les programmes des sciences physiques contiennent une nouvelle partie pour les élèves de terminales, il s'agit d'une partie sur l'électronique pour les sections scientifiques et techniques en plus de nouvelles lois pour l'orientation scolaire.

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'état des lieux de l'enseignement des sciences en Tunisie et en particulier des sciences physiques dans le secondaire à partir des différentes réformes et analyser les liens, s'ils existent, entre la physique et les autres disciplines comme les mathématiques et la philosophie. Nous allons dans un premier temps examiner les résultats et les statistiques publiés après la révolution, janvier 2011, vu qu'une nouvelle réforme de l'éducation est actuellement en cours de discussion entre les différents intervenants : représentants du ministère de l'éducation, du syndicat de l'enseignement secondaire (UGTT : Union Générale de Travailleurs Tunisiens), des experts en éducation, etc.

---

<sup>2</sup> Loi n°58-118 du 9 Novembre 1958.

<sup>3</sup> Loi n°91-65 du 29 Juillet 1991.

<sup>4</sup> Loi n°2002-80 du 23 juillet 2002 : loi de la nouvelle orientation.

## I-2-La réforme de l'éducation 91/92 :

La réforme du système éducatif tunisien introduite en 91/92 par la loi du 29 juillet 1991 concerne en particulier les points suivants :

Les programmes des sciences pures. Elles sont enseignées depuis les années 70 comme des vérités absolues, ce qui rend les apprenants dépourvus de tout esprit critique et inaptes à toute réflexion scientifique. Avant même cette réforme, dans le secondaire les filières scientifiques négligent les sciences humaines et sociales à la manière de divers courants rationalistes et idéologiques marqués par des conceptions traditionnelles.

- 1- La méthode de l'enseignement des sciences au secondaire qui doit être révisée pour permettre aux apprenants d'avoir un esprit critique et faire preuve de réflexion. La réforme incite les décideurs de l'enseignement (les experts en éducation et représentants du ministère de l'éducation) à introduire dans les programmes l'histoire des sciences pour montrer aux apprenants que la vérité scientifique n'est pas absolue mais qu'au contraire elle évolue et à utiliser la nouvelle technologie d'information et de communication en éducation (NTICE).
- 2- La révision des coefficients des matières scientifiques et l'introduction d'un certain équilibre entre les disciplines (concernant le nombre d'heures) ainsi que la place à leur accorder afin que les élèves ne négligent pas une matière par rapport à une autre.
- 3- Le report de l'orientation (choix de la filière) de la 1<sup>ère</sup> à la 2<sup>ème</sup> année du secondaire ; ainsi dans la première année du lycée tous les élèves suivent le même enseignement général. En deuxième année, le choix de la filière et en troisième année, le choix de la section.
- 4- L'enseignement de la philosophie au secondaire qui est ramené de l'ancienne philosophie (métaphysique) à la nouvelle (philosophie de la raison). De plus, l'étude des philosophes arabes et musulmans éclairés, ainsi que celle des principales écoles philosophiques étrangères, ont été introduites dans le programme. L'enseignement est assuré par des professeurs de métier (Maîtrise en philosophie), dans le but d'initier les élèves à une réflexion rationnelle sans préjugés et de les ouvrir à une pensée universelle.

### I-3--Cadre de l'enseignement secondaire en Tunisie

Au niveau structurel, et depuis la réforme de 1991, le système éducatif tunisien est composé :

1- D'un enseignement de base obligatoire de 9 ans constitué d'un premier cycle primaire de 6 ans et d'un second cycle ou cycle préparatoire, dispensé dans des collèges en trois ans.

2- D'un enseignement secondaire qui dure 4 ans et est sanctionné par le baccalauréat avec cinq spécialités : Sciences expérimentales, Mathématiques, Sciences Techniques, Sciences Informatiques, Economie et Gestion, et Lettres.

3- D'un enseignement supérieur sanctionné par les diplômes de licence, master et doctorat, et d'autres diplômes spécifiques.

4- D'un système de formation professionnelle qui délivre trois niveaux de diplômes suite à l'enseignement de base (CAP, BTP et BTS).

De manière mécanique, les très importants efforts de scolarisation primaire et secondaire réalisés les dernières années du 20<sup>ème</sup> siècle ont conduit à une forte hausse des effectifs élèves en Tunisie. Des aménagements et des constructions de collèges et de lycées ont été entrepris depuis plusieurs années, y compris au niveau des équipements des laboratoires de sciences expérimentales, mais les problèmes de fond demeurent jusqu'à aujourd'hui et constituent un handicap majeur dans la nouvelle phase de développement que traverse le pays surtout après la révolution de 2011 (politique, sociale et économique)

Au niveau de l'enseignement de base primaire et secondaire et suite à un rapport réalisé par l'organisation internationale du travail pour la « promotion de l'emploi productif et le travail décent des jeunes en Tunisie<sup>5</sup> », la Tunisie se situe parmi les pays qui accordent la part la plus importante de leurs ressources budgétaires à ce secteur (en 2012 près de 15% du budget de l'Etat et plus de 5% du PIB). La taille des classes et le taux d'encadrement sont également des

---

<sup>5</sup> Rapport (2013), Analyse du système éducatif Tunisien, préparé par l'organisation internationale du travail en partenariat avec l'observateur national de l'emploi et de qualification Tunisien (ONEQ), p 7.

indicateurs importants des moyens mobilisés au service de l'éducation. En 2012 par exemple, la moyenne est de 25,7 élèves par classe (contre 33,5 élèves par classe en 2002) et 12,7 élèves/enseignant (contre 20,8 élèves/enseignant en 2002), dans le secondaire. Dans l'enseignement primaire, on compte 17,2 élèves par enseignant et 22 élèves par classe en 2012 (contre 22 élèves/enseignant et 28,3 élèves/classe en 2002).

Entre 2002 et 2012, le taux de scolarisation des individus âgés de 6-16 ans (qui donne la mesure des effectifs de l'enseignement de base) a augmenté de 3,3%, pour atteindre 93,4%, et celui de 12-18 ans (qui donne la mesure des effectifs du 2<sup>ème</sup> cycle de l'enseignement de base et du secondaire) a augmenté de 7,4%, pour atteindre 81,1%. (Rapport National Genre Tunisie 2014, INS) et (Analyse du système éducatif tunisien, 2013 : rapport réalisé par l'Organisation Internationale du Travail pour la promotion de l'emploi productif et le travail décent des jeunes en Tunisie).

Le nombre d'élèves inscrits en premier et en deuxième cycle de l'enseignement de base général est en baisse depuis 2002, suivant la courbe démographique. Ce nombre est passé de 1863385 élèves en 2002 à 1484204 élèves en 2012.

Au niveau de l'éducation secondaire, les effectifs ont augmenté jusqu'à 2005 mais sont actuellement en baisse, et en 2012 ils étaient de 453090 (contre 508790 en 2005). La proportion d'élèves en 7<sup>ème</sup> année secondaire ayant rejoint l'enseignement technique est de 6,1%, 4,5%, 5,8% et 4,4% respectivement pour les années 2009, 2010, 2011 et 2012. Ces taux restent en dessous des objectifs fixés (10% en 2011 et 15% en 2012).

Malgré les réformes introduites dans le système éducatif et des performances quantitatives, le rendement interne ne s'est pas amélioré. Les taux de promotion intra et inter - cycles diminuent entre 2002 et 2011 dans tous les cycles d'enseignement, alors que les taux de redoublement et d'abandon augmentent. De nombreux élèves abandonnent encore les études, surtout au niveau du deuxième cycle de l'enseignement de base (9%), sans avoir acquis les compétences fondamentales requises pour s'insérer dans la société. Le taux d'abandon du secondaire est de 10.1%. Pendant l'année scolaire 2011-2012, presque 18267 élèves du primaire quittent l'école, 42243 élèves du préparatoire quittent les collèges et 45762 élèves du secondaire quittent les lycées avant de terminer le cycle, en tout 106272 élèves par an quittent l'école, le collège et le lycée (Détails Fig. 1ci dessous).

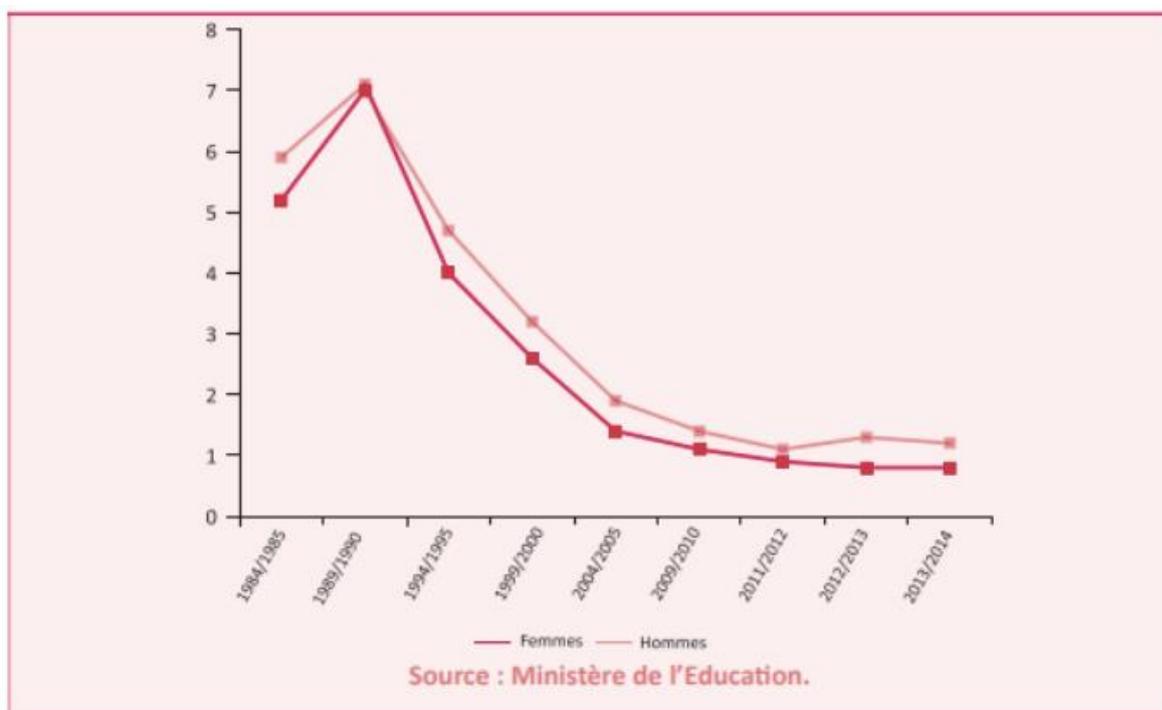


Diagramme d'évolution du taux d'abandon scolaire de 1984 à 2014 selon le sexe

C'est grâce aux réformes éducatives que le taux d'abandon scolaire a diminué depuis 1989/1990 jusqu'à 2013/2014, telle que la création de l'école de base qui permet à l'élève du primaire de passer au collège sans passer le concours de sixième année primaire (non obligatoire), mais ce taux reste stagnant, depuis 2011/2012 en absence d'une nouvelle réforme éducative.

En ce qui concerne le Bac Général, on observe une détérioration nette du pourcentage d'admis (qui ont passé l'examen et obtenu le bac), qui ne représentaient que 55,9% des effectifs de la quatrième année secondaire en 2012, contre 72% en 2002. Quant à la répartition des admis et des diplômés du bac par filière, on observe que la filière Lettres est encore prépondérante bien que les sections Economie-Gestion et Technique aient connu une évolution remarquable du nombre de diplômés ; cela a des conséquences évidentes sur l'employabilité, d'après les résultats d'une enquête nationale sur la population et l'emploi du quatrième trimestre 2016 publiés par l'Institut National de la Statistique (INS) le nombre de chômeurs s'établit à 623500 chômeurs du total de la population active, par conséquent le taux de chômage s'établit à 15,5%, le nombre de chômeurs diplômés de l'enseignement supérieur est estimé à 262400 en 2016 ce

qui correspond respectivement à un taux de chômage de 31,6% dont 51,8% dans le secteur de services ( Economie, Gestion, Lettre, Droit....). Ceci est dû aussi à une incohérence entre l'augmentation du nombre des étudiants inscrits dans différentes sections à l'Université tunisienne et les perspectives d'employabilité des diplômés.

Les élèves tunisiens manifestent aussi des faiblesses évidentes dans le domaine des langues et des mathématiques que traduisent les difficultés qu'ils éprouvent à communiquer, à rédiger, à résoudre des problèmes. Diverses évaluations internes (sous l'égide des inspecteurs) et externes ont attiré l'attention sur cet état de fait. Par exemple, les résultats réalisés par la Tunisie à l'évaluation PISA en 2009, TIMSS (Trends In Mathematics and Science Study) en 2011 et PISA en 2013 sont extrêmement modestes. Sur les 65 pays, la Tunisie a été toujours classée parmi les derniers pays (exemple 56<sup>ème</sup> avec 401 points en matière de compréhension de l'écrit, PISA en 2009 et 2013).

#### I-4- La place de la physique au secondaire et surtout dans les classes scientifiques :

##### I-4-1-Place des sciences dans l'enseignement tunisien.

Accéder à l'enseignement des sciences pour un pays représente le signe d'une adhésion générale à la modernité, car en réformant l'enseignement scientifique au primaire, au secondaire et au supérieur, un pays forme des citoyens suffisamment qualifiés qui peuvent assurer un développement à la nation, comme le montrent plusieurs rapports internationaux effectués pour évaluer les acquis des élèves en matières scientifiques. Exemple en Tunisie : PISA (2013), montre que les élèves tunisiens obtiennent des résultats largement inférieurs à la moyenne et qu'ils se classent toujours parmi les derniers 65 pays (encore 56<sup>ème</sup>).

Le plan éducatif de l'école de demain (juin 2002) déplore des résultats très modestes en sciences et en mathématique, une insuffisance du temps consacré à l'enseignement des sciences et une faible présence des nouvelles technologies dans les programmes d'enseignement scientifiques, plusieurs questions se posent sur l'enseignement des sciences :

- Faut-il enseigner une science abstraite ?
- Faut-il enseigner la science moderne ? ou faut-il s'adapter aux spécificités culturelles et religieuses du pays ?

- Faut-il enseigner les sciences dans la langue nationale (en arabe) ou dans la langue scientifique d'origine (en français) ?

Il n'est pas toujours facile de traiter ces questions vu les liens compliqués existants entre sciences et culture, sciences et langue, sciences et modernité, sciences et religion, sciences et épistémologie, c'est pourquoi les nouveaux curricula scientifiques tunisiens du primaire et du secondaire tiennent compte des approches anthropologiques et culturelles du pays à cause de deux raisons qui justifient bien cette idée :

1/ Tenir compte des acquis des systèmes contemporains d'éducation scientifique et de la formation scolaire des pays occidentaux et repenser les contenus et les démarches de ces systèmes afin de les adapter au contexte historico-culturel tunisien<sup>6</sup>.

2/ Depuis la réforme de 1991, en plus de difficultés inhérentes au dilemme initial entre contenus modernes et culture de référence pré-moderne, l'introduction de l'enseignement scientifique de l'école de base (primaire et collège) dans un terrain totalement inconnu auparavant, il a été décidé d'arabiser intégralement l'enseignement scientifique sans pour autant prendre le risque d'aller jusqu'au bout de la démarche (cette arabisation s'arrête à la dernière année du collège, la 9<sup>ème</sup> année) et à partir de la 1<sup>er</sup> année (10<sup>ème</sup> année d'étude) les élèves se trouvent contraints de continuer en langue française des matières qu'ils ont jusqu'alors étudiées dans la seule langue arabe. D'autre part, on adopte au niveau des disciplines scientifiques (Math, physique, SVT, technique) des cycles arabisés, une démarche assez particulière en introduisant une mixité linguistique (arabe et français), cette situation de bilatéralité linguistique est parfois contestée, d'autant plus qu'aucune étude scientifique préalable n'a été menée en Tunisie pour montrer le bienfondé d'une telle démarche.

L'enseignement scientifique dans le contexte tunisien se situe au cœur d'une relation aussi complexe que tendue entre le traditionnel et le moderne, malgré les réformes réalisées et

---

<sup>6</sup> Chabchoub Ahmed, 2000, Rapport au savoir, didactique des sciences et Anthropologie, in Rapports au savoir et apprentissage scientifique).

en cours de réalisation, cette relation complexe est celle qui explique les résultats médiocres dans le rapport PISA cité plus haut. En Tunisie, des recherches ont été effectuées ces dernières années en vue d'explorer le rapport qu'entretiennent les élèves et les étudiants tunisiens avec le savoir scientifique (Ben Abderrahmen, 2003) ; (Chabchoub, 2005) ; il ressort de ces recherches deux résultats principaux :

1/ Le rapport des élèves tunisiens aux savoirs scientifiques est souvent imprégné de conceptions métaphysiques et surnaturelles.

2/ La culture d'origine des élèves fonctionne généralement comme un obstacle à l'apprentissage du savoir scientifique.

#### I-4-2-Statut des sciences physiques et démarches pédagogiques au secondaire :

##### I-4-2-1- Présentation de la discipline

L'enseignement des sciences physiques s'inscrit en droite ligne de la logique de la réforme du système éducatif, et ce, conformément aux articles 56 et 52 de la loi d'orientation de l'éducation et de l'enseignement scolaire (Loi du 23 juillet 2002), qui stipulent respectivement qu'à l'école incombe la double mission primordiale d'assurer en général la formation cognitive des apprenants et celle de leur faire acquérir les méthodologies de travail et de résolution de problèmes et qu'en particulier, la finalité de l'enseignement des mathématiques et des sciences et de permettre aux élèves de :

1- Maîtriser les diverses formes de la réflexion scientifique et s'habituer à la pratique de la démonstration et de l'argumentation ainsi que de leur faire acquérir des compétences de résolution de problèmes et d'interprétation des phénomènes naturels et humains ; avec l'enseignement des sciences physiques au collège, les élèves ont appréhendé l'univers matériel tant naturel que construit dans lequel ils vivent.

2- Par l'observation et l'investigation (manipulations, recherches documentaires ou sur le terrain...), ils ont reconnu des interactions de tous les jours entre la matière et des phénomènes physiques courants (essentiellement ceux qui sous-tendent la nature) ; ils ont construit qualitativement des concepts et dégagent des lois qui régissent les phénomènes étudiés.

3- En mettant à profit leurs acquis, ils se sont entraînés à proposer une explication ou une solution à des problèmes d'une complexité de degré moyen, à réaliser de petits projets et à s'approprier des manières de communiquer.

Dans une perspective de continuité et de complémentarité avec l'enseignement de base, l'enseignement au secondaire vise chez les élèves à :

1- Développer des éléments de culture scientifique qui les aideront à se faire une représentation rationnelle des phénomènes naturels environnants et à se situer dans le monde contemporain.

2- Acquérir une certaine autonomie, et ce, par la prise de conscience de la responsabilité d'agir pour apprendre et par le développement de l'esprit de créativité.

3- Systématiser la pratique de la démarche scientifique par la mise en pratique fréquente de son protocole de base (indiquer les éléments du problème posé, construire des hypothèses, recourir à l'expérience, à la recherche documentaire ou sur le terrain pour confirmer ou mettre en doute les hypothèses avancées, conclure ou déduire...).

4- Perfectionner les habiletés méthodologiques telles que l'utilisation des TIC (Technologies de l'information et de la communication) et l'exploitation des données (Recherche des informations, leur tri, leur analyse...).

Simultanément, on doit apprendre aux élèves à transférer ces savoirs, savoir-faire et savoir être d'une manière intégrative dans des situations problèmes authentiques déclenchées par des phénomènes physico-chimiques.

C'est dans cette perspective que les programmes de sciences physiques sont conçus et élaborés en s'appuyant sur les idées directrices suivantes :

1- Centrer les contenus de l'enseignement sur l'essentiel et dégager un socle fondamental de connaissances déclaratives et procédurales.

2- Renforcer la corrélation de l'enseignement de la physique chimie avec celui des autres disciplines.

3- Mettre l'accent sur l'unité profonde des phénomènes physico-chimiques qui structurent le monde naturel et qui permettent notamment une vision rationnelle et globale de l'environnement.

4- Contribuer à renforcer la maîtrise des technologies de l'information et de la communication et à enrichir la culture scientifique indispensable dans le monde contemporain.

5- Former l'esprit à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique constructive et à l'honnêteté intellectuelle.

D'après des constatations dans l'enseignement des sciences physiques, les élèves arrivent au collège très motivés car ils vont apprendre, se familiariser avec l'expérience, connaître de nouveaux concepts physiques liés à la nature et à leur vie quotidienne, ils vont utiliser le matériel du laboratoire pour réaliser des expériences simples et attirantes qu'il n'était pas possible de faire au primaire (absence du matériel et de laboratoire) et donc leur regard vis-à-vis les sciences physiques va changer. Mais malheureusement cette motivation diminue d'une année à l'autre au cours du collège (voir résultats de PISA) et aussi au Lycée et ceci d'après les statistiques et les constatations suivantes :

- Programme chargé qui reprend les mêmes concepts appris aux collèges mais en langue française.

- Les élèves, en première année du Lycée, fuient les matières scientifiques et essentiellement les sciences physiques qui leur paraissent difficiles et abstraites. Ceci est visible pendant leur orientation à la fin de la première année (orientation vers des études économie-gestion ou vers des études littéraires).

- Les contenus des programmes n'ont pas beaucoup changé depuis 2002, ainsi l'élève se retrouve-t-il à reprendre les mêmes concepts sans développer ses compétences d'apprentissages ni ses acquis.

- Le taux élevé d'absentéisme des élèves en Terminale (nouveau phénomène, apparu surtout après la révolution de 2011) surtout à la fin de l'année et ceci est dû au manque

d'intérêt accordé aux cours en classe dans les lycées (beaucoup d'élèves termineront leurs cours en privé avec d'autres enseignants en dehors du Lycée).

- La majorité des élèves détestent la vie au collège et au Lycée pour manque de motivation, manque d'activités culturelles et associatives... c'est pourquoi un grand nombre d'entre eux abandonnent leurs études (plus que 100000 par an comme on l'a vu).

#### I-4-2-2- Liens avec les autres disciplines

Toute discipline scolaire a sa raison d'être essentiellement par sa manière de concevoir le réel et d'y intervenir, voire par le regard particulier qu'elle porte sur le monde. Pour son fonctionnement, elle a besoin d'éclairages complémentaires qui peuvent être apportés par d'autres disciplines, toutefois, elle peut à son tour éclairer ces dernières, donc il n'est pas question de dissocier les apprentissages à réaliser en sciences physiques de ceux effectués ailleurs, non seulement dans les disciplines du domaine des sciences mais aussi dans toutes les disciplines scolaires.

Les « Sciences Physiques », les « Sciences de la vie et de la Terre » (SVT) et la « Technologie » sont complémentaires par les nombreux concepts qu'elles ont en commun. Pour comprendre la matière animée et l'univers vivant auxquels s'intéressent les SVT, il faut avoir un socle minimum de connaissances sur la matière inanimée et l'univers matériel qui sont de l'ordre des sciences physiques et inversement.

Pour comprendre le monde qui nous entoure, les sciences physiques s'appuient souvent sur les progrès en technologie, progrès qui sont eux même le fruit d'une exploitation efficace et efficiente de concepts, de lois et de théories de l'ordre de la physique et de la chimie, pour l'étude des sciences physiques, on a besoin d'outils mathématiques (calculs, notions de géométrie, analyse, modélisation, représentations graphiques...). D'autre part, on a besoin de connaissances langagières, connaissances qu'apporte l'étude des langues véhiculaires, exemple en physique, les connaissances liées à l'air, à l'eau et aux changements d'états par exemple peuvent servir à l'étude des climats en géographie.

Afin d'investir les savoirs et savoir-faire en physique et en chimie pour le bien-être collectif, pour la préservation des ressources naturelles et pour la protection de l'environnement, on compte beaucoup sur les acquis d'ordre éthique et sur l'esprit de citoyenneté apportée par les éducations civique et religieuse, voire la philosophie. Pour l'étude de quelques thèmes philosophiques comme le déterminisme, l'épistémologie des sciences et la vision du monde, on a recours à des concepts, des lois et des théories de physique ou de chimie. Quant à la pensée philosophique, elle peut favoriser le développement de l'esprit critique en physique et en chimie aussi.

Les sciences physiques restent essentiellement une discipline expérimentale et doivent être donc enseignées en tant que telles. Pour donner un autre ordre d'idée, la nouvelle orientation de l'enseignement scolaire dans tous ses niveaux replace l'apprenant à sa vraie place, c'est-à-dire au centre de l'action éducative ; deux raisons majeures qui s'imposent :

1- Une réflexion approfondie sur les moyens et méthodes à mettre en œuvre pour appliquer ces nouveaux programmes avec une garantie minimale d'efficacité dans le but de favoriser les visées assignées à l'enseignement de cette matière scientifique.

2- Une méthodologie et une évaluation garantes de la réussite de tous, sans oublier d'accorder au caractère expérimental l'importance qu'il mérite.

Les directives des curricula incitent les enseignants des différentes disciplines à faire des liens entre leurs propres disciplines et les autres disciplines surtout quand il s'agit d'un sujet traité par deux disciplines ou plus afin de permettre à l'élève d'élargir ses connaissances et de lui faire comprendre que les disciplines sont complémentaires, par exemple l'utilisation des outils mathématiques pour découvrir ou vérifier une loi physique, la réalisation de quelques exemples de réactions chimiques vues en sciences de la vie et de la terre, etc. Mais malheureusement nous ne trouverons pas, dans les contenus des programmes officiels, les liens cités ci-dessus car plusieurs fois l'enseignant des sciences physiques se heurte à des difficultés majeures pour suivre son cours. Par exemple au moment d'introduire les équations différentielles, les enseignants des sciences physiques feront appel aux fonctions dérivées et primitives non encore vues en mathématiques ; en chimie l'enseignant fait appel à la notion de Logarithme (népérien et décimal) avant que les élèves entament ces notions en mathématiques. En philosophie, il paraît étrange à nos élèves de faire un lien entre sciences physiques et philosophie puisqu'ils ne savent pas que la majorité des physiciens sont empreints d'une grande

culture philosophique et puisqu'ils pensent que ces deux disciplines n'ont aucun lien entre elles ; pourtant nous pourrions trouver des thèmes communs comme la modélisation, l'évolution des idées scientifiques, l'épistémologie, etc., d'où la nécessité d'introduire l'histoire des sciences pour approfondir encore plus l'enseignement des sciences physiques au secondaire et montrer aux élèves les liens avec les autres disciplines.

Maintenant, l'utilisation de l'histoire des sciences en tant que support didactique et pédagogique aux apprentissages des sciences physiques est une méthode relativement récente et innovante. Elle donnera aux enseignants et aux élèves la connaissance du contexte historique et épistémologique qui tient compte des aspects socio-culturels et des controverses de chaque époque. L'histoire des sciences permettra à l'élève de savoir que les connaissances scientifiques sont les résultats de constructions progressives et non un ensemble de vérités figées ; elles se sont constituées à partir de la succession d'idées de différentes disciplines.

#### I-4-3-Méthodologie d'enseignement de la discipline

Pour mettre en œuvre les principes constructivistes et d'intégration des connaissances, assignés à l'enseignement de la matière (principes énoncés précédemment), il faut conduire les activités de formation par des méthodes actives, des méthodes selon lesquelles les apprenants doivent être rendus capables de construire eux même des connaissances, de s'approprier des habiletés (maîtrise de savoir-faire expérimentaux) et de les intégrer dans des situations significatives ; la large part des horaires consacrés aux séances de travaux pratiques où l'élève assume une grande part d'initiative et de responsabilité dans la construction de son savoir et dans l'acquisition de savoir-faire est en soi un signe qui ne trompe pas sur l'orientation qui place l'élève au centre des préoccupations de l'institution éducative, en fait, à travers des activités expérimentales, en amenant les élèves à formuler les hypothèses et à les confronter aux faits, le professeur de la matière contribue au développement de la pensée logique chez les élèves.

Il est à peine utile ici de rappeler que l'enseignement traditionnel des sciences physiques formel, abstrait et hautement mathématisé est voué à l'échec, en d'autres termes, le professeur de physique chimie doit centrer son enseignement sur les élèves, il ne doit pas hésiter à leur accorder l'initiative, et ce, en les impliquant régulièrement dans des activités d'investigation,

de structuration et d'intégration, dans toutes les situations d'apprentissage, aussi bien en cours qu'en travaux pratiques. Pour stimuler la motivation des élèves et favoriser chez eux la rétention ainsi que la compréhension, il est recommandé de recourir autant que possible à l'enseignement par le problème ou par le projet, un enseignement qui vise un apprentissage dont le point de départ est une situation problème (situation problème didactique à ne pas confondre avec la situation problème d'intégration), c'est-à-dire une situation qui fait initialement problème aux élèves parce qu'ils n'ont pas les connaissances scientifiques indispensables pour s'en acquitter. Dans ce cadre, et pour faciliter la tâche du professeur, les contenus des programmes officiels de physique chimie sont accompagnés d'une liste non limitative et non obligatoire de questionnements et d'activités qui peuvent être exploités en classe comme exemples de stimuli ou de supports didactiques au service des objectifs visés, les activités de recherche documentaire ou de recherche sur terrain proposées aux élèves doivent susciter la curiosité chez ces derniers et les aider à appréhender le(s) concept(s) physico-chimique(s) en construction, dans les différentes activités d'apprentissage, les élèves doivent être amenés à utiliser au mieux les moyens contemporains et essentiellement les TIC (Technologies de l'Information et de la Communication). L'ordinateur, avec les accessoires appropriés, doit être utilisé non seulement comme outil de laboratoire, mais comme un outil privilégié pour l'acquisition et le traitement des données, pour la simulation, pour l'évaluation formative, ce privilège, à accorder à l'ordinateur, ne doit en aucun cas laisser sous-entendre que cet outil peut remplacer l'expérience réelle de physique ou de chimie, mais il doit être à son service.

Enfin, dans les limites de l'horaire imparti à l'enseignement de la matière et sans sortir du cadre de ces démarches décrites, le professeur de physique-chimie a toute latitude de prendre les initiatives et d'organiser les activités de classe dans l'ordre qu'il juge le mieux adapté à l'atteinte des objectifs visés, la méthode d'enseignement des sciences physiques au secondaire comme étant une science expérimentale a été l'objet de plusieurs travaux de recherches tels que ceux de Johsua et Dupin (1989), Roberdet (2001), Boilevin (2005), Weisbush( 2014).

En Tunisie aussi, nous donnons une importance majeure à l'enseignement de la physique. Au début de son enseignement, vers les années 70 et 80, les méthodes inductives et déductives étaient dominantes, mais ces méthodes ont présenté des défaillances à propos de l'acquisition des concepts scientifiques par les élèves au moment où les connaissances scientifiques évoluent de plus en plus (les élèves éprouvent une désaffection vis-à-vis de la discipline), et c'est à partir de 2002 que les méthodes constructiviste, situation problème,

démarche hypothético-déductive ont été introduites, comprenant la création des journées de formation pour les enseignants de sciences physiques pour l'utilisation de la méthode d'enseignement basée sur la situation problème et la démarche d'investigation, en particulier pour les séances de travaux pratiques.

#### I-4-3-1-Les activités de formation à caractère expérimental :

Les activités expérimentales en physique-chimie peuvent se ramener à deux groupes complémentaires :

##### \* Les expériences de travaux- pratiques :

Il s'agit d'activités expérimentales à réaliser par les élèves (généralement par binômes ou plus), en groupe réduit (classe dédoublée) lors des séances de travaux pratiques. Ces activités peuvent se regrouper en deux catégories selon les finalités pédagogiques recherchées :

- Les activités expérimentales destinées à exploiter un modèle ou à vérifier, pour les situations étudiées, la validité d'un modèle ou d'une loi. La loi ou le modèle sont censés avoir été présentés par le professeur ou dégagés par les élèves eux-mêmes, expérimentalement en cours, en TP, les élèves doivent continuer à approfondir et affiner les concepts par un travail expérimental de consolidation.
- Les activités expérimentales permettant de répondre à une situation problème. La situation problème proposée permet aux élèves la « redécouverte » d'un phénomène et / ou la construction et la structuration d'un modèle modeste ; ils peuvent ainsi mettre en œuvre la démarche scientifique aussi bien pour une reconstruction du savoir que pour répondre à des questions susceptibles de les intéresser directement.

##### \* Les expériences de cours :

Ce sont des expériences à réaliser par le professeur avec la classe entière dans une séance de cours. Elle permet soit d'introduire une notion qui sera approfondie et enrichie ultérieurement en TP, soit de reprendre une expérience faite par les élèves en TP pour un complément de cours. Cependant, elle s'impose lorsqu'elle est dangereuse ou difficile.

D'une manière générale, et dans toutes les situations d'apprentissage, les activités expérimentales de physique chimie doivent avoir pour objet d'apprendre aux élèves à observer, à se poser des questions et à confronter leurs représentations avec la réalité ; elles doivent les aider à acquérir des connaissances, des savoir-faire et surtout une méthode d'analyse et de raisonnement leur permettant de formuler avec pertinence des jugements critiques.

A ce propos, il est utile de rappeler que rares sont les activités expérimentales dans l'enseignement secondaire qui n'amènent pas les élèves à se confronter directement aux mesures des grandeurs physiques et surtout aux incertitudes affectant leurs résultats. La puissance des moyens de calcul (calculatrice et ordinateur) mis entre les mains du professeur et ses élèves permettent actuellement d'aborder efficacement le phénomène des erreurs de mesure par le biais de la statistique, de donner du sens à la moyenne d'une série de mesures et surtout d'évaluer un intervalle de confiance raisonnable encadrant un résultat de mesure.

L'apprentissage de l'objectivité, de la rigueur et de l'honnêteté scientifique que l'on souhaite inculquer aux apprenants ne saurait ignorer ces éléments qui, quoique non mentionnés explicitement dans les libellés des programmes, sont implicitement présents dans tous les cursus scientifiques d'ordre expérimental. Il n'y a pas lieu évidemment de développer ces notions sous forme de cours à un niveau ou à un autre, mais de les étaler sur les quatre ans de l'enseignement secondaire en procédant à leur enrichissement progressif et en les utilisant à chaque fois que l'occasion se présente (d'après le *Statut de la discipline, septembre 2010*).

#### I-4-3-2-Évaluation du travail de l'élève :

Il n'est pas superflu de rappeler à ce niveau que l'évaluation est un processus (ou démarche) qui permet de porter un jugement sur les acquis de l'apprenant en vue de prendre une décision. L'évaluation doit avoir la fonction d'aide à l'apprentissage et celle de reconnaissance des acquis de l'élève.

##### a) Évaluation des apprentissages :

Loin de toute sanction, l'évaluation des apprentissages est une occasion de régulation dans le seul but de favoriser le progrès des apprenants. Donc, toute activité (ou tâche) qui aboutit à une régulation peut faire l'objet d'évaluation. La régulation à réaliser par l'enseignant peut viser une rétroaction immédiate (Régulation interactive) ou un ajustement des actions pédagogiques (Régulations rétroactive et proactive). Quant à l'autorégulation, régulation à faire

par les élèves eux-mêmes, elle amène ces derniers à revoir et améliorer leurs manières d'apprendre. Toutefois, l'autorégulation n'est possible que lorsque les acteurs sont conscients de leur processus d'apprentissage, c'est-à-dire lorsque toutes les connaissances déclaratives, procédurales et conditionnelles sont construites par eux-mêmes.

#### b) Évaluation des acquis :

Comme celle des apprentissages, l'évaluation des acquis peut être ramenée à une auto-évaluation. Pour l'enseignant, elle vise à rendre compte du niveau de développement des différentes capacités chez l'apprenant. Lorsqu'elle est faite par ce dernier, elle lui permet de reconnaître son degré d'atteinte des objectifs visés. Bien qu'elle soit continue, l'évaluation des acquis ne peut se faire qu'au terme d'études qui constituent pour chacune d'entre elles une unité complète et cohérente (Construction d'un concept, « redécouverte d'une loi »...). Pour ce faire, il faut placer les élèves dans des situations qui demandent la mobilisation de ressources (Connaissances déclaratives, procédurales et conditionnelles) dans des contextes variés (d'après le *Statut de la discipline, septembre 2010*).

#### c) Commentaire :

En Tunisie, l'apprentissage des sciences physiques est basé sur l'expérimentation soit pendant les séances du cours, guidée par l'enseignant, soit pendant les séances des Travaux pratiques réalisées par les élèves. Ainsi l'apprentissage de la théorie de la relativité ne peut pas avoir sa place dans les programmes officiels puisqu'il est difficile de réaliser des expériences liées à cette théorie au niveau du laboratoire du Lycée, donc, elle va devenir un obstacle pour l'apprentissage surtout avec des outils mathématiques difficiles, aussi la solution la plus simple est d'éliminer cette théorie dans le cadre d'un allègement des programmes. Dans notre Thèse, nous allons montrer que cette théorie est une continuité de la relativité galiléenne enseignée au secondaire et que son enseignement a un apport bénéfique pour mieux la comprendre avec des outils mathématiques simples et compréhensibles (cf. chapitre VIII).

#### I-5-Concevoir une formation adéquate pour les professeurs de sciences.

Dans la réforme du système éducatif tunisien en 1991, la formation continue des enseignants du primaire et du secondaire occupe d'une place importante :

- Création des ISFM (Institut Supérieur de Formation des Maitres) qui assure une formation de deux ans après le bac pour les futurs enseignants du primaire.
- Création des CREFOC (Centre Régional de Formation Continue) dans chaque Gouvernorat comme une structure régionale qui assure la formation continue scientifique et didactique des enseignants, avec la collaboration des inspecteurs pour l'amélioration de la qualité de l'enseignement (du primaire et du secondaire).

En parallèle, il y a eu un aménagement et l'équipement des laboratoires des sciences physiques et naturelles pour la modernisation de l'enseignement scientifique.

Une étude a été réalisée en 2010 sur un échantillon d'enseignants tunisiens de sciences physiques intitulée « l'évaluation ergonomique de l'encadrement des enseignants des sciences physiques en Tunisie ». Suite au décalage entre les tâches prescrites dans les programmes officiels et les tâches réelles utilisées en classe avec les élèves, plusieurs facteurs qui nuisent aux pratiques de méthodes actives pendant le processus Enseignement/Apprentissage ont été identifiées telles que :

- La démotivation des enseignants à cause de l'absence d'opportunités adéquates.
- Le manque de techniques d'animation adéquate (matériels nécessaires d'animation, formation poussée en animation) qui assure la bonne transmission de l'information.
- L'absence d'une communication constructive entre les enseignants et les inspecteurs, absence d'écoute mutuelle, le manque de reconnaissance de la part de quelques inspecteurs pendant les entretiens qui se déroulent, soit après une visite d'inspection soit pendant les séances de formation continue.
- La surcharge de curriculum qui fait obstacle aux pratiques constructives par souci de gain de temps.
- Le peu de recentrage sur l'apprenant pendant les séances d'apprentissage des sciences physiques, la faible personnalisation du savoir par l'apprenant à cause d'une grande imposition de ce savoir (pas de feed-back).
- L'absence du matériel didactique et pédagogique adéquats dans le laboratoire de science physique (beaucoup de matériel ancien qui ne fonctionne pas).

- Le manque d'outil de TIC pour améliorer les conditions d'apprentissage.
- La formation continue en didactique des sciences physiques, en pédagogie et en sciences physiques, des enseignants pour la professionnalisation du métier assurée par les inspecteurs est très limitée (Exemple : depuis l'année scolaire 2011/2012 jusqu'à l'année scolaire 2016/2017 aucune séance de formation pour un certain nombre de professeurs de sciences physiques D.R.E (Direction Régionale de l'Education) de Ben Arous).
- La formation continue apparait poussée pour les enseignants stagiaires de sciences physiques et est totalement absente pour les anciens enseignants et ceci est dû aux multiples tâches incombant aux inspecteurs telles que : l'encadrement des enseignants stagiaires, la formation des inspecteurs élèves, l'élaboration des programmes officiels et des manuels scolaires, le suivi des sujets d'examens nationaux et leurs corrections.

Pour faire face à ces facteurs qui nuisent aux processus E/A et pour suivre l'évolution sociale, la diversification et l'hétérogénéité des apprenants devant l'arrivée des nouvelles technologies d'information et de communication plusieurs propositions et réformes sont en cours de discussion et d'analyse, dont les plus importantes sont :

- La création de l'institut supérieur de l'éducation pour le métier d'enseignants comme en France, l'ESPE (Ecole Supérieurs du Professorat et de l'Education – désormais INSPÉ).
- L'incitation des enseignants de toute discipline à la formation continue tout au long de leur carrière professionnelle par la création d'une formation certificative.
- La création de centres de recherches et de formation continue dans les CREFOC régionaux.
- L'incitation des professeurs du secondaire à réaliser des recherches en didactique des sciences physiques, en pédagogie et en sciences de l'éducation avec la collaboration des laboratoires de recherche de l'enseignement supérieur.

## I-6-Quelle place de la science, en particulier des sciences physiques, dans l'enseignement de la philosophie ?

### I-6-1-Etat des lieux de l'enseignement de la philosophie au secondaire :

La Tunisie est l'un des rares pays dans le monde arabe qui assure à ses élèves un enseignement philosophique sur deux années malgré la présence de quelques tendances qui souhaitent réduire l'espace de l'enseignement philosophique.

Concernant les nouveaux programmes qui ont été mis en vigueur en 2006, tous les élèves dans toutes les sections bénéficient d'un enseignement de philosophie, que ce soit en section lettre ou dans d'autres sections comme les sections scientifiques et techniques.

Dans les nouveaux programmes, les concepteurs ont essayé de garder la finalité de l'enseignement de la philosophie, d'aider les élèves à penser par eux-mêmes, à favoriser et à développer leur capacité d'analyse de synthèse et de critique.

En 1976, a été décidée l'arabisation de la philosophie dans le secondaire et depuis, plusieurs ONG (Organisation Nationale non Gouvernementale) ont largement contribué à soutenir la présence de la philosophie dans la culture tunisienne, d'où la création au sein des universités de plusieurs masters en philosophie et la mise en place de plusieurs unités de recherches et de laboratoires de philosophie.

L'un des défis majeurs, pour le système éducatif tunisien est l'aménagement d'un temps suffisant consacré à l'enseignement de la philosophie. Les participants à la réunion régionale sur l'enseignement de la philosophie dans les pays arabes, réunis les 11 et 12 mai 2009 à Tunis<sup>7</sup>, ont souligné, d'une part, qu'il est important que l'enseignement de la philosophie soit généralisé et ne soit pas uniquement optionnel et, d'autre part, que son enseignement au secondaire soit dans une dynamique de complémentarité avec les autres disciplines surtout vis-à-vis des disciplines scientifiques.

Ce rapport, concernant l'enseignement de la philosophie au secondaire, a prouvé que l'enseignement traditionnel de la philosophie a atteint certaines limites : la philosophie est enseignée comme option dans certaines sections, elle ne présente aucun lien avec les autres

---

<sup>7</sup> Rapport de l'UNESCO, 2009 : L'enseignement de la philosophie dans le monde Arabe.

disciplines, méthode d'enseignement classique, etc., d'où la nécessité d'établir de nouvelles approches qui permettent un débat plus large et une réforme révolutionnaire des pratiques d'enseignement de la philosophie. Malheureusement, en Tunisie, trop souvent l'enseignement de la philosophie se fait d'une manière magistrale, ésotérique, voire savante en faisant appel aux grands noms de l'histoire de la philosophie. Cette façon d'enseigner a tendance à décourager les élèves et donc à créer un désintérêt à l'égard de la discipline.

Enfin, l'évaluation des élèves est réalisée principalement par des exercices écrits tels que la dissertation, un type d'évaluation traditionnel qui ne motive pas les élèves dans ce domaine.

#### I-6-2-Formation d'enseignants de philosophie :

La formation reçue par les enseignants est souvent inadaptée par rapport aux exigences réelles de l'enseignement au niveau secondaire. Selon le Rapport cité si haut, deux cas se présentent pour les enseignants de philosophie :

1/ Un diplôme (maîtrise ou licence) de philosophie exigé avec le concours du CAPES.

2/ L'enseignement scolaire représente le seul débouché professionnel possible pour les diplômés en philosophie et n'est pas toujours le plus alléchant, d'où une carence de formation des enseignants et une difficulté générale : manque de la disponibilité pour les inspecteurs de philosophie, manque d'un nombre suffisant d'inspecteurs, pour assurer une meilleure formation.

La formation des enseignants de philosophie étant assurée par les inspecteurs, elle présente les mêmes difficultés et obstacles que la formation dans les autres disciplines : le manque de formation des enseignants est dû aux multiples tâches données aux inspecteurs : visites, encadrements des stagiaires, formation des anciens enseignants, réformes... de plus, les contenus des programmes n'ont pas changé depuis 2006 ; aucune motivation n'est mise en avant pour inciter à la recherche, ce qui induit un enseignement de la philosophie classique et dogmatique, ce qui fait que la majorité des élèves présentent une désaffection pour son apprentissage.

### I-6-3- Lien entre science et philosophie<sup>8</sup> :

La Tunisie considère que l'enseignement de la philosophie est un outil pour former l'esprit critique de l'élève et pour adopter une attitude responsable, en l'intégrant dans toute les sections secondaires, durant deux ans, mais l'enseignement de la philosophie au secondaire reste un peu loin d'une approche interdisciplinaire, bien que le contenu du programme officiel se base sur l'étude de quelques concepts physiques et mathématiques et des paradigmes philosophiques par des savants philosophes à des époques différentes, ce que l'enseignant utilise pour construire son cours avec ses élèves. Ce n'est qu'en deuxième année d'enseignement de la philosophie (classe de terminale) que le programme officiel tient compte de l'étude scientifique.

#### Exemples :

1/ Thème : la science entre la réalité et la modélisation, mais sans citer le lien qui peut exister entre ce thème philosophique et d'autres disciplines comme la physique et la chimie (cas de la modélisation de l'atome).

2/ Les valeurs entre l'absolu et le relatif avec la possibilité de se référer au livre d'Albert Einstein et Léopold Infeld (1938) : *L'évolution dans idées en physique* qui est généralement inconnue ou négligé par les enseignants de philosophie.

Or dans l'enseignement supérieur, une étude réalisée par l'Unesco, montre qu'il existe une légère articulation entre philosophie et d'autres disciplines en sciences humaines et culturelles, en théologie et en lettres. Enseigner la philosophie dans des institutions scientifiques du supérieur pour faire le lien entre philosophie et science, comme physique, maths, biologie... n'existe pas aujourd'hui dans les universités scientifiques en Tunisie. Malgré les débats qui ont affirmé l'importance de promouvoir le modèle interdisciplinaire et d'inclure la philosophie dans les autres spécialités, et ce d'une manière continue et efficace, la mise en pratique reste encore à réaliser.

---

<sup>8</sup> Rapport de l'UNESCO, 2009 : L'enseignement de la philosophie dans le monde Arabe, p 43.

I-7- Quelle place pour les mathématiques dans les programmes officiels tunisiens en sciences physiques au secondaire ?

I-7-1-Etat des lieux de l'enseignement des mathématiques au secondaire dans les programmes officiels tunisiens.

Depuis la réforme de l'éducation de 2002 qui a retenu 5 domaines d'apprentissage : les langues, les sciences, la technologie, les humanités et les arts, les mathématiques commencent à prendre une nouvelle place dans l'enseignement au primaire et au secondaire :

*«... les mathématiques et les sciences sont enseignés dans le but de permettre aux élèves de maîtriser les différentes formes de la pensée scientifique, de les exercer à l'usage des modes de raisonnement et d'argumentation, de les doter de compétences de résolution de problèmes et d'interprétation des phénomènes naturels et des faits humains [...]. Les programmes accordent l'intérêt qui se doit à l'entraînement des apprenants à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication comme moyen d'accès au savoir et outil de l'autoformation » (Extrait du Statut des mathématiques, loi 2002).*

Conformément aux attendus de la loi d'orientation 2002 et dans le cadre de l'innovation, le modèle des curricula de mathématiques est élaboré sur la base de l'activité mathématique, et ce modèle est structuré comme décrit dans le document ci-dessous (Fig. 2) :

Contenu mathématique	Niveaux exigibles de l'activité mathématique
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Arithmétique et calcul.</li> <li>➤ Algèbre et relations.</li> <li>➤ Analyse.</li> <li>➤ Géométrie.</li> <li>➤ Mesure de grandeurs.</li> <li>➤ Probabilité, traitement de l'information chiffrée, statistiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pratiquer une démarche mathématique : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chercher, expérimenter, conjecturer.</li> <li>- Démontrer en développant un raisonnement inductif, un raisonnement déductif ou un raisonnement par l'absurde.</li> <li>- Contrôler une solution ou un résultat.</li> </ul> </li> <li>➤ Connaître et mettre en œuvre des algorithmes et des procédures de calcul (numérique, algébrique, géométrique ou statistique).</li> <li>➤ Résoudre des problèmes : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utiliser différentes approches de recherche.</li> <li>- Elaborer des stratégies de résolution.</li> <li>- Modéliser des situations réelles.</li> </ul> </li> <li>➤ Communiquer dans un langage mathématique : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Décrire une figure ou un graphique en utilisant un vocabulaire mathématique.</li> <li>- Expliquer, en utilisant un vocabulaire mathématique, une procédure, un algorithme de calcul, un raisonnement ou le choix d'une stratégie.</li> <li>- Rédiger une démonstration ou la solution d'un problème.</li> <li>- Discuter une démarche, un raisonnement ou une stratégie.</li> </ul> </li> <li>➤ Organiser, analyser et synthétiser des informations chiffrées ou graphiques.</li> <li>➤ Utiliser les technologies de l'information et de la communication, la calculatrice ou des logiciels, dans un travail de recherche, de prospection, de contrôle et de communication.</li> <li>➤ Apprécier la contribution des mathématiques au développement de l'individu et de la société ainsi qu'à la compréhension du monde et à son évolution.</li> </ul>

Tableau n°1: L'activité mathématique de l'élève

D'après le dernier rapport PISA (le Programme Internationale pour le Suivi des Acquis des élèves, en anglais, *Program for International Student Assessment*, mené par l'Organisation de Coopération et de Développement Economique, OCDE) réalisé en 2015, la Tunisie reste toujours le bas du tableau 65<sup>ème</sup> sur 70 pays concernés par ce résultat des épreuves scientifiques, de compréhension de l'écrit de mathématique et de résolution collaborative de problèmes.

Le rapport de PISA de 2012 et publié en 2013 qui a choisi les mathématiques comme domaine majeur d'évolution cognitives avec des élèves âgés entre 14 et 16 ans : la Tunisie occupe aussi le bas du tableau 59<sup>ème</sup> sur 65 pays concernés.

Les sciences et les mathématiques constituent deux disciplines majeures et cruciales dans la formation des jeunes. Le classement de la Tunisie incite à une réflexion profonde sur la situation de l'éducation tunisienne à un moment où la réforme de l'éducation au primaire et dans le secondaire est en cours de concrétisation.

#### I-7-2- Lien entre mathématiques et physique au secondaire.

En sciences physiques, les outils mathématiques sont beaucoup utilisés, parfois l'enseignant de physique trouve des difficultés à énoncer une loi physique vue qu'il n'a pas pu utiliser l'outil mathématique correspondant, c'est pourquoi plusieurs questions se posent au cours de l'apprentissage de la physique :

- 1/ Est ce que les outils mathématiques utilisés en physique sont déjà maîtrisés par les élèves ?
- 2/ Y-a-t-il une adaptation entre les outils mathématiques et les besoins en physique ?
- 3/ Comment seront appréhendés les outils mathématiques en physique s'ils n'ont pas été vus en mathématiques pour pouvoir comprendre les concepts physiques?

Les programmes officiels d'enseignement des mathématiques au secondaire (septembre 2008) se focalisent sur la démarche et le raisonnement mathématique de l'élève, sans tenir compte du lien entre les mathématiques et les autres disciplines comme la physique, la chimie, la biologie ou la philosophie surtout pour que les élèves puissent tendre à développer leur aptitude à chercher, à raisonner et à cultiver leur persévérance. Cette négligence d'interdisciplinarité entre mathématiques et physique renvoie les élèves à apprendre la physique indépendamment des mathématiques, même si les outils mathématiques vus en physique ont déjà été vus en mathématiques, et c'est cette négligence que confirment les résultats de PISA (2009, 2012 et 2015). Ainsi les réponses aux questions posées précédemment sont :

- Les élèves utilisent des outils mathématiques en physique, non maîtrisés. Exemples :

La droite linéaire, pour vérifier expérimentalement la relation entre le poids et la masse  $\|P\|=m\|g\|$  et pour vérifier expérimentalement la loi de Hooke de l'élasticité :  $\|T\|=k \Delta L$   
.- Aucune adaptation en cours de mathématiques entre les outils mathématiques et les lois de la physique, et cette inadaptation complique encore l'acquisition des lois mathématiques en physiques.

- Parfois, l'enseignant de physique utilise des outils mathématiques non déjà vus par l'élève en cours des mathématiques, et ceci pousse l'enseignant à faire une introduction mathématique rapide au détriment du programme de physique, et nous prenons comme exemples :

\*La dérivée d'une fonction et sa primitive quand nous abordons la vitesse et l'accélération d'un corps en mouvement en 3<sup>ème</sup> année.

\*Les fonctions logarithme népérien et exponentielles pour des oscillations électriques et mécaniques.

\*les équations différentielles du premier et du second ordre et leurs solutions pour les oscillateurs électriques et mécaniques.

Dans notre recherche, nous avons essayé de simplifier les notions mathématiques nécessaires dans l'étude de la théorie de la relativité restreinte. Nous avons aussi accordé une attention particulière au moment choisi pour l'introduction de cette théorie, peu après la relativité galiléenne, comme nous le discuterons. Nous avons également exploité le lien et le rapport entre les postulats de cette théorie et les lois de la physique galiléenne, qui permettent de se placer aussi sur un terrain philosophique.

En physique, la théorie de la relativité restreinte pourra être introduite en classe, en mettant les apprenants dans une situation – problème telle que la constance de la vitesse de la lumière d'une part et le théorème de l'addition des vitesses d'après la mécanique classique d'autre part ce qui leur permettra de proposer des hypothèses qui seront confirmées ou non par l'exposition avec des outils informatiques ou avec des logiciels des expériences réalisées sur cette nouvelle théorie.

Nous espérons que la nouvelle réforme éducative qui est en en cours de réalisation tiendra compte de l'importance de l'interdisciplinarité surtout entre mathématiques et physique et entre physiques et philosophie

## **Chapitre II :**

Histoire de l'enseignement de la notion de relativité dans les programmes officiels tunisiens  
du secondaire en Physique et en Philosophie depuis 1970

## II-I-Introduction

Après l'indépendance de la Tunisie en 1956, l'état a commencé à réfléchir à l'éducation suite à la création du ministère nationale de l'éducation et en s'appuyant sur les structures mises en place sous le protectorat. La première réforme de 1958 a été contestée et corrigée par les aménagements apportés par la réforme sociale de 1967 : en se basant sur l'égalité des chances devant l'éducation pour tous les tunisiens dans tout le territoire et en tenant compte de l'importance de l'école comme ascenseur social.

Entre les deux réformes, l'état se pencha sur la création et la construction d'écoles pour le primaire, des lycées pour le secondaire et des universités pour le supérieur.

Dans ce chapitre nous commençons dans un premier temps par l'histoire de l'enseignement de la physique pour les sections scientifiques depuis 1970 : but, démarches d'enseignement, horaire, contenus pour chaque niveau scolaire, que nous étendrons à l'histoire de l'enseignement de la philosophie depuis 1970.

Dans un second temps, nous analyserons les contenus des programmes actuels en physique pour les sections scientifiques et en philosophie pour toutes les sections et nous examinerons la place du concept relativité dans ces programmes.

## II-2- Histoire de l'enseignement de la physique en Tunisie depuis 1970 et place de la relativité (section science).

### II-2-1-Année : 1970 (voir Annexe 2)

#### II-2-1-1-Buts :

- Le développement des techniques et des sciences, la transformation des conditions de vie et de travail, exigent un enseignement conforme aux besoins du monde moderne.
- Les élèves qui abordent la 4<sup>ème</sup> année (16 ans) ont pour la première fois déjà acquis certaines compétences scientifiques par l'étude de la physique, des sciences naturelles et l'initiation technique : ils ont appris à observer, à classer les objets et les faits, à analyser les fonctions de certains appareils, leurs possibilités et leur limites (voltmètres, ampèremètre, balance, etc.).
- L'enseignement des sciences physique a pour but de développer ces premières acquisitions

- Cet enseignement développe leur esprit critique et leur honnêteté intellectuelle, les familiarise avec les processus expérimentaux et leurs interprétations.

### II-2-1-2- les démarches d'enseignement :

Il appartient au professeur de déterminer en tenant compte du niveau des élèves, de la matière à enseigner, quelle est la méthode qui, selon le cas, confère à son enseignement le maximum d'efficacité.

- Avec les élèves de 4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année la méthode inductive est la plus fréquemment utilisée.

\* La démarche inductive est la démarche à travers laquelle l'enseignant propose à ses élèves d'étudier des situations expérimentales particulières à partir desquelles il reconstitue dans un esprit de découverte quelques éléments choisis d'une théorie. Les élèves sont invités à généraliser pour aboutir à des lois de la physique ; cette démarche consiste à « aller du particulier au général »

- Avec les élèves de 7<sup>ème</sup> année (Baccalauréat) la méthode déductive est utilisée.

\* La démarche déductive consiste à « aller du général au particulier », l'enseignant présente à ses élèves la théorie, ou plutôt une loi d'un phénomène physique, puis il leur demande d'en déduire un certain nombre de faits expérimentaux qui accèdent cette théorie.

### II-2-1-3- Niveau scolaire :

#### II-2-1-3-1- 4ème année Math sciences.

- a) Horaire : **3heures par semaine** : 1h30 de Travaux Pratiques (T.P) de Physique, 1h T.P de chimie, 30 min de cours (1h par quinzaine)
- b) Programme : Mesure de longueurs avec règles graduée, palmaire, pied à coulisse ; Poids, masse force ; Optique.

#### II-2-1-3- 2- 5ème année Math sciences

- a) Horaire : **5 heures par semaine** : 1h 30 de Travaux Pratiques, 2h30 cours de physique et 1h cours de chimie.
- b) Programme : Notion de force, Statique des solides, Travail et puissance, Statique des fluides et chaleur.

### II-2-1-3- 3- 6<sup>ème</sup> année Maths sciences

- a) Horaire : **5 heures par semaine** : 1h30 de TP, 2h30 de cours de physique et 1h de cours de chimie.
- b) Programme : Electrostatique, Electrocinétique, Electromagnétisme.

### II-2-1-3- 4-7<sup>ème</sup> année (baccalauréat).

- a) Horaire : **5h par semaine** : 1h30 T.P, 2h30 cours de physique et 1h cours de chimie.
- b) Programme : Dynamique, Phénomènes périodiques, Electricité et phénomènes corpusculaires.

### II-2-1-4- Conclusion :

Absence totale de la partie cinématique, de la relativité galiléenne et de la théorie de la relativité restreinte dans les programmes de 1970.

## II-2-2- Année 1978 (voir annexe 2)

### II-2-2-1- Buts :

Les mêmes buts qu'en 1970

### II-2-2-2- démarches d'enseignement :

Les mêmes démarches d'enseignement appliquées qu'en 1970 pour les élèves de 4<sup>ème</sup> année, 5<sup>ème</sup> année, 6<sup>ème</sup> année et 7<sup>ème</sup> année :

### II-2-2-3- Niveau scolaire :

#### II-2-2-3-1- 4<sup>ème</sup> année maths sciences et maths technique.

- a) Horaire : **3 heures par semaine** : 1h T.P de physique, 1h de cours de physique, 1h de cours de chimie.
- b) Programme : Mesures des largeurs avec : règles graduées, palmaire, pied à coulisse... Poids- masse- force et Optique.

II-2-2-3-2- 5<sup>ème</sup> année (sciences : maths sciences et maths technique)

- a) Horaire : **5h par semaine** : 1h30 T.P, 2h30 cours de physique : 1h  
cours de chimie.
- b) Programme : Notion de force, Statique des solides, Travail et puissance et Statique des fluides.

II-2-2-3-3- 6<sup>ème</sup> année science : maths sciences et maths technique

- a) Horaire : **5 heures par semaine** : 1h30 T.P, 2h30 cours de physique et  
1h cours de chimie
- b) Programme : Electrostatique, Electrocinétique et Electromagnétisme.

II-2-2-3-4- 7<sup>ème</sup> année (sciences : maths sciences et maths technique)

- a) Horaire : **5h30 par semaine** : 1h30 T.P, 3h cours de physique et 1h cours de chimie.
- b) Programme :
- Dynamique, Phénomène périodique, Electricité et phénomène corpusculaire
  - Equivalence masse – énergie : la relation d'Albert Einstein  $E=mc^2$
  - Radioactivité : alpha, gamma, béta (+) et béta (-).

II-2-2-4- Conclusion:

Absence totale de la partie cinématique (vitesse, trajectoire, référentiel...) et par la suite absence totale de la notion de relativité galiléenne au cours des trois premières années d'apprentissage de la physique. Au cours de la quatrième année, il y a introduction directe de la partie dynamique, équivalence masse énergie et radioactivité (rayonnements : alpha, béta et gamma) sans faire appel à la théorie de la relativité restreinte et ses deux postulats qui sont :

1<sup>er</sup> postulat (dit principe de relativité) : toutes les lois de la physique sont les mêmes dans les référentiels galiléens. En effet, nous savions que les lois de la mécanique gardaient leur validité dans les systèmes de coordonnées dits galiléens et Einstein généralise cette hypothèse en l'appliquant à toutes les lois de la physique (mécaniques, électrodynamiques et optiques).

2<sup>e</sup> postulat : la vitesse de la lumière dans le vide est la même quel que soit le référentiel dans lequel on l'observe. Ceci est très nouveau, très surprenant et s'oppose formellement à

l'hypothèse de temps absolu comme nous le verrons plus tard (cette formulation n'est pas celle originale d'Einstein que nous avons rappelée en introduction, mais la forme sous laquelle elle est discutée dans l'enseignement).

### II-2-3- Année 1982 (Annexe 2)

II-2-3-1- Buts : même buts qu'en 78 et 70

II-2-3-2- Démarche d'apprentissage : même démarche qu'en 78 et 70

II-2-3-3- Niveau d'apprentissage

II-2-3-3-1- 4<sup>ème</sup> année du secondaire (maths sciences et maths technique)

- a) Horaire : **3h par semaine** : 1h T.P physique, 1h cours de chimie, 1h cours de physique ou de chimie.
- b) Programme : Mesure des longueurs, Poids – masse – forces et Optique

II-2-3-3-2- 5 année (math science et math technique)

- a) Horaire : **5h par semaine**, 1h30 T.P, 2h30 cours de physique et 1h cours de chimie
- b) Programme : Notion de force, Statique des solides, Travail des solides et Chaleur

II-2-3-3-3- 6<sup>ème</sup> année math sciences et math technique

- a) Horaire : Idem
- b) Programme : Electrostatique, Electrocinétiq ue, Electromagnétisme.

II-2-3-3-4- 7<sup>ème</sup> année (math science et math technique)

- a) Horaire : idem **5h30 par semaine** : 1h30 pour T.P, 3h cours de physique et 1h cour de chimie
- b) programme :
  - Dynamique, Phénomènes périodiques, Optique physique, Electricité et phénomène de corpusculaire, Masse et énergie énoncée de la loi d'équivalence masse et énergie
  - Défaut de masse pour une réaction nucléaire, Radioactivité alpha, béta (+) et béta (-)

II-2-3-4- Conclusion : pas d'évolution concernant notre sujet.

#### **II-2-4- Année 1993 (voir Annexe 2)**

Au cours de cette année, il y a eu une réforme du système éducatif. L'apprentissage au primaire et au secondaire est divisé en deux types d'enseignement :

- Enseignement de base : de la première année du primaire jusqu'à la 9<sup>ème</sup> année du collège (de 1 à 6 : école primaire, de 7 à la 9<sup>ème</sup> année, collège).
- L'enseignement secondaire : de la première année jusqu' à 4<sup>ème</sup> année (baccalauréat)

L'orientation se fait à partir de la 3<sup>ème</sup> année du secondaire. L'introduction de l'enseignement de la physique en 7<sup>ème</sup> année, 8<sup>ème</sup> année et 9<sup>ème</sup> année est désormais en langue arabe.

#### **II-2-4-1- But : article 428**

##### **a/ Pour les élèves de 1<sup>ère</sup> année et 2<sup>ème</sup> année :**

L'enseignement des sciences physiques en 1<sup>ère</sup> année et 2<sup>ème</sup> année de l'enseignement secondaire vise à :

- Contribuer au développement de la personnalité de l'élève, à la formation de son esprit et à l'épanouissement de ses capacités intellectuelles.
- Permettre à l'élève d'acquérir les connaissances scientifiques nécessaires au développement d'une attitude scientifique vis-à-vis de son environnement naturel, culturel et technique.

##### **b/ Pour les élèves de 3<sup>ème</sup> année et 4<sup>ème</sup> année :**

Au niveau de la 3<sup>ème</sup> année et de la 4<sup>ème</sup> année, l'enseignement des sciences physiques vise à développer chez l'élève :

- les facultés intellectuelles : l'esprit de rigueur et de précision, l'aptitude à l'analyse et à la synthèse, l'amour de l'initiative, l'imagination créatrice, la curiosité, l'objectivité et l'esprit critique.
- la dextérité manuelle présupposant la compétence opératoire et expérimentale tel que l'emploi à bon escient d'instruments d'observations et de mesures.

- La vertu du travail en groupe :

\* l'observation, la recherche et le tri des informations, l'expérimentation, l'interprétation des résultats.

\* la maîtrise des diverses techniques spécifiques (l'emploi adéquat des instruments de mesure, la représentation graphique, l'évaluation des incertitudes...)

II-2-4-2- Démarche d'apprentissage: démarche constructiviste, basée sur l'expérimentation.

II-2-4-3- Niveau d'apprentissage :

II-2-4-3-1- 1<sup>ère</sup> année secondaire : Tronc commun : (4<sup>ème</sup> année secondaire ancien régime)

a) Horaire : **3heures par semaine** : 1h de cours de physique, 1h de cours de chimie et 1h de T.P.

b) Programme : Mécanique : le mouvement et son caractère relatif, repère espace, trajectoire, repère temps, Quantité de mouvement, Astronomie : mouvement des planètes, loi de gravitation, trajectoire et période, Hydrostatique et Electricité.

Commentaire : introduction des bases pour l'enseignement de la relativité galiléenne du mouvement.

II-2-4-3-2- 2 années secondaires : section sciences (5<sup>ème</sup> année, ancien régime)

a) Horaire **3h par semaine**: 1h de cours de physique, 1h de cours de chimie et 1h de T.P.

b) Programme : Mécanique : Système mécanique, point matériel, système déformable et indéformable, équilibre d'un solide soumis à 2 forces, soumis à 3 forces, moment, théorème des moments travail et puissance, énergie, chaleur, électricité et optique.

Remarque : pas de suite dans l'enseignement de la notion de la relativité.

II-2-4-3-3- 3<sup>e</sup> année secondaire, section : math, science expérimentale et technique

a) horaire : **4h30 par semaine** : 1h30 de TP, 2h de cours physique et 1h de cours de chimie.

b) programme : Mécanique :

- Grandeurs scalaires, grandeurs vectorielles

- Cinématique du point, mouvement et grandeurs caractéristiques

- Dynamique du point matériel. Dynamique du système matériel, mouvement, électricité, électromagnétique, électronique et optique.

Remarque : introduction de l'électronique

- L'étude cinématique est plus détaillée (relativité du mouvement par changement de référentiels abordée)

II-2-4-3- 4- 4<sup>ème</sup> année secondaires (math, science expérimentale et technique) (7<sup>ème</sup> année ancien régime).

- horaire : **4h30 par semaine** : 1h30 T.P, 2h cours de physique et 1h cours de chimie.
- programme : Energie mécanique, Phénomènes périodiques. Les ondes : onde mécanique, onde stationnaire, onde sonore, effet doppler, onde électromagnétique, onde lumineuse, aspect corpusculaire de la lumière (l'effet photo électrique) et dualité onde/ corpuscule et électronique.

article 459 : éléments de relativité restreinte et réactions nucléaires

- Relativité Restreinte : Objectifs : L'élève sera capable de :
  - Expliquer en se basant sur des résultats expérimentaux l'insuffisance de la mécanique newtonienne : par l'expérience de Bertozzi :
  - Utiliser un cliché qui montre que les trajectoires de deux particules identiques de grande énergie ne sont pas perpendiculaires entre elles après le choc contrairement à ce qui prévoit la mécanique newtonienne on se limitera aux chocs élastiques : proton-proton dont l'un est fixe avant le choc.
  - Enoncer les deux postulats de la mécanique relativiste :

a/ Premier postulat : Les lois de la physique ont même expression mathématique dans tous les référentiels galiléens.

b/ Deuxième postulat : La célérité de la lumière est la même dans tous les référentiels galiléens.

- Ecrire les expériences relativistes de la quantité de mouvement et de l'énergie totale d'une particule (on admet sans démonstration que  $p=\gamma mv$  et  $E=\gamma mc^2$  (on note  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ).

- Distinguer les particules relativistes et les particules non relativistes.
- Réactions nucléaires.
- Ecrire  $\Delta E = \Delta m c^2$ , défaut de masse représente l'énergie de liaison d'après le principe d'équivalence masse –énergie.

#### II-2-4-4-Conclusion :

Au cours de cette réforme, la partie physique débute pour la première fois par la partie Cinématique : Mouvement, relativité de la trajectoire, référentiel. Le nombre d'heures consacrées à la physique a diminué en deuxième année (5<sup>ème</sup> année ancien régime) pour passer de 5h à 3h.

Approfondissement de la partie cinématique en 3<sup>ème</sup> année avec introduction d'une nouvelle partie sur l'électronique.

L'introduction de la cinématique a été accompagnée aussi avec l'introduction de la théorie de la relativité restreinte au baccalauréat (4<sup>ème</sup> année).

Cette introduction est basée sur l'expérience de Berzotti : analyse d'un cliché sur choc proton-proton : qui prouve que la mécanique newtonienne est incapable de prévoir les résultats de ce type de choc, et sur l'énoncé des deux postulats de cette nouvelle théorie. Les élèves de 5<sup>ème</sup> année, 6<sup>ème</sup> année et 7<sup>ème</sup> année vont aborder la théorie de la relativité restreinte sans avoir étudié la cinématique newtonienne introduite en 4<sup>ème</sup> année et ceci pourrait créer des obstacles épistémologiques à ces élèves pour l'acquisition des concepts de cette théorie.

#### II-2-5- année 1998 (voir Annexe2)

II-2-5-1- buts : mêmes buts d'apprentissage pour les élèves de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année qu'en 1992. Mêmes buts d'apprentissage pour les élèves de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> année qu'en 1992

II-2-5-2- Stratégies d'apprentissage : même stratégie qu'en 1992

II-2-5-3-Niveau d'apprentissage :

II-2-5-3-1- 1<sup>ère</sup> année secondaire

- a) Horaire : **3h par semaine** : 1h de T.P, 1h de cours de physique, 1h de cours de chimie.

- b) Programme : Mécanique : le mouvement et son caractère relatif, solide de référence, repère spatial, repère temporel, position et trajectoire, Vitesse : vitesse moyenne, vitesse instantanée, principe d'inertie, la masse et ses applications, Hydrostatique, Electricité, Lumière.

#### II-2-5-3- 2- 2ème année secondaire

- a) Horaire : **3h/ semaine** : 1h de T.P, 1h cours de physique, 1h cours de chimie
- b) Programme Mécanique : -point matériel, -système point matériel, forces, -équilibre d'un solide soumis à 2 forces, équilibre d'un solide soumis à 3 forces coplanaires et non parallèle, mouvement de rotation, travail et puissance, Energie, Chaleur, électricité, lumière : dispersion de la lumière, énergie rayonnante.

#### II-2-5-3- 3- 3ème année secondaire (math, science expérimental –technique)

- a) Horaire : **4h30 par semaine** : 1h30 de T.P, 2h cours de physique, 1h cours de chimie.
- b) Programme :
- 1) Electricité, Mécanique : repère : vecteur position, vecteur vitesse, vecteur accélération
  - 2) Mouvement rectiligne, circulaire, équation horaire, Dynamique, Electronique et Optique.

#### II-2-5-3- 4- 4ème année secondaire

- a) Horaire : **4h30 par semaine** : 1h30 de T.P, 2h cours de physique et 1h cours de chimie.
- b) Programme : Energie mécanique, phénomènes périodiques, les ondes, Dualité onde-corpuscules, Réaction nucléaire, Electronique.

#### II-2-5-4- Conclusion:

- Introduction pour la première fois, en première année, avec la relativité du mouvement et la notion de référentiel, du principe d'Inertie qui représente la relativité galiléenne.
- Rupture avec la cinématique en deuxième année.
- Reprise de la partie cinématique en troisième année mais sans insister sur la relativité galiléenne.
- Élimination de la théorie de la relativité restreinte dans l'enseignement en quatrième année tout en gardant les réactions nucléaires et l'équivalence masse – énergie.

- Diminution du nombre d'heures en sciences physique pour les élèves de quatrième année (classe de terminale).

- Bien que les contenus du programme insistent sur la relativité galiléenne, la relativité restreinte en a été supprimée en grande partie et n'ont été conservées que quelques conséquences pour la physique nucléaire. Ceci montre très clairement que les programmes négligent complètement les liens historiques et épistémologiques entre la relativité galiléenne et la relativité restreinte.

### **II-2-6- Années 2006 (voir annexe2)**

II-2-6-1- buts : mêmes buts d'apprentissage pour les élèves de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année que 1992. Mêmes buts d'apprentissage pour les élèves de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> année que 1992.

II-2-6-2- Stratégies d'apprentissage : même stratégie que 1992

#### II-2-6-3- Stratégie d'apprentissage :

##### II-2-6-3-1- 1 année secondaire :

- a) Horaire : **3h/semaine** : 1h cours de physique, 1h de cours de chimie, 1h de T.P
- b) Programme : Electricité, Propriété de la matière, forces, mouvement, pression, caractère relatif du mouvement, solide de référence, position de mobile, trajectoire, vitesse, énergie et contrôle, optique, Terre et univers.

##### II-2-6-3- 2- 2<sup>ème</sup> année secondaire : filière science

- a) Horaire **4h par semaine** : 1h30 cours de physique, 1h cours de chimie, 1h30 de T.P
- b) Programme : Circuit électrique, forces, mouvement et pression, énergie et contrôle, lumière et terre et Univers.

##### II-2-6-3- 3-3 année section (mathématique, science expérimentale, technique)

- a) Horaire : **5h par semaine**, 2h cours de physique, 1h30 cours de chimie, 1h30 T.P
- b) Programme : L'interaction dans l'univers, mouvement (25 à 29 h) : Etude cinématique : généralités, repérage d'un mobile (vecteur position, coordonnées cartésiennes, abscisses curvilignes), vecteur vitesse, vecteur accélération, lois horaires, mouvement rectiligne

uniforme, mouvement rectiligne uniformément accéléré, mouvement rectiligne sinusoïdal, étude dynamique, optique.

Remarque : pas d'insistance sur l'importance de la relativité du mouvement.

#### II-2-6-3-4- 4<sup>ème</sup> année section (mathématiques, sciences expérimentales, sciences techniques)

- a) Horaire : **5h par semaine** : 2h de cours de physique, 1h30 de cours de chimie et 1h30 de T.P.
- b) Programme : Evolution des systèmes : électriques et mécaniques, ondes, physique atomique et nucléaire : (10 à 12h), équivalence masse -énergie et radioactivité.
- c)

#### II-2-6-4-Conclusion :

- La partie cinématique n'est plus au début de la partie physique en première année, elle vient juste après le thème électricité.

- Augmentation du nombre d'heures en sciences physiques pour les élèves de deuxième année et cette augmentation se fait au profit de la chimie.

- Ces contenus n'insistent pas comme avant sur la partie cinématique et ceci nous pourrions le voir du point de vue nombre d'heures consacrées à la relativité galiléenne et de sa place dans le programme.

- Pas de théorie de la relativité restreinte dans les programmes, pourtant ses conséquences (équivalence masse-énergie, réactions nucléaires, constance de la vitesse de la lumière  $c...$ ) sont encore enseignées.

#### **II-2-7-Année 2010 (voir Annexe2)**

II-2-7-1- Buts : identiques à 2006.

II-2-7-2-Stratégie d'apprentissage : identique à 2006

II-2-7-3- Niveau scolaire :

II-2-7-3-1- 1<sup>ère</sup> année secondaire (identiques à 2006, horaire et programme).

II-2-7-3-2- 2<sup>ème</sup> année secondaire (identiques à 2006, horaire et programme).

#### II-2-7-3-3- 3ème année scolaire

En 2010, les programmes de physique en troisième année diffèrent légèrement d'une section scientifique à une autre (sections : Math, sciences expérimentales, sciences techniques, sciences de l'informatique) la différence est au niveau du thème électronique. Nous allons nous intéresser au programme de troisième année sciences expérimentales.

a) Horaire : même horaire que 2006

b) Programme

- 1) L'interaction dans l'univers, mouvement (16 à 20h) : diminution du nombre d'heures consacré au mouvement par rapport à l'année 2006, optique et image :  
Idem (nombre d'heures) que celui de 2006.

#### II-2-7-3-4- 4<sup>ème</sup> année science expérimentales.

En 2010, les programmes de physique en quatrième année diffèrent légèrement d'une section scientifique à l'autre (sections : Math, sciences expérimentales, sciences techniques, sciences de l'informatique) la différence est encore au niveau du thème électronique. Nous allons nous intéresser au programme de quatrième année sciences expérimentales.

a) Horaire : même horaire que 2006.

b) Programme :

- Evolution des systèmes : électriques et mécaniques, ondes, physique atomique et nucléaire (10 à 12h), Equivalence masse et énergie, radioactivité.

#### II-2-7-4- Conclusion :

- Diminution du nombre d'heure concernant le concept de mouvement (partie cinématique) en troisième année dans le cadre de l'allègement des programmes en physique (moins 9h).
- Donner plus d'importance à la chimie, l'épreuve de chimie au baccalauréat sera notée sur 9 points au lieu de 7 et ceci à partir de l'année scolaire 2011/2012.
- Absence de la relativité galiléenne et de la relativité restreinte en troisième année et en quatrième année ; coupure totale avec les concepts mouvement et relativité.

#### II-3- histoire de l'enseignement de la philosophie en Tunisie depuis 1970 et place du concept temps.

Depuis 1970 jusqu'à l'année 1979 la Philosophie n'est enseignée en langue Française que pour les élèves du baccalauréat. Dans ces programmes, aussi bien la notion de la relativité que le concept temps étaient absents. À partir de l'année scolaire 1979/1980, la Philosophie est enseignée en langue arabe et uniquement pour les élèves du Baccalauréat.

À partir de l'année scolaire 1993/1994, les programmes officiels commencent à introduire les notions de relatif et d'absolu en incitant les enseignants à se baser, comme nous l'avions évoqué dans le chapitre précédent, sur les lectures des livres suivants :

\* *Evolution des idées en Physique*, A.Einstein et L. Infeld, 1938.

\* *Formation de l'esprit scientifique*, G.Bachelard, 1938.

Les contenus des programmes officiels actuels sont presque les mêmes depuis 1970 sauf au moment de l'arabisation de la philosophie, où il y a eu l'introduction de quelques philosophes, arabo musulman et jusqu'à nos jours ; les contenus sont toujours basés sur les mêmes ouvrages qui se rapportent sur les notions de relatif et d'absolu et ceci pour inciter la discussion sur la différence entre ces deux concepts.

#### II-4-Analyse des programmes officiels actuels et Discussions :

##### A/ En sciences physiques

##### A-1- Réformes éducatives :

En revenant sur l'histoire de l'enseignement de la physique dans le secondaire en Tunisie, nous remarquons qu'il y a eu plusieurs réformes, mais elles ne concernaient que les programmes (savoir à enseigner) hormis la réforme éducative structurelle plus importante de 1992 qui a instauré l'enseignement de base de la 1<sup>ère</sup> année du primaire à la 9<sup>ème</sup> année du collège (9ans) puis l'enseignement secondaire sur 4 ans. Dans cette réforme a été aussi introduit l'enseignement en Arabe des sciences physiques au collège.

Dans l'enseignement secondaire, la première année est une année commune à tous les élèves, la deuxième année est l'année du choix de la filière (Science, Lettre, Economie gestion ou Technique) et la 3<sup>ème</sup> année est l'année correspondante au choix de la section (sciences expérimentales, Mathématiques, lettre, technique, informatique, économie gestion), jusqu'à l'année du Baccalauréat (4<sup>ème</sup> année secondaire).

## A-2- Objectifs de l'enseignement des sciences physiques au secondaire :

L'enseignement des sciences physiques a une double mission primordiale, d'abord assurer en général la formation cognitive des apprenants, leur faire acquérir les méthodologies de travail, les habituer à la pratique de la démonstration et de l'argumentation, puis leur faire acquérir des compétences de résolution de problèmes et d'interprétation des phénomènes naturels et humains, mais aussi développer des éléments de culture scientifique qui les aideront à se faire une représentation rationnelle des phénomènes naturels environnants et à se situer dans le monde contemporain.

## A-3- Liens avec les autres disciplines

Pour assurer une meilleure acquisition des connaissances par les élèves, il n'est pas question de dissocier les apprentissages à réaliser en sciences physiques de ceux effectués ailleurs, non seulement dans les disciplines du domaine des sciences mais plutôt dans toutes les disciplines scolaires. « Les sciences Physiques » les « sciences de la vie et de la Terre », la « technologie », la « philosophie » et autres, sont complémentaires par les nombreux concepts qu'elles ont en commun (voir paragraphe si haut I-4-2-2).

## A-4- Contenus Actuels des programmes actuels et place de la relativité :

### A-4-1- Première année secondaire (pour la dernière réforme des contenus des programmes en date de 2010)

#### a/ Commentaires

Examinons maintenant d'une manière détaillée le contenu de la partie cinématique à travers les contenus des programmes officiels de physique enseignés à partir de l'année scolaire 2010/2011. À l'aide d'exemples tirés de la vie courante, on dégagera le caractère relatif du mouvement et on fera remarquer que la trajectoire d'un point mobile n'est définie que si l'on précise le solide de référence auquel on rapporte le mouvement. On se limitera à des exemples de mouvements plans rapportés à la Terre considérée comme solide de référence. La position d'un mobile sur sa trajectoire est repérée, après le choix préalable d'une origine et d'une unité, soit par son abscisse curviligne soit par ses coordonnées dans un système d'axes orthonormé. Il est très important de faire saisir qu'à tout instant correspond un scalaire  $t$  appelé date : lorsqu'on dit « un instant  $t$  », il est sous-entendu, qu'il s'agit de « un instant de date  $t$  ». Donc, il

est impropre de dire qu'un mobile passe par une position donnée à une date  $t$ , il faut dire « à un instant de date  $t$  » ou pour simplifier : « à un instant  $t$  ». L'équation d'une trajectoire n'est pas au programme. Le digramme de vitesse ainsi que la notion d'accélération sont hors programme.

**FORCES, MOUVEMENTS, PRESSION (12 heures)**

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Volume horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reconnaître un état de mouvement ou de repos d'un objet par rapport à un autre objet.</li> <li>■ Déterminer la nature du mouvement d'un corps en exploitant un ensemble de positions associées à des dates sur sa trajectoire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ citer quelques exemples de mouvements : êtres vivants, projectiles, véhicules, mouvements des planètes du système solaire.</li> <li>▶ Comment peut-on décrire le mouvement d'un objet ?</li> <li>▶ Proposer quelques techniques d'observation de mouvements : Observation directe, chronophotographie, exploitation de séquences vidéo assistée par ordinateur, document multimédia et simulations.</li> </ul>	<p><b>I. Forces et mouvements</b></p> <p><b>I-1.</b> Caractère relatif d'un mouvement : Solide de référence ; sens</p> <p><b>I-2.</b> Position d'un mobile</p> <p><b>I-3.</b> Trajectoire : Mouvement rectiligne et mouvement curviligne</p> <p><b>I-4.</b> Vitesse moyenne et vitesse instantanée (grandeurs scalaires) : Mouvement accéléré, mouvement ralenti et mouvement uniforme</p> <p><b>I-5.</b> Respect de la distance de sécurité sur route</p>	1 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reconnaître un mouvement accéléré, freiné et uniforme.</li> <li>■ Calculer une vitesse moyenne en mètres par seconde et en kilomètres par heure.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ En quoi la ceinture de sécurité diminue-t-elle les risques encourus en cas d'accident ?</li> <li>▶ Analyser un document de sécurité routière.</li> </ul>	<p><b>I-6.</b> Action exercée sur un objet et effets observés ; définition et exemples (Aspect dynamique et statique) ; sa modélisation par une force</p>	1 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Distinguer entre l'objet exerçant la force et celui qui la subit.</li> <li>■ Distinguer les différents effets d'une force.</li> <li>■ Mesurer l'intensité (ou valeur) d'une force et l'exprimer en newtons (N).</li> <li>■ Représenter une force par un vecteur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Comment peut-on modifier le mouvement d'un objet ?</li> <li>▶ Comment un objet peut-il être déformé ?</li> </ul>		2 h

Tableau n°2 : La relativité du mouvement

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Volume horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Appliquer la 1<sup>ère</sup> loi de Newton.</li> <li>■ Distinguer entre le poids et la masse d'un corps.</li> <li>■ Exploiter la relation de proportionnalité entre le poids et la masse d'un corps.</li> <li>■ Expliquer l'effet de l'apesanteur sur le fonctionnement de l'organisme humain.</li> <li>■ Appliquer la condition d'équilibre d'un objet soumis à deux forces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Comment expliquer la chute des corps ?</li> <li>▶ Comment situer le centre de gravité d'un solide homogène de forme géométrique simple ?</li> <li>▶ Quelle relation y a-t-il entre le poids et la masse d'un corps ?</li> <li>▶ Pourquoi les cosmonautes revenant sur Terre trouvent-ils des difficultés à se maintenir debout ?</li> </ul>	<p><b>I-7.</b> 1<sup>ère</sup> loi de Newton (Principe d'inertie)</p> <p><b>I-8.</b> Le poids d'un corps</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Direction et sens ; centre de gravité</li> <li>- Relation entre l'intensité du poids et la masse (intensité de pesanteur <math>g</math> en <math>N.kg^{-1}</math>)</li> <li>- Danger de l'apesanteur</li> </ul>	3 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Déterminer le centre de gravité d'un corps.</li> <li>■ Expliquer le principe de fonctionnement d'un dynamomètre droit.</li> <li>■ Appliquer la 3<sup>e</sup> loi de Newton.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Comment déterminer expérimentalement le centre de gravité d'une plaque ?</li> <li>▶ Expliquer l'équilibre d'un objet posé sur une table ou suspendu à un fil.</li> </ul>	<p><b>II. Forces et équilibres</b></p> <p><b>II-1.</b> Equilibre d'un solide soumis à deux forces</p> <p>Application : Détermination expérimentale du centre de gravité</p> <p><b>II-2.</b> Forces de liaison : Tension d'un fil ; tension d'un ressort: <math>T = k.x</math> ; réaction d'un plan d'appui ; 3<sup>e</sup> loi de Newton</p>	3 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reconnaître les facteurs dont dépend la pression.</li> <li>■ Expliquer le principe de fonctionnement d'outils simples tels que le couteau, la pince coupante, la tenaille, les ciseaux...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pourquoi la « punaise » a-t-elle cette forme ?</li> <li>▶ Comment percer, couper... manuellement ?</li> <li>▶ Pourquoi les engins lourds ont-ils de gros pneus ou des chenilles ?</li> <li>▶ Pourquoi aiguiser les couteaux ?</li> </ul>	<p><b>III. Forces et pression</b></p> <p><b>III-1.</b> Transmission des forces par les solides</p> <p><b>III-2.</b> Notion de pression et applications</p>	2 h

Tableau n°3 : Application de la première loi de Newton

## A-4-2- 2<sup>ème</sup> année

### a/ Commentaires :

Les notions de système indéformable et de système déformable doivent être dégagées progressivement, ce qui suppose l'élimination de tout exposé dogmatique à ce sujet .L'étude de l'équilibre d'un solide et celle du mouvement d'un point matériel nécessite le choix d'un repère lié à la Terre. L'équilibre d'un corps abandonné à lui-même sur un plan incliné permettra de mettre en évidence l'existence de forces de frottement solide-solide. On ne parlera pas de coefficient de frottement.

#### FORCES, MOUVEMENTS ET PRESSION (16 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Volume horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Distinguer un système indéformable d'un système déformable.</li> <li>■ Identifier les forces intérieures et les forces extérieures appliquées à un système.</li> <li>■ Etablir expérimentalement la relation entre trois forces coplanaires et non parallèles auxquelles est soumis un solide en équilibre.</li> <li>■ Appliquer la condition d'équilibre d'un solide soumis à trois forces coplanaires et non parallèles.</li> <li>■ Calculer le moment d'une force par rapport à un axe fixe qui lui est orthogonal.</li> <li>■ Appliquer le théorème des moments.</li> <li>■ Expliquer le principe de fonctionnement d'une machine simple.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Qu'est-ce qu'un système mécanique ?</li> <li>▶ Citer quelques systèmes environnants et les classer en systèmes indéformables et systèmes déformables.</li> <li>▶ Pourquoi serre-t-on les freins à main lors du démarrage en côte d'une voiture?</li> <li>▶ Réaliser une expérience permettant de maintenir immobile, un solide sous l'effet de trois forces, et dégager la condition d'équilibre.</li> </ul>	<p><b>I. Forces et équilibre</b></p> <p><b>I-1.</b> Système mécanique: définitions du point matériel, du système matériel, du système indéformable et du système déformable</p> <p><b>I-2.</b> Equilibre d'un solide soumis à trois forces coplanaires et non parallèles Application à la détermination des forces de frottement</p> <p><b>I-3.</b> Equilibre d'un solide assujéti à tourner autour d'un axe fixe</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moment d'une force par rapport à un axe fixe</li> <li>- Moment d'un couple de forces</li> <li>- Théorème des moments</li> </ul> <p>Applications :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Machines simples (leviers, poulie à axe fixe, treuil)</li> <li>* Balance Roberval</li> </ul>	6 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reconnaître un mobile en mouvement rectiligne uniformément varié.</li> <li>■ Reconnaître un mobile en mouvement circulaire uniforme.</li> <li>■ Déterminer la vitesse angulaire d'un mobile en mouvement circulaire uniforme ainsi que sa période.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pourquoi recourt-on parfois à l'augmentation de la longueur de la clé lors du desserrage d'un boulon ? Expliquer.</li> <li>▶ Réaliser une expérience permettant d'introduire la notion de moment d'une force par rapport à un axe fixe et une autre permettant de dégager le théorème des moments.</li> <li>▶ Comment procède-t-on pour soulever un corps lourd d'un niveau à un autre plus élevé ?</li> </ul>	<p><b>II. Le mouvement d'un point matériel : étude cinématique</b></p> <p><b>II-1.</b> Mouvement rectiligne uniformément varié</p> <p><b>II-2.</b> Mouvement circulaire uniforme</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vitesse angulaire</li> <li>- Période et fréquence</li> </ul>	5 h

Tableau n°4 : La place de la cinématique classique en deuxième année

## A-4-3- 3<sup>ème</sup> année

### a/ Commentaires

On se limitera aux mouvements de translation dans le plan. L'étude des mouvements combinés est hors programme. Dans les généralités sur la cinématique, on s'intéressera au point matériel. Pour l'étude cinématique des mouvements, on introduira brièvement la dérivée d'une fonction scalaire et on généralisera aux fonctions vectorielles tout en se limitant à des vecteurs unitaires constants. Il est à noter que les notions introduites ne doivent en aucune manière

donner lieu à un développement excessif. On donnera sans démonstration, les expressions de l'accélération tangentielle et de l'accélération normale et uniquement dans le cas de mouvement circulaire.

Il est à remarquer que l'étude de « la composition de vitesses » est strictement hors programme. Le vecteur déplacement est hors programme. Au niveau de l'étude cinématique des mouvements, on signalera que la translation d'un solide peut être curviligne, on la définira et on en donnera des exemples.

Lors de l'étude de la rotation d'un solide autour d'un axe fixe, on ne manquera pas de signaler la relation entre grandeurs linéaires relatives à un point de ce solide et grandeurs angulaires.

On énoncera pour un point matériel, la loi fondamentale de la dynamique (2ème loi de Newton). Il est indiqué de préciser d'emblée que la relation  $\Sigma \mathbf{F} = m\mathbf{a}$ , traduisant cette loi n'est valable que dans les référentiels galiléens. On saisira cette occasion pour définir le repère de Copernic, le repère géocentrique et pour signaler sans développement excessif le caractère approximativement galiléen de ces repères ainsi que tout repère lié au laboratoire.

**MOUVEMENTS** (25 – 29 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reconnaître un solide en mouvement de translation.</li> <li>▪ Représenter les vecteurs : position, vitesse et accélération d'un mobile.</li> <li>▪ Reconnaître la nature du mouvement d'un mobile par recours à l'expérience.</li> <li>▪ Connaissant l'expression d'une grandeur cinématique (x, v ou a) en fonction du temps ainsi que les conditions initiales, retrouver les expressions de deux autres.</li> <li>▪ Etablir, pour un mouvement rectiligne uniformément varié, la relation : <math>v_2^2 - v_1^2 = 2a \cdot (x_2 - x_1)</math>.</li> <li>▪ Caractériser un mouvement rectiligne sinusoïdal par son amplitude <math>X_m</math> et sa période T.</li> <li>▪ Etablir la relation <math>(\mathbf{a} + \omega^2 \mathbf{x} = \mathbf{0})</math> entre l'accélération a et l'élongation x d'un mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal.</li> <li>▪ Appliquer la loi fondamentale de la dynamique (2<sup>e</sup> loi de Newton).</li> <li>▪ Appliquer le théorème du centre d'inertie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Réaliser des enregistrements de mouvements ou faire des mesures de grandeurs cinématiques pour étudier des mouvements rectilignes. ☐</li>   <li>▶ Déterminer, par mesure directe (pour les mouvements lents) ou par enregistrement, la période T et l'amplitude <math>X_m</math> d'un mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal. ☐</li>   <li>▶ Vérifier expérimentalement la relation : <math>\Sigma \vec{F}_{ext} = m\vec{a}_G</math> ☐</li> </ul>	<p><b>I. Solide en translation</b>  <b>I-1. Etude cinématique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Généralités : repérage d'un mobile (vecteur position, coordonnées cartésiennes, abscisse curviligne), vecteur vitesse, vecteur accélération (accélération normale, accélération tangentielle), lois horaires.</li> <li>- Mouvement rectiligne uniforme.</li> <li>- Mouvement rectiligne uniformément varié.</li>   <li>- Mouvement rectiligne sinusoïdal : définition, équation horaire, vitesse, accélération, amplitude, période, fréquence, pulsation.</li>   <li><b>I-2. Etude dynamique</b></li> <li>- Loi fondamentale de la dynamique (2<sup>ème</sup> loi de Newton).</li> <li>- Théorème du centre d'inertie.</li> </ul> <p><u>Applications :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Glissement d'un solide sur un plan incliné ;</li> <li>• Solide isolé ou pseudo isolé.</li> </ul>	7,5 – 9h

Tableau n°5 : Place de la cinématique classique en troisième année

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Distinguer un mouvement de rotation uniforme d'un mouvement de rotation uniformément varié.</li> <li>■ Reconnaître la nature du mouvement d'un solide en rotation, par recours à l'expérience.</li> <li>■ Connaissant l'expression d'une grandeur cinématique (<math>\theta</math>, <math>\dot{\theta}</math> ou <math>\ddot{\theta}</math>) en fonction du temps ainsi que les conditions initiales, retrouver les expressions de deux autres.</li> <li>■ Etablir, pour un mouvement de rotation uniformément varié, la relation : <math>\dot{\theta}_2^2 - \dot{\theta}_1^2 = 2\ddot{\theta} \cdot (\theta_2 - \theta_1)</math>.</li> <li>■ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique de rotation.</li> <li>■ Calculer l'énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation.</li> <li>■ Calculer l'énergie cinétique d'un solide en mouvement de rotation autour d'un axe fixe.</li> <li>■ Appliquer le théorème de l'énergie cinétique pour déterminer entre autres la valeur d'une grandeur inaccessible à la mesure (force de frottement, réaction d'un support...).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Réaliser des enregistrements de mouvements ou faire des mesures de grandeurs cinématiques pour étudier des mouvements de rotation d'un solide. ☐</li> <li>▶ Déterminer expérimentalement l'accélération angulaire d'un solide en mouvement de rotation uniformément varié.</li> <li>▶ Vérifier expérimentalement la relation : <math>\Sigma \mathcal{M} = J \cdot \ddot{\theta}</math></li> <li>▶ Pourquoi les vitesses des véhicules sont-elles plus limitées en temps pluvieux qu'en temps sec ?</li> <li>▶ Sur quoi se base-t-on pour fixer les distances de sécurité routière ?</li> <li>▶ Etudier expérimentalement la variation de l'énergie cinétique d'un solide en chute libre ou mobile sur un banc à coussin d'air incliné. ☐</li> <li>▶ Réaliser des chocs (élastiques et non élastiques) entre deux planeurs sur un banc à coussin d'air et mesurer leurs vitesses avant et après le choc, comparer les énergies cinétiques du système des deux planeurs avant et après le choc. ☐</li> </ul>	<p><b>II. Solide en rotation autour d'un axe fixe</b></p> <p><b>II-1. Etude cinématique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Généralités : abscisse angulaire, vitesse angulaire, accélération angulaire.</li> <li>- Mouvement de rotation uniforme.</li> <li>- Mouvement de rotation uniformément varié.</li> </ul> <p><b>II-2. Etude dynamique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Relation fondamentale de la dynamique de rotation appliquée à un solide mobile autour d'un axe passant par son centre de gravité.</li> <li>- Application : détermination du moment d'un couple de frottement supposé constant</li> </ul> <p><b>III. Energie cinétique</b></p> <p><b>III-1. Energie cinétique d'un solide en translation</b></p> <p><b>III-2. Energie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe</b></p> <p><b>III-3. Variation de l'énergie cinétique : théorème de l'énergie cinétique</b></p> <p><u>Applications :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Détermination d'une force de liaison ;</li> <li>- Choc élastique et choc inélastique.</li> </ul>	8,5 – 10 h

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique aux mouvements : <ul style="list-style-type: none"> <li>- d'un projectile,</li> <li>- d'un satellite.</li> </ul> </li> <li>■ Retrouver la troisième loi de Kepler.</li> <li>■ Calculer le travail d'une force électrique.</li> <li>■ Appliquer l'expression du travail d'une force électrique : <math>W_{A \rightarrow B} = q(V_A - V_B)</math>.</li> <li>■ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</li> <li>■ Calculer la force de Lorentz.</li> <li>■ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Dans quelle direction, par rapport à l'horizontale, un lanceur de poids doit-il effectuer son lancement pour optimiser sa performance ?</li> <li>▶ Comment déterminer l'altitude d'un satellite pour qu'il soit géostationnaire ?</li> <li>▶ Commenter un dossier, préparé par les élèves à l'avance, sur les lois de Kepler et l'historique y afférent. ☐</li> <li>▶ Quel est le principe de fonctionnement de l'oscilloscope ?</li> <li>▶ Expliquer la perturbation de l'image sur l'écran de l'oscilloscope par la présence d'un aimant.</li> <li>▶ Comment séparer les isotopes d'un élément chimique ?</li> <li>▶ Etudier expérimentalement l'influence de <math>\vec{B}</math>, <math>\vec{v}</math>, et de l'angle <math>\alpha</math> que fait <math>\vec{v}</math> avec <math>\vec{B}</math> sur les caractéristiques de la force de Lorentz. ☐</li> </ul>	<p><b>IV. Mouvements dans les champs</b></p> <p><b>IV-1. Mouvement dans un champ gravitationnel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mouvement d'un projectile.</li> <li>- mouvement des satellites : troisième loi de Kepler.</li> </ul> <p><b>IV-2. Mouvement dans un champ électrique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Travail d'une force électrique dans un champ électrique uniforme : notion de différence de potentiel (d.d.p.) électrique.</li> <li>- Accélération d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</li> <li><u>Application</u> : canon à électrons</li> <li>- Déviation d'une particule chargée par un champ électrique uniforme.</li> <li><u>Application</u> : déflexion d'un faisceau d'électrons, oscilloscope.</li> </ul> <p><b>IV-3. Mouvement dans un champ magnétique uniforme</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme : force de Lorentz.</li> <li><u>Applications</u> : télévision, cyclotron.</li> </ul>	9 – 10 h

Tableau n°6 : Place de la cinématique classique en troisième année

A-4-5- 4ème année :

a/ Commentaires:

Absence totale de la relativité générale et de la théorie de la relativité restreinte, hormis les réactions nucléaires : les élèves apprennent la relation d'équivalence masse- énergie :  $\Delta E = \Delta mc^2$  et ils considèrent que la célérité de la lumière  $c$  est constante sans savoir que cette considération est le deuxième postulat de la théorie de la relativité restreinte ou que cette relation est une des conséquences de la théorie de la relativité restreinte sur les lois de l'électromagnétisme.

#### A-5- Discussion sur la notion de relativité dans les programmes officiels tunisiens en physique au secondaire depuis l'année 1970.

a/ Malgré de légères modifications du programme de physique du secondaire dans les années 70,78 et 82, la notion de relativité n'est introduite qu'en 1993 : à partir de cette année l'élève commence l'apprentissage de la physique au lycée (première année) par la partie cinématique dans laquelle il va tenir compte de la relativité du mouvement et de l'importance du choix d'un repère espace et temps (absolu). C'est la relativité galiléenne qui reste sans aucun rapport avec la partie relativité restreinte vue ensuite au baccalauréat (4<sup>ème</sup> année secondaire).

b/ L'introduction de la partie relativité restreinte en 1993 pour les élèves du baccalauréat était très abstraite. Elle était introduite comme si l'on voulait montrer aux élèves uniquement l'insuffisance de la mécanique newtonienne à partir de l'expérience de Berzotti : choc élastique proton-proton, sans insister sur les postulats de la théorie de la relativité restreinte, sur son lien avec la relativité galiléenne ou newtonienne, sur ses conséquences sur la physique contemporaine et avec des formules mathématiques complexes et parachutées c'est pourquoi après 6 ans , elle a été supprimée des programmes officiels, même si quelques chapitres et quelques lois physiques qui étaient des conséquence de la relativité restreinte comme la radioactivité, ou l'équivalence masse-énergie, apparaissent encore dans les programmes officiels actuels.

c/ Même si la relativité galiléenne ou newtonienne a été introduite depuis 1993, elle n'était pas introduite même jusqu'à nos jour d'une manière pertinente à cause du peu de temps consacré à cette partie (partie cinématique) et à cause des obstacles rencontrés par les apprenant vis-à-vis de l'acquisition des concepts cinématiques (conceptions erronées et non changées pendant l'apprentissage à propos des concepts : référentiel, aspect relatif du mouvement, repère espace et repère temps...).

d/ Dans les programmes officiels actuels de physique, l'apprenant doit savoir que la célérité de la lumière est une constante, mais sans connaître son importance dans la théorie de la relativité et sans savoir qu'elle constitue le second postulat de cette théorie, d'où les difficultés de compréhension de l'histoire de la détermination de sa valeur (voir les résultats du questionnaire pour les élèves du bac au chapitre IX).

e/ Le temps est considéré pour l'apprenant tout au long de ses études dans le secondaire comme une grandeur absolue. Il ne dépend pas du référentiel choisi. En effet, depuis sa première année d'apprentissage de la physique, l'élève ne voit que la relativité galiléenne (relativité du mouvement), et pas celle du temps ou d'espace ce qui sera pour lui un obstacle pour acquérir la notion de temps propre ou de temps mesuré (à l'université) et par la suite de pouvoir considérer un phénomène physique comme un événement dans l'espace-temps et non comme un phénomène lié à l'espace uniquement.

#### A-6-Discussion sur l'enseignement du concept vitesse de la lumière dans les programmes tunisiens de physique.

La notion de célérité de la lumière est introduite dans les programmes officiels des sciences physiques tunisien d'une façon succincte et aléatoire, comme une constante égale à la valeur de 300.000 km/s, à travers la nature ondulatoire de la lumière et l'équivalence masse-énergie, sans se référer à l'histoire de sa mesure, ni à comment la communauté scientifique a fixé sa valeur en 1984 à 299 792,458Km/s. Ce qui amène l'élève au niveau du baccalauréat à négliger son importance dans l'évolution de la science depuis l'époque de Galilée (16<sup>ème</sup> siècle).

Dans ce paragraphe nous présenterons la façon dont a été introduite la célérité de la lumière dans les programmes officiels tunisiens en sciences physiques pour les élèves du baccalauréat, à travers les deux thèmes suivants qui sont étudiés à la fin du troisième trimestre du programme officiel au baccalauréat.

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Justifier le caractère ondulatoire de la lumière à partir d'expériences de diffraction d'ondes mécaniques et d'ondes lumineuses.</li> <li>▪ Préciser l'influence, sur le phénomène de diffraction, du quotient <math>\frac{\lambda}{a}</math> (<math>\lambda</math> étant la longueur d'onde et <math>a</math> la largeur de la fente).</li> <li>▪ Réaliser des expériences de dispersion des ondes lumineuses.</li> <li>▪ Montrer qu'une lumière blanche est constituée d'une infinité de radiations monochromatiques.</li> <li>▪ Distinguer un milieu dispersif d'un milieu non dispersif.</li> </ul>	<p>Observer la diffraction d'une onde progressive rectiligne à la surface de la nappe d'eau d'une cuve à ondes, à travers une fente droite de largeur réglable et fixée à 1,3 cm par exemple et celle de la lumière émise par une source laser à travers une fente droite de largeur réglable et fixée à 0,2 mm par exemple ; faire varier dans chaque cas la largeur de la fente et suivre l'évolution de la netteté du phénomène de diffraction.</p>	<p><b>II- Nature ondulatoire de la lumière</b>  <b>II-1. Diffraction mécanique et lumineuse.</b>  <b>II-2. Dispersion de la lumière.</b></p>	2 - 2,5 h

Tableau n°7 : La nature ondulatoire de la lumière

**PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLEAIRE (10 – 12 heures)**

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Décrire une expérience montrant que l'énergie de l'atome est quantifiée.</li> <li>▪ Calculer l'énergie de l'atome d'hydrogène en joules et en électrons-volts.</li> <li>▪ Distinguer un spectre d'émission d'un spectre d'absorption.</li> <li>▪ Appliquer la relation <math>\Delta E = h \cdot \nu</math></li> <li>▪ Identifier un élément chimique à partir de son spectre d'émission ou d'absorption.</li> <li>▪ Utiliser le spectre de la lumière émise par une étoile pour reconnaître certains de ses constituants.</li> <li>▪ Ecrire le symbole d'un noyau atomique connaissant sa composition et inversement.</li> <li>▪ Evaluer, en joules et en MeV, l'énergie mise en jeu au cours d'une transformation nucléaire.</li> <li>▪ Evaluer en <math>u</math> et en <math>MeV \cdot c^{-2}</math>, le défaut de masse résultant de la formation d'un noyau.</li> <li>▪ Calculer l'énergie de liaison d'un noyau et son énergie de liaison par nucléon.</li> <li>▪ Comparer la stabilité de deux ou de plusieurs noyaux, connaissant les valeurs de leurs énergies de liaison par nucléon.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Réaliser l'expérience de dispersion de la lumière émise par une lampe spectrale (lampe à vapeur de mercure par exemple) par un prisme.</li> <li>▶ Observer un spectre de raies (<b>H, Na, Hg et He</b>), l'analyser et l'interpréter.</li> <li>▶ Comparer la masse totale des noyaux produits lors d'une transformation avec la somme des masses des noyaux de départ.</li> <li>▶ Analyser la courbe d'Aston représentant l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de masse.</li> </ul>	<p><b>I. Spectre atomique et quantification des échanges d'énergie</b>  <b>I-1. Quantification de l'énergie d'un atome</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantification des échanges d'énergie à l'échelle des atomes.</li> <li>- Niveaux d'énergie d'un atome.</li> </ul> <p><b>I-2. Spectre atomique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantum d'énergie : le photon.</li> <li>- Etat fondamental et états excités d'un atome.</li> <li>- Spectres d'absorption et d'émission d'un atome.</li> </ul> <p><b>II. Noyau atomique</b>  <b>II-1. Equivalence masse-énergie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Relation d'Einstein <math>E = mc^2</math>.</li> <li>- Défaut de masse.</li> </ul> <p><b>II-2. Stabilité du noyau</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Energie de liaison.</li> <li>- Energie de liaison par nucléon.</li> </ul>	<p>3 – 4 h</p> <p>2 h</p>

Tableau n°8 : Place de la célérité de la lumière en physique nucléaire et atomique

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Justifier l'émission de rayonnements radioactifs.</li> <li>▪ Ecrire les équations des réactions nucléaires spontanées.</li> <li>▪ Appliquer la loi de désintégration pour des durées multiples de la période d'un radioélément.</li> <li>▪ Calculer l'activité d'un échantillon radioactif.</li> <li>▪ Distinguer les réactions nucléaires spontanées des réactions nucléaires provoquées.</li> <li>▪ Distinguer la fission de la fusion nucléaire.</li> <li>▪ Ecrire les équations des réactions nucléaires provoquées.</li> <li>▪ Justifier la variation d'énergie accompagnant la fission et la fusion nucléaires.</li> <li>▪ Evaluer l'énergie libérée au cours des réactions nucléaires de fission et de fusion.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Quel est le principe de datation des éruptions volcaniques ainsi que des momies pharaoniques?</li> <li>▶ En quoi diffère la centrale d'électricité thermonucléaire de la centrale thermique classique ?</li> <li>▶ Qu'est-ce qu'un réacteur nucléaire ?</li> <li>▶ En quoi consistait l'accident survenu le 26 avril 1986 dans la centrale thermonucléaire de la ville de Tchernobyl en Ukraine ? En quoi consiste la gravité de cet accident et quelles sont ses conséquences néfastes pour le considérer jusqu'à maintenant comme étant la plus grande catastrophe du nucléaire civil ?</li> <li>▶ Quelle est l'origine de l'énergie solaire ?</li> </ul>	<p><b>III. Réactions nucléaires</b></p> <p><b>III-1. Réactions nucléaires spontanées : Radioactivité</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Radioactivité naturelle et radioactivité artificielle : les différents rayonnements.</li> <li>- Loi de désintégration radioactive.</li> <li>- Période ou demi-vie d'un radioélément.</li> <li>- Activité d'un échantillon radioactif et effet biologique.</li> <li>- Application: datation par le carbone 14 .</li> </ul> <p><b>III-2. Réactions nucléaires provoquées</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fission.</li> <li>- Fusion.</li> </ul> <p><u>Applications</u> : énergie nucléaire ; énergie du Soleil.</p>	5 – 6 h

Tableau n°9 : Place de la célérité de la lumière en physique nucléaire et atomique

#### A-7- Nature ondulatoire de la lumière.

Après avoir étudié que la lumière est une onde, puisqu'elle vérifie le phénomène de diffraction et de dispersion, alors cette lumière est caractérisée par deux grandeurs physiques, la période  $T$  et la longueur d'onde  $\lambda$  telle que la relation entre les deux grandeurs est  $\lambda = c T$  où  $c$  la célérité de la lumière égale à la constante de 300.000km/s (dans le vide, sans insister sur le fait que  $c$  varie avec le milieu traversé par la lumière). On trouve aussi dans les recommandations du programme la phrase suivante : « *On rappellera la dispersion de la lumière blanche par un prisme et on conclura que cette dernière est constituée de plusieurs radiations monochromatiques, chacune est caractérisée par une fréquence* ». Ce qui laisse l'apprenant penser que la célérité de la lumière est constante quel que soit le milieu réfringent.

#### A-8- Physique atomique et nucléaire :

La célérité de la lumière apparaît dans les formules suivantes :

Chaque photon transporte de l'énergie  $w = h c/\lambda$ . Aussi dans le postulat d'Albert Einstein énoncé en 1905 appelé postulat de l'équivalence masse-énergie « *Tout corps au repos dans un référentiel donné possède du seul fait de sa masse  $m$ , une énergie potentielle appelée énergie de masse donnée par la relation  $E_o = mc^2$  ou  $c$  représente la célérité de la lumière dans le vide* ». Par conséquent le défaut de masse équivaut à une variation d'énergie potentielle,  $\Delta E =$

$\Delta mc^2$ . Vu que cette introduction de la vitesse de la lumière ne permet pas à l'apprenant de bien comprendre son importance et le rôle de la détermination de sa valeur dans l'évolution de la physique, nous nous intéresserons dans le chapitre IV à l'historique de la mesure de  $c$  que l'apprenant doit connaître.

## B/ En philosophie :

### B-1- Objectifs actuels de l'enseignement de la philosophie au secondaire : (voir Annexe3)

L'enseignement de la philosophie aux élèves de troisième année et quatrième année du secondaire leur permet de :

- S'exprimer et s'habituer à la liberté d'expression d'après les travaux des grands philosophes.
- Se libérer des idées anciennes et des jugements rapides qui n'ont aucun fondement logique.
- Développer leurs compétences cognitives et leurs comportements sociétal.

### B-2- Contenus des programmes :

#### B-2-1- 3<sup>ème</sup> année secondaire (voir annexe3)

Absence totale des concepts relativité et temps dans les sujets de Philosophie.

#### B-2-2- 4<sup>ème</sup> année secondaire (voir Annexe3).

Dans le thème n°3, il y a introduction des concepts d'absolu et de relatif et incitation à lire les deux célèbres livres mentionnés plus haut.

### B-3- Liens entre philosophie et les autres disciplines :

Aucun lien n'est présenté entre la philosophie et les autres disciplines. Pourtant, nous trouvons des sujets communs comme la modélisation qui est enseignée en philosophie et en chimie (modélisation d'un atome et d'une molécule) et en physique (modélisation d'une force).

### B-4- Conclusion:

- La notion de relativité et la notion d'absolu sont mal introduites pour les élèves et elles sont généralement négligées par les enseignants faute de formation.
- Aucun lien entre la philosophie et les autres disciplines comme sciences physiques ou mathématiques ; chaque discipline est enseignée à part ; même s'il s'agit parfois d'enseigner

des thèmes identiques à cause de la négligence de l'interdisciplinarité dans l'acquisition des concepts scientifiques des apprenants.

- C'est pourquoi dans notre recherche, nous avons essayé d'insister sur les liens entre philosophie et physique et ceci depuis Aristote, car la majorité des physiciens étaient aussi des philosophes ou formés à la philosophie.

Si les enseignants insistent sur les liens scientifiques et épistémologiques qui existent entre les mêmes concepts dans différentes disciplines alors ils permettront aux élèves de mieux acquérir ces concepts.

### **Chapitre III :**

#### **Etude comparée des contenus actuels des programmes officiels en relativité en physique et en philosophie dans le secondaire en France, en Italie et en Tunisie**

### III-1- Introduction :

Nous constatons que l'enseignement de la relativité générale et la théorie de la relativité restreinte en particulier au secondaire en sciences physiques et en philosophie diffère d'un pays à un autre. Il dépend essentiellement des objectifs d'enseignement de chaque discipline et des niveaux d'acquisition des apprenants dans chaque pays, c'est pourquoi nous allons analyser dans ce chapitre le contenu des programmes actuels de l'enseignement de la relativité au secondaire en France et en Italie (nous avons déjà analysé les contenus de physique et de philosophie en Tunisie, chapitre II) puis faire une étude comparée et essayer de voir si les contextes historiques et philosophiques sont les causes de cette différence, si les programmes de physiques et de philosophie introduisent la relativité de la même manière aux élèves et quels apports scientifiques et culturels pourrait donner l'enseignement de la relativité dans le secondaire à nos enseignants ainsi qu'à nos élèves.

### III-2- la place de la relativité dans les programmes officiels actuels en France et en Italie :

#### A- En France

##### A-1- En physique :

###### a/ Objectifs<sup>9</sup> :

L'enseignement des sciences physiques et chimiques contribue à la construction d'une culture scientifique et citoyenne indispensable à une époque où l'activité scientifique et le développement technologique imprègnent notre vie quotidienne et les choix de société. L'activité expérimentale permet notamment de poursuivre l'éducation de l'élève à la sécurité, à l'évaluation des risques, à la surveillance et à la protection de l'environnement, au développement durable. De nos jours, l'enseignement de la physique et de la chimie participe à poser les bases de comportements sociétaux responsables qui fondent la possibilité du vivre ensemble. En effet, la règle de droit peut être amenée à s'appuyer sur des normes quantitatives communes (seuils, plafonds, valeurs de références, etc.) et la mesure des écarts à ces normes en

---

<sup>9</sup> Arrêté du 8 avril 2010 - BO spécial n°4 du 29 avril 2010.

définit les modalités de validation. Le respect des autres et de soi est au fondement de la culture de la responsabilité.

En classe de seconde, la présentation des programmes sous forme de thèmes : santé, pratique sportive, Univers, a été retenue pour prendre en compte la diversité des publics accueillis.

Au cycle terminal de la série S (Sciences), les élèves ayant fait le choix d'une orientation scientifique, le programme a pour ambition de développer leur vocation pour la science et de les préparer à des études scientifiques post-baccalauréat. La discipline, avec ses contenus et ses méthodes, se met au service de cette ambition en se fondant sur les atouts qui lui sont propres : son rapport privilégié au réel, qu'elle englobe et pénètre au plus loin, son rôle dans la structuration des esprits, son importance dans l'appréhension et la relève des défis posés à l'Homme par l'évolution du monde et de la société. L'enseignement des sciences physiques et chimiques de la série S n'est pas tourné en premier lieu vers la discipline, mais vers les élèves, afin de susciter et consolider des vocations pour que le plus grand nombre se dirige vers des carrières scientifiques et techniques. Le questionnement premier n'est donc pas : « *S'ils veulent poursuivre des études scientifiques, qu'est-ce que les bacheliers S doivent savoir ?* », mais plutôt : « *Ont-ils acquis les compétences de base de la démarche scientifique ?* » sans lesquelles il n'est point de vocation assortie de réussite. Et pour tous les élèves de cette série, quel que soit leur métier futur : « *Ont-ils développé suffisamment le goût des sciences pour percevoir leur importance dans la société ?* ».

Il ne saurait en découler un affadissement de la discipline, alors qu'elle se mettrait au service de cet objectif double, celui des compétences et des appétences, mais au contraire une légitimité supérieure, au-delà de sa propre construction, en donnant sens et pertinence à ses objectifs, méthodes et contenus en direction des élèves et plus largement de la société. Partant de cette problématique globale, l'enseignement de la physique-chimie au cycle terminal permet la construction progressive et la mobilisation du corpus de connaissances et de méthodes scientifiques de base de la discipline, en s'organisant autour des grandes étapes de la démarche scientifique : l'observation, la modélisation, et l'action sur le réel, tout en recherchant l'adhésion et l'intérêt des élèves par des entrées et des questionnements contextualisés et modernes.

Pour cela, l'enseignement du cycle terminal prolonge les différents aspects de l'initiation aux sciences physiques et chimiques abordée en seconde, en approfondissant les compétences

développées au travers des modalités de mise en œuvre : la démarche scientifique, l'approche expérimentale, la mise en perspective historique, le lien avec les autres disciplines, l'usage des TIC. En classe de seconde, la liberté pédagogique du professeur s'incarne dans une logique thématique propre à éclairer les choix d'orientation des élèves. Au cycle terminal, elle s'inscrit dans la possibilité de choisir le niveau d'entrée au sein de la démarche scientifique globale sous-tendant l'articulation du programme.

#### b/ Liens avec d'autres disciplines

L'apprentissage des sciences physiques ne se résume pas à des connaissances et savoir-faire strictement disciplinaire, l'élève doit être capable de présenter d'autres compétences dans d'autres disciplines comme la langue française pour pouvoir trier les informations, décrire une expérience, utiliser du vocabulaire scientifique, rédiger une argumentation..., aussi doit-il présenter des compétences en mathématiques pour pouvoir tracer des courbes, utiliser les vecteurs, utiliser quelques notions de géométrie...des compétences en NTIC pour acquérir des données de l'ordinateur, savoir exploiter des logiciels, savoir chercher l'information ....

#### c/ Contenus des programmes officiels et place de la relativité :

##### c<sub>1</sub>/ Au collège :

Des nouveaux programmes d'enseignement à l'école élémentaire et au collège ont entré en vigueur à la rentrée scolaire 2016/2017 suite à la loi 2015<sup>10</sup>, ces nouveaux programmes ont été conçus par cycle de durée de trois ans chaque cycle : cycle (2), cycle (3) et le collège, cycle (4) Les objectifs de formation du cycle 4 en physique et chimie s'organisent autour de quatre thèmes :

Organisation et transformations de la matière

Mouvements et interactions

L'énergie et ses conversions

Des signaux pour observer et communiquer

---

<sup>10</sup> B.O spécial n°11 du 26 Novembre 2015

## Attendus de fin de cycle

- » Caractériser un mouvement.
- » Modéliser une interaction par une force caractérisée par un point d'application, une direction, un sens et une valeur.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
<b>Caractériser un mouvement</b>	
Caractériser le mouvement d'un objet. Utiliser la relation liant vitesse, distance et durée dans le cas d'un mouvement uniforme. <ul style="list-style-type: none"><li>» Vitesse : direction, sens et valeur.</li><li>» Mouvements rectilignes et circulaires.</li><li>» Mouvements uniformes et mouvements dont la vitesse varie au cours du temps en direction ou en valeur.</li><li>» Relativité du mouvement dans des cas simples.</li></ul>	L'ensemble des notions de cette partie peut être abordé à partir d'expériences simples réalisables en classe, de la vie courante ou de documents numériques. Utiliser des animations des trajectoires des planètes, qu'on peut considérer dans un premier modèle simplifié comme circulaires et parcourues à vitesse constante. Comprendre la relativité des mouvements dans des cas simples (train qui démarre le long d'un quai) et appréhender la notion d'observateur immobile ou en mouvement.

Tableau n°10 : Place du mouvement au collège

Le tableau ci-dessus indique l'introduction de la notion de relativité du mouvement, en donnant des exemples simples de corps en mouvement (train, quai).

C<sub>2</sub>/ Au Lycée :

\* Classe seconde :

L'enseignement des sciences physiques, en classe seconde, se fait pendant 3h par semaine.

## Mouvement et interactions

La mécanique est un domaine très riche du point de vue de l'observation et de l'expérience, mais aussi du point de vue conceptuel et méthodologique. Elle permet d'illustrer de façon pertinente la démarche de modélisation. Deux caractéristiques inhérentes à l'apprentissage de la mécanique méritent d'être soulignées :

- d'une part l'omniprésence des situations de mouvement qui a permis d'ancrer chez les élèves des raisonnements spontanés, souvent opératoires mais erronés et donc à déconstruire ;
- d'autre part la nécessaire maîtrise de savoirs et savoir-faire d'ordre mathématique qui conditionne l'accès aux finalités et concepts propres à la mécanique.

Ce thème prépare la mise en place du principe fondamental de la dynamique ; il s'agit en effet de construire un lien précis entre force appliquée et variation de la vitesse. Si la rédaction du programme est volontairement centrée sur les notions et méthodes, les contextes d'étude ou d'application sont nombreux et variés : transports, aéronautique, exploration spatiale, biophysique, sport, géophysique, planétologie, astrophysique ou encore histoire des sciences.

Lors des activités expérimentales, il est possible d'utiliser les outils courants de captation et de traitement d'images mais également les capteurs présents dans les smartphones. L'activité de simulation peut également être mise à profit pour étudier un système en mouvement, ce qui fournit l'occasion de développer des capacités de programmation.

Au-delà des finalités propres à la mécanique, ce domaine permet d'aborder l'évolution temporelle des systèmes, quels qu'ils soient. Ainsi, la mise en place des bilans est-elle un objectif important d'une formation pour et par la physique-chimie, en ce qu'elle construit des compétences directement réutilisables dans d'autres disciplines (économie, écologie, etc.).

### **Notions abordées au collège (cycle 4)**

Vitesse (direction, sens, valeur), mouvements uniformes, rectilignes, circulaires, relativité des mouvements, interactions, forces, expression scalaire de la loi de gravitation universelle, force de pesanteur.

Tableau n° 11 : Place du mouvement en classe de seconde

Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<b>1. Décrire un mouvement</b>	
<p>Système. Échelles caractéristiques d'un système. Référentiel et relativité du mouvement.</p> <p>Description du mouvement d'un système par celui d'un point. Position. Trajectoire d'un point.</p>	<p>Identifier les échelles temporelles et spatiales pertinentes de description d'un mouvement. Choisir un référentiel pour décrire le mouvement d'un système. Expliquer, dans le cas de la translation, l'influence du choix du référentiel sur la description du mouvement d'un système.</p> <p>Décrire le mouvement d'un système par celui d'un point et caractériser cette modélisation en termes de perte d'informations. Caractériser différentes trajectoires. <b>Capacité numérique</b> : représenter les positions successives d'un système modélisé par un point lors d'une évolution unidimensionnelle ou bidimensionnelle à l'aide d'un langage de programmation.</p>

Tableau n°12 : Place du mouvement en classe de seconde

<p>Vecteur déplacement d'un point. Vecteur vitesse moyenne d'un point. Vecteur vitesse d'un point. Mouvement rectiligne.</p>	<p>Définir le vecteur vitesse moyenne d'un point. Approcher le vecteur vitesse d'un point à l'aide du vecteur déplacement <math>\overline{MM'}</math>, où M et M' sont les positions successives à des instants voisins séparés de <math>\Delta t</math> ; le représenter. Caractériser un mouvement rectiligne uniforme ou non uniforme. <i>Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie d'un système en mouvement et représenter des vecteurs vitesse ; décrire la variation du vecteur vitesse.</i> <b>Capacité numérique</b> : représenter des vecteurs vitesse d'un système modélisé par un point lors d'un mouvement à l'aide d'un langage de programmation. <b>Capacités mathématiques</b> : représenter des vecteurs. Utiliser des grandeurs algébriques.</p>
--	---

Tableau n°13 : Place du mouvement en classe de seconde

2. Modéliser une action sur un système	
Modélisation d'une action par une force.	Modéliser l'action d'un système extérieur sur le système étudié par une force. Représenter une force par un vecteur ayant une norme, une direction, un sens.
Principe des actions réciproques (troisième loi de Newton).	Exploiter le principe des actions réciproques.
Caractéristiques d'une force. Exemples de forces : - force d'interaction gravitationnelle ; - poids ; - force exercée par un support et par un fil.	Distinguer actions à distance et actions de contact. Identifier les actions modélisées par des forces dont les expressions mathématiques sont connues <i>a priori</i> . Utiliser l'expression vectorielle de la force d'interaction gravitationnelle. Utiliser l'expression vectorielle du poids d'un objet, approché par la force d'interaction gravitationnelle s'exerçant sur cet objet à la surface d'une planète. Représenter qualitativement la force modélisant l'action d'un support dans des cas simples relevant de la statique.
3. Principe d'inertie	
Modèle du point matériel. Principe d'inertie. Cas de situations d'immobilité et de mouvements rectilignes uniformes. Cas de la chute libre à une dimension.	Exploiter le principe d'inertie ou sa contraposée pour en déduire des informations soit sur la nature du mouvement d'un système modélisé par un point matériel, soit sur les forces. Relier la variation entre deux instants voisins du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel à l'existence d'actions extérieures modélisées par des forces dont la somme est non nulle, en particulier dans le cas d'un mouvement de chute libre à une dimension (avec ou sans vitesse initiale).

Tableau n°14 : Lois de la mécanique classique en seconde

Ce programme insiste mieux que le programme tunisien sur le concept mouvement mais n'insiste pas sur le concept temps considéré ici comme absolu.

\* Classe de première générale :

## Mouvement et interactions

La mécanique est un domaine très riche du point de vue de l'observation et de l'expérience, mais aussi du point de vue conceptuel et méthodologique. Elle permet d'illustrer de façon pertinente la démarche de modélisation. Deux caractéristiques inhérentes à l'apprentissage de la mécanique méritent d'être soulignées :

- l'immédiateté et la familiarité des situations de mouvement et d'interactions qui ont permis d'ancrer chez les élèves des raisonnements spontanés souvent opératoires et donc à déconstruire ;
- la nécessaire mise en place de savoirs et savoir-faire d'ordre mathématique dont la maîtrise conditionne l'accès aux finalités et concepts propres à la mécanique.

Le programme de l'enseignement de spécialité de la classe de première complète les connaissances des élèves en lien avec des modèles d'interaction ; les interactions gravitationnelles et électrostatiques permettent aussi une première introduction à la notion de champ. La description d'un fluide au repos fournit l'occasion de décrire les actions exercées par un fluide. Enfin, dans la continuité du programme de la classe de seconde, un lien quantitatif entre la force appliquée à un système et la variation de sa vitesse est construit, d'abord à travers une formulation approchée de la deuxième loi de Newton, puis, dans la partie du programme dédiée au thème « Énergie : conversions et transferts », en adoptant un point de vue énergétique.

Il ne s'agit nullement de proposer aux élèves une présentation décontextualisée de la mécanique. Au contraire, les situations d'étude ou d'application sont nombreuses dans des domaines aussi variés que les transports, l'aéronautique, l'exploration spatiale, la biophysique, le sport, la géophysique, la planétologie, l'astrophysique. Par ailleurs, l'étude de la mécanique fournit d'excellentes opportunités de faire référence à l'histoire des sciences. Le fait de montrer qu'un même ensemble de notions permet de traiter des situations et des phénomènes d'échelles très diverses constitue un objectif de formation à part entière.

Lors des activités expérimentales, il est possible d'utiliser les outils courants de captation et de traitement d'images, ainsi que les nombreux capteurs présents dans les smartphones. L'activité de simulation peut également être mise à profit pour exploiter des modèles à des échelles d'espace ou de temps difficilement accessibles à l'expérimentation. Ce thème est l'occasion de développer des capacités de programmation, par exemple pour simuler et analyser le mouvement d'un système.

Au-delà des problématiques liées à la mise en place d'un modèle – s'appuyant ici sur la deuxième loi de Newton – la mécanique permet d'illustrer la physique comme science de la description des systèmes matériels en évolution.

### Notions abordées en seconde

Référentiel, vecteur position, vecteur vitesse, variation du vecteur vitesse, exemples de forces, principe d'inertie. Charge électrique élémentaire.

Tableau n°15 : Place du mouvement en classe de première

Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
<b>1. Interactions fondamentales et introduction à la notion de champ</b>	
Charge électrique, interaction électrostatique, influence électrostatique. Loi de Coulomb.	Interpréter des expériences mettant en jeu l'interaction électrostatique. Utiliser la loi de Coulomb. Citer les analogies entre la loi de Coulomb et la loi d'interaction gravitationnelle.

Tableau n°16 : Interaction

Force de gravitation et champ de gravitation. Force électrostatique et champ électrostatique.	Utiliser les expressions vectorielles : - de la force de gravitation et du champ de gravitation ; - de la force électrostatique et du champ électrostatique. Caractériser localement une ligne de champ électrostatique ou de champ de gravitation. <i>Illustrer l'interaction électrostatique. Cartographier un champ électrostatique.</i>
--	---

Tableau n°17 : Force et interaction

2. Description d'un fluide au repos	
Échelles de description. Grandeurs macroscopiques de description d'un fluide au repos : masse volumique, pression, température.	Expliquer qualitativement le lien entre les grandeurs macroscopiques de description d'un fluide et le comportement microscopique des entités qui le constituent.
Modèle de comportement d'un gaz : loi de Mariotte.	Utiliser la loi de Mariotte. <i>Tester la loi de Mariotte, par exemple en utilisant un dispositif comportant un microcontrôleur.</i>
Actions exercées par un fluide sur une surface : forces pressantes.	Exploiter la relation $F = P.S$ pour déterminer la force pressante exercée par un fluide sur une surface plane $S$ soumise à la pression $P$ .
Loi fondamentale de la statique des fluides.	Dans le cas d'un fluide incompressible au repos, utiliser la relation fournie exprimant la loi fondamentale de la statique des fluides : $P_2 - P_1 = \rho g(z_1 - z_2)$ . <i>Tester la loi fondamentale de la statique des fluides.</i>
3. Mouvement d'un système	
Vecteur variation de vitesse. Lien entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci. Rôle de la masse.	Utiliser la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci : - pour en déduire une estimation de la variation de vitesse entre deux instants voisins, les forces appliquées au système étant connues ; - pour en déduire une estimation des forces appliquées au système, le comportement cinématique étant connu. <i>Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie d'un système modélisé par un point matériel en mouvement pour construire les vecteurs variation de vitesse. Tester la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées au système.</i> <b>Capacité numérique</b> : Utiliser un langage de programmation pour étudier la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci. <b>Capacité mathématique</b> : Sommer et soustraire des

Tableau n°18 : Mouvement d'un système

En comparant le tableau ci-dessus au tableau suivant (ancien programme), nous remarquons que le contenu des programmes concernant le mouvement en mécanique classique est plus détaillé que l'ancien contenu.

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

Tableau n°19 : Ancien contenu du programme sur le mouvement

\* En terminale (sciences)<sup>11</sup>

Le programme de physique en terminale débute par la relativité galiléenne, le principe d'inertie et l'exploitation des informations relatives à l'évolution de la mesure du temps, la notion de référentiel galiléen, le mouvement d'un satellite, les lois de Kepler ... Ce début est une préparation à l'apprentissage de la théorie de la relativité restreinte et le temps : temps propre, relativité de l'espace et du temps, notion d'événement.

<sup>11</sup> B.O. spécial n°8 du 13 Octobre 2011.

<b>Temps, mouvement et évolution</b>	
<b>Notions et contenus</b>	<b>Compétences exigibles</b>
<p><b>Temps, cinématique et dynamique newtoniennes</b> Description du mouvement d'un point au cours du temps : vecteurs position, vitesse et accélération.</p> <p>Référentiel galiléen.</p> <p>Lois de Newton : principe d'inertie, <math>\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}</math> et principe des actions réciproques.</p> <p>Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé.</p> <p>Mouvement d'un satellite. Révolution de la Terre autour du Soleil.</p> <p>Lois de Kepler.</p>	<p>Extraire et exploiter des informations relatives à la mesure du temps pour justifier l'évolution de la définition de la seconde.</p> <p>Choisir un référentiel d'étude. Définir et reconnaître des mouvements (rectiligne uniforme, rectiligne uniformément varié, circulaire uniforme, circulaire non uniforme) et donner dans chaque cas les caractéristiques du vecteur accélération.</p> <p>Définir la quantité de mouvement <math>\vec{p}</math> d'un point matériel. Connaître et exploiter les trois lois de Newton ; les mettre en œuvre pour étudier des mouvements dans des champs de pesanteur et électrostatique uniformes. <i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier un mouvement.</i></p> <p><i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour interpréter un mode de propulsion par réaction à l'aide d'un bilan qualitatif de quantité de mouvement.</i></p> <p>Démontrer que, dans l'approximation des trajectoires circulaires, le mouvement d'un satellite, d'une planète, est uniforme. Établir l'expression de sa vitesse et de sa période.</p> <p>Connaître les trois lois de Kepler ; exploiter la troisième dans le cas d'un mouvement circulaire.</p>

Tableau n°20 : Place du mouvement et du temps en mécanique classique

Nous remarquons que la théorie de la relativité restreinte est abordée juste après la mécanique newtonienne et ceci permettra à l'élève de comparer les deux théories et de comprendre que la cinématique newtonienne est un cas particulier de la théorie de la relativité restreinte, quand la vitesse de l'objet est négligeable devant celle de la lumière.

<p><b>Temps et relativité restreinte</b> Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps.</p> <p>Postulat d'Einstein. Tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière.</p> <p>Notion d'événement. Temps propre. Dilatation des durées. Preuves expérimentales.</p>	<p>Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.</p> <p>Définir la notion de temps propre. Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée. Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.</p>
---	--

Tableau n°21 : Place de la théorie de la relativité restreinte

Les tableaux précédents sont constitués de deux colonnes, une pour les notions et contenus et l'autre pour les compétences exigibles. Les contenus commencent par la notion du concept temps et la conservation de la quantité du mouvement en mécanique newtonienne et se terminent par ce même concept en relativité restreinte : dilation des durées et contraction des longueurs.

L'enseignant, pour mieux expliquer ces différences, pourra utiliser les exemples du rayon lumineux se réfléchissant sur un miroir vu au premier temps dans son référentiel appelé référentiel propre puis dans un deuxième temps vu dans un référentiel dans lequel le référentiel propre se déplace à la vitesse constante  $V$  perpendiculairement au déplacement de la lumière. L'enseignant pourra, aussi, s'inspirer du principe de fonctionnement du GPS ou de l'exemple de la désintégration des muons cosmiques.

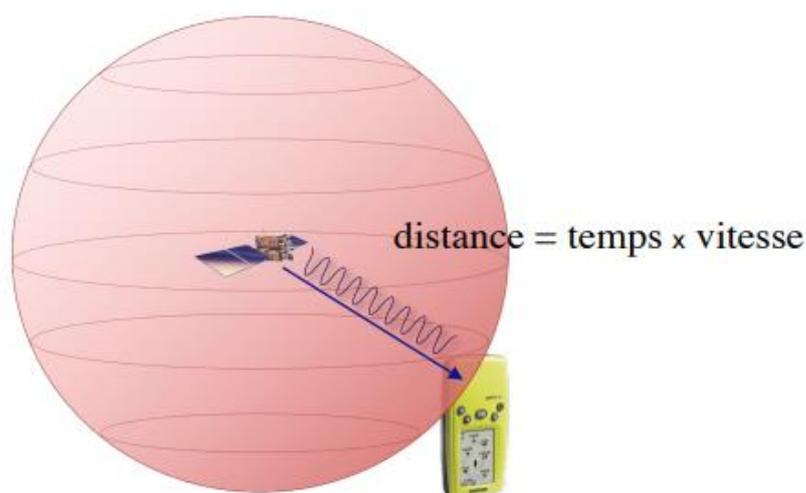


Fig.3

**Photo tirée du cours de Licence de physique-chimie : première année : GPS et localisation par satellites**

A-2- En Philosophie (Badiou, 2012)

a/ Objectifs d'apprentissage de la philosophie.

La philosophie, dans l'enseignement secondaire français, est dispensée durant une seule année en classes terminales, ce qui n'est pas le cas en Tunisie et en Italie. Ainsi les élèves

Français aborderont moins de questions philosophiques et parcourront moins d'étapes de l'histoire de la philosophie.

\* En France, 4 heures par semaine pour série ES, 8heures pour série L et 3heures pour série S.

**B.O.** Bulletin officiel spécial n° 1 du 4 février 2010

**Grilles horaires du cycle terminal de la voie générale : séries ES, L et S**

**2. Classe terminale**

Enseignements communs aux 3 séries					
Disciplines			Horaires		
LV1 et LV2 (enveloppe globalisée) (a) (b)			4 h		
Éducation physique et sportive (c)			2 h		
Éducation civique, juridique et sociale(d)			0 h 30		
Accompagnement personnalisé			2 h		
Heures de vie de classe			10 h annuelles		
Enseignements spécifiques de chaque série					
Série ES		Série L		Série S	
Sciences économiques et sociales	5 h	Littérature	2 h	Mathématiques	6 h
Mathématiques	4 h	Littérature étrangère en langue étrangère	1 h 30	Physique-chimie	5 h
Histoire-géographie	4 h	Histoire-géographie	4 h	Sciences de la vie et de la Terre ou sciences de l'ingénieur ou Biologie, agronomie et développement durable (1)	3 h 30
Philosophie	4 h	Philosophie	8 h	Philosophie	8 h
Un enseignement de spécialité au		Un enseignement de spécialité au		Philosophie	5 h 30
					3 h

Tableau n°22 : Répartition des heures de philosophie pour différentes sections

\* En Tunisie 1heure en troisième année (une année avant le bac) et 3 heures en Terminale pour les classes scientifiques et techniques par contre pour les classes littéraires : 3 heures par semaine en troisième année et 7 heures par semaine en Terminale.

\* En Italie 3 heures par semaine pendant trois ans.

L'objectif de l'enseignement de la philosophie est de :

- Permettre à l'élève de donner des jugements réfléchis
- Offrir à l'élève une culture philosophique initiale, culture littéraire et artistique, savoirs scientifiques et connaissance de l'histoire.
- Maîtriser l'expression et l'argumentation
- Etre ouvert aux acquis d'autres disciplines
- Développer chez l'élève l'aptitude à l'analyse et aux critiques par avoir un esprit autonome.

b/ Contenus du programme de philosophie<sup>12</sup> :

<sup>12</sup> B.O. n°25 du 19 juin 2003.

Aucun contenu ou référentiel de programme lié à la relativité galiléenne ou restreinte français de philosophie excepté pour la section littéraire le *sujet* « l'existence et le temps » et parmi les *repères* « l'absolu et le relatif » identiques à ceux de la section scientifique.-Le professeur de philosophie peut aussi utiliser pour les besoins de son enseignement des extraits d'écrits dont les auteurs ne figurent pas sur cette liste (Platon ; Aristote ; Épicure ; Lucrèce ; Sénèque ; Cicéron ; Épictète ; Marc Aurèle ; Sextus Empiricus ; Plotin ; Augustin ; Averroès ; Anselme ; Thomas d'Aquin ; Guillaume d'Ockham ; Machiavel ; Montaigne ; Bacon ; Hobbes ; Descartes ; Pascal ; Spinoza ; Locke ; Malebranche ; Leibniz ; Vico ; Berkeley ; Condillac ; Montesquieu ; Hume ; Rousseau ; Diderot ; Kant ; Hegel ; Schopenhauer ; Tocqueville ; Comte ; Cournot ; Mill ; Kierkegaard ; Marx ; Nietzsche ; Freud ; Durkheim ; Husserl ; Bergson ; Alain ; Russell ; Bachelard ; Heidegger ; Wittgenstein ; Popper ; Sartre ; Arendt ; Merleau-Ponty ; Levinas ; Foucault)<sup>13</sup>. Notons que plusieurs auteurs cités ont été lus par Albert Einstein, dont les centres d'intérêt en la matière sont connus par des témoignages directs ou rétrospectifs comme on le verra dans la partie B.

---

<sup>13</sup> Une partie de ces auteurs a été lue par Albert Einstein tels que : Hume, Kant, Comte...

### II.1.3 Série littéraire

Notions :	
Le sujet	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La conscience</li> <li>- La perception</li> <li>- L'inconscient</li> <li>- Autrui</li> <li>- Le désir</li> <li>- L'existence et le temps</li> </ul>
La culture	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le langage</li> <li>- L'art</li> <li>- Le travail et la technique</li> <li>- La religion</li> <li>- L'histoire</li> </ul>
La raison et le réel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Théorie et expérience</li> <li>- La démonstration</li> <li>- L'interprétation</li> <li>- Le vivant</li> <li>- La matière et l'esprit</li> <li>- La vérité</li> </ul>
La politique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La société</li> <li>- La justice et le droit</li> <li>- L'État</li> </ul>
La morale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La liberté</li> <li>- Le devoir</li> <li>- Le bonheur</li> </ul>
Repères :	
<p>Absolu/relatif - Abstrait/concret - En acte/en puissance - Analyse/synthèse - Cause/fin - Contingent/nécessaire/possible - Croire/savoir - Essentiel/accidentel - Expliquer/comprendre - En fait/en droit - Formel/matériel - Genre/espèce/individu - Idéal/réal - Identité/égalité/différence - Intuitif/discursif - Légal/légitime - Médiat/immédiat - Objectif/subjectif - Obligation/contrainte - Origine/fondement - Persuader/convaincre - Ressemblance/analogie - Principe/conséquence - En théorie/en pratique - Transcendant/immanent - Universel/général/particulier/singulier</p>	

Tableau n°23 : Contenu du programme de philosophie pour une classe terminale série L

### II.1.5 Série scientifique

Notions :	
Le sujet	- La conscience - L'inconscient - Le désir
La culture	- L'art - Le travail et la technique - La religion
La raison et le réel	- La démonstration - Le vivant - La matière et l'esprit - La vérité
La politique	- La société et l'État - La justice et le droit
La morale	- La liberté - Le devoir - Le bonheur
Repères :	
Absolu/relatif - Abstrait/concret - En acte/en puissance - Analyse/synthèse - Cause/fin - Contingent/nécessaire/possible - Croire/savoir - Essentiel/accidentel - Expliquer/comprendre - En fait/en droit - Formel/matériel - Genre/espèce/individu - Idéal/réel - Identité/égalité/différence - Intuitif/discursif - Légal/légitime - Médiat/immédiat - Objectif/subjectif - Obligation/contrainte - Origine/fondement - Persuader/convaincre - Ressemblance/analogie - Principe/conséquence - En théorie/en pratique - Transcendant/immanent - Universel/général/particulier/singulier	

Tableau n°24 : Contenu du programme de philosophie pour une classe terminale série S

### **B- En Italie :**

Comme la France et la Tunisie, l'Italie a participé à une réformes éducative (Biferale, 2000) afin de permettre à son système éducatif (Longo, 2008) de s'adapter aux évolutions technologiques, économiques et sociétales.

#### B-1-En physique :

##### a/ Objectifs de l'apprentissage de la physique au secondaire :

Les objectifs d'apprentissage de la physique en Italie (OSA : Obiettivi Specifici di Apprendimento) visent à :

- Créer un cadre de référence pour le développement cohérent des connaissances et des compétences de l'élève qui combine les aspects cognitifs avec les aspects culturels de la discipline.

- Savoir la place de la physique dans la pensée scientifique et comment elle s'intègre avec d'autres formes de pensée (mathématiques, philosophique, technique...) et contribue à l'évolution historique des idées.
- Poursuivre à travers un processus déjà suivi dans les écoles primaires et les collèges (secondaria inferiore), l'acquisition d'une conscience directe et phénoménologique des aspects physiques du monde.
- Construire « une science pour le citoyen » en soulignant que la connaissance est une compréhension d'un modèle qui permet de décrire, d'interpréter et de diriger l'expérience quotidienne.
- Construire et approfondir progressivement une interprétation structurée des faits.
- Placer la réalité phénoménologique au centre du processus de construction de la connaissance scientifique (phénomènes mécaniques, thermiques, électromagnétiques et lumineux).
- Former en physique fait partie intégrante de l'éducation scientifique des citoyens depuis l'école primaire.
- Inclure aux connaissances et compétences des élèves les découvertes et les problèmes de la physique contemporaine afin que l'enseignement puisse sensibiliser les citoyens aux choix scientifiques et technologiques requis par la société actuelle.
- Faire comprendre aux élèves que la physique est une continuation, diversification et progression dans la formalisation mathématique.

b/ Contenus des programmes de physique qui se rapportent à la relativité et au temps :

- Le contenu des programmes en physique complète les processus commencés dans les écoles primaires et les collèges en mettant l'accent sur la compréhension des notions abstraites telles que « Grandeurs physiques abstraites » basées sur des relations invariantes entre variables observées.
- « Systèmes physiques abstraits » basés sur leurs efficacités en tant que modèle explicatif.
- « Méthodes de formalisation » qui offrent le support linguistique nécessaire au processus de conceptualisation physique.

Nous nous proposons d'exposer des extraits du contenu des programmes de physique qui se rapportent à la partie mécanique : cinématique et dynamique et à la partie relativité restreinte.

OBIETTIVI PER IL 1° BIENNIO DI TUTTI I LICEI

(Objectifs de la première année de tous les lycées)

I- FENOMENI MECCANICI :

-I

(Phénomènes mécaniques)

<b>Conoscenze</b>	<b>Abilità</b>
<p><b>Spazio, tempo, moto</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistemi di riferimento spazio-temporali e descrizione dei moti.</li> <li>- Spostamento, velocità e accelerazione come vettori.</li> <li>- Moto relativo e composizione delle velocità.</li> <li>- Moti periodici e oscillatori.</li> </ul> <p><b>Aspetti storici</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Galilei e la nascita del metodo sperimentale.</li> </ul>	<p><b>Spazio, tempo, moto</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Misurare distanze e intervalli di tempo con metodi diversi; esprimere le misure in unità di misura diverse.</li> <li>- Rappresentare e descrivere le traiettorie di uno stesso moto visto da riferimenti spaziali diversi.</li> <li>- Distinguere tra velocità medie e istantanee.</li> <li>- Rappresentare moti vari osservati nella vita quotidiana in grafici <math>(s, t)</math> e <math>(v, t)</math> e utilizzarli per risolvere problemi.</li> <li>- Ricavare l'equivalenza tra rappresentazioni grafiche e algebriche di moti uniformi e vari.</li> <li>- Applicare le proprietà vettoriali di spostamento, velocità e accelerazione per analizzare moti in due e in tre dimensioni.</li> <li>- Descrivere situazioni di moto relativo e comporre velocità in una e in due dimensioni.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ricavare vettorialmente direzione e verso dell'accelerazione per moti qualsiasi su traiettoria curva e applicare i risultati al caso del moto circolare uniforme.</li> <li>- Misurare la frequenza di fenomeni periodici con riferimento alla misurazione del tempo.</li> <li>- Misurare posizioni, velocità e accelerazioni di un corpo e porle in relazione con le forze agenti.</li> </ul>

Tableau n°25 : Place des concepts mouvement, espace et temps en mécanique classique

Ce tableau est divisé en deux colonnes, une colonne concernant les connaissances de l'élève dans cette partie mécaniques et la deuxième colonne concernant les compétences que doit avoir l'élève dans cette partie. L'élève doit connaître les concepts espace, temps et mouvement, donc

connaître le système de référence espace-temps pour savoir décrire les différents types de mouvement par rapport à ce système de référence, les vecteurs : déplacement, vitesse, accélération, mouvement relatif, composition des vitesses, mouvement périodique et mouvement oscillatoire. En plus de la connaissance de ces concepts, l'élève doit connaître un aperçu historique sur cette partie qui s'intéresse essentiellement à la période de Galilée et la naissance de la méthode expérimentale. Connaissant ces concepts mécaniques, l'élève doit présenter des compétences pour mesurer des distances, des intervalles de temps et exprimer leurs unités, pour différencier la vitesse moyenne de la vitesse instantanée, pour analyser les différents types de mouvements à partir de leurs vitesses et de leurs accélérations et pour mesurer la fréquence d'un mouvement périodique et oscillatoire.

### O BIETTIVI PER IL 2° BIENNIO DI TUTTI I LICEI

(Objectifs pour la deuxième année de tous les Lycées)

#### 1) FENOMENI MECCANICI

Conoscenze	Abilità
<p><b>Forza, moto e relatività</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipi di forze ed equazioni del moto.</li> <li>- Campo gravitazionale come esempio di campo conservativo.</li> <li>- Sistemi di riferimento inerziali e relatività galileiana.</li> <li>- Sistemi di riferimento non inerziali e forze apparenti.</li> <li>- Limiti di applicabilità della relatività galileiana.</li> <li>- Velocità della luce nel vuoto.</li> <li>- Dilatazione del tempo, contrazione delle lunghezze, simultaneità.</li> <li>- Quantità di moto ed energia relativistiche. La relazione fra massa ed energia e le sue implicazioni.</li> </ul> <p><b>Aspetti storici</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'origine della teoria della relatività ristretta.</li> </ul>	<p><b>Forza, moto e relatività</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Esplorare al calcolatore soluzioni di semplici equazioni del moto ottenute con il metodo delle differenze finite.</li> <li>- Applicare le proprietà conservative del campo gravitazionale alla risoluzione di problemi.</li> <li>- Descrivere la differenza tra sistemi inerziali e non inerziali dando esempi degli uni e degli altri.</li> <li>- Distinguere con criteri appropriati le forze apparenti da quelle attribuibili a interazioni.</li> <li>- Spiegare perché i corpi in caduta libera sono in condizione di assenza di peso e perché i satelliti artificiali intorno alla Terra e i pianeti intorno al Sole sono in caduta libera.</li> <li>- Spiegare perché le conclusioni della relatività ristretta su simultaneità, dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze sono conseguenza dell'invarianza della velocità della luce nel vuoto.</li> <li>- Discutere l'effetto Doppler luminoso e confrontarlo con l'effetto Doppler acustico.</li> <li>- Descrivere effetti relativistici e calcolarne l'ordine di grandezza, valutando le condizioni di applicabilità della meccanica newtoniana.</li> <li>- Illustrare l'equivalenza massa-energia descrivendo e analizzando fatti e fenomeni appropriati.</li> </ul>

Tableau n°26 : Place de la relativité du mouvement en mécanique classique

Dans la première colonne du tableau précédent, l'élève doit connaître les concepts :

1/ Force et mouvement : Types de forces et équation du mouvement, champ Gravitationnel, système de référence inertiel et relativité galiléenne, système de référence non inertiel et force apparente.

2/ Relativité : Limite de l'application de la relativité galiléenne, vitesse de la lumière dans le vide, dilatation du temps, contraction des longueurs simultanément, quantité de mouvement et énergie relativiste, la relation d'équivalence masse-énergie et ses implications.

3/ Aspect historique : l'origine de la théorie de la relativité restreinte.

Dans la deuxième colonne du tableau, l'élève doit présenter des compétences pour :

1/ Calculer et résoudre les problèmes concernant la mécanique galiléenne

2/ Faire la distinction entre les différents types de forces.

3/ Expliquer, pourquoi la conclusion de la relativité restreinte : simultanément, dilatation d'une durée contraction des longueurs sont les conséquences de l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide.

4/ Discuter l'effet Doppler

5/ Décrire les ordres de grandeurs des vitesses utilisés en mécanique newtonienne.

6/ Savoir illustrer la formule d'équivalence masse/énergie.

#### INTEGRAZIONI PER IL 2° BIENNIO DEI LICEI SCIENTIFICO E TECNOLOGICO

##### 1) FENOMENI MECCANICI

Conoscenze	Abilità
<b>Forza, moto e relatività</b> - Moto rotatorio, momento angolare e sua conservazione. - Energia nel moto rotatorio.	<b>Forza, moto e relatività</b> - Descrivere e modellizzare fenomeni quotidiani riguardanti la conservazione del momento della quantità di moto e dell'energia meccanica di rotazione.

Tableau n°27 : Force, mouvement et relativité

## OBIETTIVI PER IL 5° ANNO DEI LICEI SCIENTIFICO E TECNOLOGICO

Conoscenze	Abilità
<b>Relatività</b>	mentali.

17

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trasformazioni di Galilei e di Lorentz.</li> <li>- Struttura dello spazio-tempo.</li> <li>- Principi di equivalenza e di relatività generale.</li> <li>- L'interazione luce-campo gravitazionale.</li> </ul> <p><b>Origine ed evoluzione cosmiche</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Misura delle velocità e delle masse dei corpi celesti.</li> <li>- Origine ed evoluzione delle stelle.</li> <li>- Produzione termonucleare dell'energia all'interno delle stelle. Origine stellare degli elementi chimici.</li> <li>- Il Big Bang e l'Universo in espansione.</li> </ul>	<p><b>Relatività</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analizzare alcuni fenomeni di relatività generale, come ad esempio la deflessione della luce nel campo gravitazionale, descrivendone le conseguenze per la ricerca astronomica e per la misurazione del tempo (rallentamento degli orologi).</li> </ul> <p><b>Origine ed evoluzione cosmiche</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Descrivere i fatti sperimentali su cui si basano i modelli sull'origine ed espansione dell'Universo e individuare le ragioni che portano alla stima della scala dei tempi di espansione.</li> <li>- Utilizzare il diagramma di Hertzsprung-Russell per descrivere l'evoluzione stellare.</li> </ul>
---	---

### Tableau n°28 : Place de la relativité pour des corps célestes

Pour les élèves de 5<sup>ème</sup> année dans les Lycées scientifiques et Techniques doivent connaître :

- 1/ Transformation de Galilée et de Lorentz
- 2/ Structure de l'espace-temps.
- 3/ Principe d'équivalence et relativité générale
- 4/ Origine et évolution cosmique

Ces élèves doivent présenter des compétences pour :

- 1/ Analyser quelques phénomènes de la relativité générale.
- 2/ Décrire la réalité expérimentale sur laquelle se basent l'origine et l'expansion de l'Univers.

## OBIETTIVI PER IL 5° ANNO DEL LICEO CLASSICO

Conoscenze	Abilità
<p><b>Relatività</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Struttura dello spazio-tempo.</li> <li>- Principi di equivalenza e di relatività generale.</li> <li>- L'interazione luce-campo gravitazionale.</li> </ul>	<p><b>Relatività</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analizzare alcuni fenomeni di relatività generale, come ad esempio la deflessione della luce nel campo gravitazionale, descrivendone le conseguenze per la ricerca astronomica e per la misurazione del tempo (rallentamento degli orologi).</li> </ul>

Tableau n°29 : Place de la relativité générale pour la classe 5me année de Lycée.

### COMMENTI SUGLI OBIETTIVI SPECIFICI DI APPRENDIMENTO DELLA FISICA NEI LICEI

#### STRUMENTI, MODELLI E PROCEDURE

I contenuti di questa tabella indicano i passi caratteristici e le abilità di processo che devono accompagnare gli studenti lungo tutto il percorso in fisica. In quanto tali non sono distinti tra primo e secondo biennio. Essi individuano i modi di guardare ai fenomeni, selezionare proprietà e relazionare variabili per saper descrivere la fenomenologia in modo qualitativo e quantitativo. Vengono quindi individuate le modalità con cui si costruisce la teoria, integrando in processi formali sintesi sempre più ampie di contesti fenomenologici, e viene quindi guidata l'interpretazione dei fenomeni, selezionando e adattando modelli il cui potere predittivo mette a confronto teorie e classi fenomenologiche.

Lo sviluppo di processi mentali a cui si mira nel primo biennio è prevalentemente rivolto all'osservazione e alla descrizione, con scopo di:

- individuare le variabili rilevanti,
- misurarle per rivelarne variazioni significative e per metterle in relazione fra di loro,
- rappresentare e interpretare tali relazioni in forma matematica, anche mediante l'utilizzo di grafici,
- analizzare le variazioni con tecniche di "differenze finite".

Nel secondo biennio si mira, oltre al rafforzamento dei processi già avviati nel primo biennio, all'avvio di una modellizzazione più formale come base di costruzione della teoria fisica e per la gestione di situazioni variamente complesse.

## 1) FENOMENI MECCANICI

L'interazione fra sistemi materiali nei fenomeni meccanici presenta concetti-chiave che devono essere resi presenti a tutti i livelli e richiamati in tutti i contesti (a livello almeno qualitativo fin dalle prime osservazioni fenomenologiche).

### 1° BIENNIO

Nello studio dei fenomeni meccanici vengono proposti nel primo biennio aspetti mirati a esaminare le caratteristiche dell'interazione tra corpi e a costruire i concetti di forza ed energia oltre a quelli che ne stanno alla base. Il campo dei fenomeni meccanici è diviso in parti che raggruppano e classificano situazioni fenomenologiche idonee alla costruzione di concetti e nuclei concettuali.

-----

### Spazio, tempo e moto

Nella fase iniziale di gestione della fenomenologia, l'osservazione e la descrizione dei possibili modi di muoversi e delle grandezze corrispondenti (spazio, tempo, velocità e accelerazione) permette di individuare:

- gli aspetti cinematici differenziali (velocità come distanza percorsa nell'intervallo di tempo, accelerazione come cambiamento di velocità nell'intervallo di tempo),
- quelli integrali (distanza percorsa, velocità raggiunta alla fine dell'accelerazione),
- quelli vettoriali (direzione relativa a un certo riferimento).

### 2° BIENNIO

#### Forza, moto e relatività

Nel secondo biennio si completa l'apprendimento con aspetti a livello più alto di astrazione e complessità, e con l'inquadramento nell'ambito generale del sistema di riferimento, che porta ai concetti base della teoria della relatività. La relatività viene proposta a tutti i Licei nei suoi elementi fondamentali, sufficienti però per far capire la portata delle idee relativistiche riguardanti la revisione dei concetti di tempo e spazio e la relazione fra massa ed energia.

Concetti base di relatività ristretta, quali il principio di relatività, la dilatazione del tempo, l'equivalenza massa-energia e i concetti a essi propedeutici (sistemi di riferimento in moto relativo) vengono proposti per tutti i Licei, come base culturale necessaria per comprendere il "linguaggio" della relatività e le più rilevanti fenomenologie collegate.

Inoltre, si approfondisce lo studio del moto modellizzando, matematicamente e graficamente, le leggi del moto in situazioni particolarmente rilevanti (caduta dei gravi e moto armonico).

22

---

E' di fondamentale importanza in questa fase la utilizzazione delle tecnologie informatiche per lo sviluppo di abilità mirate alla comprensione dei concetti.

Ce dernier paragraphe, nous présente quelques objectifs de l'enseignement de la physique dans les lycées Italiens : permettre à l'élève d'observer, d'identifier et d'analyser un phénomène physique dans la partie mécanique. Les contenus des programmes, dans les deux premières années du lycée, visent à permettre à l'élève de savoir examiner les caractéristiques des interactions mécaniques entre deux corps, de construire les concepts force, énergie, espace, temps, mouvement (vitesse et accélération). Au cours des deux dernières années au lycée, l'apprentissage de la partie mécanique est complété par des concepts et théories de plus haut niveau scientifique telle que la théorie de la relativité restreinte. L'apprentissage de la physique, permet aussi à l'élève d'utiliser les nouvelles technologies d'information et de communication pour développer ses compétences dans ce domaine.

## **B-2- En philosophie :**

### a/ Objectifs et finalités de l'enseignement de la philosophie en Italie.

L'enseignement de la philosophie en Italie au secondaire est assuré durant les trois dernières années du Lycée : de 16 ans à 19 ans au rythme de trois heures hebdomadaires, (G.Vergne, 2012). La date de l'établissement légal de l'enseignement philosophique commence en 1859 c'est-à-dire avec la Loi Casati qui rénove l'enseignement secondaire dans l'Italie récemment unifiée. Une nouvelle réforme importante s'opère en 1923, appelée Gentile du nom du ministre de l'instruction publique Giovanni Gentile, philosophe de formation, dont les programmes sont toujours en vigueur. À partir de cette date la discipline philosophique est devenue obligatoire pour des filières générales (scientifique et classique).

En 1992, l'enseignement Italien de la philosophie a su se remettre en question et va redéfinir ses objectifs et ses finalités à partir d'un rapport appelé rapport de la commission Brocca qui a fixé les finalités et les objectifs suivante :

- Achèvement de la formation culturelle de tous les élèves par la prise de conscience des problèmes tenant aux choix d'études, de travail et de vie et leur approche sur un mode historique, critique et problématique.
- Une ouverture interpersonnelle et une disponibilité aux échanges humains féconds et tolérants.
- Avoir une réflexion critique sur les diverses formes du savoir et leur rapport à l'expérience humaine.

- Avoir la capacité de penser d'après des modèles divers et identifier des alternatives possibles.
- Repérer les analogies et les différences entre concepts, modèles et méthodes dans les divers champs de la connaissance en partant des disciplines caractéristiques des diverses filières.
- Confronter et contextualiser les différentes réponses des philosophes aux problèmes des différents thèmes étudiés.
- Identifier et analyser les problèmes de la réalité contemporaine, considérés dans leur complexité.

#### b/ Contenus des programmes officiels de philosophie.

La philosophie est enseignée pendant les trois dernières années du secondaire :

- En première année, le contenu des programmes est constitué de la philosophie classique et médiévale avec de noyau thématique (nucléa) qui sert à souligner la pluralité des positions philosophiques dans les différents domaines de recherche : conception de la vérité, conception de la science, conception du changement et donc de l'espace et du temps.
- En deuxième année, le contenu des programmes est constitué de la philosophie moderne avec les mêmes indications méthodologiques qu'en première année, cette philosophie est née pendant la naissance de la science classique.
- En troisième année, le contenu des programmes est constitué de la philosophie contemporaine qui est consacrée à exercer la réflexion critique chez l'élève sur les différentes formes du savoir et à valoriser l'unité de la culture à travers les liens entre les différents domaines du savoir.
- La philosophie en Italie est considérée comme matière orale car l'évaluation des élèves se fait oralement mais le professeur peut aussi choisir d'effectuer des épreuves écrites. Les professeurs utilisent fréquemment l'une et l'autre.

D'après les indications nationales de 2005 (Les Indicazioni nazionali de 2005 : Réforme Moratti), six types de lycées enseignent la relativité : Classique, Scientifique, Linguistique, Sciences humaines, Artistique, Musique et danse. Économique et technologique ne furent pas retenus .Ces « Indications » sont données en termes d'objectifs de formation. Nous nous contentons de présenter les contenus des programmes pour les classes des lycées classiques et scientifiques (identique pour les autres types de lycées).

### **Lycée classique :**

#### **- Première année d'enseignement de philosophie :**

La philosophie antique et médiévale :

Auteurs obligatoires : Platon, Aristote, Pluton, Augustin d'Hippone, Thomas d'Aquin

#### **- Deuxième année d'enseignement de philosophie :**

La philosophie moderne :

Auteurs obligatoires : Descartes, Vico, Hume, Kant, Hegel, Kierkegaard, Schopenhauer, Marx

#### **- Troisième année d'enseignement de philosophie**

Auteurs obligatoires : Nietzsche, Croce, Gentile, Weber, Wittgenstein, Husserl, Heidegger

### **Lycée scientifique :**

#### **- Première année :**

La philosophie antique et médiévale :

Auteurs obligatoires : Platon, Aristote, Augustin d'Hippone, Thomas d'Aquin

#### **- Deuxième année :**

La philosophie moderne :

Auteurs obligatoires : Galilée, Descartes, Kant, Hegel, Comte

#### **- Troisième année :**

La philosophie contemporaine :

Auteurs obligatoires : Nietzsche, Husserl, Bachelard, Wittgenstein, Popper

### **.III- 3-Etude comparée :**

III-3-1-En Physique : En se référant aux objectifs généraux de l'enseignement des sciences physiques dans le secondaire en France, en Italie ou en Tunisie, nous constatons que les

objectifs visés sont presque identiques pour les trois pays. Ils sont dirigés essentiellement vers l'apprenant (lui assurer une formation cognitive, lui faire acquérir une méthodologie de travail et de résolution de problème, lui faire acquérir une compétence d'interprétation des phénomènes...) avec utilisation des T.I.C, et :

- développer une culture scientifique chez les élèves qui leur permet de se situer dans le monde contemporain.

- renforcer la corrélation de l'enseignement de la physique avec les autres disciplines comme les mathématiques, la philosophie, les sciences de la vie et de la terre, les techniques....

- montrer à l'élève que les sciences physiques s'appuient souvent sur les progrès en technologie qui sont les fruits d'une exploitation efficace des lois.

Or, les pratiques en classe et les contenus des programmes diffèrent d'un pays à un autre. Au collège en France, les contenus des programmes en physiques ont pour objectifs de faire connaître et comprendre aux apprenants le monde et les phénomènes qui les entourent en les incitant à observer avec curiosité et esprit critique, à poser des questions qui se rapportent au monde qui les entoure, à l'environnement et à la santé de soi-même et de chacun, d'où l'introduction des thèmes sur la lumière et sur sa vitesse, sur la gravitation... Cette approche nous paraît utile car c'est une introduction à d'autres thèmes de la physique contemporaine dans les classes qui suivent, par contre dans les collèges tunisiens, le contenu des programmes introduit en langue arabe (réforme éducative 1991) sera le même contenu à la première année au lycée mais en langue Française donc ce que va étudier un élève français au collège sera plus pertinent de ce que va étudier un élève tunisien pendant ses premières années au lycée.

De plus, les programmes français considèrent que l'enseignement des sciences physiques au lycée doit être construit comme un tout, donc indépendant de l'enseignement fait au collège qui ne se place pas sur le même registre de modélisation et de formalisation, ce qui n'est pas le cas des programmes tunisiens pendant les deux premières années du lycée pendant lesquelles les élèves reprendront les mêmes contenus des programmes du collège mais en langue française. Aussi les contenus des programmes français et italiens insistent beaucoup mieux sur le Thème cinématique et sur le concept temps (mesure d'une durée, chronométrage...) que les contenus des programmes tunisiens et cette insistance aidera les apprenants à mieux comprendre la notion de relativité.

En Tunisie, les réformes éducatives réalisées et surtout celles des années 1991, 2002 et 2008 avaient insisté sur l'allègement des programmes en physique (moins de chapitres et de thèmes) et sur la diminution des coefficients de la matière dans un but d'égalité entre toutes les disciplines ; par contre en France les réformes ont touché l'introduction des thèmes de la physique contemporaine tel que la réintroduction de la théorie de la relativité.

Dans les programmes tunisiens, la relativité galiléenne est introduite d'une manière abstraite, puisque le temps consacré à ce concept est très court (1h) d'où les concepts position d'un mobile, trajectoire, vitesse, mouvement uniforme, mouvement accéléré sont introduits sous forme de définitions sans revenir à leurs aspects physiques et historiques, ce qui mène l'élève à plusieurs confusions entre : vitesse instantanée et vitesse moyenne, vitesse et accélération, repère, référentiel et solides de référence, état de repos et état de mouvement...

#### Exemples :

On énonce à l'élève, le principe d'inertie comme première loi de Newton sans insister sur son utilité, ses applications et les recherches réalisées pour aboutir à ce principe.

On exige de l'élève d'utiliser un repère galiléen pour résoudre les exercices de cinématique ou de dynamique sans connaître pourquoi ce repère est appelé galiléen et pourquoi il est utilisé, alors qu'il y a d'autres types de repères.

Ainsi les notions relatives au mouvement restent floues dans les acquis des élèves ce qui en fait un obstacle à l'apprentissage d'autres concepts et ce qui les rend difficile à surmonter.

Par contre dans les programmes français, la relativité galiléenne est introduite chaque année avec plus de détail et avec des exemples concrets de la vie courante.

Ainsi, si l'élève tunisien n'arrive pas à acquérir la relativité galiléenne alors il lui est difficile de comprendre la théorie de la relativité restreinte qui est pour les physiciens un prolongement de la relativité galiléenne.

Concernant de la constance et de la valeur de la célérité de la lumière, au fondement du second postulat de la théorie de la relativité restreinte, elle est introduite au collège français, puis aux lycées français et italiens avec des textes sur son aspect historique. Ceci aide les apprenants à mieux comprendre les concepts de cette théorie. Par contre en Tunisie la célérité de la lumière n'est introduite qu'en première année secondaire comme exemple de vitesse et en

terminale science et technique comme une constante dans la loi d'équivalence masse et énergie, sans aucun aspect historique ou épistémologique, c'est pourquoi la majorité des élèves du baccalauréat ne connaissent ni sa valeur ni son utilité.

Concernant l'introduction de la théorie de la relativité restreinte dans le programme de terminales en Tunisie pendant la réforme éducative de 1991, elle était basée sur un exemple de choc élastique entre deux particules électrodynamiques mais sans liens avec l'énoncé des deux postulats de la Théorie, sans les applications de cette théorie en physique contemporaine et sans précision de son lien avec les vitesses classiques.

Devant ces obstacles rencontrés par les élèves, les décideurs ont été poussés à l'éliminer cette théorie des programmes officiels en 1998, avec aussi les obstacles rencontrés par les enseignants (qui aurait nécessité une formation pour les enseignants sur cette théorie) et par les élèves qui n'ont même pas compris l'utilité de cette théorie dans leur vie quotidienne. De plus, en Tunisie, même quand on a introduit la théorie de la relativité restreinte, elle l'était en fin d'année et complètement séparée de la relativité galiléenne ce qui ne permet pas à l'élève de bien comparer les deux théories et de comprendre la nécessité de cette deuxième théorie. Or en France et en Italie l'enseignement de la relativité restreinte vient juste après l'enseignement de la relativité galiléenne.

Dans les programmes officiels français l'introduction des formules mathématiques des grandeurs physiques sans l'introduction des transformations de Lorentz (hors programme) complique l'acquisition des deux postulats de cette théorie pour l'enseignant et pour l'élève, ce qui n'est pas le cas en Italie où le recours au formalisme de la théorie est dans les programmes. Nous verrons qu'une première approche dans la continuité de la relativité galiléenne est possible avec des méthodes et des outils mathématiques plus simples avec ce que l'on pourrait qualifier rétrospectivement de développement au premier ordre de ces transformations (C.Bracco et J.P.Provost, 2014), mais qui furent introduites en fait par Lorentz dès 1895 et utiles à Einstein pour élaborer sa théorie, ce que beaucoup d'historiens des sciences ignorent encore.

Les exemples choisis dans le contenu des programmes français et italiens concernant la relativité semblent être plus proches de la vie quotidienne de l'élève que ceux choisis dans le contenu des programmes tunisiens. Nous trouvons des contenus français qui parlent de l'éducation sportive pendant l'étude du mouvement, de la ceinture de sécurité, des roues

motrices d'une voiture, de l'enregistrement vidéo, des logiciels pour analyser des mouvements, des tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière (deuxième postulat de la théorie de la relativité restreinte). Dans les programmes italiens : représentation graphiques des mouvements observés dans la vie quotidienne, prendre des mesures, apporter un regard critique sur les mesures réalisées. De plus, les deux programmes (Français et Italien), incitent les élèves à exploiter des informations relatives à des situations concrètes qui tiennent compte par exemple du caractère relatif du temps.

Le contenu sur la relativité, des programmes italiens, insiste sur les limites de l'application de la relativité galiléenne et sur la différence existante entre les transformations galiléennes et les transformations de Lorentz, ce qui n'est le cas pour le contenu des programmes Français.

De plus, dans le programme italien, nous trouvons une introduction succincte de la théorie de la relativité générale qui va permettre à l'élève d'analyser certains phénomènes de cette théorie tel que : la déviation de la lumière dans un champ gravitationnel qui est le sujet de recherche des physiciens d'aujourd'hui. Le programme français n'a pas introduit cette théorie aux élèves de terminales, âgés d'une année de moins que leurs homologues italiens cependant. Une raison supplémentaire pourrait être la meilleure culture philosophique des élèves italiens qui les prédisposent à réfléchir aux concepts et principes d'une théorie.

La théorie de la relativité restreinte nécessite des outils mathématiques un peu complexes par rapport au niveau scolaire de l'élève de terminale, qui sont généralement détestés par eux, or ceci constitue un handicap pour l'acquisition de ses concepts. En Tunisie la partie mécanique constituée de la partie cinématique et la partie dynamique et qui s'intéresse à la relativité galiléenne est fortement introduite avec des notions mathématiques, pour décrire les mouvements et leur aspect relatif, ce type d'introduction est généralement gênant pour les élèves surtout quand il s'agit des notions non encore vues au cours des mathématiques comme par exemple les dérivées des fonctions et leurs primitives.

Une singularité pour les programmes Italiens, c'est qu'ils présentent dans le contenu une partie appelée aspect historique de chaque concept étudié en particulier sur la relativité galiléenne et la théorie de la relativité restreinte et ceci pourra aider les apprenants à connaître mieux ces concepts à partir de leur contexte social, scientifique et épistémologique. Cet aspect n'existe

pas aussi explicitement dans les contenus des programmes français et n'est pas mentionné dans les programmes tunisiens.

### III-3-2- En philosophie.

Malgré que la relativité depuis sa naissance avec Galilée jusqu'à l'époque d'Albert Einstein était traitée par plusieurs physiciens, philosophes et mathématiciens comme Newton, Descartes, Kant, Lorentz, Poincaré, Bergson, Bachelard, Einstein... elle n'a pas trouvé sa place réelle en philosophie au moins dans les programmes tunisiens et français.

En terminale tunisienne les élèves étudient les valeurs d'absolu et de relatif avec incitation aux enseignants pour la lecture des deux célèbres livres comme on l'a déjà dit : *L'évolution des idées en physique* d'A. Einstein et *L'évolution de l'esprit scientifique* de G. Bachelard, mais malheureusement ces ouvrages ne sont jamais lus ni par les enseignants ni par les élèves.

Or En France l'enseignement de la philosophie se fait pendant une année, en Terminale et il ne fait aucun appel à la théorie de la relativité. De plus, il ne saurait être question d'examiner dans l'espace d'une année scolaire tous les problèmes philosophiques que l'on peut légitimement poser, ou qui se posent de quelque manière à chaque homme sur lui-même, sur le monde, sur la société, etc. Il ne peut pas non plus s'agir de parcourir toutes les étapes de l'histoire de la philosophie, ni de répertorier toutes les orientations doctrinales qui s'y sont élaborées.

Par contre le Programme de Philosophie en Italie incite à élaborer des parcours d'études multidisciplinaires et interdisciplinaires, en commençant par les thèmes de pertinence philosophique, renforcer l'unité de la culture, la philosophie était toujours l'occasion de rencontres, de colloques et de manifestations, où les philosophes évoquent des expériences de philosophie pour les enfants et contribuent à l'animation des villes et mobilisent les élèves motivés et ouvrent des perspectives philosophiques à propos de questions de société à travers les liens entre les différents domaines de la connaissance, et en soulignant les similitudes et les différences entre les concepts, les modèles de rationalité et les méthodes des différents champs cognitifs. Mais nous ne trouvons pas des liens au moins explicitement avec la physique ou avec la relativité galiléenne ou la théorie de la relativité restreinte.

Nous remarquons que les programmes de philosophie en France, en Italie et en Tunisie utilisent presque les mêmes référentiels, les mêmes notions et les mêmes auteurs mais avec plus de liberté pour les enseignants italiens que pour les enseignants français et tunisiens.

L'enseignement de la philosophie en Italie est fondé, en plus de la philosophie, sur l'histoire et l'histoire de la philosophie, ce qui n'est pas le cas pour l'enseignement de la philosophie en France et en Tunisie, c'est pourquoi les enseignants Italiens de philosophie sont en même temps enseignants d'histoire.

L'enseignement de la philosophie en France et en Tunisie est plus massifié et se fait avec des élèves plus hétérogènes, par contre l'enseignement italien de la philosophie est sélectif car il ne s'adresse qu'aux meilleurs élèves.

Les lycées italiens visent explicitement à fournir une formation généraliste à dominante littéraire et dans ce contexte, l'enseignement de la philosophie s'inscrit dans la continuité de cette perspective humaniste.

En termes quantitatifs, c'est l'Italie qui consacre le plus d'heures à la philosophie dans sa scolarité obligatoire, la philosophie étant enseignée pendant trois ans ; en Tunisie, la philosophie est enseignée pendant deux ans par contre en France, la philosophie n'est enseignée que pendant une seule année qui est l'année de terminale. L'enseignement de la philosophie en France et en Tunisie est notionnel, par contre en Italie l'enseignement de la philosophie a une tendance historicisme et cette dernière orientation est fondée depuis la réforme de G.Gentile en 1923 ( G.Vergne, 2012).

Les enseignants de philosophie Italiens ont plus de liberté dans leur choix des thèmes à enseigner et des moyens d'évaluation des élèves que les enseignants français et les enseignants tunisiens.

C'est pourquoi, l'un des grands intérêts du système éducatif italien est sa forte teneur interdisciplinaire et transversale tels que les liens entre la philosophie et les autres disciplines, ce qui n'est pas le cas au système éducatif tunisien qui néglige complètement les liens entre la philosophie et la physique et les mathématiques et les sciences de la vie et de la terre et le système français qui ne met pas ces liens en pratique.

D'après les trois systèmes éducatifs, français, italien et tunisien, nous avons bien remarqué que les concepts des théories de la relativité en générale et de la relativité restreinte en particulier que sont : le temps, l'espace, la géométrie, repère, référentiel... n'ont pas eu une place importante dans les programmes de philosophie, pourtant en revenant à l'histoire de la philosophie, plusieurs discussions philosophiques, physiques et mathématiques ont été imposées par plusieurs savants de l'époque.

Ainsi, nous allons insister dans notre recherche sur l'apport de la philosophie à l'évolution de la théorie de la relativité restreinte pendant son enseignement en physique avec les élèves de terminale, Approfondir l'enseignement de quelques concepts en philosophie tels que la modélisation, la relativité et leurs liens avec la physique et proposer des nouveaux concepts comme le temps , l'espace, géométrie à enseigner en philosophie pour leur montrer leur importance dans l'évolution des connaissances scientifiques en générale et en physique en particulier.

Partie : B

## Chapitre IV

### Histoires de la relativité et de la mesure de la vitesse de la lumière

## **IV-1- De la relativité galiléenne à la relativité restreinte :**

### **IV-1-1- Introduction :**

Quand on parle de la relativité en physique, on se ramène souvent aux travaux d'Albert Einstein et à la théorie de la relativité restreinte, or l'idée du caractère relatif du mouvement date de l'époque de Galilée (16-17<sup>ème</sup> siècle) qui fut le premier à comprendre l'idée de la relativité du mouvement et ses implications en décrivant l'expérience du bateau se déplaçant en ligne droite à vitesse constante.

Aujourd'hui, on fait appel à la notion de « référentiel galiléen » qui est fondamentale pour décrire le mouvement.

En s'appuyant sur les travaux de Galilée, Newton instaura la mécanique classique basée sur les 3 lois qui sont invariantes par rapport à tout référentiel galiléen.

Cette mécanique dite mécanique classique a régné plus de 200 ans et est encore aujourd'hui utilisée pour décrire la plupart des situations physiques. Elle constitue pour les physiciens et les philosophes de l'époque un ensemble cohérent.

Avec l'évolution de la physique au début du 19<sup>ème</sup> siècle, la mécanique classique s'avéra incompatible avec les équations de Maxwell régissant l'électromagnétisme et l'optique. C'est pourquoi plusieurs physiciens et mathématiciens tels que Michelson, Lorentz, Poincaré, Einstein, Minkowski, ont cherché à surmonter les énigmes posées par ces nouvelles études telles que le statut de l'éther (milieu de propagation de la lumière) et son rapport à la matière, la constance de la célérité de la lumière etc.

C'est en 1905 qu'Albert Einstein réunit les résultats des travaux des physiciens de l'époque en adoptant un nouveau cadre et en énonçant les deux postulats au fondement de la nouvelle théorie de la relativité restreinte. Nous revenons ci-dessous avec quelques détails sur cet enchaînement, car il est fondamental pour l'enseignement et pour comprendre la présentation que fait Einstein en 1916 de la théorie de la relativité, à laquelle nous consacrerons le prochain chapitre. La théorie de la relativité restreinte est connue comme une théorie abstraite et difficile à aborder avec les élèves du secondaire de plusieurs pays (cas de la Tunisie), comme on l'a vu dans la partie A, et il importe de bien comprendre le cadre dans lequel elle se

développe. Nous revenons donc dans ce chapitre sur le principe de relativité et la mesure de la vitesse de la lumière.

#### IV-1-2- la relativité Galiléenne, le principe de relativité, la mécanique newtonienne

Galilée a défendu le système héliocentrique, qui impliquait le mouvement diurne de la Terre et son mouvement annuel orbital autour du Soleil.

Il se demanda qu'est-ce qu'un mouvement dans l'espace ? Il en conclut qu'il est uniquement possible de déceler le mouvement d'un système relativement à un autre système car il est impossible de déterminer d'une manière absolue le mouvement d'un système ; c'est le premier à avoir exprimé clairement que le mouvement était relatif.

En 1632 Galilée mentionne l'expérience du bateau voguant sur une eau calme pour montrer que les lois de la physique sont invariantes quand le bateau est au repos ou qu'il vogue à vitesse constante. Il décrit l'expérience qui consiste à lâcher en chute libre un objet du haut du mât du bateau. Il s'intéresse aussi à l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement du bateau, sans se référer à l'extérieur :

*« Enfermez-vous avec un ami dans la cabine principale à l'intérieur d'un grand bateau et prenez avec vous des mouches, des papillons et des autres petits animaux volants. Prenez une grande cuve d'eau avec un poisson dedans, suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un grand récipient en dessous d'elle. Avec le bateau à l'arrêt, observez soigneusement comment les petits animaux volent à des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. Le poisson nage indifféremment dans toutes les directions, les gouttes tombent dans le récipient en dessous, et si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'avez pas besoin de lancer plus fort dans une direction que dans une autre.*

*Les distances étant égales, et si vous sautez à pieds joints, vous franchissez des distances égales dans toutes les directions. Lorsque vous aurez observé toutes ces choses soigneusement (bien qu'il n'y ait aucun doute que lorsque la bâteau est à l'arrêt, les choses doivent se passer ainsi) faites avancer le bateau à l'allure qui vous plaira, pour autant que la vitesse soit uniforme (c'est-à-dire constante) et ne fluctue pas de part et d'autre. Vous ne verrez pas le moindre changement dans aucun des effets mentionnés et même aucun d'eux ne*

*vous permettra de dire si le bateau est en mouvement ou à l'arrêt<sup>14</sup> »*

Galilée arrive à la conclusion suivante : « *le mouvement est comme rien* ». Il s'agit bien entendu du mouvement de translation rectiligne et uniforme.

On explique aujourd'hui dans l'enseignement que tout mouvement dans l'espace doit être décrit par rapport à un référentiel, et que tous les référentiels en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un référentiel dit galiléen sont aussi des référentiels galiléens. On donne comme exemple de référentiels galiléens approchés :

- Le référentiel héliocentrique tel que le centre du soleil est l'origine du référentiel et les trois axes sont dirigés vers 3 étoiles fixes.

- Le référentiel géocentrique : où le centre de la terre est l'origine du référentiel pour une durée pendant laquelle la trajectoire de la terre peut être assimilée à un mouvement rectiligne et uniforme.

- Le référentiel terrestre est un référentiel centré sur le centre de masse de la terre et dont les trois axes sont liés au globe terrestre appelé parfois référentiel du laboratoire qui peut être considéré comme galiléen pendant la durée d'une expérience usuelle.

La cinématique galiléenne exclut l'existence d'un référentiel privilégié par rapport auquel on pourrait calculer la vitesse d'un objet, mais donne une classe de référentiels équivalents pour décrire les lois de la mécanique, c'est le principe de relativité.

Newton a poursuivi les travaux de Galilée en fondant une discipline nouvelle dans son livre *Philosophiae Naturalis principia mathematica* publié en 1687 appelée depuis la mécanique Newtonienne, aussi appelée la mécanique classique.

Il considère que tout mouvement doit être décrit par rapport à un référentiel galiléen et énonce les trois lois fondamentales de la mécanique (présentées ci-dessous dans leur formulation moderne usuelle dans l'enseignement) :

---

<sup>14</sup> Galilée, *Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du monde*, 1632.

1/ le principe d'inertie ou principe de relativité :

« Dans un référentiel galiléen ou Inertiel, tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et le contraigne à changer d'état ».

2/ le principe fondamental de dynamique :

« Dans un référentiel galiléen, la résultante des forces appliquées sur un corps produit une variation de quantité de mouvement au cours du temps telle que ( $\vec{p}$  désignant la quantité de mouvement du corps et  $\vec{a}$  son accélération) :

$$\Sigma \vec{F} = d\vec{p}/dt = m d\vec{v}/dt = m\vec{a}$$

3/principe de l'action et de la réaction.

« Dans un référentiel galiléen : tout corps  $A$  exerçant une force  $\vec{F}_{a/b}$  sur un corps  $B$  subit une force  $\vec{F}_{b/a}$  d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé exercée par  $B$  ».

Dans sa conception de l'espace, Newton considère l'espace comme intemporel, universel et absolu, l'espace pour lui est une sorte de substance qui est indépendante de toute matière et possède une structure d'espace euclidien à 3 dimensions, cet espace persiste à travers le temps sans aucun changement.

Newton considère le temps également comme absolu : il est le même en tout point de l'univers et ne dépend pas du référentiel galiléen, indépendant de la vitesse du mouvement. Il s'écoule continûment et uniformément pour tous les observateurs<sup>15</sup>.

#### IV-1-3-La transformation galiléenne :

Il importe, pour la suite de notre discours, de mathématiser le principe de relativité en ayant recours à ce que l'on appelle la transformation de Galilée, qui laisse invariante les lois de la mécanique newtonienne. Deux événements se déroulant au même instant dans un référentiel  $R$ ,

---

<sup>15</sup> Thèse Meropi Morfouli. *De la précision dans la mesure du temps à la théorie de la gravitation universelle (1630-1740)* (2017).

se déroulent aussi au même instant dans un autre référentiel Galiléen  $R'$ , le temps s'écoule également sans relation avec quoi ce soit d'extérieur ; donc la transformation Galiléenne :

- Conserve les intervalles de temps entre les événements puisque le temps est absolu : si deux événements sont simultanés dans  $R$  alors ils le sont dans  $R'$ , la transformation de Galilée préserve la simultanéité.
- Préserve les mesures de longueurs
- Permet la composition des vitesses en les additionnant simplement.

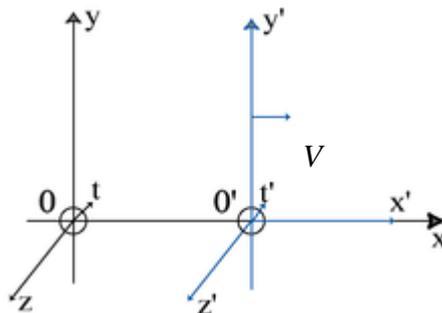
Si on choisit deux référentiels  $R$  et  $R'$  en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre, alors en prenant l'axe des  $x$  comme axe directeur de la translation (Fig. 1), on obtient l'expression suivante pour la transformation baptisée rétrospectivement de galiléenne :

$$x = x' + Vt, \quad (1)$$

$$y = y',$$

$$z = z',$$

$$t = t'. \quad (2)$$



**Fig. 1. Changement de référentiels galiléens.**

La première équation traduit simplement le fait que l'origine  $O'$  du référentiel  $R'$  est entraînée à la vitesse  $V$  par rapport au référentiel  $R$ . Aussi les coordonnées dans  $R$  et  $R'$  sont-elles reliées trivialement par la distance  $Vt$  parcourue par  $O'$  dans le sens du mouvement pendant le temps  $t$  comme l'indique la relation (1), (l'origine des temps est prise en  $O$  au moment où  $O'$  coïncide avec  $O$ ). La relation (2) n'est en général pas explicitée en mécanique newtonienne et signifie que le temps est implicitement considéré comme identique dans les deux référentiels. Comme on l'a dit, dans cette mécanique, le temps s'écoule uniformément et de la même manière pour tout observateur, indépendamment de son état de mouvement. Ces transformations jouent un

rôle remarquable car elles conduisent, par différentiation, immédiatement aux lois de transformations des vitesses et des accélérations :

$$v = v' + V, \quad (3)$$

$$a' = a$$

où  $v$  est la vitesse d'un mobile dans  $R$ ,  $v'$  sa vitesse dans  $R'$  et  $V$  la vitesse d'entraînement de  $R'$  dans  $R$  (ici en projections sur l'axe  $x$ , mais les résultats se généralisent directement sous forme vectorielle).

Avec des élèves, on peut introduire les vitesses comme des différences finies de position entre des points voisins du référentiel, reliés par le déplacement d'un objet entre deux instants séparés de  $\Delta t$  :  $v = \Delta x / \Delta t$  dans  $R$  et  $v' = \Delta x' / \Delta t$  dans  $R'$ . On peut exprimer alternativement les coordonnées dans  $R'$  en fonction de celles dans  $R$  en inversant (1) :

$$x' = x - Vt, \quad (1b)$$

Les autres relations restent identiques par ailleurs. La relation (3) implique aussi que toute vitesse peut devenir infinie par compositions successives. La transformation galiléenne fait en fait l'hypothèse implicite que la vitesse de la lumière est infinie.

Une telle approche est conforme aux programmes officiels tunisiens de la Physique pour introduire la Cinématique en première année secondaire et la Dynamique en troisième année du secondaire (réforme éducative tunisienne, 1991), elle est aussi conforme aux programmes officiels français de la physique pour les élèves de seconde et de première série scientifique, conforme encore aux programmes officiels italiens en physique pour les élèves de première année, de deuxième année et de cinquième année, sachant que les élèves italiens apprennent depuis la deuxième année la théorie de la relativité restreinte et que les élèves de cinquième année apprennent la transformation galiléenne et la transformation de Lorentz.

La transformation galiléenne est négligée dans tous les programmes, dont il sera utile d'y insister pour faire le lien avec la théorie de la relativité restreinte et comprendre ce qui amène à la transformation de Lorentz sans un formalisme mathématique poussé.

#### IV-1-4. La confrontation à l'électrodynamique et les transformations de Lorentz de 1895.

Nous reviendrons ci-dessous sur l'expérience d'Arago et l'interprétation de Fresnel, qui conduit en 1818 le physicien français à introduire un coefficient d'entraînement dans l'expression de la vitesse de la lumière traversant un milieu réfringent en mouvement, pour un observateur au repos, qui lui fait dire qu'on ne peut pas détecter le mouvement de la Terre dans l'éther (le support des ondes lumineuses au XIXe siècle). Il s'agit en fait d'une affirmation qui n'est valable qu'au premier ordre en  $V/c$  ( $V$  étant la vitesse de la terre sur son orbite et  $c$  celle de la lumière), mais qui étend de fait le principe de relativité galiléenne hors du champ de la mécanique, dans le champ de l'optique où la vitesse de la lumière est désormais finie. Le cours du XIXe siècle verra plusieurs autres expériences, reposant sur le principe de mesures optiques, électrostatiques, électromagnétiques, aboutit à la même conclusion.

En 1895, le physicien hollandais H.-A. Lorentz mathématise la problématique par une approche générale fondée sur une invariance (partielle) des équations de Maxwell. Lorentz considère un système  $S_0$  au repos dans l'éther, pour lequel les équations de Maxwell sont valables. Ce système est constitué de charges électriques statiques et en mouvement (courants). Il imagine par la pensée mettre ce système en mouvement, à la vitesse  $V$ , tout en restant dans le même référentiel. Il utilise une loi de composition galiléenne des vitesses et obtient l'expression des nouvelles équations auxquelles obéissent les champs électriques et magnétiques. Or, s'il est impossible de détecter le mouvement de la terre par rapport à l'éther à l'ordre  $V/c$ , comme les expériences de l'époque l'ont montré, c'est que les équations du système en mouvement et du système au repos doivent avoir la même forme, comme dans la mécanique newtonienne l'accélération, et donc la seconde loi de Newton, dans deux référentiels galiléens. Lorentz s'intéresse donc au changement de variable à réaliser pour ramener le système en mouvement à la vitesse  $V$  au repos. Il montre que les équations de Maxwell s'écrivent alors de la même manière pour le système au repos initialement et le système en mouvement ramené au repos (théorie des « états correspondants ») avec le changement de variables suivant :

$$x' = x - Vt, \quad (1b)$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = t - \frac{Vx}{c^2} \quad (4)$$

Lorentz complète ces changements de variables de changements analogues pour les champs électriques et magnétiques que nous n'avons pas besoin d'écrire ici. L'équation (1) est la même qu'avec la transformation de Galilée : cela traduit simplement l'identité des problématiques en envisageant une mise en mouvement à la vitesse  $V$  du système selon l'axe  $Ox$  du système au repos. La relation (2) est modifiée en devenant (4) : ce qui est pour Lorentz une « *variable fictive* » car issue de changements de variables mathématiques à partir des équations de Maxwell, s'apparente à un temps qui dépendrait du lieu dans le référentiel  $R$ , ce que Lorentz appelle le « *temps local* » (*Ortzeit*).

Ces transformations de Lorentz de 1895 sont remarquables. De plus, Si l'on fait  $c=1$ , comme les physiciens théoriciens aiment bien le faire – ce qui revient à mesurer temps et distance dans les mêmes unités – alors, ces transformations font apparaître une symétrie totale et remarquable entre espace et temps, puisque (1b) et (4) se lisent désormais :

$$\begin{aligned}x' &= x - Vt, \\t' &= t - Vx.\end{aligned}$$

Lorentz introduit donc une symétrie dans le traitement de l'espace et du temps sans en avoir totalement conscience. Pour lui, ces changements de variables ne donnent pas lieu à une nouvelle cinématique. C'est le physicien français Henri Poincaré qui va montrer que le temps  $t'$  est le temps indiqué par les montres d'observateurs comme nous le verrons ci-dessous. Nous verrons plus loin que ces transformations de Lorentz de 1895 peuvent, pour les besoins de l'enseignement, être introduites très simplement, à partir du second postulat de la relativité restreinte, l'invariance de  $c$ , et qu'elles constituent la modification la plus simple à apporter à la transformation de Galilée pour en assurer la compatibilité.

#### IV-1-5- les idées de H.Poincaré concernant temps et simultanéité :

H.Poincaré publie en 1902 *La science et l'hypothèse*, un livre de réflexion sur les mathématiques et la physique, le rôle de l'expérimentation et de l'hypothèse dans la genèse des théories physique, sur les notions de temps et d'espace, sur le rapport entre mathématiques et physiques. Ces réflexions, que nous reproduirons en partie, ont nourri les interrogations d'Albert Einstein.

« 1- *il n'y a pas d'espace absolu et nous ne concevons que des mouvements relatifs*

2- il n'y a pas de temps absolu : dire que deux durées sont égales c'est une assertion qui n'a par elle-même aucun sens et qui n'en peut acquérir un que par convention.

3- Notre géométrie euclidienne n'est elle-même qu'une sorte de convention de langage

*Nous pourrions énoncer les faits mécaniques en les rapportant à un espace non Euclidien ».*

H. Poincaré écrit aussi : « *Ainsi l'espace absolu, le temps absolu, la géométrie même ne sont pas des conditions qui s'imposent à la mécanique, toutes ces choses ne présentent pas plus à la mécanique ..... » (Poincaré 1902).*

Les affirmations concernant la simultanéité se réfèrent - cela est relativement méconnu – en fait aux transformations écrites par Lorentz en 1895, dans le cadre de sa « théorie des états correspondants », ancêtre du principe de relativité appliqué à l'électromagnétisme qui a été rappelée ci-dessus. C'est effectivement encore, Poincaré, dans son article pour le jubilé de Lorentz (Poincaré 1900), qui montre que le temps local  $t'$ , introduit par Lorentz est celui indiqué par des horloges d'observateurs qui se sont synchronisés par un échange de signal lumineux, sans avoir conscience de leur mouvement de translation dans l'éther et pour lesquels la vitesse de la lumière est toujours  $c$  (nous reviendrons sur cette démonstration dans le chapitre VIII). Il nous suffit de remarquer ici que si deux évènements distincts sont simultanés dans le référentiel  $R$ , alors  $\Delta t = 0$  dans  $R$  mais  $\Delta t' = -Vx/c^2$  est différent de zéro, puisque deux évènements distincts se produisent en des endroits différents de  $R$ , tout comme cela est le cas dans la relativité restreinte. D'où la relativité de la simultanéité discutée par Poincaré dans *La science et l'hypothèse* (Bracco, Provost, 2014). Comme nous le savons et le verrons plus en détails dans le chapitre suivant, la relativité de la simultanéité est à la base du raisonnement d'A. Einstein.

Remarquons qu'après la publication des travaux de Lorentz, H. Poincaré émit dès 1899 l'idée qu'il se pouvait fort bien que le mouvement absolu fut indécélable et que l'éther n'existait pas ; il considère par ailleurs que la vitesse de la lumière est une vitesse limite qu'aucun mobile matériel ne pouvait dépasser, qu'il explique au Congrès des arts et des sciences à saint Louis (Poincaré 1904).

#### IV-1-7- Introduction de la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein :

Les résultats obtenus au premier ordre en  $V/c$  témoignant de l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement de la terre dans l'éther par des expériences mécaniques, optiques et

électromagnétiques, les résultats négatifs de l'expérience de Michelson et Morley, la volonté d'appliquer le principe de relativité à l'électromagnétisme pour ne pas avoir deux visions différentes, selon qu'un aimant se déplace par un conducteur (induction de Neumann) ou l'inverse (induction de Lorentz), ont en particulier poussé Albert Einstein à développer sa réflexion sur de nouvelles bases et à trouver des solutions pour étendre le principe de relativité à tout ordre.

#### IV-1-7-1-les postulats de la théorie de la Relativité Restreinte :

Le principe fondamental de la relativité restreinte conserve le même principe galiléen de relativité, qu'il étend à tous les phénomènes physiques, optique et électromagnétisme y compris. Albert Einstein fonde cette théorie de Relativité Restreinte par deux postulats :

1. Premier Postulat : il existe une classe de référentiels dits galiléens, tous en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres et dans laquelle les lois de la physique ont même forme [même l'électromagnétisme].

Einstein y ajoute alors un deuxième postulat aussi fondamental, qui remplace le postulat implicite du temps absolu.

2. Deuxième Postulat : la vitesse de la lumière est indépendante du référentiel choisi.

C'est ainsi que le second postulat est présenté dans une formulation moderne ; en fait dans sa formulation initiale, Einstein indique que la vitesse de la lumière est indépendante de l'état de mouvement de la source. Il emprunte cette propriété à l'électromagnétisme de Maxwell, d'après lequel la vitesse de la lumière n'est déterminée que par les caractéristiques du milieu dans lequel elle se propage (l'éther pour Maxwell), en fait la perméabilité magnétique et la permittivité diélectrique du vide. Ce n'est qu'à la lumière du premier postulat avec lequel on souhaite le rendre compatible, qu'il acquiert cette formulation moderne.

Ce second postulat est en fait lui-même une conséquence de l'invariance que l'on souhaite imposer aux équations de Maxwell par changement de référentiel. Einstein le précisera dans une note de son article sur l'inertie de l'énergie (Einstein 1905).

#### IV-1-7-2-transformation de Lorentz (1904-1905):

Les transformations de Lorentz de 1895, discutées plus haut, ont l'inconvénient de ne pouvoir expliquer, à elles seules, les conclusions négatives d'expériences comme celle de Michelson et

Morley, qui nécessite de pousser à l'ordre 2 en  $V/c$  les calculs (expérience interférentielle). Il faut leur adjoindre le « coup de pouce » critiqué par Poincaré, d'une « troisième hypothèse », celle de la contraction des longueurs dans le sens du mouvement, par le facteur  $\gamma^{-1} = \sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Les nouvelles transformations données par Lorentz en 1904, sur la base de la poursuite de son analyse de 1895, intègrent désormais ce facteur. Mais la présentation qu'en donne Lorentz reflète les différentes étapes de son raisonnement et il faudra attendre Poincaré, puis Einstein, en 1905, pour leur donner la forme synthétique ci-dessous, qu'on leur connaît. C'est Poincaré qui baptise les nouvelles transformations de « *transformation de Lorentz* ». On peut les établir, dans une présentation moderne (comme le fait Einstein dans l'annexe de son livre, en remarquant qu'une telle transformation se doit être linéaire, par isotropie et homogénéité de l'espace-temps. On peut montrer que l'invariance de la vitesse de la lumière conduit alors à écrire cette transformation comme suit :

$$x' = \gamma(x - Vt),$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \gamma \left( t - \frac{Vx}{c^2} \right).$$

le référentiel  $R'$  étant en mouvement de translation uniforme avec une vitesse  $V$  par rapport à  $R$  et avec  $\gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ .

Nous expliquerons dans le chapitre VIII comment ces transformations peuvent être retrouvées aussi à partir des transformations de Lorentz de 1895, qui sont identiques à celles-ci au facteur  $\gamma$  près. Nous verrons que la différence entre les deux est celle, mathématiquement, existant entre transformations infinitésimales et transformation finie, ce qui rend les transformations de Lorentz 1895 d'une certaine manière plus fondamentales que celles de 1904, et renforce leur intérêt pour l'introduction de la relativité restreinte à des élèves simplement armés de la transformation de Galilée.

#### IV-2-Histoire de la vitesse de la lumière :

Nous avons vu dans la Partie A que la vitesse de la lumière était introduite dans les programmes de physique du lycée, dans les différents pays, parfois sans recours à l'histoire de sa mesure

(dans les programmes tunisiens). Devant l'importance que la vitesse de la lumière revêt, avec le second postulat de la relativité restreinte, il nous a semblé important ici de revenir avec quelques détails sur l'historique de sa mesure. Cela nous permettra également de mieux comprendre les allusions d'Einstein, à l'expérience de Fizeau par exemple, dans son livre sur la relativité que nous discuterons dans le chapitre suivant.

#### IV-2-1- Aperçu historique des mesures de la célérité de la lumière.

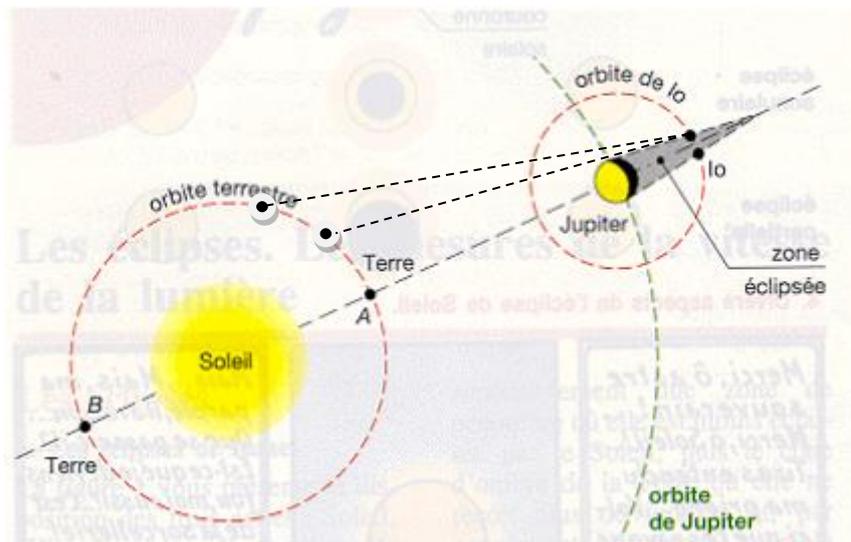
Dès l'antiquité, les savants pensaient que la lumière ne se propageait pas mais qu'elle était instantanée, donc sa vitesse était considérée comme infinie. Il faut attendre le XVI<sup>e</sup> siècle pour avoir une première indication du caractère fini, mais très grand, de sa valeur.

##### IV-2-1-1- Galilée début du XVII<sup>e</sup> siècle

C'est Galilée qui, le premier a cherché à mesurer la célérité de la lumière (Bonnet, 2003). Deux hommes munis d'une lanterne et placés à une distance de quelques km, font l'expérience suivante. Le premier découvre sa lanterne en déclenchant une horloge (une horloge à eau : clepsydre), le second découvre la sienne dès qu'il aperçoit le signal lumineux et le premier arrête son horloge dès qu'il voit le signal lumineux envoyé par le second. Le temps d'aller et retour du signal lumineux peut être ainsi en théorie apprécié. Mais Galilée ne pouvait mesurer cette valeur et il en déduisait que la lumière était instantanée ou que si elle avait une vitesse finie, alors cette valeur devait être très grande.

##### IV-2-1-2- L'expérience de Ole Römer (1676).

Connaissant la distance Terre-Soleil, Römer a étudié le décalage horaire entre les éclipses de Io, qui est une lune de Jupiter découverte par Galilée en 1610. Entre la position où la Terre est la plus proche de Jupiter et celle où elle en est la plus éloignée, ce décalage horaire atteint 22 min par rapport aux tables de prévisions de Cassini à l'observatoire de Paris (qui vient d'être fondé par Louis XIV). Il est dû au fait que la Terre s'éloignant de Jupiter, la lumière met de plus en plus de temps à l'atteindre ; ainsi, la période des éclipses de Io, mesurées à ses émergences successives hors du cône d'ombre de Jupiter, augmente (Fig. 2). L'inverse se produit lorsque la Terre se rapproche de Jupiter. Donc 22 min était le temps mis par la lumière pour parcourir le diamètre de l'orbite Terre-Soleil.



**Fig. 2. Principe de la mesure de la vitesse de la lumière à partir des satellites de Jupiter.**

On peut l'estimer par le calcul avec des élèves :  $c=d/\Delta t$ , soit  $c= 2*150.10^6 / (22*60)$ , soit  $c= 230.000$  km/s. Cette observation a été analysée sous un angle didactique dans (Maurines et Mayrargues, 2001).

#### IV-2-3-3- L'effet d'aberration stellaire comme détermination de la vitesse de la lumière.

Cet effet est découvert par l'astronome anglais James Bradley en 1728, alors qu'il était à la recherche de l'effet de parallaxe stellaire pour prouver directement le mouvement de la terre autour du Soleil dans le système copernicien. Selon la position de la terre sur son orbite, une même étoile devait être vue dans une direction différente. Le mouvement apparent de l'étoile sur le plan du ciel de l'observateur devait apparaître homothétique du mouvement terrestre dans cette projection et dans un sens inverse à celui-ci. La petitesse de l'effet, en raison de l'éloignement même des étoiles les plus proches, devait rendre l'effet inobservable jusqu'au début du XIXe siècle et les observations de Bessel. Mais c'est un tout autre effet que Bradley découvre. Il observe bien un mouvement apparent annuel des étoiles, vues depuis la Terre, mais quand il corrige de l'angle d'élévation de l'étoile observée par rapport au plan de l'écliptique, il mesure un effet identique pour toutes les étoiles qu'il observe, indépendamment de leur distance donc. De plus, le sens du mouvement est inverse de celui qu'il escomptait, dans le sens du mouvement terrestre sur le plan du ciel. Bradley vient de découvrir que la vitesse finie de la lumière en provenance de l'étoile se compose avec celle de la terre sur son orbite. De la somme vectorielle de ces deux vitesses résulte la direction apparente dans laquelle l'étoile est observée. L'angle avec la direction vraie de l'étoile est très petit, en raison du rapport lui-même très petit

entre la vitesse de la terre sur son orbite et celle de la lumière (effet en  $V/c$ ). Mais il est mesuré par Bradley qui en déduit une vitesse de la lumière d'environ 315 000 km/s, pour l'exprimer en des termes actuels.

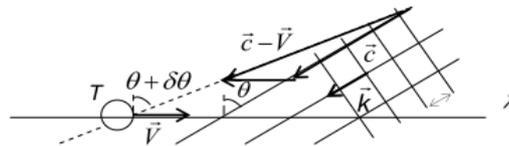


Fig. 3. Phénomène d'aberration  $\delta\theta = V\cos\theta/c$ .

**Fig. 3.** Phénomène d'aberration in (Bracco, Provost, 2014). La vitesse  $c$  des rayons lumineux (direction vraie de l'étoile) perpendiculaires aux plans d'ondes parallèles représentés (source lointaine), s'inclinent d'un angle  $\delta\theta$  pour l'observateur terrestre.

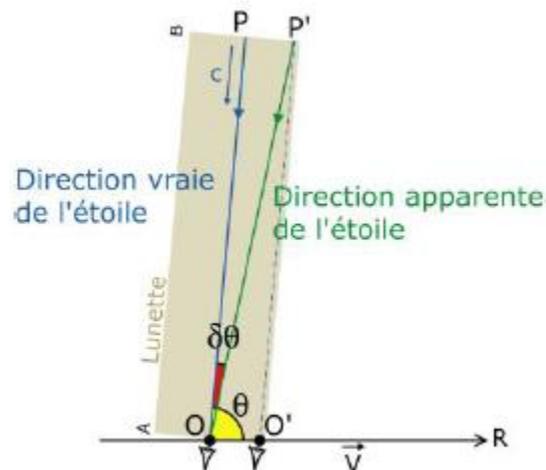
Plus précisément, après une année complète d'observation de près de 200 étoiles référencées, Bradley comprit la relation qui existait entre le déplacement de l'étoile et la position de la Terre : la composition de la vitesse de la Terre sur son orbite et la vitesse de la lumière qui parvient des étoiles provoque un déplacement apparent des étoiles  $\delta\theta = 20,2$  secondes d'arc.

Dans le cadre d'une théorie newtonienne de l'émission lumineuse, où la lumière est assimilée à des particules, l'interprétation de l'effet est analogue à l'inclinaison apparente de la pluie vue d'un train en mouvement, alors qu'elle tombe verticalement par rapport au quai en l'absence de vent. Longtemps, l'aberration de la lumière sera considérée comme une preuve en faveur de la théorie corpusculaire de Newton. Augustin Fresnel, en 1814, dans une lettre à son frère Léonor, en donne une interprétation indépendante de la théorie (corpusculaire ou ondulatoire). Il établit qu'il ne s'agit là que d'un effet dû au mouvement de la lunette, celle-ci se déplaçant à la vitesse  $V$  avec la Terre pendant que la lumière se déplace à la vitesse  $c$  de l'objectif à l'oculaire<sup>16</sup>. Fresnel écrit en effet :

« Suppose que l'œil de l'observateur soit placé en  $O$  à l'extrémité d'une lunette  $AB$  dirigée vers une étoile fixe et de manière que son axe  $OP$  prolongé passe par le lieu vrai de l'étoile.

<sup>16</sup> Augustin Fresnel, *Œuvres Complètes d'Augustin Fresnel* publiées par MM. Henri de Sénarmont, Emile Verdet et Léonor Fresnel, 3 vol. (Imprimerie Impériale, Paris, 1866-1870).

Maintenant considérons l'effet qui résulte du mouvement progressif de la lumière et du mouvement de l'œil et de la lunette dans le sens OR. Imagine que l'extrémité de la lunette ne soit percée qu'au point P. – pendant que la lumière va de P en O, l'œil change de position, et se trouve en O' lorsque la lumière est arrivée en O, en sorte qu'il ne voit rien. – Mène en O' une parallèle à OP, suppose l'œil et la lunette retournés dans leur première position, et perce l'extrémité supérieure de la lunette au point P' : alors, en appliquant l'œil en O, tu verras l'étoile par le trou P', parce que l'œil arrivera en O' aussitôt que la lumière qui passera par P' : et voilà pourquoi tu crois que l'étoile est dans le prolongement de la ligne OP', tandis qu'elle est effectivement dans la ligne OP [...]. L'hypothèse des vibrations s'accorde alors tout aussi bien que celle de Newton avec le phénomène de l'aberration des étoiles fixes, puisqu'il [...] suffit de reconnaître que la lumière met 8 minutes à venir du soleil à nous, et la terre une année à parcourir son orbite, ce qu'on admet également dans les deux hypothèses ».



**Fig. 4. Aberration stellaire** (C. Bracco et S. Haspot, 2015).

#### IV-2-3-4- L'expérience de Fizeau (1849).

Fizeau a réalisé un ingénieux système comportant une roue dentée et deux miroirs dont un est semi-réfléchissant, lui permettant de réaliser en quelque sorte l'expérience proposée par Galilée deux siècles auparavant. Il était le premier physicien à réaliser l'expérience de la mesure de  $c$  sur terre.

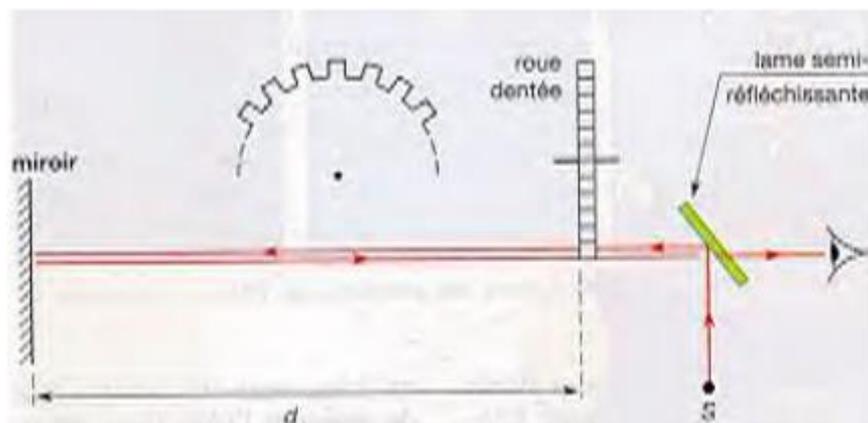
L'expérience de Fizeau se déroula donc en 1849 à Suresnes à partir de sa propre maison. Il installa une lunette permettant, par un jeu de miroirs d'envoyer un rayon lumineux à plusieurs kilomètres à Montmartre, à 8633 mètres précisément, où se trouvait une autre lunette dont le

foyer avait été remplacé par un miroir. La première lunette était coupée par une roue dentée de 720 dents. Celle-ci était entraînée par un poids à une vitesse de plusieurs tours par minute. La lumière émise passait dans l'intervalle entre deux dents sur son trajet aller et Fizeau s'intéressait à l'occultation de la source lumineuse sur le trajet retour. Celle-ci se produisait toutes les fois que la vitesse de rotation de la roue était suffisante pour que le creux entre deux dents qui avait laissé passer la lumière à l'aller était remplacé par une dent au retour, dans les faits lorsque celle-ci était un multiple de 12,6 tours par seconde.

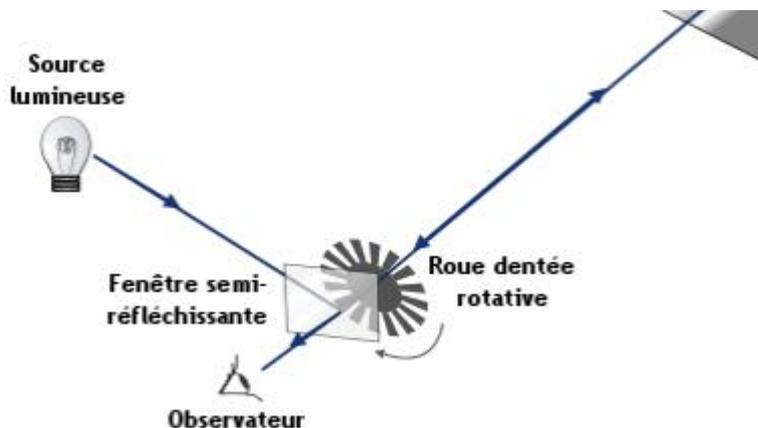


**Fig5 : Montage de Fizeau : collection Ecole polytechnique**

Le schéma de l'expérience est le suivant :



**Fig. 6. L'expérience de Fizeau In.** (Physique-chimie, Série S 2012) Ed. Nathan



**Fig. 7. Principe de fonctionnement de l'appareil de Fizeau** (Physique-chimie, Série S 2012) Ed.Nathan

Fizeau obtient une vitesse de 315 000 km/s.

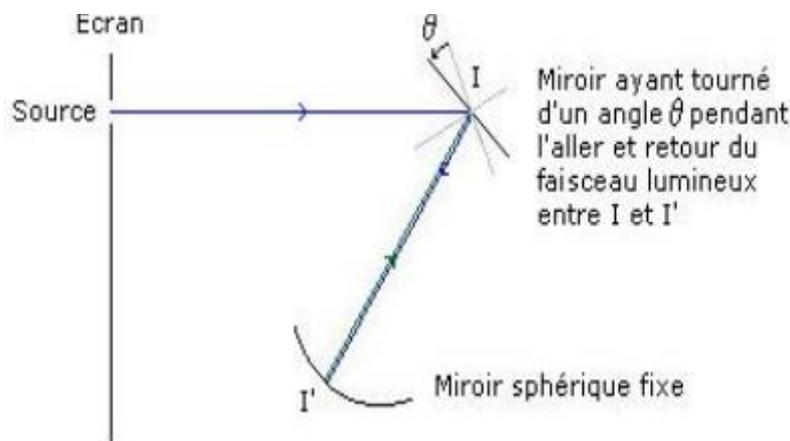
#### IV-2-3-5- Expérience de Foucault (1850).

La méthode, imaginée par Foucault, consiste à piéger la lumière au cours du trajet du faisceau lumineux à travers un circuit comportant un petit miroir tournant, une lentille et quatre miroirs sphériques. Entre ses passages aller et retour, le faisceau a parcouru 20 mètres et le miroir a eu le temps de légèrement tourner. Ainsi, l'image d'une mire graduée envoyée par le faisceau à l'aller se retrouve décalée au retour. C'est de la mesure de cet angle de déviation que Foucault déduit la vitesse de la lumière et obtint  $c = 298.000 \text{ km/s}$ .

Pour la première fois, la vitesse de la lumière pouvait être mesurée sur une table de laboratoire. Le point critique était d'assurer une vitesse de rotation stabilisée à une vitesse très élevée du petit miroir tournant.



**Fig. 8. Appareils utilisés par Foucault pour permettre la rotation du miroir tournant**



**Fig. 9. Détermination de la vitesse de la lumière à l'aide d'un miroir sphérique fixe**

La détermination de la vitesse de la lumière par Léon Foucault a une importance historique supplémentaire. En effet, avant même d'atteindre la précision suffisante pour déterminer la valeur de  $c$ , elle a permis de comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. Cette comparaison était très importante au niveau théorique car deux idées s'opposaient à propos de la vitesse de la lumière :

- La théorie de l'émission. Celle-ci supposait que la célérité de la lumière augmentait avec la densité du milieu, donc elle serait plus élevée dans l'eau que dans l'air. Cette idée était née avec René Descartes et ses analogies mécaniques. Elle était confirmée par Isaac Newton, qui avait généralisé sa théorie de l'attraction dans ses *Principia* de 1687 aux corpuscules lumineux, pour expliquer qu'ils subissaient une accélération uniforme à l'approche d'une interface (d'un dioptre). Elle était rendue compatible avec un principe d'extremum par Pierre-Louis Moreau de Maupertuis qui introduisit pour cela le concept d'action en physique (masse\*vitesse\*longueur).

- La théorie ondulatoire qui faisait hypothèse que la vitesse de la lumière variait dans les proportions inverses à la théorie de l'émission (inversement proportionnelle à l'indice de réfraction de  $n$ , supérieur ou égal à 1), donc plus faible dans l'eau. C'était le point de vue de Christian Huyghens, avec ses surfaces d'ondes, Pierre de Fermat et son principe selon lequel la lumière suit le chemin qui correspond « au temps le plus bref » (en fait est stationnaire au sens de l'extremum d'une fonction du temps). La théorie ondulatoire triomphe avec Augustin Fresnel et son explication de la diffraction au début du XIXe siècle.

#### IV-2-4- Les derniers essais des mesures de la valeur de $c$ .

Depuis, des mesures de plus en plus précises de la célérité de la lumière ont pu être réalisées

- Alfred Cornu améliore encore la précision sur la vitesse de la lumière lors d'expériences qui culminent en 1874 ; il utilise un dispositif de roue dentée dérivé de celui de Fizeau et un trajet de 52 km aller-retour entre l'observatoire de Paris et le tour de Monthéry.

À partir de 1900 d'autres méthodes utilisent les propriétés des ondes électromagnétiques :

- En 1902 en s'aidant des travaux de Cornu, Perrotin, qui a mené des observations à l'Observatoire de Nice, annonce son nouveau résultat à l'académie des sciences :  $c = 299.880 + \text{ou} - 50 \text{ km/s}$ .

- En 1927 Michelson obtient la précision la plus élevée, il utilise un jeu de miroirs tournants auxquels il fait jouer en quelque sorte le rôle d'une roue dentée.

Après la seconde guerre mondiale, la précision est améliorée grâce aux Lasers et la valeur de  $c$  est fixée depuis 1983 à  $299.792,458 \text{ Km/s}$ .

#### IV-2-4- Vitesse de la lumière dans un milieu transparent en mouvement.

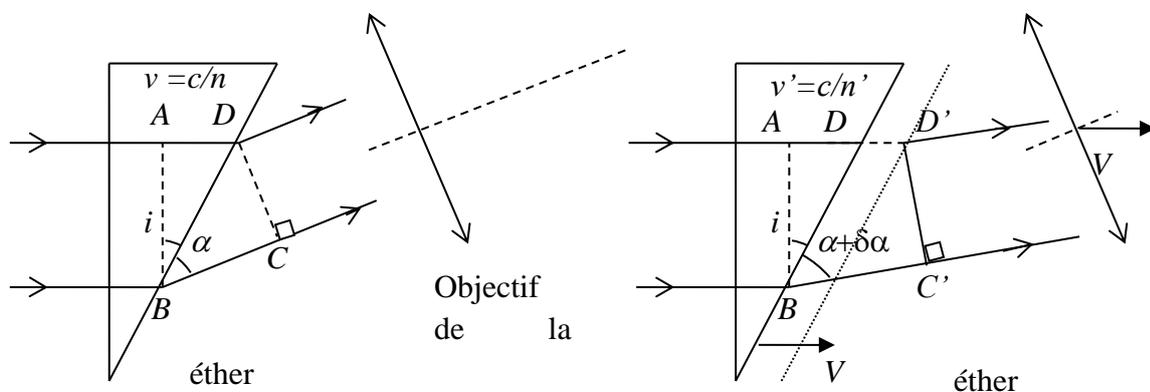
##### IV-2-4-1. Formule de Fresnel

Cette problématique est fondamentale pour la théorie de la relativité restreinte. À la fin du XIXe siècle, elle deviendra celle de l'électrodynamique des corps en mouvement (la lumière étant depuis lors réduite à une onde électromagnétique et la constitution de la matière étant mieux comprise avec une description électronique). La vitesse de la lumière dans un corps transparent en mouvement à la vitesse  $V$  par rapport à un référentiel au repos est donnée par la relation

$v' = c/n + V(1 - 1/n^2)$  où  $n$  est l'indice de réfraction du milieu et  $c/n$  la vitesse de la lumière dans le corps transparent au repos.

Elle a été obtenue par Fresnel en 1818 en partant du constat que le spectre d'une étoile observé à la lunette et donné par un prisme n'est pas sensible à la direction de la vitesse de la terre (l'étoile est observée au lever ou au coucher ou a six mois d'intervalle), dans sa composition avec celle de la lumière. Cette expérience est connue sous le nom de « prisme d'Arago ». Le décalage du spectre induit par le prisme en mouvement doit donc être compensé exactement par l'effet d'aberration stellaire, ce qui entraîne la nécessité de la relation ci-dessus. Une analyse concise, reproduite ci-dessous, en a été donnée récemment dans une revue pédagogique (Bracco et Provost, 2014). Elle est reproduite ci-dessous.

« Dans sa lettre à Arago, Fresnel analyse l'expérience du prisme dans le cadre d'une théorie ondulatoire de la lumière dans l'éther. Pour le prisme au repos éclairé par une étoile sous incidence normale (cf. Fig 10) la loi de la réfraction  $n \sin i = \cos \alpha$  s'obtient en exprimant que le temps mis par la lumière sur les trajets  $AD$  et  $BC$  (entre deux plans d'ondes orthogonaux aux rayons) sont égaux, soit  $AD/(c/n) = BC/c$ . Pour le prisme en mouvement à la vitesse  $V$  parallèle à la direction de la lumière incidente, Fresnel fait remarquer que si la lumière sort du prisme en  $B$ , elle n'en sortira pas en  $D$ , mais en point  $D'$  décalé. S'appuyant sur la relation  $AD'/(c/n') = BC'/c$ , où  $c/n'$  est la vitesse de la lumière sur  $AD'$  donnée par  $c/n + V(1 - 1/n^2)$ , il répond à Arago que l'angle à la sortie du prisme, dans l'éther, est modifié de  $\delta\alpha = V \cos(\alpha + i)/c$ , mais que pour un observateur se déplaçant avec le prisme,  $\delta\alpha$  est exactement compensé par l'effet d'aberration (avec  $\theta = \alpha + i$ ) ».



**Fig. 10 : Dispositif d'Arago au repos et en mouvement.**

Par la théorie ondulatoire de la lumière (analyse de la progression des plans d'onde), Fresnel montre que la vitesse  $v'$  de la lumière par rapport au référentiel héliocentrique doit être celle indiquée ci-dessus. Ce n'est donc plus une simple composition galiléenne, auquel cas, on aurait eu  $c/n+V$ , où  $V$  est la vitesse de la terre dans le référentiel héliocentrique.

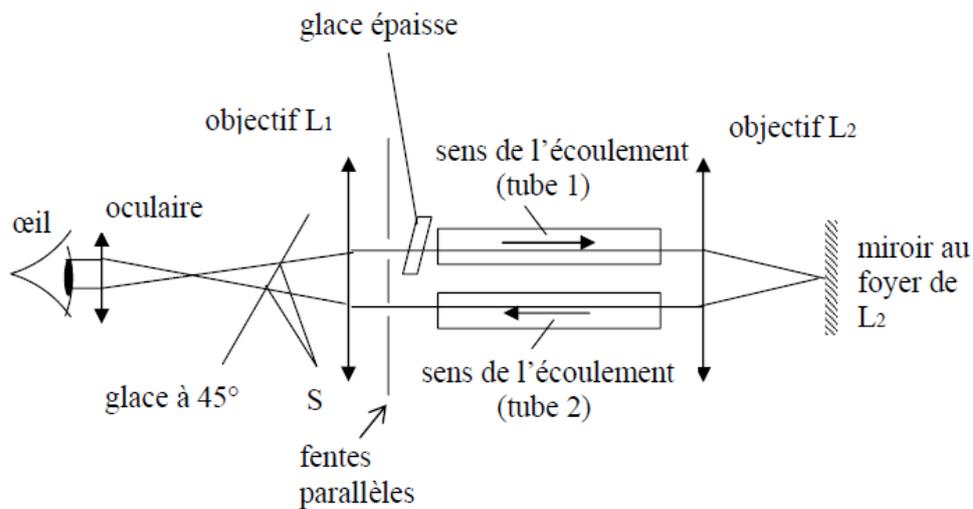
Notons que Fresnel interprète sa relation en termes d'entraînement ou non de l'éther, le milieu de propagation des ondes lumineuses, dont il donne par ailleurs la première description mécanique. Si le coefficient de  $V$  est égal à 1, c'est que l'entraînement de l'éther est total. S'il est nul, c'est qu'il n'y a pas d'entraînement, mais au contraire un « vent d'éther », celui-ci s'écoulant librement à travers les corps. La formule de Fresnel indique donc de ce point de vue un curieux « entraînement partiel » de l'éther.

Fresnel conclut cependant dès 1818, conscient de la généralité de son résultat, qu'il est impossible de détecter le mouvement de la terre dans l'éther par des expériences de réfraction. C'est la première application du principe de la relativité en dehors de la mécanique comme nous l'avions annoncé plus haut.

#### IV-2-5- Expérience de Fizeau.

Cette expérience tient un rôle central dans le développement des idées d'Einstein sur la relativité. C'est la seule qu'il cite explicitement dans son livre de vulgarisation que nous étudierons. C'est aussi à elle qu'il fait référence dans son article de 1905 sur l'électrodynamique des corps en mouvement, qui fonde la théorie de la relativité restreinte. Nous verrons plus loin qu'en appliquant la loi de composition relativiste des vitesses à l'expérience de Fizeau, on montre par un développement à l'ordre 1 en  $v/c$  qu'elle donne l'expression de Fresnel. Ainsi, « *pour tester la formule de Fresnel, Fizeau réalise en 1851 un interféromètre sur la base de l'expérience des fentes d'Young (en montage de Fraunhofer). Les faisceaux parallèles parcourent les branches d'un tube en U horizontal où circule de l'eau, dans le sens de l'écoulement pour l'un des faisceaux et dans le sens contraire pour l'autre. Partant du repos, les franges d'interférences (observées à l'oculaire) sont déplacées en des sens opposés lorsque le sens de l'écoulement est inversé* » (Bracco et Haspot, 2015).

On peut schématiser ce dispositif de la manière suivante :



**Fig. 11. Expérience interférométrique de Fizeau.**

Fizeau relate son expérience dans les Comptes Rendus hebdomadaires de l'académie des sciences (Fizeau 1851) : « *Du foyer d'une lentille cylindrique, les rayons solaires pénétraient presque aussitôt dans la première lunette par une ouverture latérale très-voisine de son foyer. Une glace transparente, dont le plan faisait avec l'axe de la lunette un angle de 45 degrés, les envoyait par une réflexion dans la direction de l'objectif.*

*En sortant de l'objectif  $L_1$ , les rayons, devenus parallèles entre eux, rencontraient une double fente, dont chaque ouverture correspondait à l'entrée de l'un des tubes. Un faisceau de rayon très-étroit pénétrait ainsi dans chaque tube, et le traversait dans toute sa longueur (1,487 m).*

*Les deux faisceaux, toujours parallèles entre eux, atteignaient l'objectif de la seconde lunette  $L_2$ , s'y réfractaient, et, par l'effet de cette réfraction, allaient se réunir à son foyer. Là ils rencontraient le plan réfléchissant d'un miroir perpendiculaire à l'axe de la lunette, et subissaient une réflexion qui les renvoyait en arrière vers l'objectif ; mais, par l'effet de cette réflexion, les rayons avaient échangé leurs routes, de sorte que celui qui était à droite auparavant se trouvait à gauche après la réflexion, et réciproquement. Après avoir traversé de nouveau l'objectif et être ainsi redevenus parallèles entre eux, ils pénétraient une seconde fois dans les tubes ; mais, comme ils étaient intervertis, celui qui avait passé par l'un des tubes en allant, passait par l'autre tube au retour.*

*Après leur second trajet à travers les tubes, les deux faisceaux traversaient de nouveau la double fente, rentraient dans la première lunette et venaient interférer à son foyer en passant à travers la glace transparente. Là ils formaient par leur action mutuelle des franges d'interférence que l'on observait avec un oculaire portant des divisions à son foyer.*

*Il fallait que les franges fussent très-larges afin de pouvoir apprécier de petites fractions de la largeur d'une frange. J'ai trouvé que l'on obtient ce résultat, tout en conservant une grande intensité de lumière, en plaçant au devant de l'une des fentes une glace épaisse que l'on incline de manière à voir les fentes par l'effet de la réfraction, comme si elles étaient plus rapprochées qu'elles ne le sont en réalité [...].*

*Relativement au mouvement, on voit [...] que les deux rayons sont soumis à des influences opposées. Si l'on suppose, en effet, que dans le tube situé à droite, de l'eau coule vers l'observateur, celui des deux rayons qui viendra de la droite aura parcouru le tube dans le sens du mouvement, tandis que le rayon venant de la gauche l'aura parcouru dans un sens contraire à celui du mouvement ».*

Il observe un déplacement des franges d'interférences produites par l'interféromètre lorsque l'eau circule dans les tubes. Avec une vitesse de l'eau de  $7,069 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  il mesure une déviation de 0,40 interfranges proche de la valeur de 0,46 interfranges prédite à partir de la théorie de Fresnel. Ce déplacement n'est sensible que pour des corps beaucoup plus réfringents que l'air, conformément à la théorie de Fresnel.

Il commente alors : « *Ce résultat est ensuite comparé à ceux que l'on déduit par le calcul des diverses hypothèses relatives à l'éther. Dans la supposition de l'éther entièrement libre et indépendant du mouvement des corps, le déplacement devrait être nul. Dans l'hypothèse où l'éther serait uni aux molécules des corps, de manière à partager leurs mouvements, le calcul donne, pour le déplacement double [obtenu après inversion du sens de l'écoulement], la valeur 0,92. L'observation a donné un nombre moitié plus faible, ou 0,46. Dans l'hypothèse où l'éther serait partiellement entraîné, suivant la théorie de Fresnel, le calcul donne 0,40, c'est à dire un nombre très-voisin de celui qui a été trouvé par l'observation [...].* ».

Cette formule d'entraînement de Fresnel sera interprétée en 1895, par le physicien hollandais Hendrik Antoon Lorentz, sur la base de l'introduction du « temps local »  $t' = t - Vx/c^2$ , prélude à la théorie de la relativité restreinte. Quant aux corps opaques, ils doivent laisser passer

librement l'éther, pour expliquer l'aberration, ce que Michelson et Morley tenteront de mettre en évidence en 1887 avec leur célèbre interféromètre.

#### IV-3- Conclusion :

En se référant à l'histoire des sciences, nous avons bien montré que le concept relativité du mouvement, l'utilité du choix d'un référentiel pour décrire le mouvement et le changement de référentiel existaient depuis l'époque de Galilée, la relativité du mouvement et le temps absolu étant expliqués par la transformation galiléenne connue des élèves du secondaire. Cette transformation pourra aider l'enseignant à introduire la transformation de Lorentz (1895), qui est à la base de notre première approche de la relativité restreinte.

Cette approche, simple et sans formalisme mathématique complexe a pour but aussi de faire le lien entre la mécanique classique (relativité galiléenne) et la mécanique relativiste (relativité einsteinienne) et à faire prendre conscience aux élèves que la science évolue en surmontant les obstacles rencontrés. C'est pourquoi, à partir de l'histoire des sciences, nous avons montré l'importance accordée à la détermination de la valeur de la vitesse de la lumière  $c$  depuis l'époque de Galilée.

Plusieurs mesures de la valeur de  $c$  citées si haut, différentes expériences et observations astronomiques, et le processus de synchronisation des horloges utilisant l'invariance de cette vitesse au premier ordre, ont permis à Albert Einstein de formuler ces résultats pour énoncer le deuxième postulat d'invariance de  $c$  de sa théorie.

Mais malheureusement la vitesse de la lumière n'a pas eu sa vraie place dans les programmes officiels des sciences physiques en Tunisie et cette négligence pourrait mener les élèves et même les enseignants à plusieurs conceptions erronées et par la suite à des obstacles à l'apprentissage comme :

- la célérité de la lumière est considérée par la majorité des élèves comme une constante identique aux autres constantes de la physique exemples :  $h, G, k, \dots$  qui a une valeur très grande et presque infinie (impossibilité de sa mesure). (Remarque :  $G, h, c$  et  $k$  sont toutes importantes car elles permettent de définir la longueur, la masse, le temps et la température de Planck et déterminent les lois de la physique).

- La célérité de la lumière est une constante qui est liée généralement à un seul nom, celui d'Albert Einstein puisqu'elle est introduite avec ses postulats et la majorité des élèves oublie que d'autres physiciens ont été à la base de la mesure de  $c$  et de son invariance.

- La majorité des élèves considère encore que la lumière est une propriété de la matière et qu'elle est un phénomène instantané (idées d'Aristote) (voir l'analyse du questionnaire (pré-test) proposé aux élèves du secondaire (chapitre IX)).

## Chapitre V

Analyse des chapitres écrits par Albert Einstein sur sa nouvelle théorie : la relativité restreinte et les problèmes de son articulation en termes de contenus des programmes d'enseignement

## V-1-Introduction :

Malgré l'importance de la théorie de la relativité dans ses apports à la physique moderne, en lien avec l'électromagnétisme et la mécanique, de sa valeur heuristique et de ses résultats généraux vérifiés de nos jours par des expériences, nous avons vu que cette théorie n'était enseignée que partiellement dans les programmes officiels de physique du secondaire dans des pays comme la France et l'Italie, et non abordée dans d'autres pays, comme la Tunisie.

En adoptant un point de vue historique, nous devons remarquer que la diffusion de la théorie de la relativité restreinte ne s'est elle-même pas fait simplement à l'époque. En effet, au vu de l'importance de cette théorie dans l'évolution des idées scientifiques, du contexte scientifique, philosophique, culturel et politique de l'époque, ce travail a suscité beaucoup de débats et critiques dont les origines et les motivations ont été très diverses.

De plus, Einstein ne fait aucune référence explicite aux travaux antérieurs d'autres savants dans ses publications de 1905 sur la relativité restreinte (L'électrodynamique des corps en mouvement, en 30 juin 1905 et L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu énergétique ? le 27 septembre 1905). Son ami et collaborateur Michele Besso – qu'Einstein remercie à la fin de l'article de juin - l'invitera à faire une histoire de ses idées dans une lettre de 1923, et insistera tout au long de sa vie auprès d'Einstein. Ainsi Besso écrit-il en 1923 : « *Je n'ai pas pu retrouver la collection complète de tes travaux antérieurs à 1919 [...]. Elle me tenait particulièrement à cœur, car, pour moi, elle redonnait vie à tant de nos discussions. Mais pourquoi cette collection rare ne serait-elle pas mise à la portée de tous, en y ajoutant l'essentiel d'un aperçu historique, de la genèse des problèmes, de ce que tu reprendrais pour des raisons de forme ou de fond, et peut-être même de ce que tu voudrais exprimer autrement [...]. Je pense que tu devrais indiquer dans l'introduction ce qui, au début de tes recherches, était déjà connu des travaux d'autrui : Boltzmann, Lorentz, ensuite Planck ... (en précisant lesquels de leurs écrits).[...]. Je*

*ne cacherais pas au lecteur les fausses routes suivies, car elles sont particulièrement instructives* »<sup>17</sup>.

Le travail d'Einstein, privé de cette perspective peut apparaître de fait comme singulier et isolé, alors qu'il s'inscrit dans une évolution constante des idées sur l'électrodynamique des corps en mouvement depuis Fresnel en 1818 et l'expérience d'Arago de 1810 à Poincaré en 1900 en passant par Lorentz en 1895 comme on l'a vu au chapitre précédent. Si Einstein en a parfaitement conscience, il n'en fait qu'une allusion indirecte et incompréhensible pour des lecteurs non avertis, en annonçant – en passant - dans l'introduction de son article de juin 1905 que sa théorie généralise ce qui était déjà connu auparavant « au premier ordre », c'est-à-dire pour des vitesses de déplacement petites devant celle de la lumière, typiquement en  $V/c$ , ou  $V$  est la vitesse de la terre sur son orbite et  $c$  celle de la lumière (un rapport de  $10^{-4} \ll 1$ ). C'est en partie cette méconnaissance historique, mais aussi la poursuite, à des fins d'analyse épistémologique, d'objectifs différents de ceux de l'enseignement de la physique, qui conduit à penser la relativité restreinte en terme de « révolution scientifique » et à l'éloigner des bases qui sont les siennes, ce sur quoi nous reviendrons dans les chapitres 7 et 8. En ce sens, notre travail s'inscrit dans une analyse critique des fondements de la théorie de la relativité restreinte, dans un but didactique et pédagogique. Notons qu'Einstein lui-même, en tant que physicien, considérait sa propre théorie comme un prolongement de la relativité galiléenne et non pas comme une rupture (à la différence de ses travaux sur les quanta, qu'il qualifiait lui-même de « révolutionnaires »). Thomas Kuhn, en tant que philosophe des sciences et épistémologue, a promu l'idée d'un « changement de paradigme » pour la relativité restreinte vis-à-vis de la relativité galiléenne.

Cette conception basée sur l'idée des discontinuités radicales entre paradigmes incommensurables a été questionnée par de nombreux épistémologues <sup>18</sup>. Ce n'est pas

---

<sup>17</sup> Albert Einstein-Michele Angelo Besso, correspondance 1903-1955 traduction, notes et introduction de P.Speziali, Paris, Hermann, 1972.

<sup>18</sup> Voir à ce propos le débat relaté dans le livre de A. F. Chalmers *What is this thing called Science ?* (1976) University of Queensland Press, traduction française : *Qu'est que la Science* Biblio essais 1990, chapitre 8, p.166.

dans le cadre restreint de ce travail que nous pourrions discuter de ces questions d'épistémologie générale, mais nous croyons toutefois, qu'une analyse historique critique montrant la constitution et les transformations des concepts et des objets scientifiques doit trouver sa place dans l'enseignement d'une manière complémentaire au questionnement épistémologique (au sens d'une philosophie générale de la connaissance).

Remarquons aussi que c'est la théorie de la relativité générale qui va assurer la renommée internationale d'Einstein au-delà du cercle des scientifiques. La courbure des rayons lumineux au voisinage du soleil, observée à la faveur d'une éclipse par le déplacement apparent des étoiles d'arrière-plan sur une plaque photographique, présentée par Arthur Eddington à la Royal Society en 1919 sous le portrait de Newton, va faire d'Einstein le rénovateur de la « philosophie naturelle », le hissant au rang d'un nouveau Newton. En effet, cette observation astronomique accrédite la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui donne une nouvelle description de la gravitation, une théorie par laquelle Einstein avait déjà expliqué la précession résiduelle du périhélie de Mercure de 43 secondes d'arc par siècle dès 1915. Mais aucune expérience ne vient alors accréditer les prédictions de la théorie de la relativité restreinte antérieure, et en particulier, les relations entre les durées mesurées dans différents référentiels inertiels, illustrées par le célèbre paradoxe des jumeaux proposé par le physicien français Paul Langevin en 1911, qui ne peut alors être considéré que comme une « expérience de pensée ». Il faudra attendre les années 1940 pour voir les premiers tests de la théorie, qui demande d'observer des particules ayant des vitesses proches de la lumière avec des détecteurs performants (désintégration des muons cosmiques) ou de pouvoir comparer des horloges très précises embarquées sur des avions avec les indications d'horloges au sol (expérience de Hafele-Keating) pour que la théorie de la relativité restreinte entre dans le champ expérimental. Mais ces expériences sont parfois difficiles à analyser, sont discutées de manière critiques par d'autres physiciens, la relativité générale entrant également en compte dans l'explication de l'expérience de Hafele-Keating par exemple. Ce défaut d'une base expérimentale a longtemps été aussi un frein à la diffusion de la relativité restreinte dans l'enseignement, comme on l'a souligné dans la partie A.

Le caractère non absolu du temps, ontologiquement associé à la théorie de la relativité restreinte, va quant à lui faire l'objet de débats philosophiques, portés par Emile Meyerson notamment, et va trouver une opposition chez Bergson,

La théorie d'Einstein, qui repose sur des « principes » est vue par certains physiciens, comme trop « spéculative » (l'un de ses principaux opposants, Lenard, sera par ailleurs un fervent adepte du parti national socialiste en Allemagne, quelques années plus tard).

C'est dans ce contexte qu'Albert Einstein écrit en 1916 son livre intitulé *La théorie de la relativité restreinte et Générale* pour partager ses idées avec le grand public, dans une volonté explicative, à l'invitation encore de son collègue, ami et collaborateur pendant les années 1901-1914, Michele Besso (Frenk et Komnetsov, 1974). Einstein a donc voulu, par la publication de ce livre, permettre au maximum de gens intéressés par la relativité, ainsi qu'à des spécialistes dans des domaines différents, de la comprendre et de connaître son utilité pour l'évolution des sciences et en particulier pour l'évolution des concepts en physique. Il énonce et essaie de justifier avec clarté les principes de base de sa théorie. Son livre est divisé en trois grandes parties : la théorie de la relativité restreinte, la théorie de la relativité générale et la cosmologie ; chaque partie est rédigée sous forme de chapitres courts et dans un langage simple. Nous allons nous intéresser à la première partie du livre qui concerne la théorie de la relativité restreinte.

Dans l'analyse des chapitres rédigés par A. Einstein, nous allons découvrir comment il a voulu présenter son point de vue essentiellement logique dans l'analyse des concepts de sa théorie, de façon à ce qu'elle soit compréhensible par des lecteurs intéressés par les nouveaux enjeux scientifiques, des lecteurs qui incluent également des élèves de lycée, de formation scientifique ou philosophique. Insistons sur le fait que dans son ouvrage, l'auteur, tout en maintenant un discours extrêmement précis et rigoureux, ne fait pas appel à des formules mathématiques (les transformations de Lorentz sont reléguées en annexe) et ne détaille aucune expérience sophistiquée. Tout nous porte donc a priori considérer cet ouvrage comme le premier support didactique et pédagogique de présentation de la théorie de la relativité, par son inventeur lui-même et nous invite à examiner son impact pour des élèves aujourd'hui, en en soulignant les points forts et les limitations, sur lesquels nous reviendrons au chapitre VII. Notre analyse a donc pour objectif de voir si ces textes sur la théorie de la relativité restreinte pourront être transposables en classe avec des étudiants ou des élèves du Terminales.

Si A. Einstein, dans la rédaction de son livre, a lui-même utilisé une approche pédagogique et didactique, l'un des principaux intérêts de ce livre réside dans la progression logique du raisonnement. Einstein reprend pas à pas la théorie de la mécanique classique, pour montrer ses obscurités, ses hypothèses implicites et cachées, bref ses difficultés, et pour indiquer comment la nouvelle théorie de la relativité représente la solution à ces difficultés. Il montre l'insuffisance des lois de la mécanique newtonienne pour l'électromagnétisme et le caractère ondulatoire de la lumière et la nécessité d'introduire des nouveaux postulats pour fonder une nouvelle théorie. Nous nous proposons donc au début de ce chapitre d'analyser les textes rédigés par A. Einstein concernant la théorie de la relativité restreinte du point de vue didactique et philosophique et de discuter leurs rapports à l'enseignement.

## V-2-La Théorie de la relativité restreinte d'après le livre d'A. Einstein

### V-2-1- Chap1: Le contenu physique des propositions géométriques :

Dans ce chapitre, Albert Einstein, s'intéresse à la nature de la mesure et insiste sur l'importance des corps rigides pour les lois de la géométrie physique. Il montre que la géométrie d'Euclide est imposée dans l'apprentissage des élèves en mathématiques depuis leur plus jeune âge, qu'elle constitue pour eux une vérité à partir des représentations plus au moins claires et intuitives et de certaines propositions simples appelées axiomes, mais est ce que ces axiomes sont vrais ?

A. Einstein écrit :

*« on sait depuis longtemps que non seulement on ne peut répondre à cette question mais qu'elle n'a en elle-même aucun sens <sup>19</sup> ».*

Cette question n'a pas de sens puisque la vérité des axiomes devrait s'établir par leur adéquation à des états de choses réels, c'est-à-dire à des faits d'expérience, dont la concordance avec les conséquences des axiomes serait mesurable.

---

<sup>19</sup> Einstein, La théorie de la relativité restreinte et générale, 1916, Paris, Ed.Dunod, p : 4.

Or la géométrie s'occupe seulement des rapports logiques entre ses propositions mais les propositions géométriques se rapportent plus au moins exactement aux objets de la nature, alors comment rendre cette concordance possible ? Pour cela, il faut ajouter un postulat tel que : à deux points d'un corps pratiquement rigide correspond toujours la même distance quelque soit le changement de position que nous lui fassions subir (position qui dépend du repère choisi).

La géométrie ainsi complétée par ce postulat doit être traitée comme une branche de la physique, donc sa vérité devient imparfaite puisqu'elle dépend de la mesure de la distance de ce corps, c'est-à-dire de l'interprétation physique de la distance.

Einstein rappelle à la fin de ce chapitre que la « vérité » des propositions géométriques, considérées repose ainsi sur des expériences qu'il appelle « imparfaites » et il renvoie aux chapitres sur la relativité générale, pour une critique plus poussée de la notion de mesure des distances relatives entre corps rigides.

Einstein s'oppose en cela au point de vue de Poincaré, pour lequel l'expérience ne peut tester la géométrie et que la géométrie est une affaire de convention. Le cinquième postulat de la géométrie euclidienne portant sur la notion de droites parallèles peut ainsi être changé et conduire à de nouvelles géométries, comme celle de Lobatchevski, qui pour Poincaré, peut toujours être traduit dans un langage euclidien, comme il a lui-même contribué à le faire.

#### V-2- 2- Chap2 : Le système de coordonnées :

Dans ce chapitre, A. Einstein, définit la mesure à partir d'une règle graduée (bâtonnet S). Il déclare que la mesure de la distance entre deux points d'un corps rigide présuppose la possibilité de répéter une unité de mesure autant de fois que l'on veut sur le corps supposé réel, donc un système de coordonnées peut être interprété comme un corps rigide.

Pour décrire un lieu où se produit un événement, il est nécessaire d'indiquer le point du corps rigide qui coïncide avec cet événement. Peut-on alors discerner des points sur la surface de n'importe quel corps rigide ? Oui par la construction d'un système de coordonnées cartésien :

a/ En prolongeant le corps rigide

b/ En utilisant un nombre au lieu de points marqués par un nom

c/ En utilisant des moyens variés tel que des observations optiques en tenant compte des propriétés de la propagation de la lumière.

C'est une manière indirecte de faire la mesure mais la seule qui puisse préciser les résultats de la physique et de l'astronomie.

Dans ce deuxième chapitre Albert Einstein insiste sur l'importance du repérage d'un point dans l'espace qui coïncide avec un événement, ce repérage se réalise en mesurant les distances apportées à trois axes perpendiculaires constituent un système de coordonnées cartésien composé de trois plans perpendiculaires appartenant à l'espace.

Le point central d'Einstein dans ce chapitre porte en réalité sur les conditions de possibilité de la mesure des grandeurs physique. Einstein souligne que pour réaliser ces mesures il faut supposer des corps rigides et donc des droites. Ce qui importe, d'un point de vue physique, c'est que l'on puisse considérer une droite comme le plus petit chemin joignant deux points sur un corps rigide.

Entre deux points d'un corps pratiquement rigide, doit correspondre toujours la même distance. L'importance des corps rigides pour la construction de l'espace perceptif, renvoie implicitement à la description de Poincaré<sup>20</sup>

D'après toutes ces discussions scientifiques et philosophiques sur l'espace physique, l'espace géométrique et l'expérience, l'introduction de l'espace euclidien même s'il paraît facile comme a relevé A Einstein dans son premier chapitre, reste délicate pour la conception de l'élève à propos de la relativité de l'espace et donc nous devons tenir compte de cette difficulté surtout au moment où nous abordons la relativité.

### V-2-3- Chap3 : Espace et temps dans la mécanique classique :

Au début de ce chapitre Einstein dit :

*« Si... je défini la tâche de la mécanique dans les termes suivants : ... je charge ma conscience de quelques pêchés mortels contre le saint esprit de la clarté et ces pêchés doivent tout d'abord être dévoilés<sup>21</sup>. »*

---

<sup>20</sup> Poincaré, *La Science et l'hypothèse*, chapitre IV, la section : Les corps rigides et la géométrie, 1902, Ed. Flammarion, pp : 85-87.

<sup>21</sup> Einstein, *La théorie de la relativité restreinte et générale*, 1916, Paris, Ed.Dunod, p. 11.

Cela veut dire que la définition donnée par Einstein de la mécanique est la définition traditionnelle et classique. Il faut donc dévoiler par une analyse logique ce qu'il y a d'obscur dans cette définition, pour pouvoir assoir la « nécessité logique » de sa nouvelle théorie, seule capable d'éliminer ces obscurités. Les obscurités sont bien évidemment liées aux notions de lieux et de temps. Le point théorique est clair. Lorsqu'elle veut décrire le mouvement des corps, la mécanique de la fin du XIX siècle, bien qu'elle ne souscrit plus à la conception newtonienne d'un espace et d'un temps absolus, continue à utiliser de manière obscure et implicite les notions de distance et de durée, comme des absolus.

Notre description de l'exemple qui suit du train est toute galiléenne. Ce qu'Einstein veut souligner ce sont justement les hypothèses implicites utilisées dans le concept galiléen de relativité du mouvement. Dans la théorie classique, le mouvement est relatif, mais les distances et les durées sont absolues. Dans notre discussion de l'exemple du train nous soulignons l'importance de la notion de système de coordonnées de référence, et l'insistance d'Einstein sur la nécessité que le système de coordonnées spatiales soit « rigidement lié au wagon » ou « au sol » et le fait que la mesure du temps présuppose l'échange des mesures des durées entre des observateurs. Il faut deux horloges identiques en deux lieux différents. Parler « d'un système de coordonnées cartésien relatif à chaque instant du temps » Einstein présuppose la possibilité de parler d'un lieu du repère et d'un écoulement absolu de ces instants du temps, ce qui fait justement problème à ses yeux.

Dans ce chapitre, A. Einstein choisit l'exemple du train. Cet exemple est familier et moderne pour le lecteur contemporain d'Einstein suite au développement récent du réseau ferroviaire. Einstein modernise en quelque sorte l'expérience du bateau de Galilée. Le train roule à une vitesse constante et en ligne droite (mouvement de translation uniforme). Einstein donne l'exemple suivant :

Laissons tomber une pierre tenue dans notre main, sur le sol du wagon. Elle tombe en ligne droite (comme la pierre lâchée du haut du mât d'un bateau voguant à vitesse uniforme et sans secousses pour Galilée).

Mais un observateur situé sur le talus verra la pierre tomber en décrivant une parabole (composition du mouvement de chute verticale accélérée uniformément de la

pierre sous l'effet de son poids et du mouvement de translation rectiligne et uniforme du wagon).

La trajectoire que la pierre décrit réellement est-elle une droite ou une parabole ? Que signifie en outre mouvement dans l'espace ?

La question n'a de sens que si l'on décrit le système de coordonnées de référence (train ou quai). Il n'y a pas de trajectoire en soi c'est-à-dire une trajectoire absolue mais seulement une trajectoire par rapport à un corps de référence déterminé : système de coordonnées cartésien relatif à chaque instant du temps.

C'est la relativité de l'espace qui est mise en jeu. A. Einstein prend soin de préciser que cette discussion est menée avec l'hypothèse d'une vitesse de la lumière infinie, pour préparer la suite de sa discussion.

Remarquons que c'est une expérience que l'on peut faire aujourd'hui avec des élèves avec un vélo, une balle et une webcam dès la classe de seconde française ou la classe de première année secondaire tunisienne pour introduire le principe de relativité galiléen.

#### V-2-4- Chap4 : Le système de coordonnées de Galilée.

L'objet de ce chapitre pour Einstein est de souligner que :

« *Ce n'est que pour les systèmes de coordonnées galiléens que les lois de Galilée Newton sont valables* »<sup>22</sup>

Or ces systèmes de coordonnées, objets mathématiques avant tout, doivent recevoir dans la formulation des lois de Galilée Newton, une interprétation physique particulière. En effet la loi d'inertie, selon Einstein, prescrit quels systèmes d'inertie sont admissibles et peuvent être employés pour la description mécanique du mouvement et lesquels ne le peuvent pas. Le principe d'inertie en discriminant des corps selon leur état de mouvement, prescrit que les repères soient associés à des corps qui ne sont pas soumis à des changements de vitesse et qui ne décrivent pas un mouvement circulaire, c'est d'ailleurs l'un des objectifs de la relativité générale que d'éliminer une telle interprétation physique des systèmes de coordonnées.

---

<sup>22</sup> Ibid.p. 13.

#### V-2-5- Chap5 : Le principe de relativité (au sens restreint)

Einstein est convaincu que sa théorie, clarifie ce qui était obscur dans les lois de Galilée-Newton, d'où la possibilité, de son point de vue, d'une description logique de la théorie de la relativité, qui laisse en arrière-plan son contenu mathématique. Or à cet état de la description, il faudra encore utiliser des concepts tels que celui de translation rectiligne uniforme, qui dans la théorie de la relativité générale seront mis en question. D'où des phrases d'Einstein telles que « pour être aussi clair que possible »<sup>23</sup> etc. Il ne faut pas oublier que ces questions seront reprises dans la deuxième partie sur la relativité générale.

Par le choix du même exemple que (le wagon du train, le talus, l'observateur dans le train) et d'autre part pour généraliser la relativité galiléenne et énoncer le principe de relativité au sens restreint, Einstein précise :

« Si  $K$  est un système de coordonnées galiléen,  $K'$  est relativement à  $K$  un système de coordonnées qui effectue un mouvement uniforme sans rotation, les phénomènes de la nature se déroulent relativement à  $K'$  conformément aux mêmes lois générales que relativement à  $K$  »<sup>24</sup>.

A. Einstein donne l'exemple du corbeau volant avec un mouvement de translation, rectiligne et uniforme dans le sens de la marche du train, le long de la voie, pour décrire la vitesse du corbeau, il précise que pour l'observateur du talus, la vitesse et la direction du corbeau seront différentes de celles notées par le voyageur, mais il restera rectiligne et uniforme (conformément à la loi d'inertie).

Le principe de relativité, tel que l'on vient de le décrire (où le mouvement est de même nature vis-vis d'une classe restreinte de repères, les repères qui effectuent un mouvement uniforme sans rotation) vaut-il dans tous les domaines de la physique? La réponse d'Einstein est non, car les phénomènes de l'électrodynamique et de l'optique ne se conforment pas aux présupposés de la mécanique classique, illustrée dans les sections 2-4 et duquel le principe de relativité dépend.

---

<sup>23</sup> Ibid. p.15

<sup>24</sup> Ibid, p. 15.

Devons-nous alors renoncer à ce principe avec le reste de la mécanique classique?

La question se pose, bien que dans le cadre de la mécanique classique ce principe constitue une condition de possibilité de la description du mouvement et donc des phénomènes de la nature. Si les lois du mouvement n'étaient pas invariantes (au moins relativement à une classe de repères) le mouvement ne serait simplement pas descriptible du tout et donc en un sens il ne serait pas du tout un phénomène.

Einstein souligne donc les raisons qui suggèrent de ne pas rejeter ce principe de relativité malgré les phénomènes optiques et électrodynamiques qui ne s'y conforment pas. Ces raisons sont les suivantes :

a) ce principe de relativité nous permet de décrire avec « une précision merveilleuse » les mouvements des corps célestes.

b) la seule solution alternative au principe de relativité restreinte semble être la réintroduction, à la place des repères galiléens, d'un repère unique  $K_0$  au repos absolu, vis-à-vis duquel tous les mouvements auraient des directions absolues et des vitesses absolues. Il devrait y avoir donc une anisotropie de l'espace telle que les systèmes physiques ne pourraient être décrits qu'en prenant en compte l'orientation d'un corps vis-à-vis de ce repère absolu, mais aucune expérience n'a mis en évidence une telle anisotropie.

A. Einstein explique que le principe de relativité confirme l'idée que les phénomènes de la nature se déroulent selon les mêmes lois quel que soit le système de référence envisagé. Seule la façon de les décrire peut varier.

Il s'intéresse à l'émission d'une onde sonore dans la direction du mouvement et perpendiculairement à celui-ci (page 17) et de l'effet Doppler qui s'ensuit :

*« On devait s'attendre, par exemple, à ce que la hauteur du son d'un tuyau d'orgue soit différente suivant que l'axe de ce tuyau est parallèle ou perpendiculaire à la direction du train »<sup>25</sup>.*

Einstein est en train de déployer son raisonnement à partir de la question cruciale indiquée précédemment concernant les phénomènes optique et électrodynamique qui

---

<sup>25</sup> Ibid.p 17.

ne se conforment pas au principe de relativité si celui-ci est compris dans le cadre de la mécanique classique et donc selon les quatre prémisses explicitées dans les quatre premiers chapitres. Le chapitre 7 explique cette incompatibilité qui n'est ici qu'énoncée et suggère la solution.

#### V-2-6-Chap6 : Le théorème de l'addition des vitesses d'après la mécanique classique

Supposons que le train roule à une vitesse  $v = 100$  km/h et qu'un homme se déplace dans le wagon, dans le sens de la marche à la vitesse  $w = 4$  km/h.

Quelle est sa vitesse  $W$  par rapport au talus ?

$W = w + v$  soit  $100 + 4 = 104$  km/h

Nous verrons par la suite que cette loi d'addition des vitesses galiléenne n'est pas tout à fait exacte et devient fautive pour les vitesses proches de la vitesse de la lumière. Il faut insister sur cette limite avec les élèves pour qu'ils comprennent l'utilité de l'introduction de la théorie de la relativité restreinte. Nous renvoyons au chapitre précédent pour une discussion de ce résultat dans le cadre de la cinématique galiléenne.

#### V-2-7-Chap7 : L'incompatibilité apparente de la loi de la propagation de la lumière et du principe de relativité.

C'est ainsi qu'A. Einstein a voulu effectivement formuler la problématique issue de ce dernier résultat, la loi d'addition des vitesses galiléenne. Elle ne peut pas être maintenue à tous les mouvements de la nature, sans violer le principe de la constance de la vitesse de la lumière qu'il va introduire, et donc elle n'est pas tout à fait exacte.

L'incompatibilité signalée au chapitre 5, n'est peut-être qu'apparente entre le principe de relativité et la loi de propagation de la lumière.

Il suppose que chacun sait, ou croit savoir, que la lumière se propage dans le vide en ligne droite à la vitesse  $c$  constante : cette vitesse ne dépend pas de la vitesse avec laquelle se meut la source lumineuse ni de la direction dans l'espace, elle est égale à 300 000 km/s et il reprend l'exemple du train et du talus :

En supposant qu'un rayon lumineux envoyé le long du talus, depuis celui-ci en direction de la marche du train, le rayon se propage à la vitesse  $c$  par rapport à l'observateur du talus.

Quelle est la vitesse  $W$  du rayon lumineux par rapport à l'observateur du wagon roulant à 100 km/h ?

Réponse selon la mécanique classique :  $W = c - v$

De même, un rayon lumineux projeté de l'intérieur du train dans le sens de la marche aurait une vitesse  $W = c + v$ , vue par l'observateur du talus.

Ceci contredit le principe selon lequel la vitesse de la lumière est constante quelle que soit le système de référence choisi. Notons que ce principe est lui-même une conséquence directe du principe de relativité appliqué à l'électromagnétisme où la lumière est décrite par une équation d'onde. Einstein fera lui-même une allusion, dans une note de son article sur l'équivalence masse-énergie en 1905, sur ce lien entre ses deux principes. (Notons qu'avec une vitesse infinie de la lumière, il n'y a plus d'incompatibilité, mais l'observation a contredit cette éventualité depuis le XVIIe siècle).

Dilemme : Doit-on alors rejeter le principe de relativité ou la loi de propagation de la lumière, qui a été formalisée dans la théorie électromagnétique de Maxwell ?

Or les travaux de H.A. Lorentz sur les phénomènes électrodynamiques et optiques présentés par les corps en mouvement montrèrent, dans leur mise en perspective par Poincaré en 1900, qu'ils avaient comme conséquence la constance de la vitesse de la lumière dans le vide (au premier ordre en  $V/c$  en 1900 et à tout ordre en juin 1905). Si Lorentz était plutôt enclin à rejeter le principe de relativité, ce dernier était un principe fondamental de la nature pour Poincaré qui a travaillé à l'émergence d'une nouvelle mécanique avec sa communication à l'académie des sciences et son article en 1905 (Bracco et Provost, 2013).

C'est par une analyse logique des notions physiques de temps et d'espace, qu'Einstein va fonder sa nouvelle théorie : la théorie de la relativité restreinte, qui permet de concilier le principe de relativité avec la loi de la propagation de la lumière, comme on va le voir.

## V-2-8- Chap8 : Sur la notion de temps en physique.

A. Einstein consacre ce chapitre sur la notion du temps en physique, prenant alors l'exemple simple d'éclairs qui tombent sur la voie ferrée. Il met en évidence par une analyse de la simultanéité la nécessité d'une convention pour la mesure du temps.

Pour rendre compte de cette convention nécessaire à la mesure du temps, il introduit une nouvelle notion, celle d'événement, ce qui lui permet de revenir sur l'analyse de la simultanéité. Il définit le concept temps comme suit :

*« On entend alors par le temps d'un événement, l'indication (la position de l'aiguille) de l'horloge immédiatement voisine de l'événement et à chaque événement est associée une valeur du temps qui est observable et mesurable »<sup>26</sup>*

L'introduction de l'horloge pour la mesure du temps est analogue à la règle comme instrument de mesure des longueurs.

C'est ainsi qu'A. Einstein renvoie à la simultanéité et à une convention pour définir le temps marqué par des horloges comme l'avait fait H. Poincaré dans son livre sur science et hypothèse, lu par Einstein, ou son article sur « La théorie de Lorentz et le principe de réaction », cité par Einstein en 1906 (à propos des équations relatives au mouvement du centre de masse d'un système en mouvement émettant de la lumière).

Pour constater la simultanéité de deux événements en deux points  $A$  et  $B$  du chemin de fer, on mesure la distance  $AB$  le long de la voie ferrée et on place au milieu de la droite  $AB$ , un observateur  $M$  muni d'un appareil (miroir) qui lui permet d'observer simultanément les deux points  $A$  et  $B$ .

La simultanéité est la perception au même instant de deux phénomènes ou de deux événements.

La perception simultanée par l'observateur des signaux lumineux provenant des points  $A$  et  $B$  est identifiée par convention à l'identité des intervalles de temps que les rayons lumineux mettent pour parcourir la distance de :  $A$  à  $M$  et de  $B$  à  $M$ .

---

<sup>26</sup> Poincaré.H. Sur la dynamique de l'électron, 1905, Académie des sciences, pp : 1504-1508.

## V-2-9- Chap9 : La relativité de la simultanéité

Une fois qu'A. Einstein a défini la notion de simultanéité, alors il se pose la question suivante :

« Deux événements qui sont simultanés par rapport à la voie, le sont-ils aussi par rapport au train ? »<sup>27</sup>

Dans ce chapitre, A. Einstein reprend l'exemple de l'orage, il suppose un orage au-dessus de notre voie ferrée, sans train.

Deux éclairs tombent au même moment sur deux points de la voie  $A$  et  $B$  situés à égale distance de l'observateur du talus situé en  $M$ . Celui-ci observera la lumière des deux éclairs simultanément.

Considérons maintenant la position de l'observateur dans le train roulant dans le sens de  $A$  vers  $B$ .

Au moment de l'impact des éclairs, il se situe au point  $M'$  qui coïncide avec le point  $M$  du talus au moment de la production des éclairs.

Pendant le temps mis par la lumière des éclairs pour arriver des points d'impact  $A$  et  $B$  au point  $M'$ , le train a parcouru une certaine distance. Le point  $M$  s'est décalé vers  $B$ . L'observateur du train verra l'impact  $B$  avant l'impact  $A$ , donc il n'y a plus simultanéité, et donc la simultanéité absolue par rapport à tous les systèmes de référence doit être rejetée. La simultanéité est relative, ce qui est une conséquence du caractère fini de la vitesse de la lumière. La simultanéité n'a donc de sens que si l'on décrit le système de référence auquel elle se rapporte. Chaque système de référence doit donc avoir son temps propre, contrairement à ce qu'affirme la physique classique avec la notion de temps absolu qui se cachait derrière la loi d'addition des vitesses présentée dans le chapitre 6.

Il y a une sorte de relation de transitivité utilisée par A. Einstein, la simultanéité définit le temps, la relativité de la simultanéité définit la relativité du temps ainsi le temps dépend de l'observateur dans son référentiel galiléen.

Soulignons que l'introduction du concept simultanéité et sa relativité aux élèves présente une difficulté pour comprendre la relativité du temps comme a signalé

---

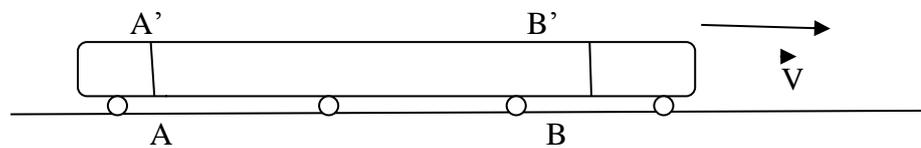
<sup>27</sup> Einstein.A. La théorie de la relativité restreinte et générale, 1916, Ed. Dunod, p. 27.

A.Einstein et qu'il faudrait donc prévoir une expérience réalisable en classe et qui explique cette relativité ... or cette expérience n'est pas évidente.

#### V-2-10- Chap10 : La relativité de la notion de distance spatiale

D'après la relation (1) du chapitre 4, la relativité de la durée impliquera aussi la relativité de la distance. Prenons 2 points sur le train : le milieu du premier wagon (Point  $A'$ ) et celui du dernier (Point  $B'$ ).

Faisons mesurer cette distance par l'occupant du train en reportant  $x$  fois la règle unité (corps rigide, processus de mesure), voir figure suivante :



Reportons à un instant donné les points  $A$  et  $B$  qui coïncident sur le talus avec les points  $A'$  et  $B'$  au moment de leur passage et effectuons la mesure de la distance correspondante.

Rien ne prouve que cette nouvelle mesure corresponde à la première, nous dit Einstein, car la simultanéité du report des points  $A$  et  $B$  sur le talus n'est pas évidente. Le signal donné en  $A$  pour ce report mettra un certain temps pour arriver en  $B$ , temps pendant lequel le train aura avancé.

La chaîne des implications se poursuit... si on définit la longueur d'une règle par les positions simultanées de ses extrémités dans différents référentiels, on aura ainsi différentes longueurs mesurées.

Pour montrer l'enchaînement logique des différents chapitres, nous revenons ci-dessous à partir du chapitre 6 sur une synthèse des différentes propositions introduites par A. Einstein.

Dans le chapitre 6, A.Einstein a voulu poser la loi d'addition des vitesses appliquée en mécanique classique, puis a montré l'incompatibilité apparente de cette loi avec l'optique si on garde constante la vitesse de la lumière (chapitre 7). Dans le chapitre 8, il définit la simultanéité par rapport à la notion d'observateur de manière

naturelle, la simultanéité dépendant du référentiel choisi, donc le temps est relatif aussi à un référentiel déterminé.

Ainsi, on conclut qu'il n'y a pas d'incompatibilité avec la constance de la vitesse de la lumière (chapitre 9) et enfin il montre dans le chapitre 10 qu'avec cette même notion de simultanéité, la relativité de la distance doit aussi être prise en considération.

#### V-2-11- Chap.11 : La transformation de Lorentz.

Avant de parler des transformations de Lorentz, Einstein commence ce chapitre en rappelant le résultat de son analyse logique : deux hypothèses non justifiées rendaient la loi de la propagation de la lumière incompatible avec le principe de relativité. Ces deux hypothèses tacitement admises et non justifiées, que l'analyse des chapitres 8-10 a permis de mettre en lumière, sont les suivantes :

1° L'intervalle de temps qui sépare deux événements est indépendant de l'état de mouvement du corps de référence.

2° La distance spatiale de deux points d'un corps rigide est indépendante de l'état du mouvement du corps de référence » (*La théorie de la relativité restreinte et générale* page 39)

On voit donc bien comment ces hypothèses implicites se cachaient dans l'analyse des notions qui ont été présentées dans les sections 1-4 et qui étaient considérés comme nécessaires à la description physique complète du mouvement. Elles se cachaient comme un résidu non explicité du cadre newtonien. Plus personne au début du XX siècle ne croit que l'espace et le temps soient des absolus, mais presque personne ne voit que durées et distances sont traités comme des absolus dans la physique classique.

Toutefois voir ces hypothèses cachées ne résout pas tous les problèmes. Il faut maintenant substituer aux règles dictées par le théorème de l'addition des vitesses de la mécanique classique, présenté au chapitre 6, des nouvelles règles qui puissent être en accord avec le principe de relativité restreinte et la loi de la propagation de la lumière.

Einstein commence par poser le problème sous la forme de diverses questions :

a/ Comment faire disparaître la contradiction apparente entre la constance de la vitesse de la lumière et la loi d'addition des vitesses ?

b/ Comment déterminer le lieu et le temps d'un événement par rapport au train si on connaît le lieu et le temps de cet événement par rapport au talus ?

c/ Quelle relation doit être établie entre le lieu et le temps des événements pour sauvegarder la constance de la vitesse de la lumière ?

Pour répondre à ces questions, A. Einstein utilise les transformations de Lorentz (TL), différentes de celle de Galilée, introduites par le physicien néerlandais Hendrik Anton Lorentz en 1904 et nommées « transformations de Lorentz » par Henri Poincaré en 1905, comme suit :

Considérons à nouveau nos deux systèmes de référence. Au talus correspond le système de coordonnées  $K$  et au train en mouvement, le système  $K'$ . Tout événement est déterminé :

dans  $K$  par les coordonnées  $x, y, z, t$

dans  $K'$  par les coordonnées  $x', y', z', t'$

Dans le cas du train, on passe de  $K$  à  $K'$  par les équations :

$$x' = (x-vt) / (1-v^2/c^2)^{1/2}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = (t-vx/c^2) / (1-v^2/c^2)^{1/2}$$

où  $v$  est la vitesse du train et  $c$  la vitesse de la lumière.

Einstein donne une démonstration de l'établissement de ces transformations en annexe, attestant en cela qu'elle n'est pas abordable aisément pour son lecteur.

#### V-2-12- Chap12 : Le comportement des règles et des horloges en mouvement

Plaçons une règle de 1 m sur la voie (K). L'origine de la règle est à  $x = 0$  et son extrémité à

$$x = 1 \text{ m.}$$

Quelle est la longueur de la règle vue par l'observateur du train en mouvement ( $K'$ ) ?

Notons que formuler la question ainsi nécessite d'inverser les transformations de Lorentz, puisque le train voit alors passer le talus  $K$  – et la règle – en sens inverse à la vitesse  $-v$ . Ainsi, les coordonnées du système mobile (le talus) par rapport au train (au repos pour l'observateur du train) sont reliées par :  $x = (x' + vt') / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . Deux

évènements séparés de  $\Delta x$  dans  $K$  (la longueur de la règle) sont donc distants de  $\Delta x'$  dans  $K'$  à un instant  $t'$  donné (photographie prise à l'instant  $t'$  de  $K'$ ) et on a donc la relation  $\Delta x' = \Delta x (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  (attention ici le référentiel propre de la règle est  $K$  où les coordonnées sont sans primes).

La règle mesure donc  $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  mètre vue depuis le train : elle apparaît contractée dans la direction du mouvement d'un facteur que l'on appelle le facteur de Lorentz. La règle en mouvement est donc plus courte que la règle au repos et d'autant plus courte que le mouvement est rapide. Les distances mesurées à partir d'un référentiel au repos qui voit passer la règle raccourcissent. Si  $v = c$ , alors la mesure donne zéro ! Cette analyse ne peut s'appliquer qu'à des vitesses inférieures ou égales à  $c$ .

Pour une horloge battant la seconde, embarquée dans le train ( $K'$ ), situé en  $x'=0$ , l'intervalle de temps entre 2 battements est  $\Delta t' = 1$ s dans  $K'$ , mais mesuré par une horloge du talus, il n'est plus d'une seconde mais de  $\Delta t = 1 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  seconde, c'est-à-dire plus qu'une seconde, en appliquant directement les transformations de Lorentz sous la forme

$$t = (t' + vx'/c^2) / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \text{ avec } x' = 0.$$

Par suite de son mouvement, l'horloge marche dans le référentiel du talus plus lentement que si elle était au repos, et d'autant plus lentement que son mouvement dans ce référentiel est rapide. C'est la dilatation des durées.

Expérimentalement, il était impossible à l'époque d'Einstein de communiquer aux horloges des vitesses telles que les écarts entre les deux systèmes de coordonnées soient mesurables, principalement car les horloges n'avaient pas la précision correspondante requise.

Les effets de la relativité restreinte ne sont donc pas encore mis en évidence de manière directe et irréfutable au moment où A. Einstein écrit son livre. Les expériences sur les vitesses des particules alpha produites dans les désintégrations radioactives sont encore sujettes à interprétation (expériences de Gouye de 1921 qui reprennent les expériences controversées de Kaufmann en 1904)<sup>28</sup>. Il n'y a pas de

---

<sup>28</sup> Thèse de Yacin Karim. Vers une vérification expérimentale de la théorie de la relativité restreinte : réplique des expériences de Charles-Eugène Guye (1907-1921), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00839315>

mesure directe de l'effet du ralentissement des horloges embarquées avant l'expérience de Hafele-Keating en 1971.

L'usage des transformations de Lorentz dans le chapitre ne sert qu'à montrer qu'il est possible de substituer aux transformations galiléennes des transformations mathématiques fondées et opératoires, c'est-à-dire qui permettent de décrire le mouvement des corps physique comme invariant vis-à-vis d'une classe restreinte de repères selon des transformations conformes aux postulats de la théorie.

Notons que les descriptions d'Einstein résultent d'une simple lecture des Transformations de Lorentz. Les effets ne sont pas établis de manière illustrative sur des exemples concrets et ne peuvent se passer de l'utilisation de ces transformations. Or, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, elles ne sont pas au programme des classes de terminale scientifique en France (tout comme la contraction des longueurs). Einstein relègue en annexe une démonstration classique dans l'enseignement supérieur pour établir ces transformations à partir des propriétés d'homogénéité et d'isotropie de l'espace, qui dépasse le niveau moyen des élèves de terminales. On peut dire qu'il y a ici un réel problème à l'établissement des effets fondamentaux prédits par la théorie de la relativité restreinte et que l'approche d'Einstein ne convient plus du point de vue pédagogique et didactique à des élèves de terminales dans les programmes actuels. Seuls les élèves en Italie peuvent utiliser cette approche, car les transformations de Lorentz sont à leur programme, mais les utiliser sans démonstration ne peut être satisfaisant dans l'enseignement.

V-2-13-Chap13 : Le théorème de l'addition des vitesses. L'expérience de Fizeau.

En appliquant les transformations de Lorentz sous forme différentielle (ou pour des événements reliés entre eux par des variations de position et de temps correspondants) on obtient simplement la relation suivante pour le théorème de l'addition des vitesses :

$$W = (v + w) / (1 + vw/c^2) \quad \text{au lieu de } W = v + w$$

Pour le marcheur dans le train, on trouve dans le premier cas 104 km/h à  $10^{-16}$  près.

Pour le rayon lumineux tiré du train et vu du talus, si  $v = c$  et  $w = 300 \text{ km/s}$  (soit  $c/1000$ ), si on applique la nouvelle loi de composition des vitesses, on trouve  $W = c$  au lieu de  $W = c + c/1000$  :

$$W = (c + c/1000) / (1 + (c \cdot c/1000) / c^2) = c (1 + 1/1000) / (1 + 1/1000) = c$$

Ainsi, avec la théorie de la relativité restreinte, la vitesse de la lumière est bien une constante dans le vide, quel que soit le système de référence envisagé.

Einstein connaissait bien avant 1905 l'expérience de Fizeau, qui vérifie expérimentalement la formule d'entraînement de Fresnel.

Cette formule donne une nouvelle loi de composition des vitesses de la lumière dans les milieux en mouvement (et non pas dans le vide, où celle-ci est constante). Aussi, dans ce chapitre, A. Einstein fait-il appel à l'expérience de Fizeau (décrite dans le chapitre précédent) puisque le comportement des règles et des horloges en mouvement, comme conséquences de la théorie de la relativité (chapitre 12), n'a pas encore de confirmation expérimentale, mais que cette nouvelle loi de composition, qui apparaît ici comme une conséquence directe de la nouvelle cinématique, a déjà été vérifiée.

C'est pourquoi il considère que l'expérience de Fizeau est une expérience cruciale, qui met à l'épreuve la théorie de la relativité par rapport à l'addition des vitesses même si ses résultats avaient été déjà obtenus dans le cadre de la théorie de Lorentz en 1895. En effet, il n'est pas besoin, comme on le verra, d'introduire les transformations de Lorentz de 1905 pour obtenir ce résultat. La vitesse de déplacement des milieux étant petite devant celle de la lumière, une formulation au premier ordre en  $v/c$  suffit par rapport à la précision des expériences.

#### V-2 – 14-Chap14 : La valeur heuristique de la théorie de la relativité

Dans ce chapitre, A. Einstein résume les idées exposées dans les chapitres précédents comme suit :

« L'expérience nous a conduit à la conviction que, d'une part, le principe de relativité restreinte est vrai, et que, d'autre part, la loi de propagation de la lumière dans le vide doit être considérée comme égale à une constante  $c$ , en réunissant ces deux postulats nous avons obtenu la loi de transformation pour les coordonnées rectangulaires  $x, y, z$  et le temps  $t$  qui constituent les processus de la nature, et le résultat ne fut pas la

transformation de Galilée mais (contrairement à la mécanique classique) la transformation de Lorentz »<sup>29</sup>.

Il y a une question fort importante sur laquelle Einstein met l'accent dans ce chapitre 14. La théorie de la relativité restreinte, par les transformations de Lorentz, donne selon lui une condition mathématiquement précise d'invariance qui agit comme une contrainte dans la recherche de nouvelles lois de la nature. En ce sens cette contrainte rend scientifique la théorie de la relativité, car elle pourra être infirmée si « l'on découvrirait une loi générale ne [la] satisfaisant pas » (page 50). La possibilité de réfuter des principes est donc du point de vue de Einstein, en accord avec le point de vue falsificationniste ultérieur de Popper<sup>30</sup>, le principe pour juger de la scientificité d'une théorie.

A. Einstein établit dans ce chapitre que l'utilisation de la transformation de Lorentz et du principe de relativité résume la théorie de la relativité comme suit :

- « Les lois générales de la nature sont invariantes relativement à la transformation de Lorentz »<sup>31</sup>,

d'où la genèse d'une nouvelle théorie fondée sur des nouveaux concepts et des nouveaux principes. Mathématiquement, on peut dire que les transformations de Lorentz forment un nouveau groupe de déplacements se substituant aux translations galiléennes et qu'elles sont la traduction mathématique du postulat de relativité.

#### V-2-15- Chap15 : Résultats généraux de la théorie :

Dans ce chapitre A. Einstein donne les résultats généraux de Théorie de la Relativité qui a

- simplifié l'édifice théorique dans les domaines de l'optique et l'électrodynamique.
- conféré un tel degré d'évidence à la théorie de Maxwell-Lorentz.

---

<sup>29</sup> Einstein.A. La théorie de la relativité restreinte et générale, 1916. Ed. Dunod p.48.

<sup>30</sup> Popper.K. La logique de la découverte scientifique, 1935, trad. Fr. 1973, réed.Payot, coll.Biblio.scientifique, 1985.

<sup>31</sup> Einstein.A. La théorie de la relativité restreinte et générale, 1916. Ed.Dunod, p.49.

- considéré que la mécanique classique constitue un cas particulier par rapport à la théorie de la relativité c'est-à-dire dans le cas où  $v$  est très négligeable devant  $c$ .
- été valable pour d'autres mouvements, mouvement à vitesse proche de celle de la lumière, les écarts des lois de la mécanique classique sont trop faibles pour pouvoir être observés dans la pratique (mouvement des étoiles)
- dédit que l'expression de l'énergie cinétique d'un point matériel de masse  $m$  n'est plus donnée par l'expression de la mécanique classique mais reste valable pour des vitesses très inférieures à la vitesse de la lumière
- unifié les deux principes : principe de conservation de l'énergie et principe de la conservation de masse, comment ? Le principe de relativité exige que le principe de conservation l'énergie ne soit pas seulement valable par rapport à un système de coordonnées  $K$  mais aussi par rapport à tout système de coordonnées galiléens, d'où le principe d'équivalence masse énergie.

#### V-2-16- Chap16 : La théorie de la relativité restreinte et l'expérience.

La question de savoir à quel point la théorie de la relativité restreinte est appuyée par l'expérience n'est pas aussi simple. A.Einstein la considère cependant comme une cristallisation de la théorie des phénomènes électromagnétiques de Maxwell-Lorentz et considère que tous les faits expérimentaux qui soutiennent une théorie soutiennent aussi l'autre ; il cite en particulier le phénomène d'aberration des étoiles et le principe de Doppler.

Les arguments expérimentaux en faveur de la théorie de Maxwell-Lorentz sont en même temps les arguments en faveur de la Théorie de la Relativité. La loi du mouvement d'un électron B, considéré comme une masse ponctuelle, émis par une substance radioactive dans un champ électrique et magnétique est décrit par la théorie électrodynamique dans le cadre relativiste.

1ere classe : dans l'étude théorique des électrons on se trouve devant une difficulté : l'électrodynamique seule n'est pas capable de rendre compte de leur nature, si l'on suppose l'électron étendu, car étant donné que des masses électriques du même signe

se repoussent l'électron ne devrait pas être stable et il faut introduire un terme de confinement (pression de Poincaré).

-La théorie de la relativité qui traite l'électron comme une charge ponctuelle explique le mouvement sans avoir besoin d'une hypothèse quelconque sur la structure et le comportement de l'électron.

2<sup>ème</sup> classe : les équations de Maxwell-Lorentz sont valables pour un système de coordonnées  $K$  mais ne sont pas invariantes avec les transformations de Galilée. Les physiciens admettaient l'existence d'un vent d'éther relativement à la terre qu'ils s'efforçaient de mettre en évidence. C'est Michelson qui avait conçu une expérience d'interférences d'une précision suffisante pour paraître être décisive ; mais cette expérience donna un résultat négatif. Pour rendre compte de l'expérience de Michelson-Morley, Lorentz et Fitzgerald supposèrent que le mouvement du corps par rapport à l'éther subit une contraction dans la direction de son mouvement, précisément un effet qui apparaît désormais comme une conséquence de la théorie de la relativité dans la problématique de la mesure des distances, une théorie dans laquelle on n'a pas besoin de faire appel à un milieu comme l'éther au repos, en tant que référentiel absolu, ni donc de vent d'éther.

En 1905, Albert Einstein pense en effet que l'existence de l'éther n'est pas utile, « une hypothèse superflue », sa position vis-à-vis de l'éther n'est pourtant pas si simple, car elle est aussi liée à son point de vue sur l'existence de quanta lumineux indépendants (qui se déplacent dans le vide sans recours à un milieu de propagation) et plus tard à son point de vue sur l'espace et la métrique dans le cadre de la relativité générale<sup>32</sup>. Pourtant de nombreux physiciens se sont arrêtés à sa déclaration de 1905, ne retenant que le rejet de l'éther en tant que référentiel absolu.

Le meilleur argument d'Einstein dans son livre semble donc être de dire que la théorie de la relativité restreinte est valable puisque celle de Maxwell-Lorentz l'est. Einstein est confronté au problème qu'il n'y a pas de test directs de sa théorie à l'époque. Même les expériences de Gouye en 1921 ne permettent pas de trancher

---

<sup>32</sup> Einstein.A. L'éther et la théorie de la relativité. Sa conférence faite à l'Université de Leyde le 5 mai 1920, traduite par son ami M. Solovine.

définitivement sur les déviations de rayons cathodiques et les différentes théories sur la forme des électrons (rigides, contractés ou dilatés), comme on l'a vu.

#### V-2-17-Chap17 : L'espace à quatre dimensions de Minkowski

Le non mathématicien est saisi d'un frisson mystique quand il entend parler de 4 dimensions pourtant rien n'est plus banal que l'affirmation que le monde dans lequel nous vivons est un continuum d'espace- temps à 4 dimensions. D'une manière analogue (au continuum de trois dimensions) le monde des événements physiques appelé par Minkowski « Monde » est naturellement à 4 dimensions espace – temps.

Si on n'est pas habitué à considérer le monde comme un continuum à 4 dimensions cela s'explique par le fait que dans la physique pré-relativiste le temps jouait par rapport aux coordonnées d'espace, un rôle différent et plus indépendant. En effet, d'après la mécanique classique le temps est absolu c'est-à-dire indépendant de la position et de l'état de mouvement de l'observateur, ce qui explique que dans la transformation de Galilée, si l'on explicite le temps, on doit écrire  $t'=t$ . Ce temps absolu, de même qu'un espace absolu, étaient un pré-requis de la mécanique newtonienne comme on l'a déjà dit à maintes reprises.

C'est par la théorie de la relativité, que le temps est privé de son indépendance avec l'espace par la relation  $t' = (t - vx/c^2)/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$

Ce qui constitue la découverte importante de Minkowski pour le développement formel de la théorie de relativité, consiste dans la reconnaissance que le continuum d'espace-temps à 4 dimensions de la théorie de la relativité restreinte présente dans ses propriétés fondamentales, la plus grande parenté avec le continuum à 3 dimensions de l'espace géométrique d'Euclide ; il est évident même pour le non mathématicien que cette reconnaissance purement formelle devrait conduire à ce que la théorie gagne en clarté.

Un événement de l'espace-temps est donc représenté dans l'espace de Minkowski par 4 coordonnées  $x_1, x_2, x_3,$  et  $x_4 = ict$  c'est pourquoi d'après la théorie de la

relativité le temps  $x_4$  entre dans les lois de la nature de la même façon que les coordonnées d'espace euclidien  $x_1, x_2, x_3$ , à ceci près qu'il intervient mathématiquement comme un nombre imaginaire. Ce continuum à 4 dimensions est appelé par Minkowski le « Monde » et le point événement appelé point du monde. La transformation de Lorentz correspond à une rotation du système de coordonnées dans cet espace à 4 dimensions, comme Poincaré l'avait déjà établi dans son article de 1905 sur la Dynamique de l'électron<sup>33</sup>. L'introduction du temps comme une coordonnée imaginaire fait qu'on ne lui assigne pas les mêmes propriétés qu'aux variables d'espace pour la mesure des distances. Le théorème de Pythagore se généralise dans cet espace pseudo euclidien, mais le terme en  $dt^2$  apparaît avec un signe opposé aux distances spatiales. Récemment, une étude s'est penchée sur la possibilité d'utilisation des diagrammes dans l'espace-temps de Minkowski pour introduire la relativité restreinte<sup>34</sup>, cette étude a montré que les étudiants même en physique ont des difficultés à bien comprendre la relativité restreinte malgré qu'elle est introduite dans les nouveaux programmes des sciences physiques en Terminale S en 2012 avec des nouveaux concepts comme : événement, invariance de la vitesse de la lumière dans un référentiel galiléen, caractère relatif du temps ( dilatation des durées).

Cette étude s'est basée aussi sur un aspect historique tel que les travaux de Scott Walter (1996) illustrant bien l'apport des mathématiques sur la genèse de la théorie de la relativité restreinte (H.Poincaré et Minkowski) et en particulier sur les diagrammes espace-temps.

Notre recherche aussi est basée sur un aspect historique car d'une part nous voulons montrer aux élèves que la genèse de la théorie de la relativité restreinte est liée à la relativité galiléenne, en utilisant les transformations galiléennes et de Lorentz et d'autre part utiliser les transformations de Lorentz au premier ordre de  $v/c$  car elles vérifient bien les postulats de cette théorie d'une manière plus simple et plus compréhensible par les élèves.

### V-3- Approche philosophique et obstacle épistémologique de la Théorie de la relativité restreinte :

---

<sup>33</sup> Poincaré.H. La dynamique de l'électron. Cercle Mathématique de Palerme (1906).

<sup>34</sup> Moutet.L. Diagrammes et théorie de la relativité restreinte, une ingénierie Didactique. Thèse à l'Université Paris Diderot. 2016.

Plusieurs critiques ont été exprimées face à la nouvelle théorie de la Relativité Restreinte, car elle n'était pas largement admise au sein de la communauté scientifique (pas de preuve expérimentale, premier ordre déjà satisfaisant), des philosophes aussi s'opposaient à cette théorie car ils ne maîtrisaient pas les mathématiques nécessaires à son acquisition et car certains résultats ne peuvent pas être visualisés, ce qui donne naissance à des paradoxes qui ne peuvent pas être expliqués par le sens commun. Nous avons insisté, en prélude à notre travail, au chapitre IV, sur les enjeux et débats philosophiques de la théorie de la relativité restreinte, en particulier le paradoxe des jumeaux de Langevin (1911). De plus la domination de la mécanique Newtonienne (depuis plus de deux siècles) a incité plusieurs scientifiques à rejeter cette théorie.

C'est en partant de la mécanique classique dont il voulait montrer l'insuffisance pour expliquer les phénomènes optiques et électromagnétique nouvellement découverts à cette époque, qu'A.Einstein se posa des questions philosophiques et proposa des solutions à ces questionnements. Il commença par accorder au temps une place plus importante que celle accordée par les physiciens de l'époque, et surtout en mécanique Newtonienne ; il rappelle :

« En mécanique classique, une description complète du mouvement est réalisée seulement quand on indique comment le corps change de place avec le temps ». Le concept temps était un problème central de la philosophie aussi, depuis l'époque d'Aristote et jusqu'à l'époque de Bergson (20<sup>ème</sup> siècle) car le temps est considéré comme une grandeur absolue comme l'espace dans la mécanique newtonienne. A.Einstein propose dans ses textes l'exemple de deux montres liées à deux observateurs : observateur du train et observateur du quai et introduit un nouveau concept non usuellement cité en mécanique classique, celui de simultanéité et comment cette simultanéité varie d'un référentiel à un autre, impliquant le caractère relatif du temps. Cette relativité aura pour conséquence d'influencer les doctrines philosophiques de l'époque comme l'idéalisme, le positivisme...

De manière générale le débat philosophique concerne, à partir des années 20, l'ensemble de la Théorie de la relativité (y compris donc la formulation de la relativité générale). On peut dire toutefois que la théorie de la relativité restreinte a

été à la fois interprétée comme donnant des raisons en faveur de l'idéalisme et du positivisme. D'une part en effet, les positivistes comme Schlick ont interprété la théorie de la relativité comme la preuve scientifique de l'inexistence de jugements synthétiques a priori en physique et comme la réfutation la plus claire de la théorie kantienne de l'existence de l'espace et du temps comme formes a priori de la sensibilité.

D'autre part des auteurs comme Cassirer ou même le premier Reichenbach et le premier Carnap ont trouvé dans la théorie de la relativité la confirmation de la place centrale du sujet dans la constitution des lois physiques. La définition de l'identité des durées fait en effet intervenir la perception des rayons lumineux par un observateur, ce qui met la perception et le point de vue de l'observateur au cœur du processus d'objectivation scientifique. L'objectivation peut ainsi être définie comme invariance par rapport à la particularité des sujets empiriques donc comme intersubjectivité.

Un deuxième obstacle rencontré par les physiciens et les philosophes de l'époque est la loi de composition galiléenne des vitesses qui est à la base de la mécanique classique et non valable pour tous les mouvements dans la nature et en particulier pour les phénomènes optiques. Face aux questions philosophiques et épistémologiques, A. Einstein explique que cette incompatibilité n'est qu'apparente et qu'il faut admettre une loi simple admissible par tout le monde qui est celle que la lumière se propage dans le vide en ligne droite et avec une vitesse constante. C'est pourquoi il associe cette loi au principe de relativité pour fonder sa nouvelle théorie dans son article de 1905.

Il explique, comme on l'a vu, que cette incompatibilité apparente entre la loi de propagation de la lumière et le principe de relativité est due aux deux hypothèses suivantes de la mécanique classique :

- 1/ L'intervalle de temps qui sépare deux points d'un corps rigide est indépendant de l'état du mouvement du corps de référence.
- 2/ La distance spatiale qui sépare deux points d'un corps rigide est indépendante de l'état du mouvement du corps de référence.

Avec cette incompatibilité, A. Einstein répondait aux différentes questions philosophiques et scientifiques par l'obligation de la modification de la théorie de l'addition de vitesse pour des corps célestes en rappelant les transformations proposées par Lorentz.

C'est à partir de cette transformation, qu'A. Einstein a montré que les lois de physique sont les mêmes pour tous les mouvements des corps dans la nature et que cette nouvelle théorie impose la dilatation des durées et la contraction des longueurs.

Cette nouvelle théorie avec ses transformations avait imposé plusieurs questions scientifiques (mathématiques, physiques...), philosophiques (doctrines), expérimentales (difficultés de réaliser des expériences pour vérifier cette théorie).

De plus, A. Einstein, pour surmonter les obstacles rencontrés, et trouver des réponses aux discussions et aux questionnements soulevés par sa théorie, a essayé dans son livre de montrer la valeur heuristique de celle-ci ainsi que les résultats généraux obtenus tels que :

- \* la simplification de l'édifice théorique dans les domaines de l'optique et l'électrodynamique
- \* la réduction de cette théorie à la mécanique classique dans le cas des vitesses très faibles usuelles en mécanique newtonienne.
- \* l'unification des lois de la physique
- \* l'invariance des lois générales

L'approche qui a été suivie par A. Einstein était une approche didactique capable de surmonter les obstacles scientifiques et épistémologiques de l'époque, de répondre aux questionnements physiques et de poser d'autres questionnements philosophiques, c'est la base d'un fondement d'une nouvelle théorie.

#### V-4- Conclusion :

Albert Einstein a voulu dans son livre introduire sa nouvelle théorie d'une manière accessible au maximum de lecteurs et à ceux qui s'intéressent à elle au point de vue général, scientifique et philosophique et même à ceux qui ne possèdent pas l'appareil mathématique de la physique théorique. En conséquence, il a suivi une

procédure pédagogique et didactique fiable et simple en suivant les étapes nécessaires pour aboutir au fondement de sa nouvelle théorie.

Il a commencé par insister sur l'importance de la connaissance de l'aspect géométrique de la physique, en introduisant les notions de système de coordonnées, de référentiel... Puis, il aboutit à l'insuffisance des lois physiques en mécanique classique pour expliquer des phénomènes physiques récemment découverts comme l'électrodynamique, l'optique, l'électromagnétisme... d'où la nécessité de l'introduction d'un nouveau postulat qui est l'invariance de la vitesse de la lumière par rapport à n'importe quel référentiel galiléen, et la nécessité d'introduire les transformations de Lorentz pour passer d'un référentiel à un autre.

Toute cette nouveauté introduite est basée sur des exemples simples et compréhensibles de la vie courante (train, talus, voyageur, éclair ...) et des expériences historiques (expérience de Fizeau (1849) et expérience de Michelson et Morley (1887)).

Dans notre recherche nous nous intéressons à l'applicabilité de la méthode pédagogique et didactique suivie par A. Einstein dans l'introduction de sa nouvelle théorie au public pour l'enseignement au Lycée dans le but d'être acquise par le maximum d'élèves de Terminale, que ce soit en physique ou en philosophie. Nous développerons notre analyse au chapitre VII. Nous insistons (comme l'a fait A. Einstein) sur l'importance de l'aspect géométrique enseigné en physique et en mathématique et la nécessité de tenir compte des liens entre les contenus concernant les notions de référentiels, d'espace et de géométrie, sur l'importance aussi de respecter l'enchaînement historique du principe de relativité depuis la mécanique Newtonienne.

Mais nous émettons quelques réserves sur la manière d'introduire quelques concepts comme les transformations de Lorentz – avec son facteur de Lorentz – qui apparaît comme tombée du ciel et qui se trouve être hors programme. Nous la remplacerons par la transformation de Lorentz au premier ordre en  $v/c$ , introduite en 1895, et dont on verra mieux le lien avec la transformation de Galilée. De plus, Einstein semble supposer ses lecteurs familiers avec la valeur de la vitesse de la lumière ce qui n'est pas le cas, au moins pour les élèves Tunisiens du secondaire. C'est pourquoi il nous semble important, comme nous l'avons fait dans le chapitre IV, d'insister sur l'histoire des mesures de la vitesse de la lumière. Mais avant de revenir sur les enjeux didactiques et pédagogiques en sciences physiques de l'enseignement de la relativité restreinte, revenons plus en détails sur les enjeux philosophiques, qui sont aussi au cœur de nos préoccupations, conceptuelles et pédagogiques.

## Chapitre VI

Apports philosophiques à la théorie de la relativité restreinte : discussions philosophiques sur les concepts : espace et temps, vérité et théorie, mesures et observations.

## VI-1- Introduction et problématique :

Si l'on se tourne vers l'histoire de la philosophie, on constate que depuis sa naissance la philosophie élabore des théories sur l'espace, le temps et le mouvement qui ont donné lieu à des hypothèses cosmologiques, à leur tour accompagnées d'une observation constante des phénomènes célestes. Depuis la révolution scientifique du XVI et XVII siècle, qui a vu la naissance de la physique mathématique au sens moderne du terme, d'une part, la critique philosophique des théories anciennes a contribué à la constitution de la physique classique avec ces notions de lois et de théorie physique et, d'autre part, elle s'est elle-même nourrie de l'élaboration mathématiques des théories physiques pour essayer d'intégrer leurs résultats dans une théorie de la connaissance cohérente et générale (Piaget, 1976).

Ce dialogue a donc eu des conséquences importantes sur l'élaboration des concepts mathématiques et physiques pendant la révolution scientifiques du XVI siècle au XVII siècle et les exemples sont nombreux : l'héliocentrisme défendu par Copernic (1473- 1543) influencé par les courants néo-pythagoriciens et néo-platoniciens, la théorie de la relativité du mouvement de Galilée (1564- 1642), présentée dans son *Dialogue* sur les deux systèmes de pensées s'affrontent à l'époque, le système Aristotélicien et le système Copernicien, où le néoplatonisme est encore utilisé en clefs anti-aristotélicienne, le *Principia* de Newton (1642- 1727) basées sur la mécanique Galiléenne, mais écrit en opposition aux thèses de la physique cartésienne, alors au cœur du débat des savants. On peut faire ce même constat d'un entrelacement de thèmes philosophiques de théorie de la connaissance et de théories scientifiques au moment de l'apparition de la théorie de la relativité restreinte (Barreau, 1985), fondée en 1905 par Albert Einstein puisque sa théorie physique, et le débat dans lequel elle a vu le jour, questionnent directement le rapport des mathématiques à l'expérience, fondamentale pour comprendre les pouvoir et les limites de la connaissance humaine.

S'ils existent donc des liens historiques certains entre philosophie et physique, dans la période ancienne, au cours de la période de la révolution scientifique et dans la période contemporaine, l'enseignement au secondaire de ces deux disciplines reste encore loin d'atteindre des objectifs communs et de recueillir les avantages de ces liens, puisque les enseignants de philosophie n'ont pas acquis une formation en physique à part entière pendant leurs cursus scolaires et de même les enseignants de physiques n'ont aucune formation en philosophie dans l'enseignement supérieur. De plus le contenu des programmes en physique

et en philosophie ne donne aucune indication concrète pour établir des relations directes entre les deux disciplines.

Nous nous demandons alors pourquoi ne pas mettre l'accent dans les contenus des programmes de philosophie sur les concepts physiques qui ont suscités bien de discussions philosophiques tels que les concepts d'espace et temps liés à la théorie de la relativité restreinte. De manière plus générale nous nous demandons comment appliquer l'interdisciplinarité pour assurer des meilleures acquisitions des concepts relativistes ?

Dans la suite nous esquissons quelques pistes de travail pour la construction de programmes interdisciplinaires en nous limitant essentiellement à quelques thèmes que nous avons dégagé à partir des réflexions d'Albert Einstein dans la quatrième partie de son ouvrage de 1916. Nous nous restreindrons dans la mesure du possible aux auteurs introduits dans les programmes officiels de philosophie en Tunisie.

Dans la suite, la première section traitera donc de la contribution que la philosophie peut donner à l'analyse des concepts d'espace, temps et mouvement qu'elle a élaboré tout au long de son histoire et dont la connaissance peut beaucoup apporter à l'intellection des concepts de la relativité restreinte par les élèves.

La deuxième section se concentre aux incidences philosophiques de la relativité restreinte dus aux philosophes qui ont marqué le tournant de formulations philosophiques telles que : le nouveau spiritualisme de Bergson, le criticisme Machien et le positivisme des néo-Kantian.

La troisième section porte sur la relation théorique entre observation et mesure en objectivant le rôle de l'opposition cruciale entre relativisme et relativité de la théorie.

#### VI-2- Discussion philosophiques sur les concepts espace et temps.

Einstein a remarqué au début de son premier chapitre de la quatrième partie du livre *La Relativité* comment la théorie de la relativité heurte des habitudes de pensée préscientifiques et psychologiques, véhiculées par le sens commun. Ces habitudes de pensées concernant les notions d'espace, de temps et de mouvement dans une perspective pseudo-newtonienne se sont lentement élaborées au cours d'au moins trois siècles et ont portées à la conception de l'espace comme boîte vide dans laquelle on peut ranger des objets selon des arrangements différents (*La Relativité* op.cit. p157) et à la conception du temps comme un continuum

complètement indépendant de l'espace dans lequel s'écourent les événements de manière universelle et homogène et linéaire. Einstein remarque comment dans l'antiquité, le texte fondateur des mathématiques anciennes *Les éléments d'Euclide* ne fait jamais intervenir ce concept d'espace. Les anciens géomètres traitent d'objets conçus par l'esprit (des points des droites des plans) mais non pas de l'espace comme tel (*La Relativité* op.cit. pp 156-7). D'ailleurs, comme l'histoire des sciences a montré, la plus-part des anciens philosophes considéraient l'espace comme un non être : « l'univers entier était contenu à l'intérieur de la sphère des étoiles, limité par sa surface [...]. A l'extérieur de la sphère des étoiles il n'y avait rien, ni matière, ni espace ; rien du tout »<sup>35</sup> et ce n'est seulement que par la réflexion théologique que l'idée d'un espace et d'un univers étendu et illimité s'est frayée un chemin, donnant naissance de la conception d'un espace homogène ouvert et infini (idée au cœur de la conception de Newton dans la suite).

Les discussions philosophiques et scientifiques sur les concepts d'espace et de temps existaient depuis longtemps (Jondlay, 1999 ; Lausberg, 2005 ; Bouriau et al. 2011 ; Guy, 2011), beaucoup de philosophes et de savants étaient à l'époque classiques réticents à attribuer, à côté de la matière, une existence indépendante à l'espace et au temps, (Einstein mentionne à ce propos la figure de Descartes). Or, en utilisant ces suggestions d'Einstein on peut soutenir que connaître comment dans le passé, d'autres conceptions philosophiques induisaient d'autres habitudes de pensées, pourraient aider les élèves à se défaire de leurs propres conceptions présocratiques.

C'est pourquoi dans ce chapitre, nous allons suggérer quelques repères historiques concernant les différentes définitions et discussions concernant l'espace et le temps afin de suggérer des pistes de réflexions, pour les enseignants de physiques et de philosophie, pour l'organisation de cours qui accompagneraient l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte en physique.

Dans cette perspective nous allons nous contenter de citer quelques noms de philosophes physiciens qui apparaissent dans les programmes officiels Tunisiens de philosophie.

a/ La conception physique d'Aristote. Le concept d'espace chez Aristote est lié à la théorie du mouvement, mais la notion de mouvement est liée à son tour à celle de changement à tel point

---

<sup>35</sup> Kuhn.T. *La révolution copernicienne*, Fayard, 1973, p. 90.

que même l'accroissement et le vieillissement étaient considérés comme des espèces de mouvements. L'état de mouvement est donc chez Aristote intrinsèquement différent de l'état de repos (comme l'état solide est différent de l'état liquide) et il est également intrinsèquement lié à la nature des substances qui composent les deux sphères dont il est constitué le monde, la sphère céleste et la sphère terrestre ou sublunaire. Dans la sphère céleste il y a des corps au repos (par ex. les étoiles fixes) et des corps en mouvement (par ex. le soleil, les planètes et la lune). Dans la sphère sublunaire il y a tous les corps composés des quatre éléments fondamentaux l'air, l'eau, la terre et le feu. Il y a donc deux types différents de mouvements naturels, le mouvement circulaire pour les corps célestes, le mouvement rectiligne pour les quatre éléments purs de la sphère terrestres lorsqu'ils ne sont poussés ou tirés par des forces (en particulier mouvement rectiligne vers le haut pour le feu et l'air qui sont légers et vers le bas pour la terre et l'eau qui sont lourds, où le haut et le bas sont des orientations absolues dans le cosmos). Chacun de ces éléments donc tend vers son lieu naturel. D'où l'idée qu'une force est toujours nécessaire pour arracher un élément de son lieu naturel ou pour créer le mouvement « désordonné » des composés de ces quatre éléments. Le mouvement est donc lié de manière intrinsèque à la nature des corps et aux lieux que ces corps occupent naturellement en fonction de leur propre nature.

Aristote pensait aussi que, le concept de temps n'existait que grâce au mouvement (et donc aux changements) engendré(s) par la nature des choses et donc si on ne pouvait agir sur le passé, le futur, au moins dans la sphère terrestre n'était que partiellement déterminé par la nature, la contingence étant un fait dans la sphère sublunaire.

Cette conception Aristotélicienne de l'espace et du temps donnera lieu à ce que Thomas Kuhn (dans le livre cité plus haut) appelle le schème conceptuel de l'univers ancien des deux sphères, schème qui sera renversé seulement au bout d'une longue révolution conceptuelle par les conceptions de Copernic, Galilée et Newton.

On remarquera que même à la suite de cette révolution l'espace et le temps seront conçus encore comme deux aspects séparés et bien différencié du monde et qu'il faudra attendre la théorie de la relativité pour que la notion de continuum spatio-temporel devienne standard.

b/ La conception de Saint Augustin (354-430 ap.J.C) : S. Augustin considérait le concept de temps comme une énigme et il s'opposait à toute tradition philosophique qui faisait du temps

la mesure du mouvement des astres. Il considérait que le temps est l'être et le sens qui dépendaient d'une disposition de l'âme : la notion du temps n'est pas un objet de notre savoir mais une dimension de notre être, le temps est la dimension essentielle de notre existence, nous vivons dans le temps, or l'existence du temps est dans notre esprit ou conscience, il s'enracine dans notre subjectivité. Augustin pensait qu'il y avait trois modes du temps :

- le présent des choses passées qui présente la mémoire
- le présent des choses présentes qui présente l'attention actuelle ou la perception
- le présent des choses futures qui présente l'attente.

Ainsi, il mettait en évidence un temps psychologique propre à chaque individu et lié à son expérience du temps, contrairement au temps défendu par Aristote : le temps physique (qui est indépendant de l'état psychologique de l'individu et extérieur à lui, lié au mouvement des objets et mesurable).

#### c/ Conception de Galilée (1564- 1642).

Galilée était le premier à étudier les mouvements des corps en utilisant le paramètre temps pour donner un nouveau départ vers une nouvelle physique faisant suite à la dominance de la physique Aristotélicienne, Galilée découvre la loi de la chute libre d'un corps quand il découvre la proportionnalité entre la vitesse du corps et la durée de sa chute indépendamment de sa masse et de sa nature, ceci poussa Galilée à s'interroger sur la nature du temps et son lien avec l'espace, il considérait que le temps a une étroite relation avec le mouvement.

Le temps jouait un rôle différent par rapport à l'espace et plus indépendant, le temps était pour Galilée absolu et indépendant de la nature, de la position et de l'état de mouvement, du système de référence, Galilée considérait le temps à l'instar de l'espace comme un paramètre mesurable et susceptible d'un traitement mathématique, pour lui, étudier le mouvement d'un système physique c'est réaliser des mesures fondamentales du concept temps et du concept position dans l'espace à trois dimensions.

#### d/ Conception de Descartes (1596-1650) :

Descartes considérait l'espace identique à l'étendue mais l'étendue était pour lui liée à la matière ; par conséquent pas d'espace sans matière et donc pas d'espace vide. Le mouvement

était donc considéré par Descartes comme le résultat d'un changement de densité de la matière.

e/ Conception de Leibniz (1646-1716) :

Leibniz cherchait à clarifier les rapports entre pensée mathématique et théorie physique dans leurs liens aux idées philosophiques, en particulier, aux concepts d'espace et de temps. Sa philosophie, s'opposant à celle de Newton est souvent considérée comme anticipatrice des conceptions de la cosmologie et de la relativité moderne.

Pour Leibniz espace et temps étaient en effet des concepts relatifs et non des concepts absolus, l'espace étant l'ordre de la coexistence et le temps l'ordre de la succession :

*« Pour moi, j'ai marqué plus d'une fois, que je tenais l'Espace pour quelque chose de purement relatif, comme le Temps ; pour un ordre des Coexistences, comme le temps est un ordre des successions. Car l'espace marque en termes de possibilité un ordre des choses qui existent en même temps, en tant qu'elles existent ensemble, sans entrer dans leurs manières d'exister particulières : et lorsqu'on voit plusieurs choses ensemble, on s'aperçoit de cet ordre des choses entre elles<sup>36</sup>. »*

Leibniz mentionne aussi le lien entre matière et espace, il affirme dans sa cinquième et sa dernière lettre à Clarke :

*« Je ne dis point que la matière et l'espace sont la même chose, je dis seulement qu'il n'y a point d'espace où il n'y a point de matière et que l'espace en lui-même n'est point une réalité absolue. L'espace et la matière diffèrent come le temps et le mouvement, cependant, ces choses quoi que différentes se trouvent inséparables<sup>37</sup>. »*

Comme nous l'avons déjà remarqué les conceptions de Leibniz, ses idées ses discussions ont bien contribué à l'évolution de la connaissance scientifique et épistémologique en générale et

---

<sup>36</sup>Leibniz.G.W. Lettre à Clarke du 25 Février 1716, P, VII, 363, (lettre à De Volder, du 30 juin 1704), cité par Luciano Boi dans la revue philosophique, volume 22, n°2, 1995, p.425.

<sup>37</sup> Ibid

de la physique contemporaine en particulier en cosmologie relativiste (qui n'admet ni espace ni temps absolus), en théorie de la relativité restreinte, (qui a rejeté toute possibilité de concevoir un espace et un temps absolus), en théorie de la relativité générale (fondée sur l'idée de l'impossibilité de concevoir l'espace indépendamment de la matière), dans la théorie moderne de physique des particules élémentaires (qui a mis en évidence la divisibilité de la matière).

#### f/ Conception de Kant (1724- 1804).

Avant de définir ses pensées et établir un sens à sa réforme critique de la philosophie, Kant se basait sur les idées de Leibniz y compris celles qui se rapportent aux concepts espace et temps, et cela à cause de l'influence qu'exerçaient ces idées sur l'orientation de la pensée philosophique à cette époque.

*« L'espace et le temps, sont des intuitions pures et a priori de la sensibilité <sup>38</sup>»*

Kant est parti d'une conception proche de celle de Leibniz pour définir les concepts temps et espace, pour ensuite s'en détacher (Nys. et Van Biéma, 1998) . Leibniz avait en effet critiqué la conception mécaniste de Newton basée sur sa conception de la notion force, et son idée d'un espace et d'un temps absolus.

Mais tandis que Leibniz considérait l'espace comme ordre de la coexistence et le temps comme ordre de succession, Kant fondait l'espace et le temps dans le sujet. Il enlevait ainsi aux concepts Newtoniens leur fondement métaphysique tout en donnant à l'espace et au temps (réduits à des formes de la sensibilité du sujet transcendantal) des propriétés compatibles avec la mécanique Newtonienne. De manière similaire les concepts fondamentaux nécessaires à la formulation des principes de la mécanique (les concepts de cause, les concepts d'action et de réaction, le concept de masse) étaient redéfinis en termes de catégories de l'entendement. Kant permet donc de donner un fondement philosophique à la physique de Newton permettant d'éviter les concepts de temps absolu et d'espace absolu qui la caractérisent.

---

<sup>38</sup>Van.Biéma.E. L'espace et le temps chez Leibniz et Kant », in Revue Néo-scolastique, 1908, p421.

g/ Conception de H.Poincaré (1854- 1912) :

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, un nombre de philosophes se posaient des questions sur l'espace, la géométrie et l'expérience, sous l'impulsion de la découverte des géométries non euclidiennes et des immenses progrès de la physique mathématique (Marchal, 2005). Le mathématicien et physicien Henri Poincaré, dans son livre philosophique : *La science et l'hypothèse*, publié en 1902, a consacré plusieurs chapitres à l'espace, la géométrie et l'expérience. Poincaré pensait que la géométrie Euclidienne était la plus commode pour l'esprit humain, qui l'adoptait par convention, mais avait bien conscience de l'existence des géométries non euclidiennes au développement desquelles il avait contribué :

« ....*On peut construire une quatrième géométrie aussi cohérente que celle d'Euclide, de Lobatchevsky et de Riemann*<sup>39</sup> »

Henri Poincaré pensait que l'espace visuel et plus en général l'espace représentatif que nous construisons pour nous orienter dans notre environnement est différent de l'espace géométrique (et donc mathématique). Par exemple une image qui nous parvient du monde extérieur, qui est géométriquement représentée en trois dimensions, tombe sur notre rétine à deux dimensions ; de plus l'espace géométrique est homogène mais tous les points de la rétine ne sont pas identiques. Les propriétés donc de l'espace représentatif et de l'espace géométrique sont donc radicalement différentes. Comme il écrit dans un article qui prépare le livre publié en 1902 : « *Il est impossible au peintre de peindre sur un tableau plan, des objets avec leurs trois dimensions*<sup>40</sup> »

---

<sup>39</sup> Poincaré.H. *La science et l'hypothèse*, 1902, Paris, Edition Flammarion, p : 61.

<sup>40</sup> Poincaré.H. *L'espace et la géométrie* in : *Revue de métaphysique et de morale*, 1895, p : 635.

Henri Poincaré sépare ainsi l'expérience de la géométrie et il suppose que les principes de la géométrie ne sont ni des formes de notre sensibilité (autrement on ne pourrait pas imaginer des géométries non euclidiennes) ni des faits expérimentaux (les postulats de la géométrie euclidienne ne sauraient être démontrés ou infirmés par l'expérience).

#### h/ Conception d'Albert Einstein (1879-1955) :

C'est à partir de l'étude des concepts espace et temps en mécanique classique, à partir de l'étude des questionnements scientifiques sur ces concepts, tels que la localisation d'un événement qui doit se faire par des coordonnées spatio-temporelles, à partir de la limite des lois de la mécanique classique pour la propagation de la lumière (Montminy, 1995)...qu'Einstein proposait une nouvelle signification de l'espace et du temps : les deux concepts ne sont plus séparés, constituent un seul continuum espace-temps et sont relatifs.

Aussi la seule vraie question philosophique à l'époque portait sur la nature des coordonnées

Spatio-temporelles : sont-elles des conventions commodes qui permettent de nous orienter dans le monde des phénomènes ou bien ont elles une réalité qui dépasse le sujet connaissant ?

Ainsi Einstein pensait autrement que Poincaré sur la conception de la géométrie physique,

Pour Einstein, la géométrie physique est une science et les propositions de la géométrie

Physique peuvent être vraies ou fausses, or pour Poincaré, il n'y a pas à proprement parlé de géométrie physique car la géométrie (en niant la notion de distance) doit toujours précéder la physique.

En mécanique classique, l'espace et le temps jouaient un double rôle :

- Un support de processus physique décrit par les mouvements de la matière constituée par des points matériels
- Un système d'Inertie considéré comme le système de référence le plus préférable en physique.

Albert Einstein a consacré tout un chapitre sur l'espace à quatre dimensions de Minkowski, espace géométrique non Euclidien pour répondre aux différents courants philosophiques qui soutenaient l'unicité de l'espace Euclidien. Notons que l'espace de Minkowski et la notion de métrique qui lui est afférente a joué un rôle clé dans l'élaboration par Einstein de la relativité

générale, entre 1912 et 1915. Auparavant, Einstein ne voyait lui-même guère d'intérêt à cette représentation mathématique de sa théorie.

Albert Einstein a fondé sa nouvelle théorie comme un prolongement de la physique classique puisqu'il s'est basé sur deux lois :

- Première loi : sur la validité des lois de la physique dans des référentiels Galiléens : (généralisant le principe de relativité galiléenne des lois de la mécanique).
- Deuxième loi : la constance de la vitesse de la lumière par rapport à tout référentiel Galiléen.

Il en déduit alors que :

- L'espace et le temps, qui étaient indépendant en mécanique classique, deviennent alors liés et constituent ce qui sera appelé un continuum espace-temps de Minkovski.
- Pour passer d'un référentiel Galiléen à un autre, on utilise la transformation Galiléenne en mécanique classique, et on utilise la transformation de Lorentz en relativité restreinte.

Toutes ces déductions des nouvelles théories, des nouvelles lois et des nouvelles formules peuvent être utilisées en classe pendant l'enseignement de la physique au moment du passage de l'enseignement classique à l'enseignement de la mécanique relativiste, de plus on peut consolider cet enseignement pendant les séquences de philosophie et permettre à l'élève une meilleure acquisition des concepts d'espace, de temps, et de relativité.

### VI-3- Discussion philosophiques sur les concepts vérité et théorie physique.

Avant d'introduire sa nouvelle théorie, Albert Einstein était bien formé aux différentes discussions philosophiques et aux différents questionnements imposés par les scientifiques et les philosophes pour fonder une nouvelle théorie (Lilionnais, 1952 ; Khan, 1959 ; Géoffroy, 2008). Ses recherches le conduisent à formuler une nouvelle théorie physique devant remplacer la théorie de Newton, ce qui ne manque pas d'éveiller en lui un questionnement proprement épistémologique dont au moins trois aspects sont cruciaux : la question de la nature d'une théorie scientifique et de ce qui la caractérise, la question du sens qui doit être donné à l'affirmation de la vérité d'une théorie généralement la question du lien entre théorie et expérience.

Sur l'ensemble de ces questions, les enseignants de physique et de philosophie francophones pourraient bénéficier de lectures tirés du cinquième volume de *Albert Einstein, Œuvres choisies*, consacré à *Science, Ethique et Philosophie*, et édité par Jacques Merleau-Ponty et Jeanne Balibar, aux éditions Du Seuil, CNRS en 1991.

### VI-3-1- La théorie physique :

Toute évolution des connaissances scientifiques est le résultat de la formulation de nouvelles théories scientifiques (Vorms, 2011).

En nous rapportant aux chapitres rédigés par A.Einstein dans son livre *La Relativité* nous remarquons qu'il a adopté une démarche de scientifique et de philosophe pour fonder sa nouvelle théorie, avec une écriture simple des principes qui constituent cette théorie et une analyse critique des concepts qui y interviennent. C'est surtout aux chapitres 14-16 de son livre qu'Einstein pose clairement la question de la valeur épistémologique de sa nouvelle théorie de la relativité restreinte.

Selon sa propre appréciation cette théorie a d'abord une valeur heuristique (chapitre 14) car elle dicte une condition mathématique générale à toute lois générale de la nature : « les lois générales de la nature sont invariantes relativement à la transformation de Lorentz » (p. 54). Cette condition mathématique précise d'invariance devient un auxiliaire précieux dans la recherche des lois générales. Cette condition et l'affirmation de la constance de la vitesse de la lumière constituent ainsi des présupposés qui permettent d'infirmer la théorie. Si jamais on observait des phénomènes dont les lois ne se conformaient pas à ces principes, la théorie serait réfutée. En tant qu'exprimant explicitement ces conditions de réfutabilité la théorie de la relativité restreinte est scientifique au sens propre du terme.

Ensuite (chapitre 15), Einstein souligne le fait que la théorie de la relativité restreinte a contribué à l'amélioration des théories dans des domaines existants de la physique comme l'Electrodynamique et l'Optique en augmentant en particulier le degré d'évidence de la théorie de Maxwell-Lorentz :

« Dans ces domaines elle [la théorie de la relativité] n'a pas beaucoup modifié les énoncés de la théorie, mais elle a beaucoup simplifié l'édifice théorique, c'est-à-dire la dérivation des lois et – ce qui est incomparablement plus important – considérablement diminué le nombre des

hypothèses indépendantes les unes des autres, sur lesquelles elle repose ». (*La Relativité* op.cit. p. 55).

Donc la validité de la théorie de la relativité repose aussi sur sa capacité intrinsèque à simplifier et réorganiser l'édifice théorique de la physique.

Quant à la question de sa confirmation empirique, le chapitre 16 analyse avec finesse la question complexe du support empirique de la relativité restreinte, qui, dit Einstein n'est pas indépendant du support empirique de la théorie de Maxwell-Lorentz. Einstein indique ainsi clairement que les deux premiers critères (réfutabilité et simplification théoriques) ont à ses yeux un poids au moins égal au critère de la confirmation empirique.

Cette conception de la notion de théorie physique a été élaborée par Einstein dans un dialogue constant avec le débat de son époque et il serait extrêmement profitable à l'enseignement de la relativité restreinte de l'accompagner par l'analyse du contexte épistémologique auquel elle est reliée. Il s'agit en particulier d'illustrer, par un des exemples les plus éclatants à notre disposition, la nature des relations entre science et théorie de la connaissance ainsi que la spécificité du travail scientifique vis-à-vis du travail philosophique, les deux étant indispensables au développement de la connaissance.

Un texte d'Einstein, rapporté dans l'édition française des œuvres d'Einstein citée plus haut, extrait de la réponse d'Einstein aux articles présentés dans *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*, (P.A.Schilpp éd. New York 1949), pourra guider ce travail. Nous le citons *in extenso* :

« La relation réciproque de la théorie de la connaissance et de la science est d'un genre remarquable : elles dépendent l'une de l'autre. La théorie de la connaissance sans contact avec la science n'est qu'un schéma vide. La science sans théorie de la connaissance – pour autant qu'elle est concevable – est primitive et confuse ; mais dès que le théoricien de la connaissance, dans sa recherche d'un système clair, y est parvenu, il est enclin à interpréter le contenu de pensée de la science dans le sens de son système et à écarter tout ce qui n'y est pas conforme. Le savant, pour sa part, n'a pas le moyen de pousser si loin ses tentatives de systématisation en matière de théorie de la connaissance : il accepte avec reconnaissance l'analyse conceptuelle de la théorie de la connaissance ; mais les conditions extérieures que lui imposent les faits d'expérience ne lui permettent pas de se laisser trop restreindre, dans

l'édification de son univers conceptuel, par son attachement à une théorie systématique de la connaissance. Il doit donc apparaître aux yeux du théoricien systématique de la connaissance comme une sorte d'opportuniste sans scrupule. Il apparaît comme une réalité dans la mesure où il cherche à se représenter un monde indépendant des actes de la perception ; comme un idéaliste dans la mesure où il considère les concepts et les théories comme des libres inventions de l'esprit humain (non dérivable logiquement du donné empirique) ; comme positiviste dans la mesure où il considère ses concepts et théories comme fondés *seulement* pour autant qu'ils procurent une représentation logique des relations entre expériences sensorielles. Il peut même apparaître comme platonicien ou pythagoricien dans la mesure où il considère le point de vue de la simplicité logique comme un outil indispensable et efficace de sa recherche. » (*Albert Einstein œuvres choisies*, vol. 5, p.164)

Dans la suite de cette section, et dans les limites qui sont les nôtres, nous donnerons quelques pistes pour construire une réflexion philosophique en mentionnant quelques courants philosophiques (surtout les courants enseignés dans les programmes officiels Tunisiens de philosophie) qui pourraient aider les élèves à comprendre le propos d'Einstein.

- Le courant positiviste (au moins sans la version du positivisme logique du cercle de Vienne) est un courant empiriste. Pour les empiristes, une théorie se construit à partir de l'expérience, cette dernière venant confirmer les hypothèses qui sont au fondement de la théorie, par un protocole expérimental qui peut être réduit de manière ultime à des relations entre sensations. Ainsi ce courant considère qu'une théorie scientifique, doit obéir à deux conditions. La première est de ne pas dépasser les frontières assignées à la science et de s'abstenir ainsi de tout concept métaphysique irréductible par définition à des conditions expérimentales d'observation. La deuxième condition c'est de n'employer que la seule déduction logico-mathématique (interprétée comme un pur symbolisme) pour mettre en forme les données de l'expérience et en établir les propriétés et les relations.

C'est à cause de sa critique de la mécanique classique, qui considère que l'espace et le temps sont deux concepts absolus et indépendants, qu'A.Einstein a pu arriver à reformuler ces deux concepts. Cette reformulation critique a été rendue possible aussi grâce aux thèses d'E.Mach (philosophe positiviste) dont l'influence a été grande sur le cercle de Vienne, inspiré également par les critiques d'Henri Poincaré sur l'espace absolu et le temps absolu (voir *La Relativité*, op. cit. pp : 163-164).

- Le courant néo-Kantien:

Les nouvelles caractéristiques des concepts d'espace et de temps fondées par la nouvelle théorie de la relativité restreinte mettaient en doute le système philosophique Kantien, c'est pourquoi un nouveau courant philosophique apparaît, appelé le courant néo-Kantien, dont Ernst Cassirer, le philosophe allemand qui a consacré de nombreux écrits à la relativité de Einstein, est un des membres les plus éminents. Cassirer considérait que la philosophie de Kant ne devait pas être conçue comme un système figé et dogmatique de thèses. Au contraire c'est aux philosophes contemporains de poursuivre l'évolution du kantisme et de donner dans l'esprit kantien de nouveaux fondements aux concepts d'espace, et de temps, et une nouvelle analyse épistémologique de la géométrie, et de la physique en accord avec la science du début du XX<sup>e</sup> siècle. Le sujet connaissant demeure au cœur de la pensée neo-kantienne. Toutefois les intuitions et les catégories qui fondent la connaissance scientifique dans le sujet connaissant évoluent dans le temps. Elles nous permettent de formuler des théories qui fonctionnent comme des *a priori* historiques qui permettent à leur tour de formuler des nouvelles conjectures. Bien évidemment le courant neo-kantien considérait qu'une théorie scientifique valide doit être capable de confirmer ses hypothèses et conjectures par l'expérience, ordonner, hiérarchiser et simplifier des lois déjà confirmées et permettre des prédictions.

Pour expliquer le passage du concept de temps absolu au concept de temps relatif dans les chapitres de son livre consacré à la théorie de la relativité, Albert Einstein a proposé, nous l'avons vu, des nombreuses expériences de pensée. La technique des expériences de pensée était un outil employé très fréquemment dans les écrits d'inspiration néo-kantienne de Hermann Helmholtz (1821-1894). L'interprétation Einsteinienne des expériences de pensées concernant la relativité de la simultanéité confirme la centralité qu'il attribue à l'observateur, qu'il soit au repos ou mobile, de manière tout à fait conforme à l'esprit du néo-kantisme.

- L'holisme de Pierre Duhem (1861-1916), que Duhem présente surtout dans le livre *La théorie physique, son objet, sa structure*, publié en 1906 (réimprimé en 2007).

Duhem définit la notion de théorie physique ainsi :

« Une théorie physique n'est pas une explication, c'est un système de propositions mathématiques déduites d'un petit nombre de principes, qui ont pour but de représenter aussi simplement, aussi complètement et aussi exactement que possible un ensemble de lois expérimentales »<sup>41</sup>

Pour Duhem, toute théorie physique doit répondre à des caractéristiques telles que :

\* La cohérence interne : une théorie doit être consistante, et exempte de contradiction interne.

\* La correspondance entre l'ensemble des propositions théoriques et les faits. Les principes théoriques formels, mis en forme par le langage mathématique, doivent permettre de rendre compte des phénomènes observables dans leur ensemble. Toutefois, on cherchera en vain une correspondance entre une proposition théorique prise individuellement et un fait ou un ensemble de faits pouvant la confirmer. Ce n'est que dans son ensemble qu'une théorie fait face à l'expérience, et il est impossible d'attribuer une signification empirique déterminée à chacun des concepts de la théorie (Awasso, 2012).

\* La capacité à fournir un bon système de prédictions. Une théorie ne doit pas seulement avoir un rôle rétrospectif de coordination et de synthèse des lois et des faits expérimentaux connus, elle doit fournir aux chercheurs un instrument de travail leur permettant de trouver des réponses aux questions qu'il se pose ; la scientificité d'une théorie se mesure par sa capacité à fonder de nouvelles hypothèses de travail permettant de découvrir des faits.

\* L'exigence de simplicité : ce que les mathématiciens appellent élégance et la réduction des hypothèses indépendantes.

\* La réfutabilité de la théorie, prise dans son ensemble, par l'expérience

### VI-3-2- La vérité d'une théorie :

---

<sup>41</sup> Duhem.P. La théorie Physique son objet, sa structure. 2016. Ed.ENS, pp44-45.

Au cours de l'histoire des théories de la connaissance, l'idée de vérité a fait l'objet de nombreuses définitions (Deshays, 2008). Toutefois :

*« La définition classique de la vérité la caractérise comme consistant dans l'accord de l'esprit et des choses, de la pensée et de son objet<sup>42</sup> »*

Mais cette définition classique du concept vérité a fait l'objet de plusieurs critiques qui se sont accentuées avec le développement de la science au XXe siècle.

Du moins c'est ainsi que Einstein conçoit le débat à l'intérieur même de la physique. Dans le texte d'une conférence présentée au *Civic Auditorium* de Cleveland, le 3 novembre 1950

*« La physique et les autres sciences <sup>43</sup> »,*

Einstein soutient que depuis l'époque moderne la conception de la vérité physique qui avait été la plus répandue chez les savants se conformait au concept classique de vérité comme adéquation entre l'esprit et le monde, bien que dès le départ des éléments théoriques et non déductibles de l'expérience furent introduits :

*« D'un point de vue philosophique la conception du monde qui était celle de ces physiciens est proche d'un réalisme naïf, dans la mesure où ils considéraient les choses dans l'espace comme quelque chose d'immédiatement donné par notre expérience sensible. Mais l'introduction des masses ponctuelles immuables était déjà un pas vers un réalisme plus raffiné. Il était en effet clair d'emblée que l'introduction de ces éléments atomiques n'était pas conditionnée par l'expérience. » (op. cit. page 159).*

La physique et la philosophie ont donc élaboré ensemble des nouveaux concepts de vérité où le rôle conjecturale des hypothèses est de plus en plus souligné et le rapport avec les données expérimentales bien plus indirect que dans la conception naïve.

---

<sup>42</sup> Alquié.F. Leçons de philosophie, Paris, Ed. Henri Didier, 2009, p. 383

<sup>43</sup> La transcription de cette conférence a été publiée dans le recueil *Albert Einstein œuvre choisies*, vol 5 (op cit) pp.158-163.

Le criticisme de E.Kant (1724-1804) a contribué essentiellement à la problématisation de ce concept classique et dogmatique de vérité. Pour les philosophes dogmatiques, toute idée vraie est une idée qui porte sur une réalité existant en soi que l'esprit ne fait que se représenter.

Mais avec la ruine du dogmatisme, la définition de vérité se transforme et elle devient liée à l'idée d'une construction cohérente et complète de la connaissance. Kant définit la vérité scientifique comme une vérité générale (applicable à tous les phénomènes) nécessaire (assurant la légalité des phénomènes) et fondé dans l'esprit.

*« ...Déjà, pour Kant, la science est dite vraie en ce sens que nous sommes assurés que ses lois se trouveront réalisées en toute expérience possible...que toute expérience doit se conformer aux nécessités de notre esprit <sup>44</sup>»*

- Le courant philosophique spiritualiste de H.Bergson a été, au tournant du XXe siècle, un des héritiers de cette tradition kantienne, tout en extrémisant la critique anti-dogmatique de Kant. Contrairement au rationalisme kantien, le spiritualisme a toujours défendu l'autonomie de la conscience et de la vie spirituelle contre le matérialisme scientifique, critiquant ainsi la raison, l'intelligence conceptuelle et discursive, en faveur de l'élan vital. Pour Bergson le spiritualisme est une philosophie de la nature vivante et le vivant est l'essence dynamique de la réalité.

Bergson affirme :

*« La vérité est qu'il s'agit, en philosophie et même ailleurs, de trouver le problème et par conséquent de le poser plus encore que de le résoudre. Car un problème spéculatif est résolu dès qu'il est bien posé. J'entends par là que la solution en existe alors aussitôt, bien qu'elle puisse rester cachée et, pour ainsi dire, couverte : il ne reste plus qu'à la découvrir. Mais poser le problème n'est pas seulement découvrir, c'est inventer [...] Position et solution du problème sont bien près ici de s'équivaloir : les vrais grands problèmes ne sont posés que lorsqu'ils sont résolus »* *La pensée et le mouvant*, 1922, p : 1293

Einstein pour sa part ne souscrirait pas à une telle conception. Bien qu'en reconnaissant le rôle fondateur des conjectures (des hypothèses) produites par la raison et non pas par

---

<sup>44</sup> Alquié.F. Leçons de philosophie, Paris, Ed. Henri Didier, 2009, p. 383

l'expérience, Einstein a toujours affirmé le rôle fondamental que l'expérience sensible en physique. Poser correctement un problème, « inventer » une formulation qui le clarifie, ne revient pas à le résoudre. Einstein affirme explicitement dans la même conférence de Cleveland mentionnée plus haut :

*« [...] par la pensée seule on ne peut pas parvenir à une connaissance des choses objectives. L'expérience sensible est à la base de toute recherche, et le contenu de vérité de la pensée théorique réside exclusivement dans le rapport qu'elle entretient avec l'ensemble de ces expériences » (op. cit. p. 163).*

#### VI-4- Discussions philosophiques sur les Concepts : Mesures, Observations :

Albert Einstein a beaucoup insisté, comme nous le verrons sur le concept de mesure et la notion d'observateur dans le chapitre 8 « sur la notion de temps en physique », le chapitre 9 « la relativité de la simultanéité » et le chapitre 10 (relativité de la notion distance spatiale) pour montrer leur importance dans la fondation de la nouvelle théorie.

Il associe à chaque concept un instrument : règle comme instrument de mesure de la distance et horloge comme instrument de mesure du temps. De plus à chaque fois qu'il mentionne une mesure ou une observation, il précise par rapport à quel solide de référence, ou système rigide de référence ou système de coordonnées la mesure ou l'observation sont effectuée, ce qui est réellement le point clé pour comprendre la théorie de la relativité. Or ces deux concepts (mesure et observation) étaient l'objet de plusieurs discussions philosophiques portant sur la possibilité de les distinguer entre eux.

L'observation était considérée comme qualitative et indépendante des méthodes, des théories, des connaissances et des instruments mais la mesure était considérée comme quantitative, mise en œuvre avec une méthode et faisant l'objet d'un processus impliquant des instruments.

Des courants philosophiques, comme le courant empiriste, considèrent qu'une donnée observationnelle doit être recueillie aussi directement que possible et qu'elle est toujours là avant et indépendamment de la mesure. Les courants instrumentalistes, au contraire, considèrent que parler de donnée observationnelle sans expliciter la méthode de mesure est un non sens.

Même pour les concepts d'observation et de mesure, des débats contradictoires entre philosophes des sciences ont eu lieu sur la distinction entre l'aspect instrumental et le rôle épistémique de la connaissance observationnelle.

P.Duhem (1861-1916) par exemple distingue entre l'observation et la mesure puisque il considère que l'observation proprement dite (non interprétative) s'arrête au seuil de l'instrumentation et donc doit laisser place à la mesure qui est, elle, interprétative, il précise :

*« Une expérience de physique est l'observation précise d'un groupe de phénomènes accompagnée de l'interprétation de ces phénomènes, cette interprétation substitue aux données concrètes réellement recueillies par l'observation des représentations abstraites et symboliques qui leur correspondent en vertu des théories admises par l'observateur<sup>45</sup> »* (Jost, 2013).

Rudolf Carnap (1891-1970) lui aussi distingue entre les concepts d'observation et de mesure. Il résume son point de vue dans le passage suivant :

*« ...le physicien appelle observables des grandeurs que l'on peut déterminer de manière relativement simple, telle que la longueur au moyen d'une règle, le temps au moyen d'une horloge, ou la fréquence des ondes lumineuses au moyen d'un spectromètre. Mais objectera un philosophe, l'intensité du courant électrique n'est pas réellement observée...oui n'est pas observée mais inférée à partir de ce qui est observé<sup>46</sup> ».*

Nous concluons qu'Albert Einstein au moment de la rédaction de son livre *La Relativité* n'a pas laissé la place à des discussions philosophiques sur les concepts utilisés concernant, l'observation et la mesure puisqu'il s'est contenté d'utiliser des instruments simples comme la règle et l'horloge pour la mesure de l'espace et la mesure du temps. Mais l'existence même de

---

<sup>45</sup> V.I.Jost. Mesure et observation à la lumière des techniques instrumentales contemporaines, cahiers philosophiques n°135, 2013, p. 27

<sup>46</sup> V.I.Jost. Mesure et observation à la lumière des techniques instrumentales contemporaines, cahiers philosophiques n°135, 2013, p. 28

ces instruments est questionable. Certains en ont fait le « troisième principe » de la théorie de la relativité.

Dans son livre Histoire du principe de relativité, 1971, Marie-Antoinette Tonnelat cite dans son premier chapitre : Relativisme et relativité de l'antiquité à la renaissance :

*« La distinction entre observable et grandeur physique nous semble essentielle pour interpréter les progrès de l'esprit relativiste <sup>47</sup> »*

Dans son chapitre VIII « Relativité restreinte et philosophie », Tonnelat cite :

« Ainsi les méthodes observationnelles utilisées par la relativité restreinte supposent :

D'une part, des observations passifs, c'est à dire des appareils de mesure qui affectent des enregistrements purs et simples dans le système respectifs, d'autre part, un physicien connaissant les principes d'une relativité réduite à un principe de raison suffisante capable de prédire la retranscription d'un événement donné dans plusieurs systèmes de référence Galiléens, les prévisions de ce physicien reposent essentiellement sur une logique de la mesure, il n'intervient à aucun moment pour influencer une observation<sup>48</sup> ».

#### VI-5-Conclusion :

Une théorie doit satisfaire à des multiples critères pour prétendre à la scientificité, elle révèle que la vérité en science ne se pense pas comme une vérité absolue, mais comme une vérité approchée, approximative, la science est devenue puissante lorsqu'elle est devenue modeste, elle a relativisé l'erreur, en se donnant toujours les moyens de surmonter ces erreurs.

Albert Einstein, dans son livre, et avant de fonder sa nouvelle théorie, a bien tenu compte de ces discussions, puisqu'il a commencé par annoncer les deux postulats de la théorie de la relativité restreinte d'une manière adéquate et explicite et qui vient contredire la mécanique classique, cette théorie est claire, puisqu'il a pu la simplifier pour qu'elle soit accessible aux

---

<sup>47</sup> Tonnelat.M.A. Histoire du principe de relativité, Paris, Flammarion, 1971, p.15.

<sup>48</sup> Ibid, p.233.

différents lecteurs même les non scientifiques, sans équivoques et cohérente, telles sont les bases de la vérité de sa théorie, cette théorie aussi a donné des nouvelles définitions des concepts temps et espace, deux concepts qui ont été largement discutés par les philosophes et les scientifiques, le temps et l'espace sont relatifs et non plus absolus comme pensait Newton.

Ainsi, la proposition de l'enseignement de ces concepts en physique et en philosophie, pourra aider les élèves à bien comprendre leur importance dans l'évolution de la théorie de la connaissance, à déduire les liens entre deux disciplines différentes tels que : physique et philosophie et à mieux comprendre la théorie de la relativité restreinte quand elle est introduite dans le contenu des programmes officiel de physique.

Cette présentation philosophique, à la fois générale et en écho à la présentation de la relativité par Einstein, a insisté sur les deux principes au fondement de la théorie de la relativité restreinte : le principe de relativité et celui d'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide. Pour mener une analyse précise et critique – d'un point de vue didactique - de l'approche d'Einstein dans son livre (exposé au chapitre VI), il convient de revenir de manière précise sur l'élaboration historique de ces concepts, ce qui est objet du chapitre qui vient.

## **Chapitre VII**

**Les Approches Didactiques et conceptuelles des écrits D'Albert Einstein dans son  
livre la théorie de la relativité restreinte et générale**

### VII-1- Introduction :

Einstein a écrit son livre dans le but de faire connaître, d'une manière aussi exacte que possible, sa nouvelle théorie de la relativité aux scientifiques, aux philosophes, à ceux qui s'intéressent à la physique en général et à la théorie de la relativité restreinte en particulier, même aux étudiants et aux bacheliers. Einstein n'a pas utilisé d'outils mathématiques complexes. Pour cela, il s'est basé sur deux approches :

#### a/ Approches didactique et pédagogique : (Mayrargue et Savaton, 2006).

Einstein a introduit dans son livre sa nouvelle théorie sous formes de chapitres courts et successifs en adoptant un ordre chronologique possible des faits pour rendre compte de son émergence de manière naturelle et logique ; son but est de ne pas ennuyer le lecteur d'une part et de créer un élément de suspense d'autre part sous forme de questions.

#### b/ Approches conceptuelles :

Pour fonder sa nouvelle théorie, Einstein a introduit, d'une manière simple, des concepts utiles, à partir des exemples choisis de la vie courante, et en se basant sur l'expérimentation (y compris de pensée), ces concepts sont tels que : mesure, observation, espace, géométrie, simultanéité, événement, vérité.

C'est pourquoi dans ce chapitre, nous allons approfondir ces deux approches choisies par Einstein pour voir si cette stratégie adoptée peut avoir un apport positif sur l'enseignement de la théorie de la relativité pour les élèves du secondaire.

### VII-2- Les approches didactiques et pédagogiques dans les écrits d'A.Einstein

-

Einstein, dans son livre, a énoncé avec justification les nouveaux postulats de la théorie de la relativité restreinte sans se fonder sur des calculs ni sur des résultats et des expériences complexes, mais sur une réflexion logique et sur une approche pédagogique et didactique fiable afin que cette théorie soit accessible à toute

personne intéressée et peut-être contribuer à ce qu'elle soit enseignable et incluse dans les programmes officiels des sciences physiques au secondaire et dans le supérieur.

Alors pouvons- nous réellement nous baser sur cette approche pour enseigner cette théorie aux élèves en physique et en philosophie ? Einstein a consacré, au début de son livre, deux chapitres sur la géométrie, et ceci pour deux considérations importantes :

1/ Montrer que la géométrie, qui sert à déterminer les coordonnées d'un lieu où se produit un événement, est considérée comme une branche de la physique ; cet événement doit être décrit par rapport à un système rigide de référence.

2/ Montrer l'importance de la géométrie dans le fondement de cette nouvelle théorie.

Einstein a essayé de simplifier les concepts utiles pour le fondement de sa nouvelle théorie, c'est pourquoi il a cité des exemples faciles de la vie courante et très connus comme : nuage, perche, corbeau, train, ...et du matériels communs comme règle..., ainsi, cette approche qui tient compte de la partie géométrie et espace pourra être utile pour le contenu des programmes officiels de physique et de philosophie au secondaire , quand ils abordent les thèmes de la mécanique newtonienne, et de la Relativité, tels que : le repère espace, repère temps, événement, système de coordonnées...car ça pourrait aider les élèves à mieux comprendre les concepts de la mécanique et les obstacles épistémologiques à l'évolution des connaissances scientifiques.

Einstein revient ensuite sur la description du concept de mouvement d'un corps et sur sa relativité au cours du temps considéré à l'époque absolu, étudié par les élèves du secondaire en physique.

Il choisit des exemples simples, le temps étant aussi est une grandeur observable et mesurable à partir d'une horloge, ce qui est analogue à la règle pour la mesure des distances. Ainsi, il prépare le lecteur à accepter aussi la relativité du temps, d'où, il introduit la notion de simultanéité pour la description de deux événements dans un même référentiel. Ainsi cette notion devient un nouveau important concept en cinématique pourtant elle est absente dans le programme officiel tunisien. L'introduction de ces deux concepts (événement et simultanéité) aidera les élèves à donner plus d'importance au concept temps (De Hosson, 2013).

Insister dans les programmes officiels de physique et de philosophie sur les rôles réels des concepts espace et temps en mécanique classique comme cités plus haut, car ça pourrait aider l'élève à comprendre le début de la théorie de la relativité restreinte qui n'est qu'un prolongement de la relativité galiléenne et c'est ce qu'a essayé de faire Einstein dans son livre lorsqu'il a énoncé le principe de la relativité ou le principe galiléen ou le principe d'inertie de la mécanique classique dont la validité devient étendue à tous les phénomènes physiques quelque soit leur origine (optique, électromagnétique, etc.).

L'introduction de ce principe est le début du fondement d'une nouvelle théorie. Ce principe ne concerne que la description des événements par rapport à des systèmes de coordonnées en mouvement de translation uniforme et exclut leurs mouvements accélérés, ce qui incitera Einstein à rechercher une théorie plus générale pouvant être étendue aux référentiels accélérés.

Einstein confirme ainsi que les lois de la physique restent valables dans n'importe quel système de coordonnées inertiel (Principe d'Inertie annoncé par Galilée et Newton), et montre aussi que la Physique peut évoluer dans le sens d'unifier ses lois. C'est pourquoi dans son livre, il introduisait la nouvelle théorie d'une manière simple et fiable puisqu'il partait de la mécanique classique déjà connue par le lecteur, cette approche pédagogique pourrait mener l'élève à faire le lien entre les différentes théories et les raisons de leur évolution.

Einstein n'a pas insisté sur l'évolution de la mécanique classique seulement mais il a aussi insisté sur l'insuffisance et la limite de cette mécanique pour expliquer toute les lois de la physique surtout en optique et en électrodynamique à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle.

Il cite l'incompatibilité de l'application de la loi d'addition des vitesses en mécanique classique ; dans le cas de la propagation de la lumière, cette incompatibilité n'est qu'apparente, Einstein a proposé que cette loi est simple et admissible facilement par les élèves, il dit : « *Tout écolier sait ou croit savoir que la lumière se propage en ligne droite avec une vitesse de 300.000 km/h* »<sup>49</sup>. Mais cette proposition ne nous semble pas valide, du moins pour nos élèves (voir questionnaire du chapitre IX ,annexe 4 pour voir ce que vraiment nos élèves connaissent la valeur de

---

<sup>49</sup> Einstein.A. La théorie de la relativité restreinte et générale, Paris, Ed. Dunod, 1916, p. 21.

c). Malheureusement, j'ai trouvé que la majorité des élèves ignore sa valeur et son importance en physique, alors faut-il insister encore plus dans les programmes officiels sur l'importance de la célérité de la lumière dans l'évolution de la physique et aussi la constance de sa valeur dans le vide ?

En se basant sur la loi de propagation de la lumière et sur la loi de composition des vitesses en mécanique classique appliquées sur l'exemple du train et du talus, Einstein réussit à mettre le lecteur devant un dilemme qui le pousse à se poser la question suivante :

Abandonner le principe de relativité ou abandonner la loi de propagation de la lumière dans le vide ?

Cette même situation pourrait être proposée à nos élèves pendant l'apprentissage, c'est la **situation problème** qui est une méthode didactique efficace utilisée en classe comme méthode pédagogique et didactique pour expliquer à nos élèves l'insuffisance de la mécanique classique citée plus haut.

Einstein continue et répond à ce dilemme sans entrer dans les détails et des calculs complexes, d'une part pour ne pas faire fuir le lecteur et d'autre part pour lui faire connaître l'importance de l'insertion du concept « temps » avec le concept « espace ».

Il signale alors qu'il n'y a aucune incompatibilité entre le principe de relativité et la loi de propagation de la lumière dans le vide, mais au contraire, ce principe et cette loi doivent être maintenus forcément et systématiquement et ce sont les deux pris ensemble qui vont nous mener à une théorie logique à l'abri de toute objection : la théorie de la relativité restreinte.

Notons que la métaphore du train et du quai est en lien avec le développement récent des chemins de fer face à l'augmentation du trafic des voyageurs et à la ponctualité des départs et des arrivées des trains.

Pour mieux faire comprendre cette incompatibilité qui n'est qu'apparente, Einstein revient sur la célérité de la lumière et cite une expérience qui a confirmé la constance de  $c$  : l'expérience de Fizeau (1851) qui pourrait être proposée aux élèves comme confirmation de cette nouvelle théorie.

Une fois la nouvelle théorie considérée comme acquise, Einstein continue à montrer son importance et son apport à la physique moderne, c'est pourquoi il n'a pas hésité à citer son impact sur l'évolution de la physique classique et montrer qu'elle touche à tous les domaines physiques modernes (optique, électrodynamique, ...). Pour bien expliquer au lecteur l'importance de sa nouvelle théorie, Einstein insiste sur son apport à la recherche en physique et ceci a un apport aussi pédagogique et didactique sur la façon d'introduire aux élèves la nouvelle théorie dans les programmes officiels de physique et de philosophie.

Les lecteurs et les élèves doivent être conscients des origines des fondements de cette nouvelle théorie et de sa participation efficiente dans l'évolution de la physique tels que :

\* Sa capacité à simplifier l'édifice théorique dans les domaines de la mécanique, l'optique, l'électrodynamique et l'électromagnétisme.

\* Rendre la mécanique classique comme un cas particulier de la mécanique relativiste ; dans le cas où la vitesse d'un corps est négligeable devant la célérité de la lumière.

\* Unifier les deux principes : principe de conservation de l'énergie et principe de conservation de la masse, avec l'équivalence masse-énergie :  $E = mc^2$

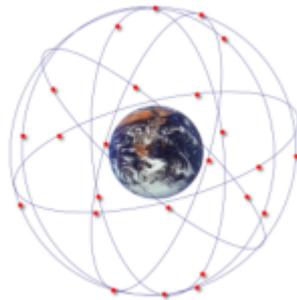
Ces deux exemples peuvent être utilisés en classe comme exemples de consolidation des acquis des élèves à propos de la nouvelle théorie.

Aussi la théorie de Maxwell-Lorentz citée par Einstein peut être aussi expliquée par la théorie de la relativité, exemples les lois du mouvement d'un électron  $\beta^-$  émis par une substance radioactive dans des champs électrique et magnétique qui sont des lois relativistes.

Traditionnellement, on a recours aux muons pour illustrer la dilatation des durées : la durée de vie très courte des muons les conduit à se désintégrer très rapidement ( $50\mu\text{s}$ ) dans leur référentiel propre, où ils sont au repos. Pourtant, les muons produits dans la haute atmosphère terrestre sont observables au niveau du sol. Se déplaçant à une vitesse proche de  $c$ , ils ne pourraient cependant parcourir une telle distance en raison de leur durée de vie très brève. Les observer au niveau du sol revient donc à confirmer

le phénomène de dilatation des durées d'après lequel la durée écoulée dans le référentiel terrestre est supérieure à celle qui s'est écoulée dans le référentiel propre des muons. On introduit aussi aujourd'hui des données GPS pour rendre compte de l'analogie de l'expérience de Hafele Keating.

La constellation GPS est constituée de 24 satellites NAVSTAR placés sur 6 orbites circulaires, l'altitude de ces satellites est de 20184 km, ils font ainsi un tour d'orbite en 12h, la position de chaque satellite est connue avec une précision inférieure à un mètre.



La constellation GPS

A. Einstein termine les chapitres de la théorie de la relativité restreinte par l'introduction du concept espace-temps de Minkowski à 4 dimensions et pour montrer au lecteur que le temps est privé de son indépendance comme il l'était en physique pré-relativiste (où  $t' = t$ ).

Ce nouveau concept appelé aussi continuum espace-temps à 4 dimensions présente une grande parenté avec le continuum à 3 dimensions de l'espace géométrique d'Euclide, ce nouveau concept espace-temps non cité en mécanique classique pourra être enseigné aux élèves pour leur montrer son importance et les aider à comprendre mieux la relativité de l'espace et du temps.

C. De Hosson a mené une étude avec les futurs enseignants des sciences physiques sur l'acquisition des concepts événement et référentiel qui sont deux concepts clés pour l'apprentissage de la relativité restreinte, elle a trouvé que la majorité des étudiants n'ont pas acquis les concepts référentiel et événement dans le cadre de la cinématique classique et donc ils sont incapables de produire un raisonnement reposant uniquement sur la localisation spatio-temporelle des observateurs<sup>50</sup>.

---

<sup>50</sup> De Hosson.C. et Kermen.I. Recherche en didactique et relativité restreinte : difficultés conceptuelles et pistes

### VII-3- Approches conceptuelles utilisées pour la fondation de sa nouvelle théorie : la théorie de la relativité restreinte.

Einstein a essayé d'introduire de nouveaux concepts pour répondre aux différentes questions posées en mécanique classique et pour fonder sa nouvelle théorie qui est la théorie de la relativité restreinte.

Dans le 1<sup>er</sup> chapitre, il signale que la partie géométrie doit être traitée comme une branche de la physique, c'est pourquoi il insiste sur l'introduction, en physique, d'un corps rigide, appelé corps de référence pour décrire un événement.

Dans la suite Einstein a voulu montrer que dans la mécanique classique, une description complète d'un événement est réalisée seulement quand on indique comment le corps change de position avec le temps. Or pour lui le temps est une grandeur observable et mesurable par une montre comme les dimensions de l'espace observables et mesurables par une règle, il propose alors que ce temps ne peut pas être absolu et pour confirmer sa supposition, il introduit un nouveau concept, le concept de simultanéité non cité en mécanique classique.

De plus, Einstein a érigé la loi d'inertie citée par Galilée et Newton en un principe de relativité restreint aux référentiels galiléens, et il cite l'exemple des systèmes de coordonnées  $K$  et  $K'$ . Mais avec l'évolution de la physique à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et l'apparition de l'électrodynamique, Einstein montra que ce principe de relativité issu de la devait être étendu à toutes les lois de la physique.

Il suffisait, d'un point de vue pédagogique, d'introduire un second principe, l'indépendance de la vitesse de la lumière du mouvement de sa source, une caractéristique propre à l'électrodynamique, pour que le principe de relativité classique associé à cette nouvelle loi constitue la base de la nouvelle théorie qui est la théorie de la relativité restreinte.

Einstein utilise des nouveaux concepts mathématiques comme la transformation de Lorentz pour garder les mêmes lois de la physique en passant d'un système de coordonnées  $K$  à un autre système de coordonnées  $K'$  ou inversement, il vérifie bien l'invariance des lois de la physique en électrodynamique et en optique et retrouve les mêmes lois en

---

pour l'enseignement, 2012. Revue : Union des professeurs de physique et de chimie, pp : 1041-1056.

mécanique newtonienne (pour les vitesses petites devant celles de la lumière) et aboutit à la conclusion suivante :

*« Les lois générales de la nature sont invariants relativement à la transformation de Lorentz <sup>51</sup> »*

Ainsi les lois de la mécanique newtonienne constituent un cas particulier de la théorie de la relativité restreinte : cas où la valeur de vitesse des corps est négligeable devant celle de célérité de la lumière  $c$ .

La théorie de Relativité Restreinte est considérée par Einstein comme une cristallisation des théories et expériences récentes à son époque Electromagnétiques (Maxwell-Lorentz), aberration des étoiles, principe Doppler, expériences de Fizeau et Michelson et Morley, ...

Là où l'approche d'Einstein apparaît comme la moins pédagogique et donc la moins convaincante, c'est son établissement de la contraction des longueurs et de la dilatation des durées comme une conséquence de transformations de Lorentz, dont il rejette la démonstration en annexe. Il est temps de voir comment contourner cette difficulté, qui obère tout enseignement complet de la théorie de la relativité restreinte à des élèves du secondaire, comme notre étude des programmes dans la partie A l'a montré.

---

<sup>51</sup> Einstein.A. La théorie de la relativité restreinte et générale, 1916, Ed. Dunod, p.50.

Chapitre VIII :

Proposition d'enseignement de la cinématique relativiste comme une modification de  
la relativité galiléenne.

### VIII-1- Visions et critiques concernant les écrits d'Albert Einstein sur la relativité restreinte

L'introduction de la théorie de la relativité restreinte pour les élèves du secondaire vise à les sensibiliser à la problématique du concept temps à plusieurs époques et aux idées qui ont donné un éclairage sur un domaine de la physique contemporaine.

A. Einstein a introduit le deuxième postulat de sa théorie : le postulat de la propagation de la lumière dans le vide à vitesse constante sans aucune explication mais en supposant que les élèves du secondaire ou même les lecteurs non scientifiques pourraient connaître et acquérir facilement ce postulat, mais ce n'est pas évident au moins pour les élèves tunisiens qui ignorent les connaissances concernant la célérité de la lumière : sa valeur, sa propagation, son utilité ... voir chapitre IX, questionnaire pré-test alors une attention particulière s'impose à ce sujet pour l'enseignement.

Dans quelques chapitres proposés par A. Einstein, nous avons remarqué l'absence de formulation précise, et ceci pourrait conduire à des confusions soit dans les manuels scolaires, soit dans l'acquisition des concepts par les enseignants et les élèves.

Exemple : (Bordas de Terminale sciences, p 221)

« Le mouvement provoque un ralentissement du temps, pour A Einstein, le temps est simplement ce que mesure une horloge : ainsi une horloge en mouvement fonctionne plus lentement qu'une horloge stationnaire »

Dans cette phrase l'auteur cite le mouvement sans préciser le référentiel par rapport auquel il définit le mouvement, ce qui laisse penser qu'une horloge en mouvement aurait un fonctionnement intrinsèque différent d'une même horloge au repos, ce qui est faux, et la formulation est pour le moins ambiguë.

Le manque d'exemples pratiques concernant l'application des lois de la relativité restreinte pourrait influencer négativement sur l'acquisition de cette théorie par les enseignants et par les élèves, comme par exemple la vérification de la constance de la célérité de la lumière par rapport à n'importe quel référentiel galiléen. Ceci rend cette théorie abstraite et difficile à transmettre aux apprenants, ce qui est le cas en Tunisie,

qui a éliminé l'enseignement de cette théorie dans le secondaire en 1998 pendant une réforme sur les programmes.

L'introduction de la transformation de Lorentz comme elle est citée dans les chapitres d'A.Einstein dans les programmes officiels des sciences physiques pourrait gêner les élèves à cause de sa complexité et de son caractère a priori non intuitif si elle est introduite, comme un simple outil d'analyse mathématique, dans le but d'expliquer que les lois générales de la physique sont invariantes ; c'est pourquoi, elle a été éliminée des programmes officiels français. Cette approche ne cadrerait donc plus avec les programmes et la démonstration donnée par Einstein pour la dilatation des durées ou la contraction des longueurs, comme des conséquences de l'utilisation des Transformations de Lorentz, ne pourrait plus être introduite en classe. D'ailleurs, A.Einstein ne fait à aucune référence à sa démonstration antérieure de l'article de 1905 pour établir les transformations de Lorentz qu'il n'a jamais reprise par la suite car il ne la trouvait lui-même vraisemblablement pas claire et aujourd'hui, probablement aucun physicien ne la connaît ou serait capable de la reproduire.

Les programmes français et italiens actuels se contentent du facteur gamma :  $\gamma = 1 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$  pour expliquer la transformation de Lorentz (hors programme) mais ce facteur pourrait masquer la relativité de la simultanéité et la loi de composition des vitesses qui n'est plus galiléenne, alors peut-on introduire la nouvelle théorie d'une manière pédagogique et didactique plus simple ?

Alors y-a-t-il d'autres méthodes d'enseignement de cette nouvelle théorie pour mieux et plus simplement expliquer aux élèves comment les lois de la physique sont invariantes ?

Et comment la transformation de Galilée est insuffisante au regard des lois générales de la physique ?

En Tunisie, l'introduction de la théorie de la relativité restreinte était basée sur l'expérience de Bertozzi et la description d'un cliché montrant le choc élastique proton-proton pour expliquer l'insuffisance de la mécanique newtonienne, ce qui avait mené les enseignants et les élèves à approfondir leurs connaissances non pas sur la nouvelle théorie d'Albert Einstein et son apport à l'évolution scientifique de l'époque

mais sur l'insuffisance de la mécanique Newtonienne et c'est pourquoi, cette partie du programme a été éliminée après quatre ans d'enseignement seulement. Mais pour réintroduire de nouveau cette nouvelle théorie, faut-il une nouvelle transposition didactique du savoir savant de la relativité restreinte ? Et si oui, comment ?

## VIII-2-Propositions d'enseignement de la cinématique relativiste au premier ordre de $V/c$ :

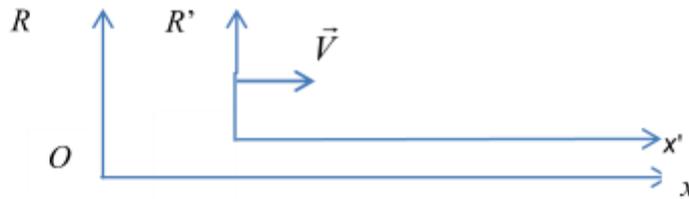
### VIII-2-1- Problématique et Introduction :

C'est là que l'on peut mentionner qu'on peut faire autrement, avec les Transformations de Lorentz dites au premier ordre (sans le facteur de contraction  $\gamma$ ), introduites par Lorentz en 1895 dans sa théorie des états correspondants, ancêtre du principe de relativité appliqué à l'électrodynamique. Vu les difficultés que pourrait présenter les transformations de Lorentz de 1905 aux apprenants du secondaire, alors nous pourrions remplacer ces transformations par la correction au premier ordre en  $V/c$  (C.Bracco, J.P.Provost, 2014) qui paraîtra aux apprenants plus simple à acquérir mais à partir desquelles tous les résultats de la relativité restreinte peuvent être établis (J.P.Provost et C.Bracco, 2016).

### VIII-2-2- Le savoir à enseigner dans la théorie de la relativité restreinte proposé aux élèves du secondaire : Approches didactique et pédagogique basées sur les transformations de Lorentz de 1895.

La transposition didactique est un concept didactique, c'est comment passer d'un savoir savant à un savoir à enseigner qui pourra être enseigné par les enseignants et qui pourra être acquis par les élèves. C'est ce que nous allons proposer à nos élèves, comme savoir à enseigner, concernant la théorie de la relativité restreinte avec l'utilisation des Transformations de Lorentz de 1895.

Soit  $R$  un référentiel galiléen et  $R'$  un référentiel en translation uniforme avec une vitesse  $V$  par rapport à  $R$ , et soient  $(x, t)$  et  $(x', t')$  les coordonnées d'un même événement dans  $R$  et  $R'$  (voir figure1) :



**Figure 1 :** Référentiel  $R'$  en translation suivant  $Ox$ .

A  $t = 0$  s, l'origine  $O'$  de  $R'$  coïncide avec l'origine  $O$  de  $R$ .

Nous rappelons aux élèves la *transformation galiléenne*

$$x' = x - Vt \quad (1)$$

$$t' = t$$

De la relation (1) nous déduisons les relations suivantes

$\Delta x' / \Delta t = \Delta x / \Delta t - V$  où  $\Delta x'$ , représente des différences de position dans  $R'$  à deux dates proches, d'un mobile qui se déplace selon  $Ox$ . Nous obtenons :  $v' = v - V$ ; la loi de composition des vitesses en mécanique classique vue au chapitre IV.

L'apport conceptuel principal des transformations de Galilée est l'idée de relativité de l'espace : un intervalle d'espace  $\Delta x$  entre deux événements dépend du référentiel

$$\Delta x' = \Delta x - V\Delta t \neq \Delta x.$$

Alors comment passer simplement des transformations de Galilée aux transformations de Lorentz ?

En 1895, Lorentz introduisait le terme  $-Vx/c^2$  dans l'expression de  $t'$  pour rendre compte des phénomènes électromagnétiques associés à des milieux en mouvement dans l'éther et de l'impossibilité de détecter par ce moyen le mouvement de la terre dans l'éther. Historiquement, ce « temps fictif », qui n'était pas un temps marqué par des horloges pour Lorentz, mais un changement de variables mathématique, provenait du fait que les équations de Maxwell devaient revêtir la même forme dans les deux référentiels, comme on l'a vu.

Comme Einstein l'a souligné, les transformations de Galilée sont incompatibles avec l'invariance de la vitesse de la lumière, en appliquant la loi de composition des vitesses ci-dessus si on l'applique à la vitesse  $c$  de la lumière.

Quelle est la modification la plus simple à introduire aux transformations de Galilée pour qu'elles soient compatibles avec l'invariance de  $c$  ? Nous proposons de suivre le raisonnement suivant.

Un observateur du référentiel  $R$  (le quai pour reprendre l'exemple d'Einstein) envoie depuis l'origine  $O$ , un flash lumineux, le long de l'axe des  $x$ , à l'instant  $t=0$ . Au cours du temps  $t$  de ce référentiel, le flash parcourt une distance :

$$x=ct, \quad (2)$$

où  $c$ , est la vitesse de la lumière dans  $R$ . Pour un observateur du train (référentiel  $R'$ ), en faisant appel au second postulat de la relativité restreinte sur la constance de la vitesse de la lumière, la vitesse sera  $c'=c$  et la distance  $x'$  parcourue par le flash lumineux dans  $R'$  sera donc :

$$x'=ct'. \quad (3)$$

Les relations (2) et (3) entre  $x$  et  $t$  d'une part et entre  $x'$  et  $t'$  d'autre part, doivent être considérées avec l'équation de base de la transformation galiléenne

$$x'=x-Vt \quad (1)$$

qui indique le déplacement de translation de l'origine  $O'$  par rapport à  $O$ .

Appliquons donc cette expression à notre rayon lumineux pour trouver la relation entre  $t'$  et  $t$ . Nous remplaçons donc dans (1) :

$x'$  par  $ct'$ ,

$x$  par  $ct$

$t$  par  $x/c$ . Nous obtenons, après division des deux membres par  $c$  :

$$t'=t-Vx/c^2 \quad (4)$$

Les transformations (1) et (4) sont les transformations de Lorentz de 1895, que nous appelons transformations au premier ordre en  $V/c$  puisqu'elles ne sont valables que pour des vitesses petites devant celles de la lumière, quand on change de référentiel. Notons que c'est sur cette base que le physicien allemand Max Abraham introduit ces transformations dans ses cours avant 1905<sup>52</sup>.

### VIII-2-3- Conséquences de la cinématique relativiste au premier ordre de $V/c$

---

<sup>52</sup> Conférence de Bracco.C. à l'Université de Lille, 2013.

### VIII-2-3-1- La relativité de la notion de simultanéité :

La relation (4) permet de mener une discussion sur la notion de simultanéité et sur le caractère non absolu du temps. Soient deux événements se produisant dans deux endroits différents dans  $R$ , alors les relations (2) et (4) peuvent s'écrire ainsi :

$$\Delta x' = \Delta x - V\Delta t$$

et

$$\Delta t' = \Delta t - V\Delta x/c^2 \quad (4')$$

Des événements simultanés ( $\Delta t = 0$ ) dans  $R$  (une photo prise dans  $R$ ), séparés spatialement de  $\Delta x$ , ne sont plus simultanés dans  $R'$  puisqu'alors  $\Delta t' \neq 0$ . La notion de simultanéité est donc relative. Nous pouvons introduire là la discussion faite par Poincaré dans la *Science et l'hypothèse* faite au chapitre IV, ce qui permet de restituer le lien entre notions physiques et interprétation philosophique. C'est en effet en vertu de ces Transformations de Lorentz au premier ordre qu'il faut comprendre la discussion de Poincaré dans la science et l'hypothèse, comme nous l'avons vu.

Nous proposons d'aller plus loin et de montrer que ce temps est celui indiqué par des horloges, en tenant compte de l'invariance de  $c$ . Pour cela, il nous faut détailler la démonstration suggérée par Poincaré dans son article de 1900, intitulé La théorie de Lorentz et le principe de réaction, rédigé en l'espace d'un mois<sup>53</sup> entre octobre et novembre 1900, en l'honneur du physicien hollandais H.-A. Lorentz, pour le vingt-cinquième anniversaire de sa thèse de doctorat (le *Jubilé*).

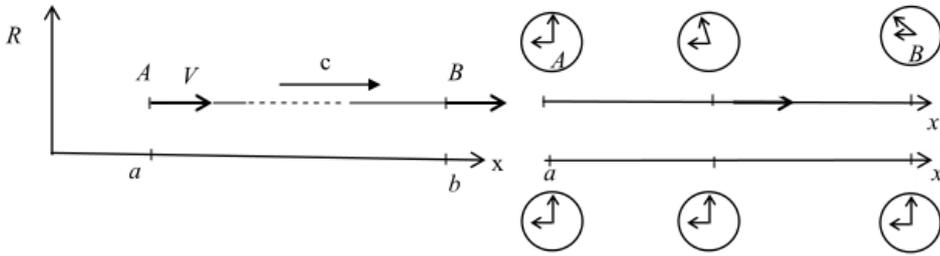
### VIII-2-3-2- Interprétation de H.Poincaré des transformations de Lorentz au premier ordre en $V/c$ .

Dans leur article intitulé : La relativité d'Einstein au premier ordre en  $V/c$ , publié dans l'union des professeurs de physique et de chimie en 2014, Christian Bracco et Jean-Pierre Provost (in BUP pp : 533- 546) ont exposé les remarques de H.Poincaré pour interpréter le terme  $-Vx/c^2$  apparu dans l'expression de  $t'$ . Poincaré nous dit que ce terme est la conséquence d'une convention de synchronisation d'horloges. Le paragraphe proposé par Christian et Jean Pierre est le suivant :

---

<sup>53</sup> Poincaré.H. Œuvres de Poincaré, 1900, vol3.

$$(t'_{rB} - t'_{rA}) - (t_{rb} - t_a) = \frac{l}{c} - \frac{l}{c-V} \approx -\frac{Vl}{c^2}.$$



**Figure 4 :** Lecture dans  $R$  à un instant  $t$  des montres synchronisées dans  $R'$ .

Si l'on représente l'heure  $t'$  indiquée par les montres du référentiel  $R'$  à un instant donné dans  $R$ , par exemple  $t'_a$ , la montre située au niveau de  $a$  indiquera  $t'_A$  tandis que celle au niveau de  $b$  à l'instant  $t'_b = t'_a$  retardera :  $t'_B = t'_A - Vl/c^2$  (cf. Fig 4).

Cette démonstration doit être adaptée par l'enseignant pour des élèves de lycée et chaque étape doit être explicitée clairement si l'on veut qu'elle puisse être utilisée.

Considérons donc avec Poincaré deux observateurs  $A$  et  $B$  du référentiel  $R'$ , séparés de la distance  $l$ . Comment s'assurer que les horloges en  $A$  et  $B$ , de constitutions égales, sont bien synchronisées entre elles ? Si  $A$  et  $B$  sont proches l'un de l'autre,  $B$  se rend en  $A$  et les deux observateurs règlent leur horloge pour qu'elles indiquent le même temps, comme nous pouvons être amenés à le faire dans notre vie quotidienne. Mais si la distance qui les sépare est importante ? Si  $A$  est sur terre et  $B$  sur Sirius, comme le dit Poincaré en 1904, dans la *Valeur de la Science* ? Il faut convenir d'un procédé de synchronisation. Le signal qui se propage le plus vite est le signal lumineux (ou électromagnétique de manière plus générale).  $A$  décide donc d'envoyer un signal lumineux vers  $B$  à l'instant qu'il considèrera comme origine, à 0h00. La lumière émise par  $A$  ayant à parcourir une distance  $l$  (que  $B$  a pris soin de mesurer à la manière du passager du train d'Einstein, en reportant sa règle) à la vitesse  $c$ , le signal atteint  $B$  avec un retard égal à  $l/c$ . On peut désigner par  $t'_{a=0}$  la date d'émission du signal par  $A$ . La réception de ce même signal par  $B$  dans  $R'$  a lieu à l'instant :

$$t'_{B=l/c} \quad (5)$$

Mais, nous dit Poincaré,  $A$  et  $B$  ignorent qu'ils sont eux-mêmes entraînés par rapport à un autre référentiel  $R$  à la vitesse  $V$ . Dans l'esprit de Poincaré,  $A$  et  $B$  sont sur

terre et se déplacent dans l'éther. On considèrera avec les élèves que  $A$  et  $B$  sont dans un train ou un vaisseau spatial qui se déplace par rapport à la terre. Dans le référentiel  $R$  (du quai pour le train, de la terre pour le vaisseau), que marque une horloge de  $R$  en un point qui coïncide avec le passage de  $B$  au moment de la réception du signal lumineux envoyé par  $A$ ? Pour simplifier, considérons que le signal émis par  $A$  l'a été au temps  $t=0$  de  $R$  également.  $A$  envoie son signal vers  $B$ , mais, vu de  $R$ ,  $B$  fuit  $A$  et le signal lumineux doit parcourir une distance plus grande pour rattraper  $B$ . Soit  $t_B$  le temps marqué par l'horloge de  $R$  dans le voisinage de  $B$  au moment de la réception du signal par  $B$ .  $B$  s'est déplacé à la vitesse  $V$  pendant  $t_B$ , augmentant la distance  $l$  que doit parcourir le signal lumineux pour le rattraper de  $Vt_B$ , de telle sorte que l'on a :

$$x_B = l + Vt_B \quad (6).$$

Mais la lumière se propage à la vitesse  $c$  dans  $R$  également (on utilise ici l'invariance de  $c$  au premier ordre).  $x_B$  est donc la distance parcourue par la lumière pendant le temps  $t_B$  à la vitesse  $c$ , d'où

$$x_B = ct_B \quad (7)$$

La substitution de la relation (7) dans (6) conduit à

$$t_B = l / (c - V) \quad (8)$$

La différence entre les indications des horloges de  $R'$  et de  $R$  au moment de la réception par  $B$  du signal est donc donnée par la différence des relations (5) et (8) :

$$t'_B - t_B = l/c - l/(c - V)$$

qui se développe au premier ordre en  $V/c$  en  $-Vl/c^2$ .

Ce développement mathématique, au premier ordre en  $V/c$ , est bien entendu le point délicat pour des élèves du secondaire. Il doit faire l'objet d'une attention particulière. On peut donner les expressions aux élèves et leur faire vérifier l'excellente approximation des fonctions, en les traçant par exemple.

On obtient ainsi, en s'affranchissant des indices, la relation :

$$t' = t - Vx/c^2$$

### VIII-2-3-3- Nouvelle loi de composition des vitesses

Nous savons que :

Dans  $R$ , l'équation horaire du mouvement d'un corps  $\Delta x = v \Delta t$  et  $\Delta x' = v' \Delta t'$  dans  $R'$ , que nous utilisons dans les deux relations (1) et (4) nous donne :

$$\Delta x' = v \Delta t - V \Delta t = (v - V) \Delta t \quad (9)$$

$$\Delta x' / v' = \Delta t - V v \Delta t / c^2 \quad (10)$$

et le rapport de ces deux expressions conduit à :

$$v' = (v - V)/(1 - Vv/c^2) \quad (11)$$

Ce qui est la nouvelle loi de composition des vitesses en cinématique relativiste. En toute rigueur, son établissement n'est valable ici que pour les vitesses  $V \ll c$ , domaine de validité des TL de 1895 et qu'il ne faut l'appliquer qu'à ces situations. Il se trouve que le facteur  $\gamma$  des TL de 1905 intervenant dans les deux relations  $x'$  et  $t'$  (voir chapitre IV) dont on fait le rapport, il se simplifie et on retrouve la même loi de composition des vitesses de manière exacte.

#### VIII-2-3-4- Constance de la célérité de la lumière :

Nous savons que dans R,  $x = ct$  avec  $c$  la vitesse de la lumière,  $x' = v't'$  avec  $v'$  la vitesse de la lumière dans R' ; Appliquons la relation (11) et vérifions que  $v' = c$

$$v' = \frac{c - V}{1 - Vc/c^2} \quad \text{on simplifie par } c \text{ et par } c - V \text{ nous retrouvons que } v' = c \text{ d'où la}$$

conformité avec le premier postulat de la théorie de la relativité restreinte. La loi de composition obtenue est donc bien compatible avec ce postulat.

#### VIII-2-4- Approches historique du savoir à enseigner proposé dans la théorie de la relativité restreinte.

##### VIII-2-4-1-L'expérience de Fizeau:

Lors de la séance du 29 septembre 1851 à l'académie des sciences, H.Fizeau expose « une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change de vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur »

Il s'agit d'une expérience d'interférences dans laquelle les deux trajets parcourus par la lumière se font dans de l'eau en mouvement à la vitesse  $V$ , l'un des trajets étant parcouru dans le sens d'écoulement et l'autre dans le sens opposé (pour doubler le déphasage et s'affranchir des inhomogénéités) comme on l'a vu dans le chapitre IV.

Fizeau explique le déplacement des franges qu'il observe en fonction de  $V$  par le fait que la vitesse de la lumière dans le laboratoire, lorsqu'elle se propage dans le sens d'écoulement, n'est pas donnée par la loi de composition galiléenne  $c/n + V$  mais

par la relation  $v = c/n + V(1 - 1/n^2)$  or cette formule n'est que la loi de la composition des vitesses en mécanique relativiste appliquée à la lumière. Pour le vérifier, on exprime  $v$  en fonction de  $v'$  dans (11), on écrit  $v'=c/n$  et on fait un développement au premier ordre en  $V/c$  de la relation (11). Ainsi, on retrouve la formule de Fresnel donnée en 1818 dans son analyse de l'expérience du prisme d'Arago dans le cadre d'une nouvelle cinématique. Il n'est plus question de problématique d'entraînement de l'éther.

### VIII.2.6. Vers la relativité restreinte d'Einstein ? Dilatation des durées et contraction des longueurs à partir des transformations de Lorentz de 1895.

Les TL de 1895 permettent d'aller plus loin que l'utilisation du second principe de la relativité restreinte pour leur établissement, la discussion de la simultanéité et du caractère relatif du temps, leur interprétation en terme de synchronisation d'horloges ou la loi de composition des vitesses. On peut établir directement à partir d'elles la dilatation des durées ou la contraction des longueurs (Provost et Bracco, 2016). Cela peut être abordé dès la terminale mais probablement que sous forme d'activité et pour les élèves les plus motivés ou pour les étudiants du supérieur, en première année de licence.

#### Transformation des durées.

Pendant qu'une horloge mobile, se déplaçant à la vitesse  $v$  dans un référentiel  $R$ , compte  $T_0$  dans son référentiel propre, par exemple la durée entre deux tics, soit  $T$  le temps écoulé dans  $R$  et  $x = vT$  son déplacement. Il nous faut relier  $T$  et  $T_0$ .

La vitesse  $v$  de l'horloge dans  $R$  est quelconque ; elle n'est pas forcément petite devant  $c$ . Ce qui est important est de considérer une horloge initialement en mouvement dans  $R$ .

Imaginons que l'on passe du référentiel  $R$  à un référentiel  $R'$  (qui n'est pas le référentiel propre de l'horloge mais un troisième référentiel) galiléen, en translation à la vitesse  $V \ll c$  par rapport à  $R$ . La formule du temps local de Lorentz s'applique entre  $R$  à  $R'$  et donne pour l'indication de l'horloge dans  $R'$  :

$$T' = T - Vx/c^2 = T(1 - vV/c^2)$$

puisque l'horloge se trouve dans  $R$  en  $x=vT$ . D'après la loi de transformation des vitesses que l'on a établies précédemment on a, entre les vitesses de l'horloge dans  $R$ , notée  $v$  et celle dans  $R'$  :  $v'-v = dv = -V(1 - v^2/c^2)$ . On a considéré ici que la différence finie entre  $v$  et  $v'$  était très petite et on a utilisé la notation différentielle  $dv$ . On déduit, en utilisant de même  $T'-T = dT$  :

$$\frac{dT}{T} = -\frac{vV}{c^2} = \frac{v dv}{1 - v^2/c^2}.$$

Cette égalité intégrée entre  $T_0$  et  $T$  pour le membre de gauche et entre les vitesses correspondantes  $0$  et  $v$  dans le membre de droite donne l'expression attendue :

. Nous pouvons faire un raisonnement plus accessible en  $T = T_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  remarquant que la quantité  $\gamma^{-1}T$  est invariante.

### Transformation des longueurs.

Un corps solide en translation est caractérisé dans le référentiel  $R$ , où il se déplace à la vitesse  $v$ , et où sa longueur est  $l$ , par un ensemble de points  $x$  satisfaisant la relation  $0 < x - vt < l$ .

(Provost, Bracco, 2016).

Cette relation se lit  $0 < x' - v't' < l'$  dans un référentiel  $R'$ . Dans  $R'$  ci-dessus, en translation à la vitesse  $V \ll c$  par rapport à  $R$ , on obtient ainsi la relation :

$$l' = \frac{l}{1 - vV/c^2} \approx l(1 + vV/c^2) \quad \text{ou} \quad \frac{dl}{l} = \frac{vV}{c^2}.$$

On a noté comme précédemment  $l' - l = dl$ , infinitésimal. On obtient de manière analogue à la transformation des durées, par intégration :

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

où  $l_0$  est la longueur de la règle dans son référentiel propre. C'est la relation donnant la contraction des longueurs

En conclusion, la relativité à tout ordre se déduit très facilement de celle au premier ordre ; mais encore faut-il pour cela ajouter à l'idée de relativité celle de groupe.

Chapitre IX : Questionnaire, analyse du questionnaire, proposition d'une séquence  
d'enseignement, retour des élèves

### IX-1- Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons et analysons une séquence d'enseignement sur la théorie de la relativité restreinte avec un groupe d'élèves volontaires (Bac sciences expérimentales), après avoir distribué un questionnaire aux élèves de terminale de sections scientifiques différentes et à un certain nombre d'étudiants de sections scientifiques. Nous insistons sur le lien entre transformation galiléenne et transformation de Lorentz au premier ordre en  $V/c$ , sur la relativité de l'espace et la relativité du temps (relativité de la simultanéité), sur la limite de la mécanique newtonienne, sur les applications contemporaines de la théorie de la relativité restreinte et sur les discussions philosophiques sur les concepts de cette théorie. Enfin nous allons tester et analyser le retour des élèves après cette séquence d'enseignement.

### IX-2- Choix du questionnaire (pré-test) :

Le questionnaire pré-test choisi est constitué de 15 questions ouvertes afin de permettre à l'élève de répondre librement et sans limitation de réponses. Ce questionnaire a été testé, sous sa première version, avec un nombre limité d'élèves afin de vérifier sa compréhension, la cohérence des questions, aussi le nombre des questions qui était au départ 20 questions et qui est apparu trop long pour l'échantillon d'élèves choisis, c'est pourquoi, nous l'avons réduit à 15 questions afin de ne pas ennuyer les élèves et par la suite perturber et influencer leurs réponses (**voir annexe 4**).

### IX-3- Objectifs du questionnaire :

Ce questionnaire a été proposé dans le but de contrôler les connaissances des élèves sur :

- 1- Les concepts cinématiques de la mécanique classique tels que : référentiel galiléen, relativité du mouvement, repos, événement, changement de référentiel, principe d'inertie. Ces concepts sont déjà étudiés au cours des années précédentes en physique. (de la question Q1 à la question Q9)
- 2- Les caractéristiques de la vitesse de la lumière et son importance scientifique et historique dans le fondement de la théorie de la relativité restreinte (de la question Q10 à la question Q13) sachant que ces élèves ont déjà abordé la vitesse de la lumière dans le thème des ondes.
- 3- Le lien entre physique et philosophie surtout pour le concept relativité.

#### IX-4- Echantillonnage :

Le questionnaire a été proposé aux élèves volontaires de terminale (4<sup>ème</sup> année) du Lycée Taha Houssein Mégrine Gouvernorat de Ben Arous Tunisie et des étudiants volontaires d'instituts universitaires différents : le nombre total de l'échantillon est de 45 élèves et 5 étudiants répartis comme suit :

- 25 élèves 4<sup>ème</sup> année section : sciences expérimentales, noté Sc.exp
- 10 élèves 4<sup>ème</sup> année section : sciences de l'informatique, noté Sc.Info
- 10 élèves 4<sup>ème</sup> année section : Mathématiques, noté Ma
- 5 étudiants spécialités différentes mais bac scientifique, noté Etu.

Le Lycée Taha Houssein est constitué de trois classes terminales section sciences expérimentales, une classe terminale section mathématiques et une classe terminale section sciences informatiques c'est pourquoi l'effectif des élèves volontaires varie d'une section à une autre. De plus les programmes de physique pour les trois sections, pendant la période du secondaire sont presque les mêmes en générale et identiques en cinématique classique et relativité galiléenne.

Nous avons choisi un certain nombre d'étudiants pour vérifier leurs acquis en cinématique classique sachant qu'ils ne font plus de la physique à l'Université sauf en première année pour deux étudiants. Ces élèves et ces étudiants n'ont pas vu la théorie de la relativité restreinte.

#### IX-5- Résultats et analyse des réponses au questionnaire:

##### 1- Les questions Q1, Q2 et Q3 :

Q1 : Comment pourrez-vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

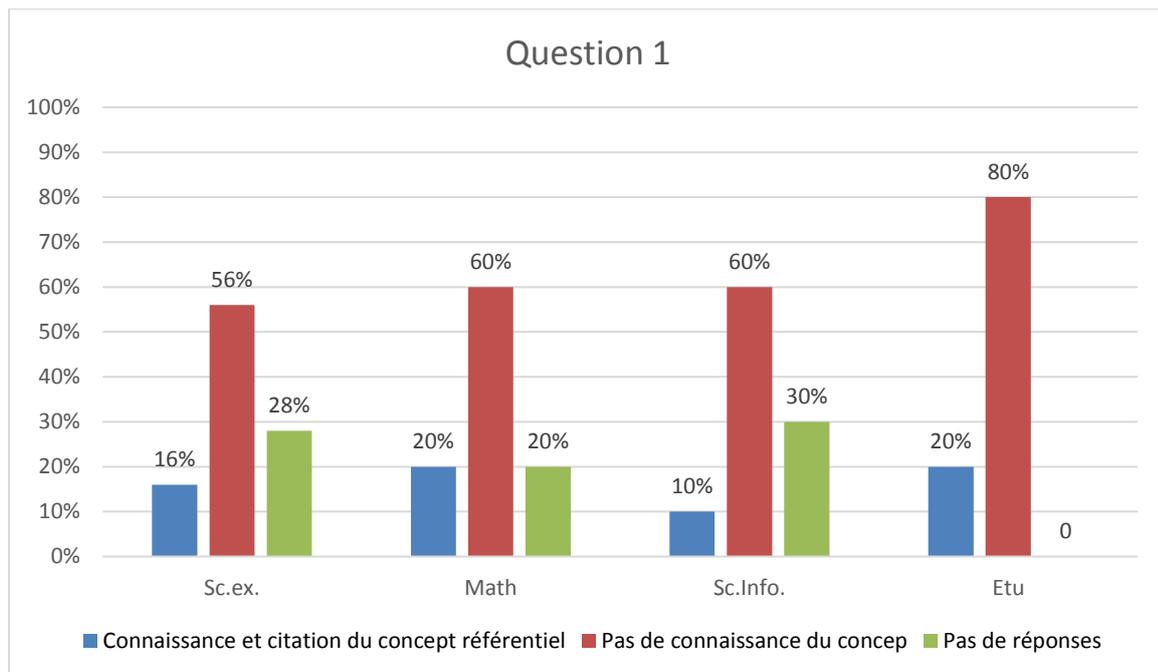
Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

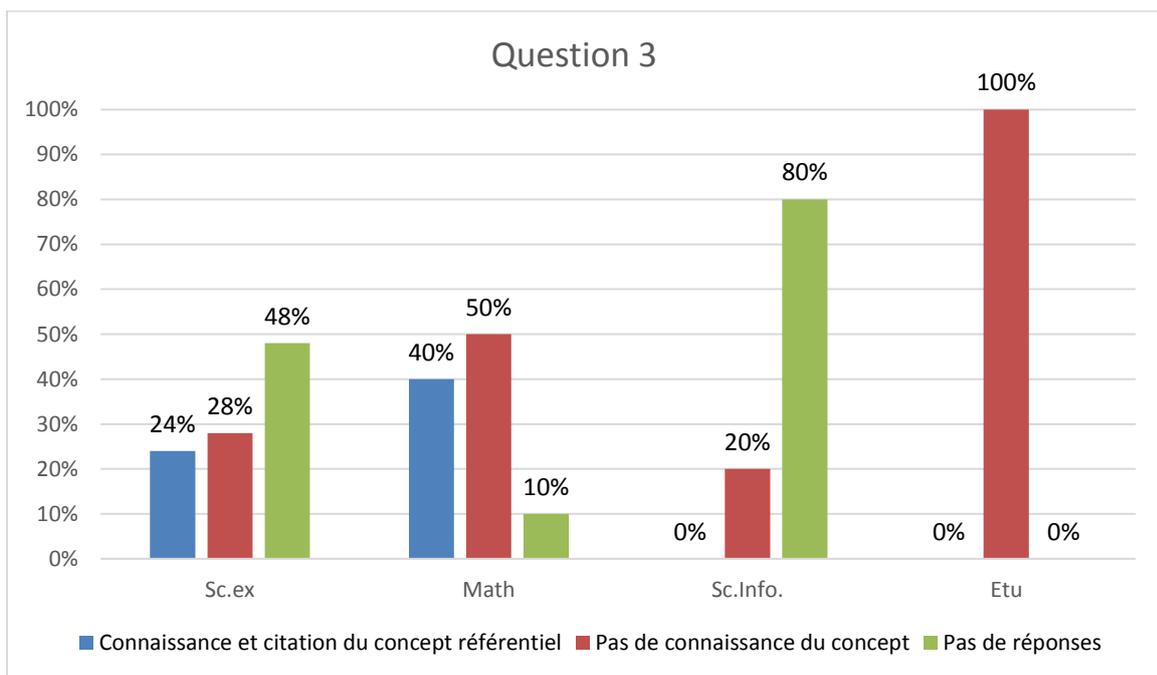
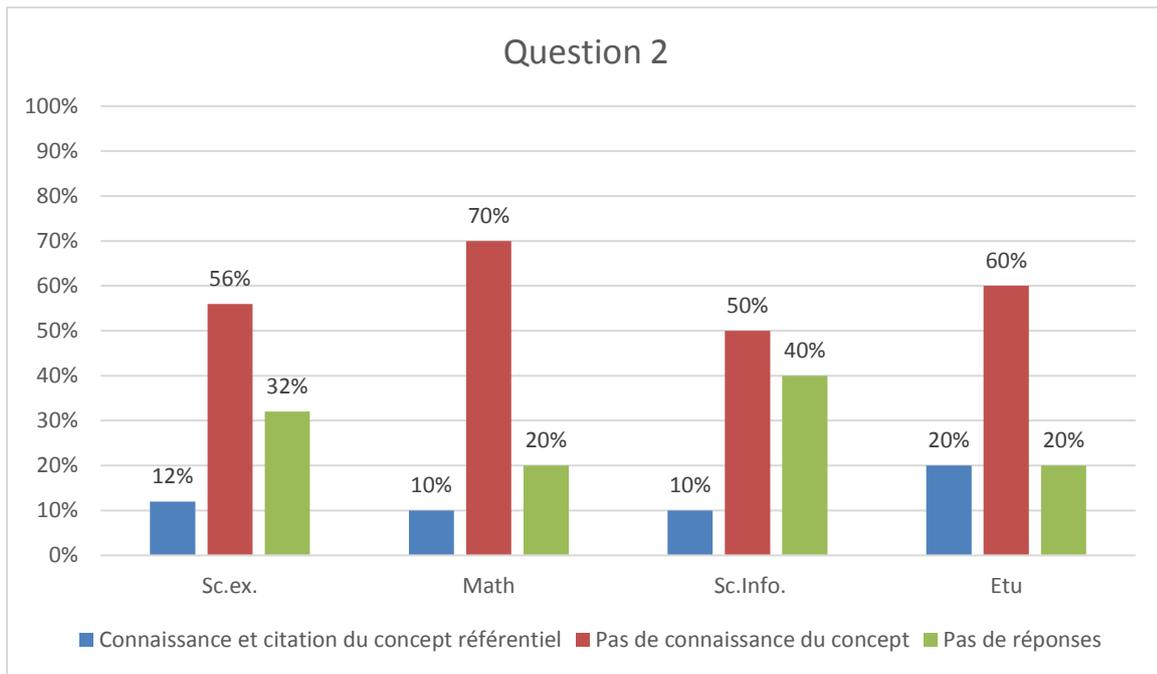
Q3 : Qu'est-ce qu'un référentiel galiléen ?

##### a/ Objectifs

Q1, Q2 et Q3 sont proposés pour contrôler les acquis des élèves et des étudiants concernés concernant le concept référentiel, son importance pour décrire l'état de repos ou l'état du mouvement d'un corps.

### b/ Résultats





c/ Analyse des résultats de Q1, Q2 et Q3:

Le concept Référentiel, n'est pas cité par la majorité des apprenants de chaque section, pour décrire l'état de repos ou l'état du mouvement d'un objet.

La majorité des apprenants ont utilisé le concept vitesse : savoir si la vitesse d'un corps est différente de zéro pour dire qu'il est en mouvement et savoir si sa vitesse est égale à zéro pour dire qu'il est au repos.

Parler de la vitesse, c'est parler d'une manière implicite du référentiel privilégié qui est l'observateur lui-même.

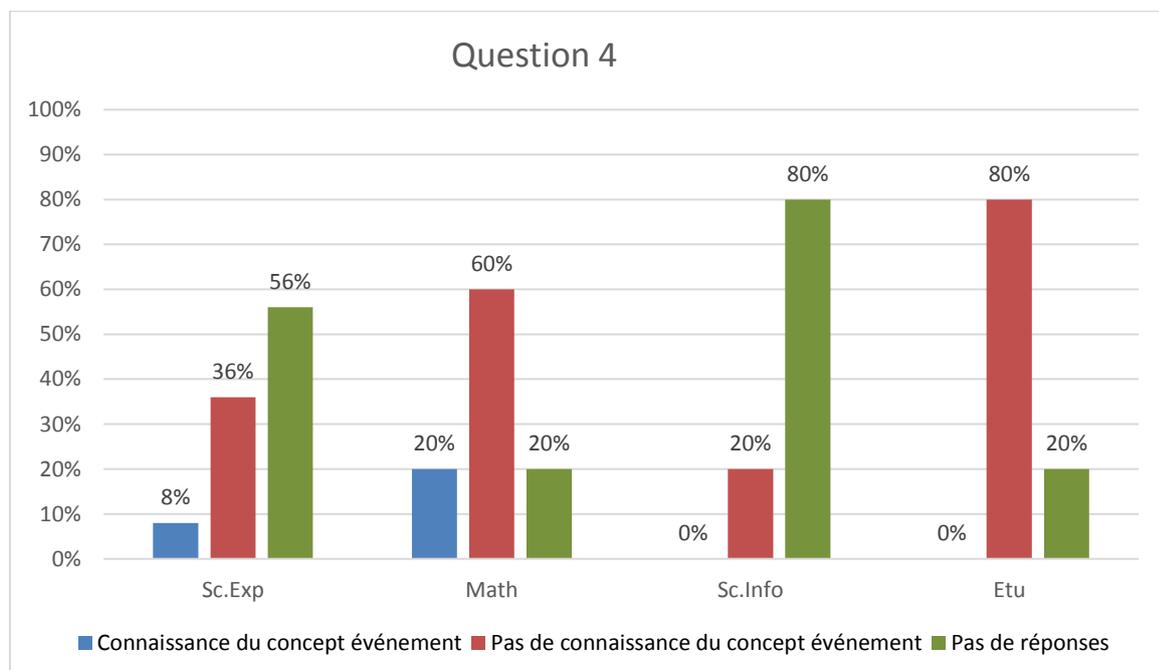
Exemple : Rima (Sc.Exp) a cité : « Corps en mouvement :  $V \neq 0$  / Corps en repos :  $V = 0$  » (voir Annexe n°6).

2/ La Question Q4 : Qu'est-ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

a/ Objectifs :

L'objectif de cette question est de tester si les élèves et les étudiants connaissent ou non le concept événement en physique et par la suite tester chez eux l'importance du concept temps dans la description du mouvement d'un corps et son lien avec le concept espace même si le temps est considéré comme un concept absolu en cinématique newtonienne.

b/ Résultats :



c/ Analyse des résultats :

La majorité des apprenants de toute section n'a pas pu répondre à cette question, puisqu'ils n'ont pas vu dans le cours de physique ce concept en cinématique, et ceci pourrait constituer un obstacle épistémologique pour l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte (De Hosson et Kerman, 2012).

Exemples : Elève (Math) cite : « Un événement en physique est un phénomène ou un mouvement dans l'espace, la réalité, on le repère par un référentiel » sachant que cet élève confond repère avec référentiel d'après sa réponse à la question Q2 (voir annexe n°7).

Rihab cite : « Un événement est une observation physique se repèrent en événement terrestre ou extra- terrestre » voir annexe n°8).

Etudiant E1 cite : « Un événement est un corps en mouvement par rapport à un référentiel »

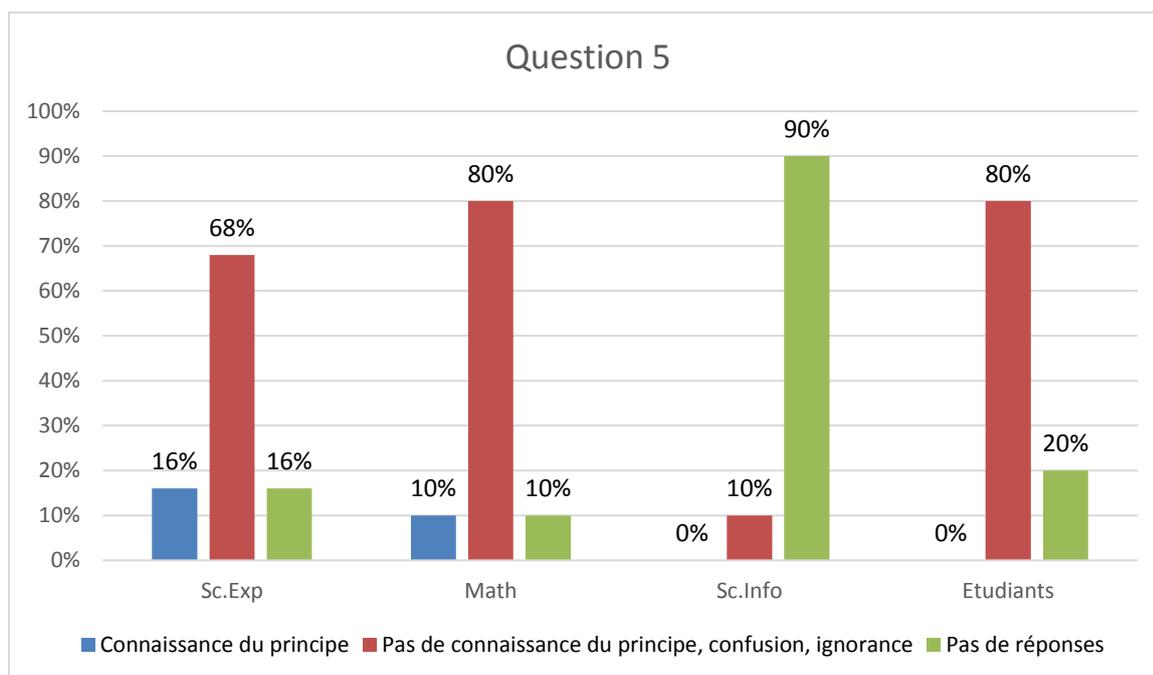
(Voir annexe n°9).

3- La Question 5 : Enoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

a/ Objectifs :

Vu l'importance du principe d'Inertie, il est enseigné dès la première année et est appliqué par la suite pour toute la mécanique classique, alors nous allons tester le savoir des élèves de terminale sur ce principe.

b/ Résultats :



c/ Analyse des résultats :

La majorité des apprenants ne connaissent pas l'énoncé du principe d'Inertie, pourtant ce principe est vu en première année secondaire dans le thème : Forces, mouvement, pression

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Volume horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Appliquer la 1<sup>ère</sup> loi de Newton.</li> <li>▪ Distinguer entre le poids et la masse d'un corps.</li> <li>▪ Exploiter la relation de proportionnalité entre le poids et la masse d'un corps.</li> <li>▪ Expliquer l'effet de l'apesanteur sur le fonctionnement de l'organisme humain.</li> <li>▪ Appliquer la condition d'équilibre d'un objet soumis à deux forces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Comment expliquer la chute des corps ?</li> <li>▶ Comment situer le centre de gravité d'un solide homogène de forme géométrique simple ?</li> <li>▶ Quelle relation y a-t-il entre le poids et la masse d'un corps ?</li> <li>▶ Pourquoi les cosmonautes revenant sur Terre trouvent-ils des difficultés à se maintenir debout ?</li> </ul>	<p><b>I-7.</b> 1<sup>ère</sup> loi de Newton (Principe d'inertie)</p> <p><b>I-8.</b> Le poids d'un corps</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Direction et sens ; centre de gravité</li> <li>- Relation entre l'intensité du poids et la masse (intensité de pesanteur <math>g</math> en <math>N.kg^{-1}</math>)</li> <li>- Danger de l'apesanteur</li> </ul>	3 h

Quelques élèves de toute section se sont contentés de citer : « la somme des vecteurs forces appliquées est nulle » ce qui montre que ces élèves confondent la partie cinématique avec la partie dynamique et donc ça pourrait être pour eux un obstacle épistémologique pour apprendre la théorie de la relativité restreinte.

Exemples :

- Etudiant E1(H) cite : « la somme des forces est égale à zéro » (voir annexe n°10)

- Elève section Sc.exp. cite : «  $\sum \mathbf{F} = 0$  » (voir annexe n°11).

- Elève section Math cite : « la somme des forces s'exerçant sur un corps est nulle » (voir annexe n°12).

En deuxième année, les élèves étudient la partie cinématique et appliquent le principe d'inertie mais sans se rendre compte de ce principe, car l'enseignant et le contenu du programme ne le cite pas, et n'insiste pas sur son importance ni sur l'importance du concept référentiel dans la partie cinématique.

Le principe est cité une autre fois d'une manière négligée dans la partie commentaires du programme officiel de troisième année en physique dans le thème mouvement, comme suit : (page 35).

#### **Commentaires**

On se limitera aux mouvements de translation dans le plan.

Dans les généralités sur la cinématique, on s'intéressera au point matériel.

Pour l'étude cinématique des mouvements, on introduira brièvement la dérivée d'une fonction scalaire et on généralisera aux fonctions vectorielles tout en se limitant à des vecteurs unitaires constants. Il est à noter que les notions introduites ne doivent en aucune manière donner lieu à un développement excessif.

On donnera sans démonstration, les expressions de l'accélération tangentielle et de l'accélération normale. Il est à remarquer que l'étude de « la composition de vitesses » est strictement hors programme.

Le vecteur déplacement est hors programme.

On énoncera la loi fondamentale de la dynamique (2<sup>ème</sup> loi de Newton). Il est indiqué de préciser d'emblée que la relation :  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$  traduisant cette loi n'est valable que dans les référentiels galiléens. On saisira cette occasion pour définir le repère de Copernic, le repère géocentrique et pour signaler sans développement excessif le caractère approximativement galiléen de ces repères ainsi que tout repère lié au laboratoire.

L'application du théorème du centre d'inertie à un solide isolé ou pseudo-isolé permettra de vérifier le principe d'inertie.

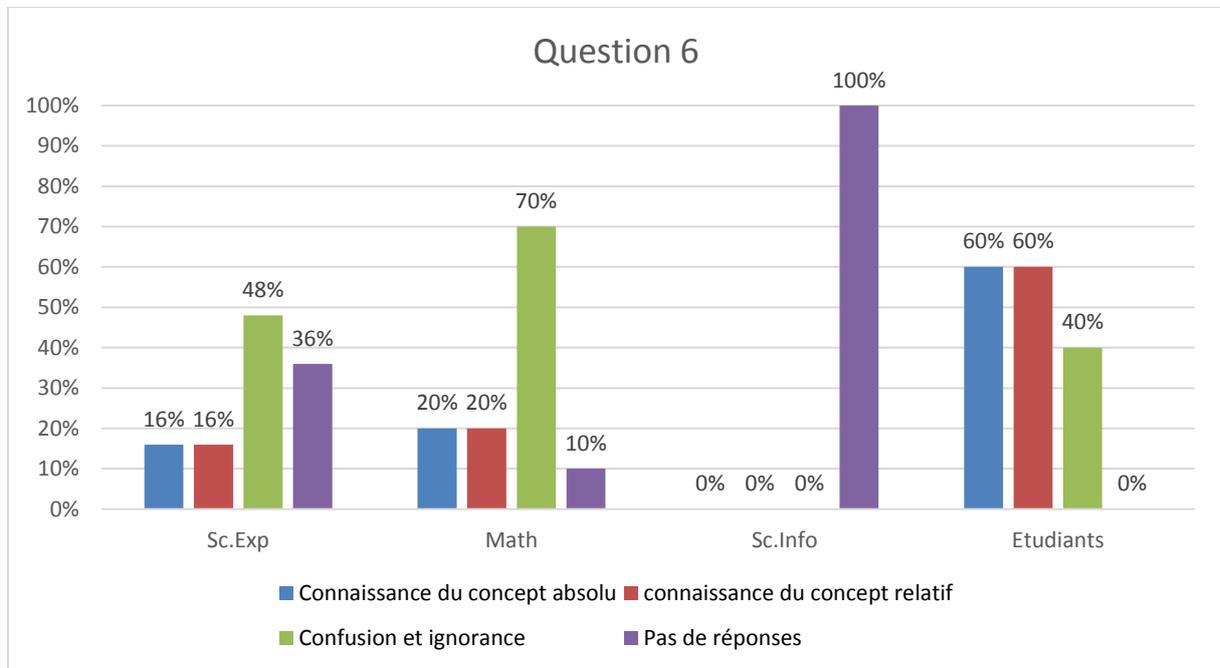
En plus, ce commentaire nous montre bien que le concept référentiel est négligé puisqu'il insiste sur le concept repère uniquement.

4- La Question Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

a/ Objectif :

L'objectif de cette question est de savoir si les élèves maîtrisent bien les concepts absolu et relatif en cinématique d'une façon générale ou non.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

La majorité des apprenants ignorent et confondent les concepts relatif et absolu car le contenu des programmes de physique tout au long du secondaire et par la suite les enseignants n'insistent pas sur ces deux concepts et leur importance, surtout pour le concept espace et le concept temps.

Quelques élèves se sont contentés de définir absolu comme inchangeable, relatif comme changeable sans connaître la définition scientifique exacte de chaque concept et leurs liens avec les concepts espace et temps.

Exemple :

Elève (Hiba) Sc.exp. cite : « absolu : qui varie pas, relatif : qui varie » (voir annexe n°13).

D'autres apprenants ont lié le concept absolu et le concept relatif respectivement à illimité et limité sans expliquer en détail.

Exemple :

Elève section Math cite : « absolu signifie une chose qui n'a pas de limites, relatif signifie une chose qui possède des limites » (voir annexe n°12).

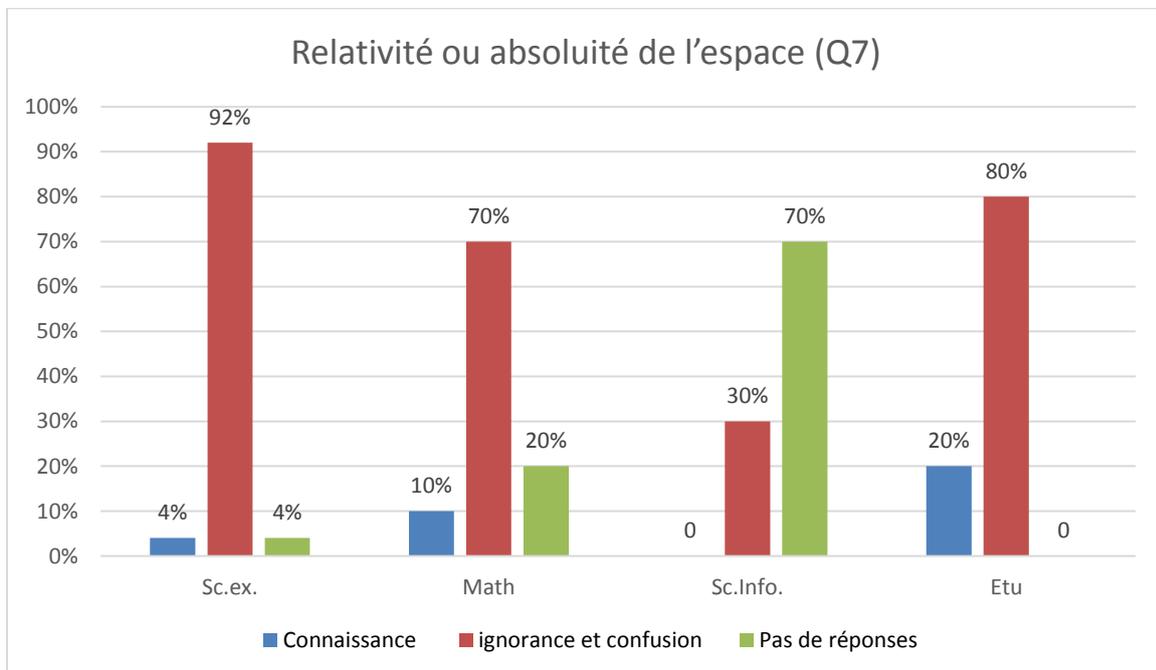
5- Question 7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.
- le temps est-il absolu ou relatif ? Justifier.
- le mouvement est-il absolu ou relatif ? Justifier.

a/ Objectifs :

L'objectif de cette question est de tester les connaissances des élèves qui ont correctement répondu à la question Q6 sur les liens entre absolu et relatif et les concepts temps et espace en physique car nous supposons que pour le reste des élèves ne vont pas connaître ces liens puisqu'ils ignorent ou confondent les concepts absolu et relatif. Les réponses des élèves sans justification seront considérées comme fausses.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

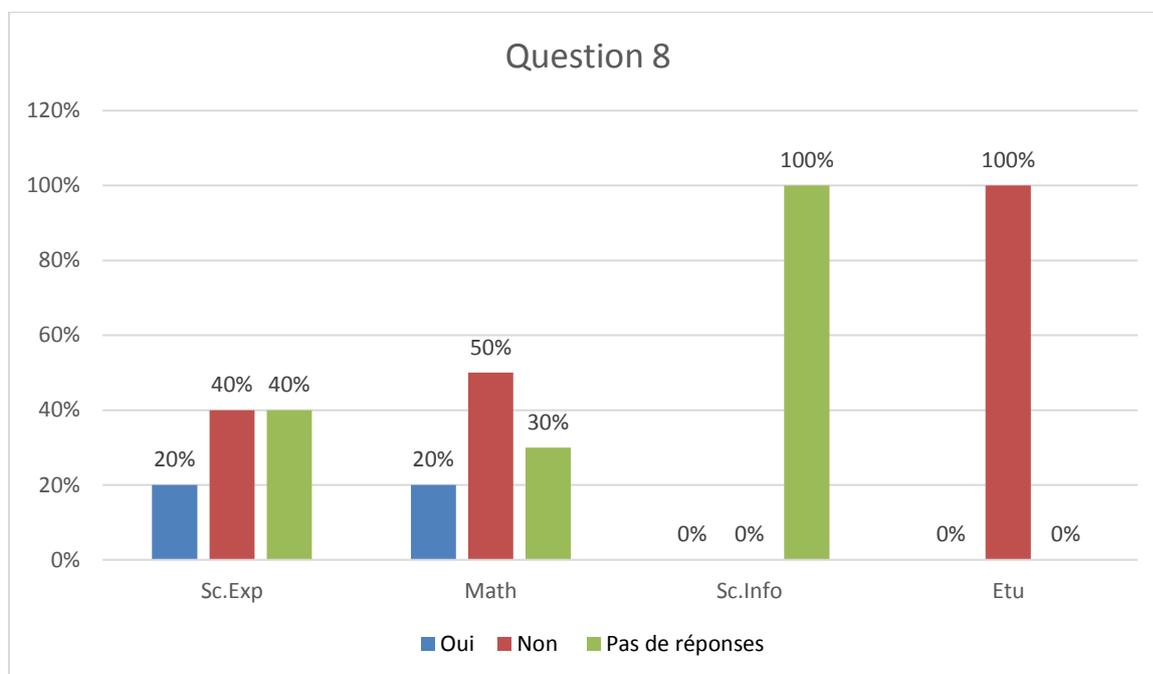
La majorité des apprenants ignorent et confondent les termes absolus et relatifs surtout quand ils sont liés aux concepts : espace, temps et mouvement, même pour les élèves qui ont répondu correctement à la question 6 et ceci nous paraît logique puisque ni les programmes ni les enseignants insistent sur ces liens.

**6- La Question 8 :** Avez-vous entendu parler de transformation galiléenne en mécanique classique ? Si oui en quelle année d'étude ?

**a/ Objectifs :**

L'objectif de cette question est de vérifier si les élèves ont entendu parler de la transformation galiléenne pendant leur apprentissage de la cinématique ou non.

**b/ Résultats :**



**c/ Analyse :**

Même s'il y a quelques élèves qui ont répondu correctement à cette question mais ils n'ont pas pu arriver à justifier leurs réponses donc nous concluons que ces réponses sont des réponses par tâtonnement.

De plus, la partie cinématique est enseignée durant le secondaire sans faire appel à la transformation galiléenne, elle est enseignée avec séparation totale entre les concepts espace et temps, ce qui pourrait être un obstacle épistémologique pour l'apprentissage de la théorie de la relativité restreinte.

7- La Question 9 : Soit  $R(O, x, y, z)$  un référentiel d'origine  $O$  et d'axes  $x, y$  et  $z$  et soit  $R'(O', x', y', z')$  un référentiel mobile animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme à la vitesse  $V$  dans  $R$ , parallèlement à la direction  $(Ox)$ . On suppose qu'à l'instant initial  $t = 0$  les origines  $O$  de  $R$  et  $O'$  de  $R'$  des deux référentiels sont confondues.

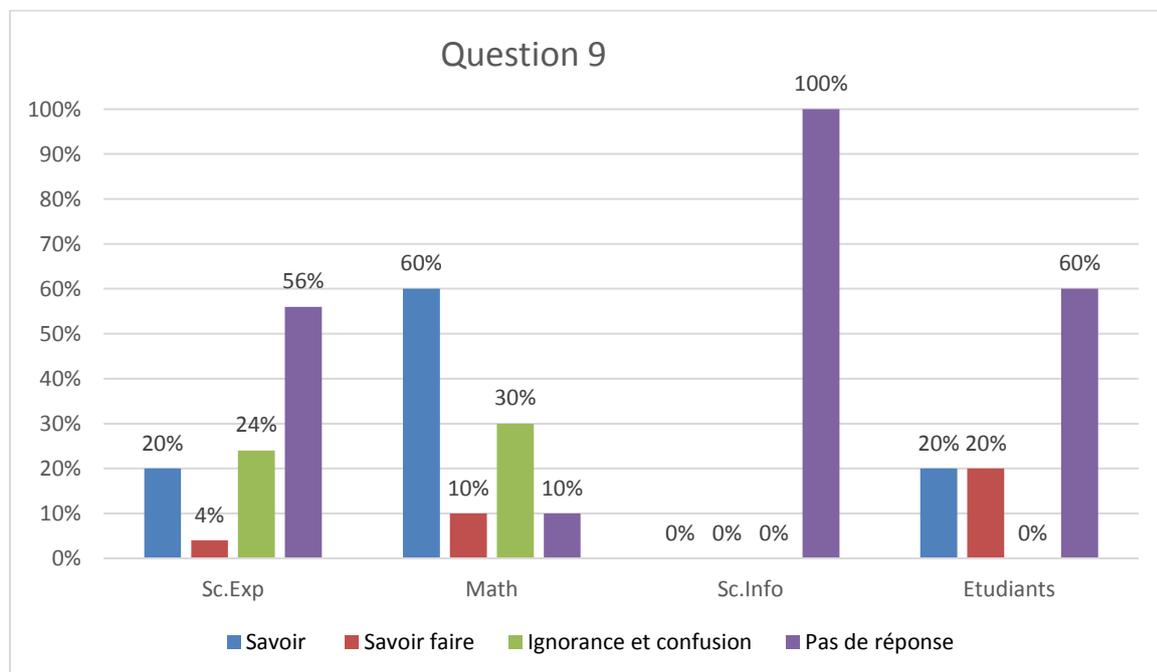
-Faire un schéma à un instant  $t$  quelconque des deux référentiels  $R$  et  $R'$ .

-Donner l'expression mathématique de la relation entre les coordonnées dans  $R'$  et celles dans  $R$ ,  $x' = f(x, V, t)$ ,  $y' = f(y)$ ,  $z' = f(z)$ .

a/ Objectifs :

L'objectif de cette question est de tester la mobilisation du savoir et du savoir-faire des élèves concernant le passage d'un référentiel galiléen à un autre pour décrire le mouvement d'un corps.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

La majorité des élèves de terminale section Math ont pu répondre à la première partie de la question Q9, donc ils ont pu mobiliser leurs connaissances concernant le choix des référentiels galiléens, pour le reste des apprenants leur majorité confondent le passage d'un référentiel galiléen à un autre.

8- Les Questions 10, 11 et 12

-Que signifie en physique la vitesse de la lumière ? Donner sa notation et sa valeur.....

Cette valeur dépend-elle de la vitesse de déplacement de la source lumineuse?  
.....

Cette valeur dépend-elle de la vitesse de l'observateur qui reçoit le signal lumineux ?

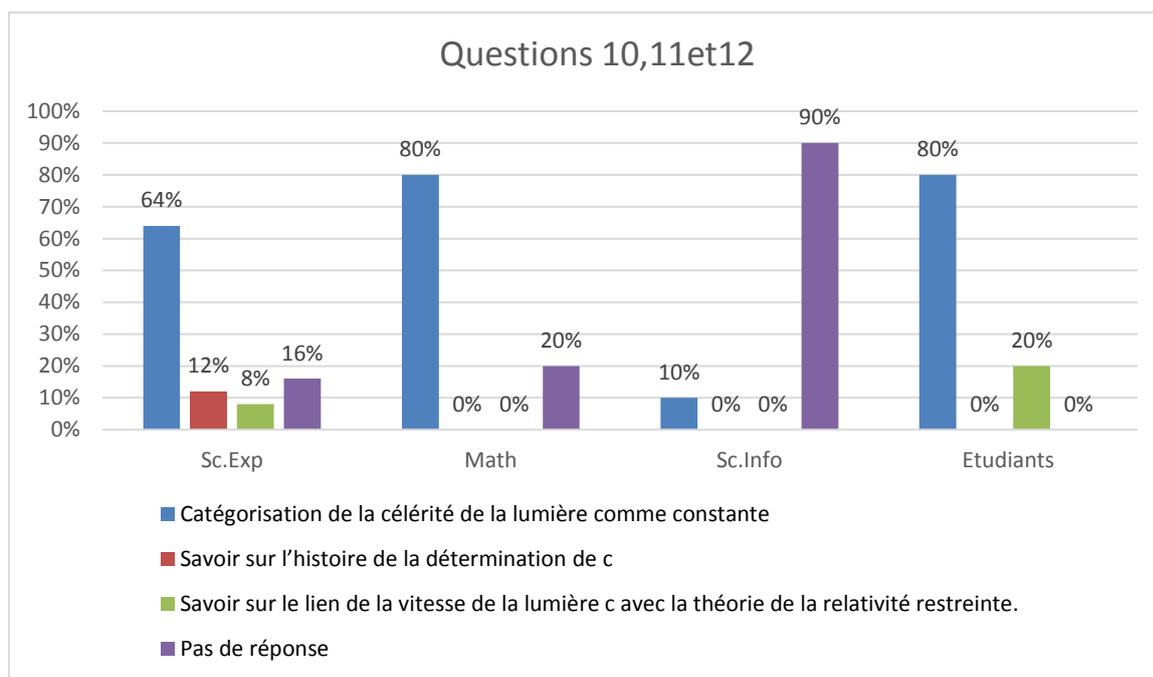
Q11 : Quels noms de scientifiques sont attachés à la détermination de la vitesse de la lumière ? À quelles époques ?

Q12 : Quels liens existent-ils entre la vitesse de la lumière et la théorie de la relativité restreinte? Connaissez-vous le nom du physicien, inventeur de cette théorie ?

a/ Objectif :

L'objectif de ces questions est de vérifier le savoir des élèves sur la vitesse de la lumière, ils la considèrent comme une constante invariable, sans savoir un peu d'histoire sur la détermination de sa valeur ni savoir son lien avec la théorie de la relativité restreinte.

b/ Résultats :



### c/ Analyse :

La majorité des apprenants considèrent que la célérité de la lumière est une simple constante puisqu'ils répondent qu'elle ne dépend pas de la vitesse de la source et de la vitesse de l'observateur malgré qu'ils n'ont pas vu la théorie de la relativité restreinte.

Exemple : Elève (Molka), Sc.exp.cite : « Elle est une constante physique universelle et une vitesse limitée, elle est de l'ordre de 300.000km/s » (voir annexe n°14).

Ils ignorent l'histoire de la détermination de la valeur de la vitesse de la lumière.

La majorité des élèves connaît le nom d'Albert Einstein comme inventeur de la théorie de la relativité restreinte mais ils ignorent le lien entre cette théorie et la vitesse de la lumière.

Aucune signalisation dans les programmes officiels sur l'importance de la vitesse de la lumière dans l'évolution de la physique moderne, pourtant les élèves utilisent la vitesse de la lumière dans la partie spectre atomique tel que :  $\Delta E = hc/\lambda$  et aussi dans l'équivalence masse énergie tel que :  $\Delta E = \Delta mc^2$ .

### 9- La Question 13 :

En relativité restreinte :

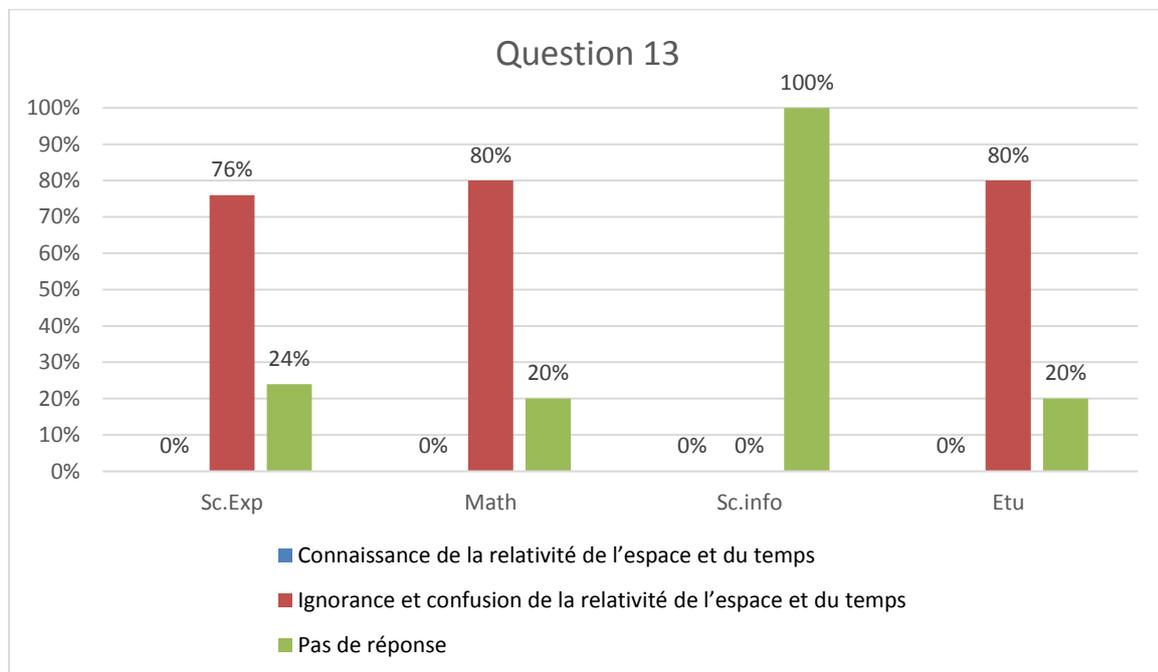
- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.

a/ Objectif :

L'objectif de cette question est de vérifier que les élèves ne maîtrisent pas les concepts relativité de l'espace et du temps et absoluité de l'espace et du temps, puisqu'ils n'ont pas étudié la théorie de la relativité d'une part et ils ne maîtrisent pas ces concepts en mécanique classique déjà étudié, c'est pourquoi, nous avons demandé aux élèves de justifier leurs réponses.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

Des élèves confondent les concepts relativité et absoluité de la mécanique classique avec la mécanique relativiste.

Des élèves de terminale science expérimentale et Math considèrent que l'espace et le temps sont absolus en mécanique Newtonienne et sont relatifs en relativité, rien que le terme relativité restreinte qui l'a influencé pour répondre ainsi.

Exemple : Elève (X), section Math cite : « en relativité restreinte, l'espace est relatif, le temps est relatif » sans aucune justification sachant qu'en mécanique newtonienne il a répondu que : « l'espace est absolu, le temps est absolu » (voir annexe n°15).

10- Questions 14 et 15.

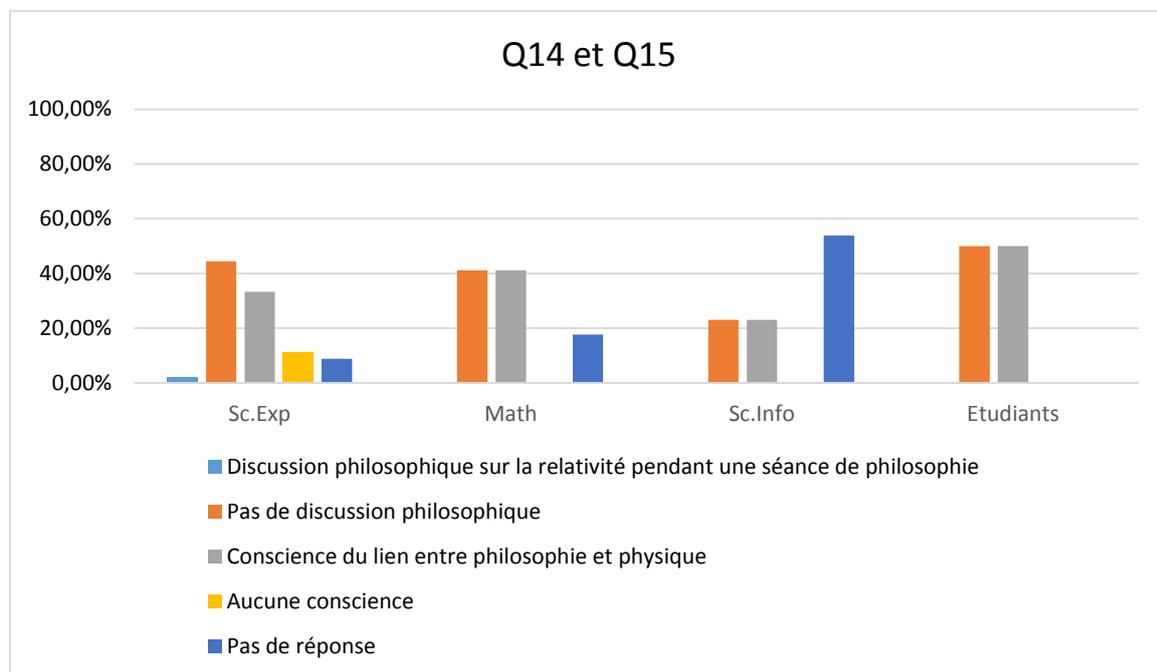
**Q14 :** D'après ce que vous avez étudié en philosophie, avez-vous appris quelques discussions philosophiques sur la relativité en physique ? Citer un exemple.

**Q15 :** D'après ce que vous avez étudié en physique et en philosophie, Pensez-vous qu'il y a un lien entre physique et philosophie ?

a/ Objectif :

L'objectif de ces deux questions est de savoir si les élèves évoquent dans la séance de philosophie des questions en physique et en particulier en relativité et de savoir si l'élève est conscient ou non du lien existant en philosophie et physique.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

La majorité des apprenants n'ont pas vécu des séances interdisciplinaires surtout pendant la séance de philosophie, ils n'ont jamais évoqué les liens entre philosophie et physique en particulier en relativité, pourtant les statuts de la physique et de la philosophie incitent les enseignants à discuter avec les élèves pendant leur séance sur des concepts qui ont eu des apports à la physique et à la philosophie.

Des élèves justifient leur conscience du lien entre philosophie et physique à partir du fait que la majorité des physiciens sont des philosophes ou l'inverse.

#### IX-6- Première conclusion (avant séquence d'enseignement):

D'après l'analyse des réponses des apprenants aux questions du questionnaire proposé, nous pouvons conclure que le manque d'acquisition des concepts cinématiques en physique classique et les confusions existantes entre les différents concepts sont valables pour tous les élèves de différentes sections et même aussi pour les étudiants de différentes spécialités.

Les apprenants ne maîtrisent pas les différents concepts cinématiques tels que : référentiel galiléen, repère, principe d'inertie et ses applications, événement, le lien entre espace et temps, les termes absolu et relatif...

D'après le contenu des programmes de physique en Tunisie, le concept relativité et le thème cinématique de la physique classique n'étaient introduits qu'à partir de 1994 et leur introduction était pendant un temps très court qui ne dépassait pas 5h pour toute étude cinématique et qui ne permettait pas à l'élève de bien acquérir les différents concepts convenablement.

La majorité des apprenants considèrent que la vitesse de la lumière est une constante universelle qui ne change pas et ignorent son apport à la physique moderne en général et à la théorie de la relativité restreinte en particulier.

Même si la majorité des apprenants n'ont pas eu l'occasion de discuter la théorie de la relativité en philosophie, ils étaient conscients des liens entre les deux disciplines physique et philosophie.

D'après les résultats et les analyses des réponses des apprenants et afin d'essayer de les préparer à l'apprentissage de la théorie de la relativité restreinte, nous avons proposé une séance de cours d'une heure pour des élèves volontaires, à la fin du mois d'avril, dans laquelle nous avons insisté

sur les concepts cinématiques mal acquis à partir de l'introduction de la transformation galiléenne, ses concepts et ses lois qui mettent en évidence :

a/ En mécanique classique :

- \* le concept événement : définir ses coordonnées et le temps correspondant.
- \* le concept relativité du mouvement,
- \* le temps absolu, la simultanéité absolue.
- \* la loi de composition de la vitesse
- \* la constance de l'accélération qui met en évidence l'uniformité des référentiels galiléens
- \* l'insuffisance de la cinématique classique pour expliquer les phénomènes électromagnétiques.

b/ En théorie de la relativité restreinte :

- \* La transformation de Lorentz au premier ordre.
- \* La constance de la vitesse de la lumière.
- \* Dédution des principes de la théorie de la relativité restreinte

c/ Les liens historiques et philosophiques entre philosophie et physique.

- \* Citation de quelques concepts de la théorie de la relativité restreinte qui ont été discutés en philosophie.
- \* Citation de quelques philosophes qui ont discuté ces concepts.

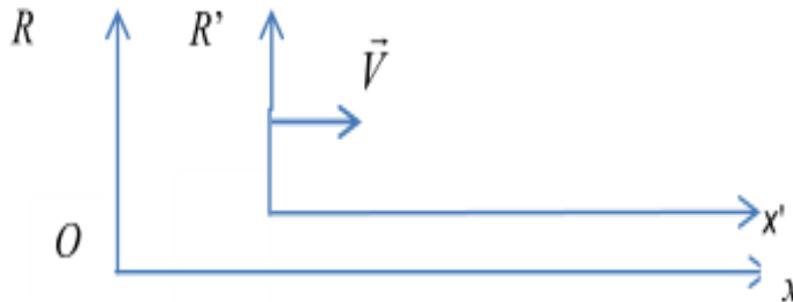
La démarche pédagogique et didactique qui va accompagner cette séance est basée sur la démarche pédagogique utilisée par Albert Einstein pendant l'écriture la partie théorie de la relativité restreinte dans son livre : « La théorie de la relativité restreinte et générale » (chapitre V) et sur notre proposition d'introduction des transformations au premier ordre.

L'acquisition des connaissances des élèves volontaires pendant cette séance va être évaluée à partir d'un nouveau questionnaire appelé questionnaire post-test (voir annexe n°5) distribué aux élèves correspondants après un mois c'est-à-dire fin mai 2019.

Vu que la fin du mois de mai est une période de révision pour les élèves du bac, donc c'est rare de les retrouver au lycée, mais 14 élèves volontaires m'ont promis d'assister et de répondre au questionnaire post-test et nous présentons l'analyse de leurs réponses aux différentes questions.

IX-7- Séquence d'enseignement : a été consacrée aux élèves volontaires en terminale science expérimentale pendant une heure et structurée comme suit (Durée 1h30') :

a/ Introduction de la transformation de Galilée en cinématique classique :



**Figure 1 : Référentiel  $R'$  en translation suivant  $Ox$ .**

$$x' = x - Vt \quad \bullet$$

$$t' = t \quad \text{traduit que le temps est} \quad \bullet$$

absolu

$$\Delta x' / \Delta t = \Delta x / \Delta t - V \quad \text{alors : } v' = v - V \quad \text{loi de composition des vitesses} \quad \bullet$$

$a' = a$  la constance de l'accélération explique l'équivalence des référentiels galiléens  $\bullet$

$\Delta x' = \Delta x - V\Delta t \neq \Delta x$ . pour des événements non simultanés, la trajectoire du mobile dépend du référentiel inertiel.  $\bullet$

b/ Limite de la cinématique classique d'après la loi de composition des vitesses qui montre que la célérité de la lumière n'a pas de limite :

$$c' = c + V$$

c/ Introduction de la théorie de la relativité restreinte à partir de la transformation galiléenne alors:

« Comment modifier la transformation galiléenne d'une manière pédagogique et didactique simple pour aborder la nouvelle théorie? »

On utilise l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide pour écrire l'équation d'un rayon lumineux dans les deux référentiels galiléens:

$$x=ct, \quad \bullet$$

$$x'=ct'$$

$$x^2 = x - Vt$$

on aboutit à  $t' = t - Vx/c^2$  ce qui explique la relativité du temps (simultanéité)

$\Delta x' = \Delta x - V\Delta t$  (1) explique la relativité de l'espace

$\Delta t' = \Delta t - V\Delta x/c^2$  (2), deux événements simultanés dans R ne le sont pas dans R'

(1)/(2) donne la nouvelle loi de composition des vitesses :  $v' = v - V / (1 - vV/c^2)$

développée au premier ordre en  $V/c$  donne  $v = v' + V / (1 - v'^2/c^2)$  qui permet de retrouver la relation de Fresnel dans le contexte d'une nouvelle cinématique.

d/ Citation de quelques discussions philosophiques sur les concepts : temps, espace, théorie, vérité, observation et mesure.

e/ Applications de la théorie de la relativité restreinte à partir de deux exemples : le GPS et le paradoxe des jumeaux.

#### IX-7- Analyse des réponses des élèves au questionnaire (post-test) :

Ce questionnaire post-test a été proposé aux élèves un mois après la séquence d'enseignement sur la cinématique classique et la théorie de la relativité restreinte, constitué de 10 questions : 5 questions sur la cinématique classique (de Q1 à Q5) et 5 questions sur la relativité restreinte et (de Q6 à Q10) se rapportant surtout sur la célérité de la lumière (annexe 19).

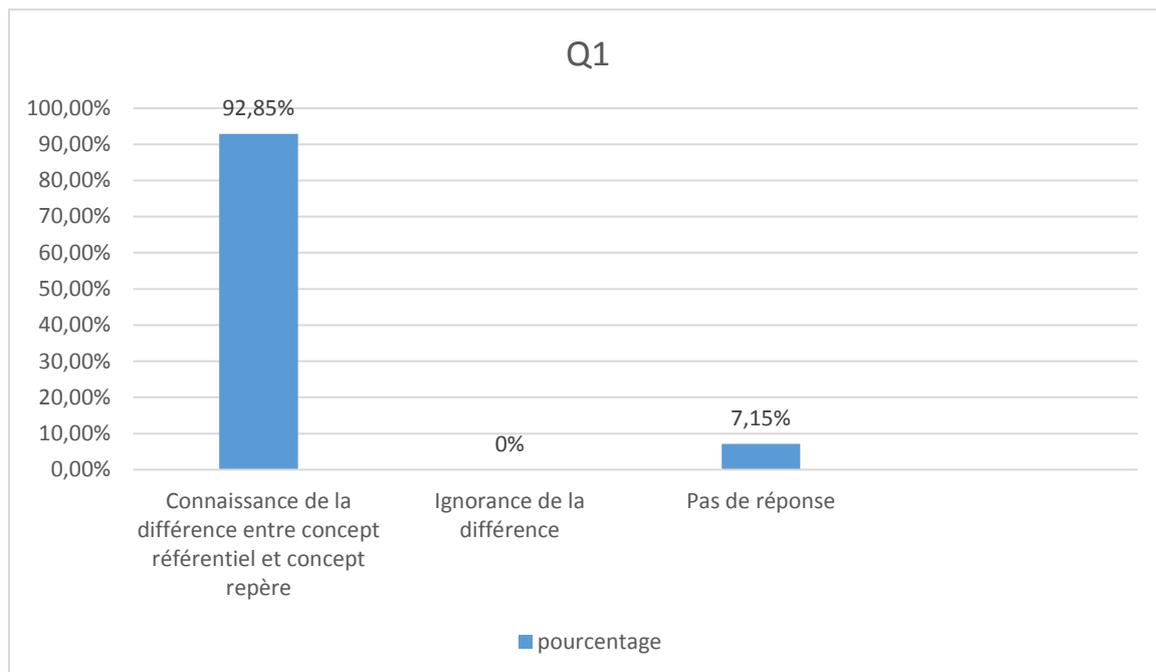
##### 1- La Question 1 :

Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

##### a/ Objectif :

Vérifier les acquis des élèves concernant la différence entre repère et référentiel.

##### b/ Résultats :



**c/ Analyse :**

Presque la totalité des élèves (sauf un élève) ont correctement répondu à Q1 en précisant la différence entre référentiel et repère.

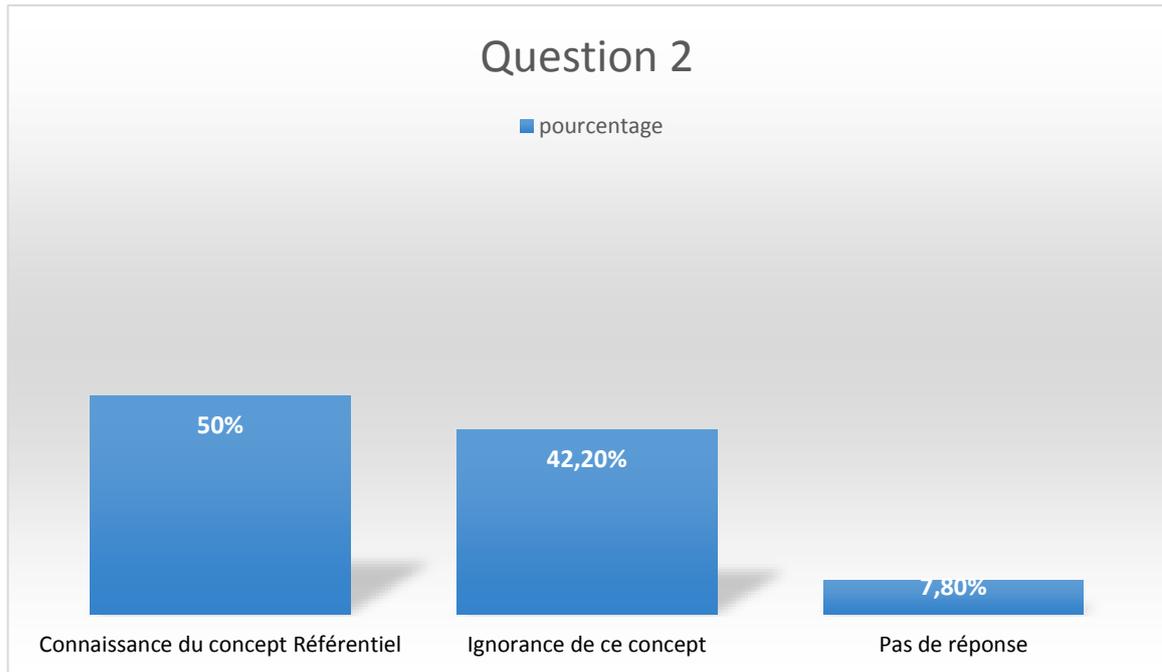
**2- La Question 2 :**

**Qu'est-ce qu'un référentiel galiléen ?**

**a/ Objectif :**

Vérifier si les élèves ont bien acquis le concept référentiel galiléen.

**b/ Résultats :**



c/ Analyse :

- 42,2% ignorent encore le concept référentiel galiléen, beaucoup d'entre eux ont cité que le référentiel galiléen est animé d'un mouvement constant sans préciser la nature du mouvement constant.
- 50% des élèves ont cité qu'un référentiel galiléen est animé d'un mouvement rectiligne uniforme mais sans préciser par rapport à un autre référentiel galiléen.
- Presque 7% d'élèves n'ont pas pu répondre à cette question.

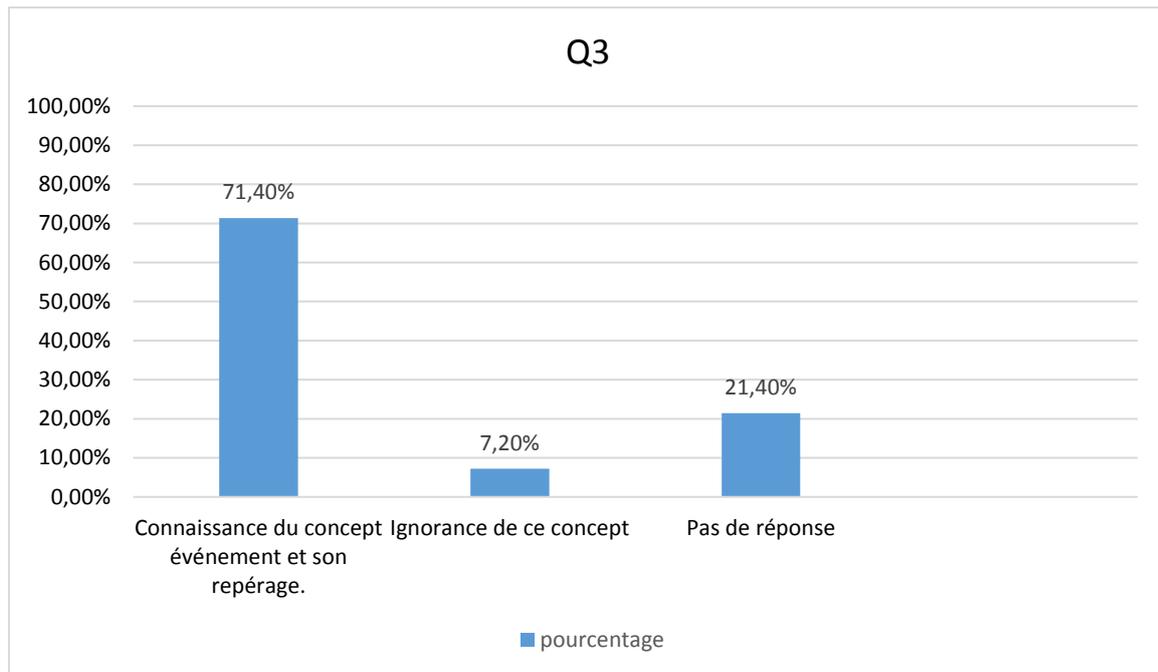
3- La Question 3 :

Qu'est-ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

a/ Objectifs :

De vérifier si les élèves ont bien acquis le concept événement et comment ils peuvent le repérer.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

La majorité des élèves ont pu définir un événement et le repérer dans l'espace et dans le temps.

4- La Question 4 :

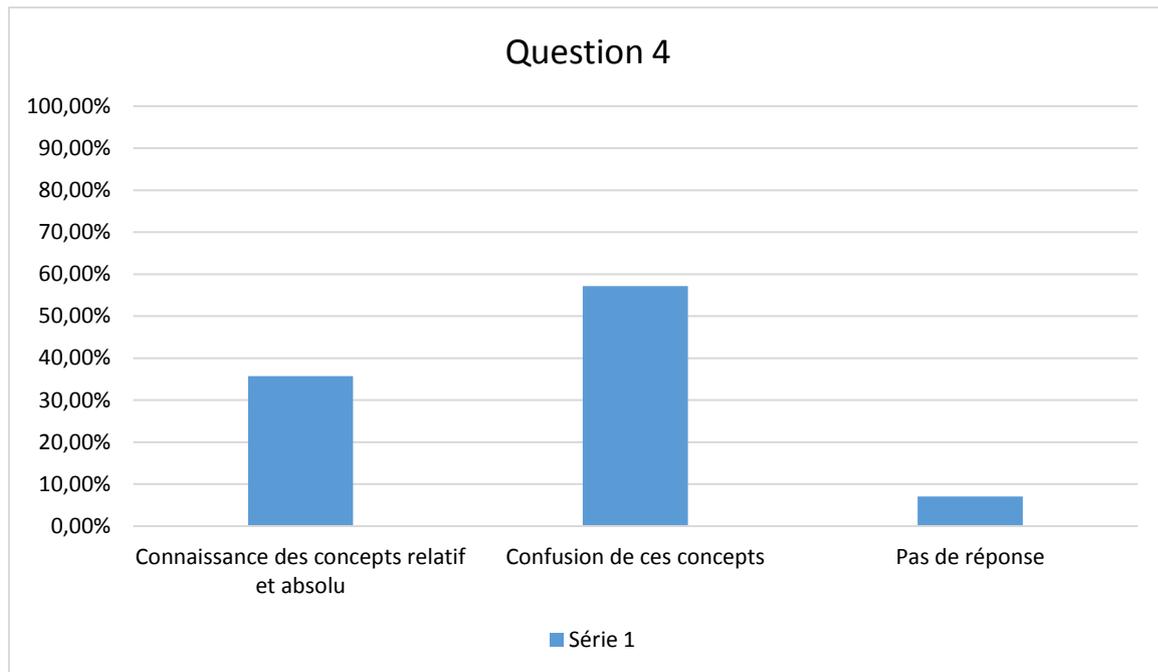
En mécanique newtonienne :

- le mouvement est-il absolu ou relatif ? Justifier.
- le temps est-il absolu ou relatif ? Justifier.

a/ Objectif :

Vérifier l'acquisition de la relativité et de l'absoluité des concepts espace et temps en mécanique classique.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

- 35,7 % des élèves ont bien répondu à la question Q4, une meilleure amélioration par rapport à l'analyse avant la séquence d'enseignement de la relativité (00%)
- 57,2 % confondent encore les concepts mouvement relatif et temps absolu et ceci est dû à la non acquisition du référentiel Galiléen.

5- La Question 5 :

Soit  $R(O, x, y, z)$  un référentiel d'origine  $O$  et d'axes  $x, y$  et  $z$  et soit  $R'(O', x', y', z')$  un référentiel mobile animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme à la vitesse  $V$  dans  $R$ , parallèlement à la direction  $(Ox)$ . On suppose qu'à l'instant initial  $t = 0$  les origines  $O$  de  $R$  et  $O'$  de  $R'$  des deux référentiels sont confondues.

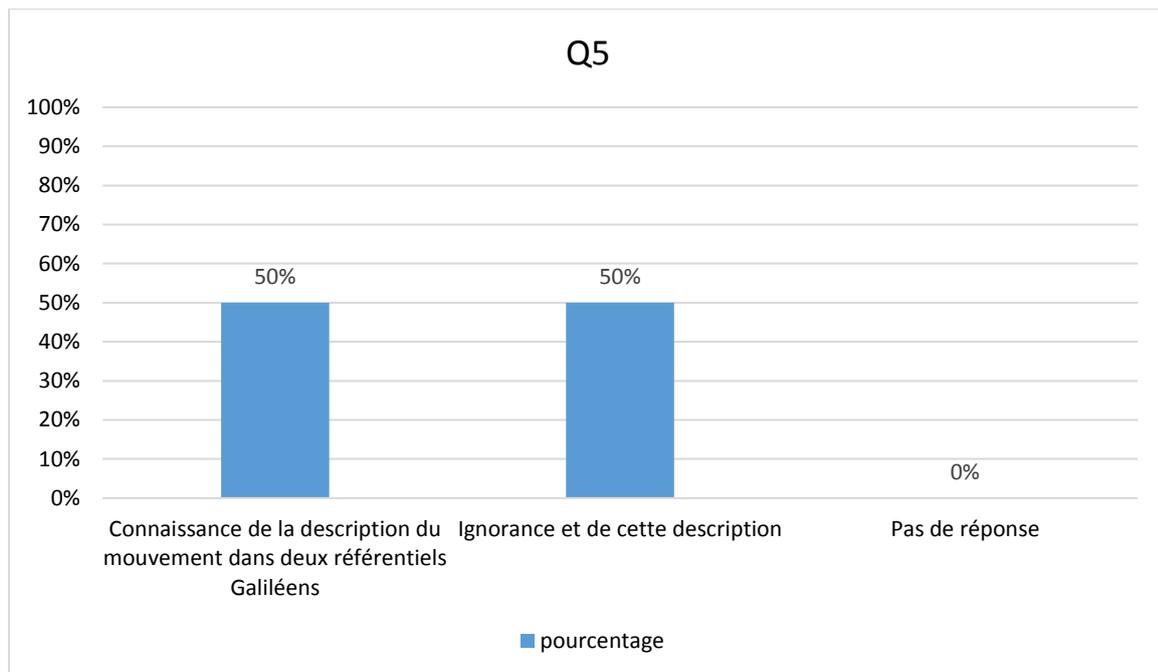
Faire un schéma à un instant  $t$  quelconque des deux référentiels  $R$  et  $R'$ .

Donner l'expression mathématique de la relation entre les coordonnées dans  $R'$  et celles dans  $R$ ,  $x' = f(x, V, t)$ ,  $y' = f(y)$ ,  $z' = f(z)$ .

a/ Objectif :

Vérifier si les élèves ont bien acquis la description du mouvement dans deux référentiels galiléens l'un est en mouvement de translation unidimensionnelle par rapport à l'autre : schémas des deux référentiels Galiléens et transformation des coordonnées d'espace.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

Une nette amélioration de l'écriture d'une partie de la transformation galiléenne par rapport aux réponses des élèves aux questions du premier questionnaire (pré-test).

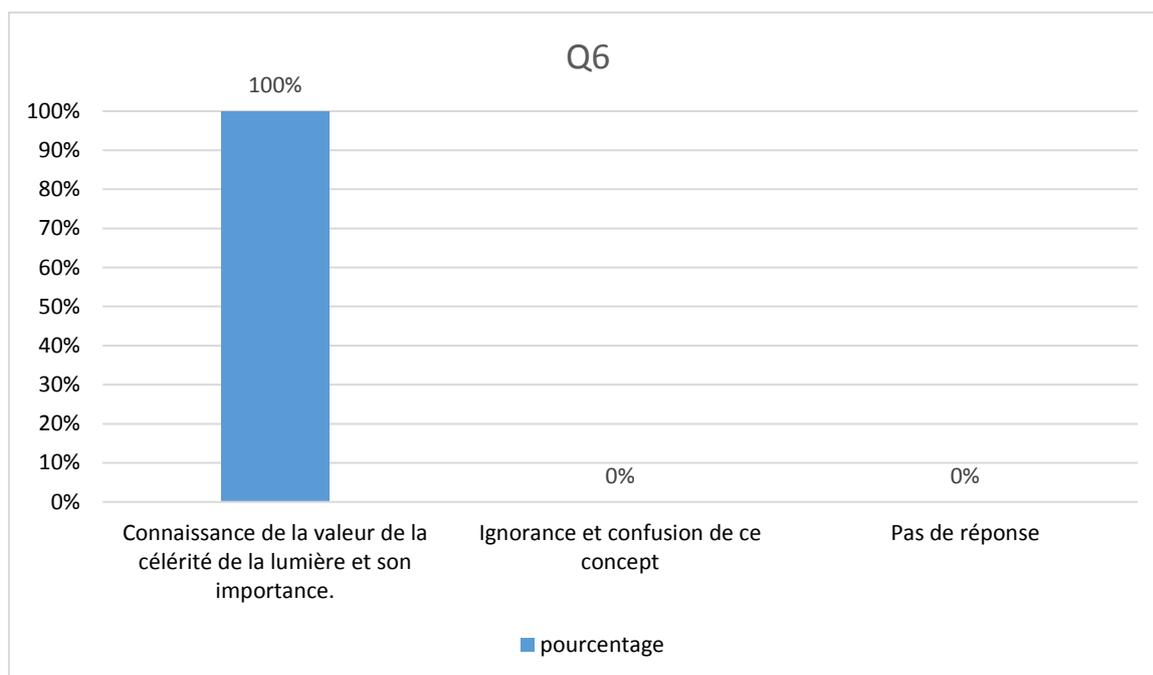
6- La Question 6 :

Comment est-elle la valeur de la vitesse de la lumière ? Justifier.

a/ Objectif :

Vérifier chez les élèves l'acquisition ou non de l'importance de la célérité de la lumière dans la théorie de la relativité restreinte.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

100% des élèves connaissent la valeur de la célérité de la lumière et sa constance sans préciser par rapport à quoi (toujours problème de référentiel galiléen),

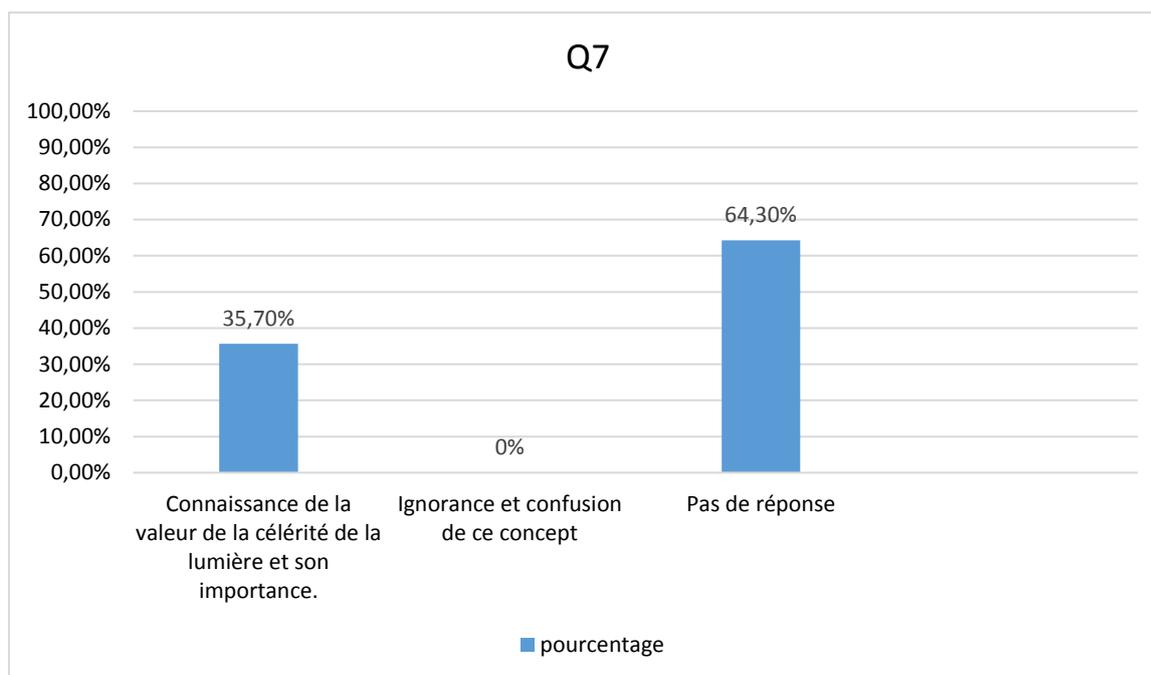
7- La Question 7 :

Quels liens existent-ils entre la vitesse de la lumière  $c$  et la théorie de la relativité restreinte? Connaissez-vous le nom du physicien, inventeur de cette théorie ?

a/ Objectif :

Vérifier si les élèves ont bien acquis le lien entre célérité de la lumière et théorie de la relativité restreinte d'après la séquence d'enseignement sur la relativité.

b/ Résultats :



c/ Analyse :

35% ont bien compris le lien entre célérité de la lumière et théorie de la relativité donc l'importance de cette célérité en physique, en plus ils ont répondu que l'inventeur de cette théorie est Albert Einstein :

Rima cite : « Albert Einstein est l'inventeur de cette théorie, la vitesse de la lumière reste constante et constitue une loi par rapport à la théorie de la relativité restreinte » (voir Annexe n°16).

8- Question 8 :

En relativité restreinte :

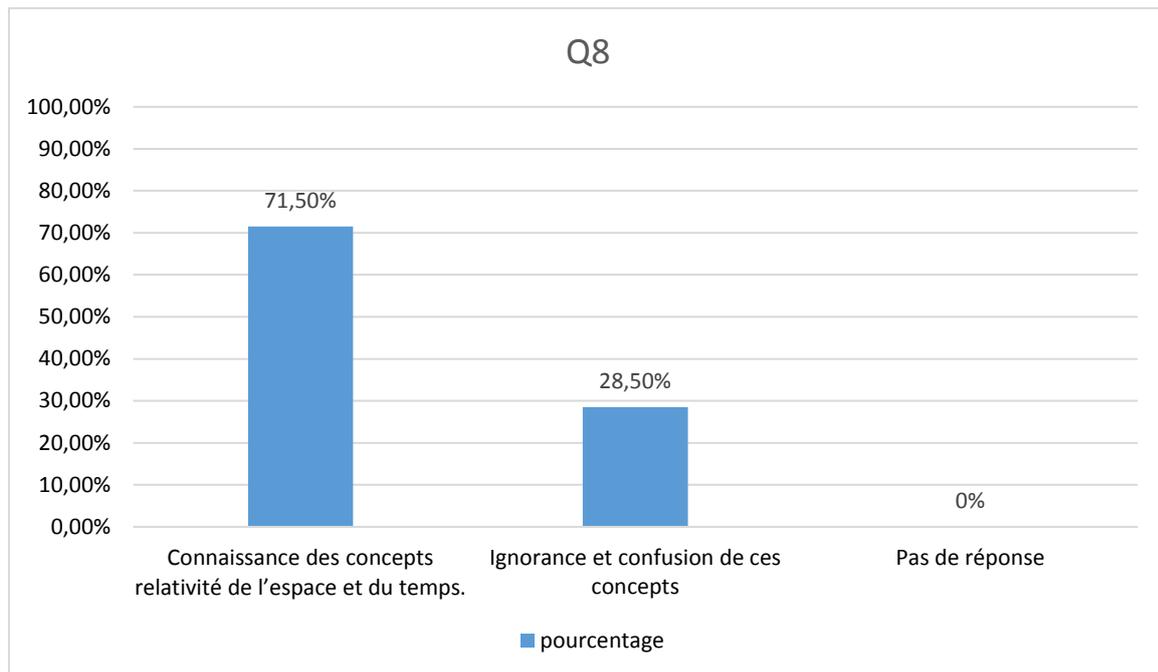
- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.

a/ Objectif :

Vérifier si les élèves ont acquis les concepts relativité de l'espace et du temps ou non dans la théorie de la relativité restreinte.

**b/ Résultats :**



**c/ Analyse :**

La majorité des élèves ont bien acquis les concepts relativité de l'espace et du temps dans la théorie de la relativité, et 28,5% confondent encore ces concepts.

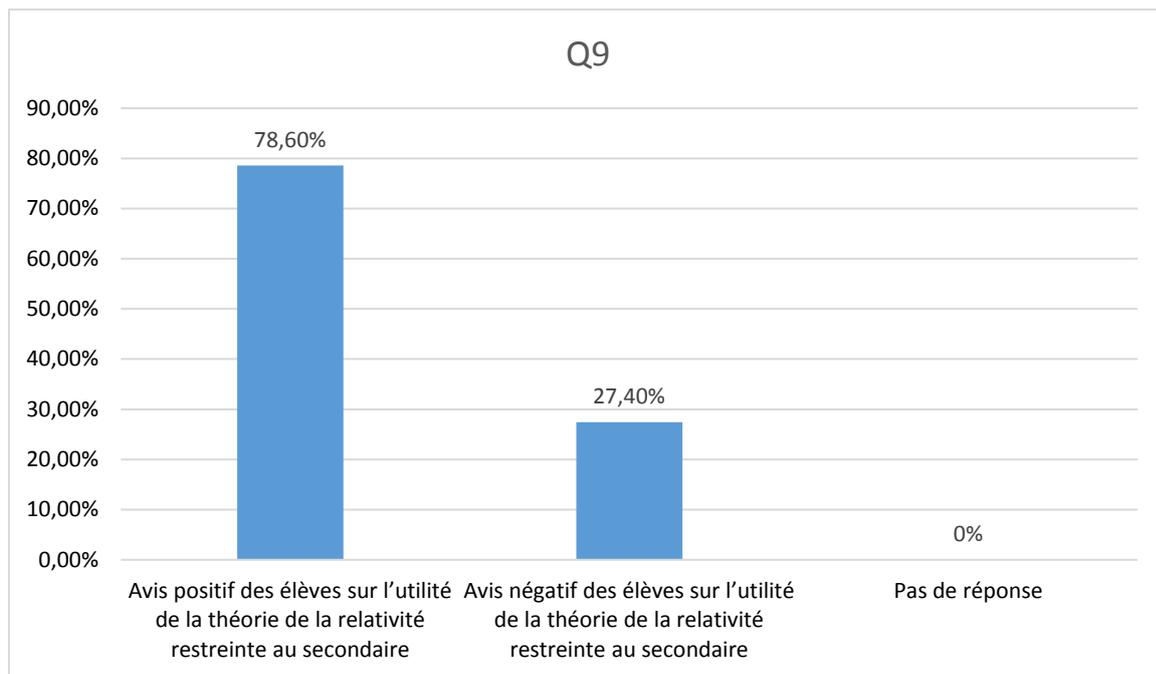
**9- La Question 9 :**

Pensez- vous que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire. Justifier.

**a/ Objectif :**

De savoir les avis des élèves sur l'utilité de l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte au secondaire et avec justification.

**b/ Résultats :**



c/ Analyse :

La majorité des élèves sont pour l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte, beaucoup d'entre eux justifient ça ; puisque cette théorie constitue une partie de la physique moderne que l'élève du secondaire doit être sensé de la connaître.

- Kenza cite : « Oui je pense que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire puisqu'elle est moderne et utile à la compréhension de phénomènes quotidiens ». (voir annexe n°17).

10- Question 10 :

D'après vous comment faut-eil exploiter les liens entre la physique et la philosophie pour améliorer l'enseignement de la physique et de la philosophie.

a/ Objectif :

Vu que la grande majorité des élèves sont pour l'interdisciplinarité entre physique et philosophie alors nous l'avons proposé de nous expliquer comment ils conçoivent les liens entre physique et philosophie :

b/ Résultats :

La majorité des élèves proposent d'apprendre les concepts philosophiques au même temps qu'en physique et qu'en philosophie et que les enseignants doivent les informer des liens et des apports d'une discipline à l'autre pour chaque concept étudié.

IX-8- Deuxième conclusion (après séquence d'enseignement) :

Malgré que la séance d'enseignement a duré une heure, nous remarquons une nette amélioration des acquis des élèves concernant les concepts cinématiques, mais nous ne pouvons pas confirmer si ses acquis sont durables ou non :

- La totalité des élèves ont correctement précisé la différence entre référentiel et repère.
- la moitié des élèves a pu savoir qu'un référentiel galiléen est animé d'un mouvement rectiligne uniforme mais sans préciser par rapport à un autre référentiel galiléen.
- La majorité des élèves ont pu acquérir la liaison entre le temps et l'espace pour décrire un événement.
- Amélioration des acquis des élèves envers la relativité du mouvement et l'absoluité du temps à partir de l'écriture des lois cinématiques avec la transformation galiléenne.
- Meilleures acquisitions de l'importance de la célérité de la lumière en physique.
- Amélioration des acquis des élèves envers le lien entre célérité de la lumière et théorie de la relativité restreinte, avec utilisation de la transformation de Lorentz au premier ordre en  $V/c$  ;
- Acquisition de la relativité de l'espace et de la relativité du temps à partir de la transformation de Lorentz au premier ordre en  $V/c$ .
- La bonne réception de la transformation de Lorentz au premier ordre en  $V/c$  a permis aux élèves de comprendre mieux les limites de la relativité galiléenne et de connaître en plus les obstacles épistémologiques de l'évolution de la relativité.
- La majorité des élèves sont conscient de l'importance de l'introduction de la théorie de la relativité restreinte dans les programmes officiels de physique.

Nous déduisons alors que :

La majorité des élèves sont pour l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte au secondaire.

La théorie de la relativité restreinte doit être enseignée aux élèves de préférence à la suite de l'apprentissage de la cinématique classique pour faire comprendre aux élèves les limites de la cinématique classique et les liens entre ces deux théories.

La majorité des élèves sont conscients de l'existence des liens entre physique et philosophie, et proposent l'enseignement des concepts philosophiques et physiques au même temps avec l'apprentissage des apports de l'une à l'autre discipline et leurs rôles dans l'évolution scientifique des deux disciplines.

## Conclusion Générale

Dans notre recherche, nous nous sommes intéressés à l'enseignement de la relativité et de ses concepts dans les programmes officiels de physique et de philosophie au secondaire en Tunisie et aux causes de l'absence de la théorie de la relativité restreinte, alors qu'elle est enseignée dans d'autres pays méditerranéens comme la France et l'Italie puisqu'elle constitue une partie importante de la physique contemporaine.

Généralement quand nous parlons de la relativité nous nous référons aux travaux d'Einstein sur sa théorie de la relativité restreinte ou générale, or l'idée du concept relativité ne date pas de l'époque d'Einstein mais elle trouve son origine dans les travaux de Galilée.

Cependant, le principe de relativité galiléen doit être étendu, avec Einstein, à tous les phénomènes physiques, quelque soient leur origine, et c'est à ce titre qu'il permet aux élèves de suivre le développement de la nouvelle cinématique.

De plus enseigner la cinématique classique indépendamment de la mécanique relativiste ne permet pas aux élèves de surmonter les obstacles épistémologiques rencontrés en mécanique.

En se référant à l'histoire des sciences, nous avons trouvé que cette théorie a été le sujet de plusieurs discussions scientifiques et philosophiques, d'où nous avons essayé de chercher s'il y a eu un lien, dans l'enseignement de cette théorie, entre la physique et la philosophie en France et en Italie et comment pourrions nous exploiter ce lien éventuel pour proposer l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte en Tunisie.

La théorie de la relativité restreinte constituait l'évolution scientifique de la relativité galiléenne qui a dominé le monde physique pendant plusieurs décennies, donc son enseignement (la théorie de la relativité restreinte) au secondaire exige l'enseignement de la relativité classique afin de se rendre compte de sa limite et d'aborder de nouveaux champs de la physique, tels que l'électromagnétisme, dont la quintessence pour Einstein est la vitesse de la lumière (la lumière étant conçue comme une onde électromagnétique). L'extension du principe de relativité à ce domaine entraîne l'invariance de la célérité  $c$  de la lumière.

Nous avons, ainsi, commencé par décrire l'état des lieux de l'enseignement de la physique, des mathématiques et de la philosophie, en Tunisie, en citant les différentes réformes entamées dans les programmes officiels, la formation des enseignants, les liens entre les trois disciplines au secondaire, nous avons ainsi mis en évidence la nécessité, dans la réforme éducative en cours, d'améliorer les liens entre ces disciplines à travers la rénovation des

programmes et la méthodologie d'enseignement pour assurer des meilleures acquisitions du savoir enseigné.

Puis nous avons passé à l'analyse historique de l'enseignement du concept relativité dans le secondaire depuis l'année 1970 afin de connaître sa place dans l'enseignement de la physique et nous avons trouvé que ce concept n'a existé qu'en 1992 (après 36 ans de l'indépendance), ce qui montre que ce concept n'a pas eu une place importante dans les programmes officiels de l'époque.

En 1992/93, a été introduite aussi, la théorie de la relativité restreinte, mais indépendamment de la relativité classique (introduite dans les derniers chapitres du programme à la fin de l'année), cette indépendance ne pourra jamais montrer à l'élève et même à l'enseignant la limite de l'une et la nécessité de l'autre.

En se basant sur les données précédentes, nous avons réalisé une étude comparée des contenus des programmes officiels actuels concernant le concept relativité, en Tunisie, en France et en Italie afin de voir sa place et son lien avec la théorie de la relativité restreinte dans les deux disciplines physique et philosophie dans chaque pays, cette étude nous donnera une idée convaincante sur la façon de réintroduire l'enseignement de la théorie de la relativité au secondaire en Tunisie.

Dans la deuxième partie B de notre recherche, nous nous sommes basés sur l'analyse historico-conceptuelles de la théorie de la relativité restreinte à partir de :

- L'analyse de l'histoire de la théorie de la relativité et l'histoire de la détermination de la vitesse de la lumière afin de faire les liens entre les différents concepts et lois de cette théorie et voir la possibilité de les transmettre aux élèves pendant son enseignement dans les deux disciplines physique et philosophie, cette analyse nous explique l'importance de la détermination de la valeur de la vitesse de la lumière et de sa constance dans le vide et sur son lien avec la théorie de la relativité restreinte.

- L'analyse du contenu du livre d'Albert Einstein « La théorie de la relativité restreinte et générale, 1916 », afin de voir les approches pédagogiques, didactiques, philosophiques et scientifiques utilisés pour faire passer sa nouvelle théorie au monde et déduire la possibilité de transmettre ces approches aux élèves pendant son enseignement.

Et retrouver l'importance de la constance de la vitesse de la lumière (deuxième loi de la théorie) dans la détermination de la limite des lois de la mécanique classique et au fondement de la nouvelle cinématique.

- L'analyse des différentes discussions philosophiques sur les concepts relativistes comme le temps et l'espace et sur le fondement de la théorie de la relativité restreinte à partir des concepts vérités, théorie, observations et mesures afin d'illustrer l'apport de ces discussions philosophiques à cette théorie physique, ces discussions mettent en évidence les liens entre physique et philosophie et doivent être pris en considération au moment de l'enseignement de ces deux disciplines.

- L'analyse des approches didactiques, pédagogiques et conceptuelles à partir des écrits d'Einstein afin d'aboutir à un savoir à enseigner compréhensible au moment de l'introduction de la théorie de la relativité restreinte en classe. S'il nous a semblé que nombre de points soulignés par Einstein présentent un intérêt direct pour l'enseignement, en revanche, son utilisation des transformations de Lorentz pour aborder des concepts essentiels de la théorie n'était pas transposable dans le secondaire, du fait de la complexité de ces transformations et de leur manque de lien avec les transformations de Galilée, qui peuvent être enseignées aux élèves.

- Enfin, pour la partie expérimentale de notre recherche, nous avons proposé le contenu du savoir à enseigner de la théorie de la relativité restreinte comme une modification de la transformation galiléenne, utilisant l'invariance de la lumière, à la manière d'Abraham dans ses cours, nous avons insisté sur l'interprétation de Poincaré des transformations de Lorentz au premier ordre  $V/c$ , en terme de synchronisation d'horloges d'observateurs se basant sur l'invariance de  $c$  au premier ordre et insister sur la détermination de la célérité de la lumière  $c$  à partir des expériences historiques, dans le vide et dans les milieux transparents en mouvement. Ce savoir proposé pourra servir pour une partie à la formation des enseignants de physique en relativité restreinte.

Nous avons réalisé la séquence d'enseignement basée sur le savoir proposé ci-dessus, avec l'introduction de quelques discussions philosophiques sur les concepts temps, espace, vérité... après avoir évalué, à partir d'un questionnaire (pré-test), les connaissances et les acquis des élèves de terminale en relativité.

L'analyse des contenus des programmes officiels Tunisiens et des réponses des élèves de terminale aux différentes questions du questionnaire, nous montre bien la négligence des concepts cinématiques, vu les exemples choisis en cours ou le temps consacré à l'apprentissage de ces concepts : ainsi la grande majorité des élèves de terminale de différentes sections n'ont pas bien acquis ces concepts, puisqu'ils n'ont pas pu illustrer les différentes questions, ceci pourrait être un obstacle pour l'apprentissage de la théorie de la relativité restreinte, en plus ils n'ont jamais eu des discussions philosophiques en physique et des discussion physique en philosophie, malgré qu'ils sont tous conscients de l'importance de l'interdisciplinarité dans la compréhension de cette théorie,

D'où la nécessité de réintroduire l'enseignement de la cinématique classique d'une manière plus efficace et insister sur le concepts, relativité, référentiel, événement, simultanéité avant d'introduire la théorie de la relativité restreinte.

#### I- Mise en perspective de notre recherche :

L'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est généralement synonyme de complexité et d'incompréhension par les élèves du secondaire et même par les enseignants dans l'absence d'expérimentation aisée en classe.

Pourtant cette théorie constitue une partie de la physique contemporaine à cause de ses récentes applications (GPS, cosmologie...), d'où son enseignement dans la majorité des pays ne cesse d'évoluer grâce aux différentes recherches réalisées en didactiques, en histoire des sciences et en philosophie.

Toutes ces recherches confirment bien les difficultés rencontrées par les élèves ou par les étudiants au cours de l'apprentissage de la théorie de la relativité restreinte et même de la relativité Galiléenne.

Notre contribution consiste à enseigner la théorie de la relativité restreinte juste après l'enseignement de la cinématique classique en insistant sur des concepts bien précis comme les concepts repère, référentiel, événement, simultanéité, relativité, temps, espace...

Insister sur ces concepts à partir de l'étude de la transformation Galiléenne en mécanique classique et la transformation de Lorentz au premier ordre en  $V/c$  en mécanique relativiste, puisque la transformation de Lorentz (à tout ordre de 1905) est hors programme car elle demande des outils mathématiques développés surtout pour les élèves du supérieur.

Insister aussi sur l'étude de ces concepts en philosophie au fur et à mesure que leur enseignement en physique pour permettre aux élèves de comprendre les liens entre les deux disciplines et pour assurer une meilleure acquisition des différents concepts.

Nous promovons donc un enseignement conceptuel de la relativité qui suit l'enseignement des lois de la mécanique classique, dans le cadre historique de son développement.

## II- Les limites de notre recherche.

Notre recherche vise l'enseignement de la théorie de la relativité en tenant compte de trois approches : approche historique, approche philosophique et approche didactique, et ces trois approches demandent un grand approfondissement dans l'analyse de ce qui existe actuellement comme contenu d'enseignement de cette théorie dans les trois pays choisis et dans les deux disciplines considérées et dans l'analyse de ce qui existait au moment de la fondation de cette théorie, de discussions scientifiques et philosophiques de l'époque, cet approfondissement pourrait être au détriment de l'aspect philosophique qui est moins développé ici que les deux autres aspects à cause de la rareté des sources documentaires originales.

Sur le plan méthodologique, nous aurons dû choisir un échantillon d'élèves qui ont déjà eu un cours sur la théorie de la relativité et voir l'impact de cet enseignement classique sur leurs acquisitions et le comparer à notre contribution à l'enseignement de cette théorie en classe avec des élèves de terminale, or ceci ne pourrait se faire qu'avec des élèves français ou italiens qui m'est impossible car je travaille à Tunis et je ne peux pas être sur place pour longtemps et hors jours des vacances ; c'est pourquoi nous nous sommes contentés de choisir un échantillon d'élèves Tunisiens même s'ils n'ont pas eu d'enseignement sur la théorie de la relativité.

Aussi, nous avons élaboré deux questionnaires, un questionnaire pré-test et un questionnaire post-test et nous avons analysé les réponses des élèves or il serait plus pertinent de filmer la séquence d'enseignement qui nous permettra de faire une analyse plus étayée des réponses des élèves.

La période choisie pour la réalisation de la séquence d'enseignement fin du mois d'avril, était la période du début de révision pour les examens du bac, et généralement beaucoup d'élèves

s'absentent de la classe d'où le nombre des élèves présent à cette séquence n'était pas important.

En plus nous étions obligés de réaliser qu'une seule séquence d'enseignement de la théorie de la relativité, pendant une séance de physique, il serait plus pertinent d'enseigner les concepts relativiste pendant une séance de philosophie aussi et de réaliser après l'évaluation des acquis de ces élèves.

### III- Perspectives et approfondissement de notre recherche

Notre recherche pourrait mettre à profit dans l'introduction de la théorie de la relativité restreinte dans les programmes officiels de physique au secondaire dans les pays qui n'enseignent pas cette théorie ou de la réintroduire de la manière exploitée dans notre recherche dans les pays qui l'enseignent actuellement pour vaincre les obstacles rencontrés par les élèves et les enseignants.

Elle pourrait mettre à profit l'importance de l'interdisciplinarité dans l'enseignement et dans l'évolution des acquisitions des élèves en particulier en physique et en philosophie et ça pourrait concerner d'autres concepts et d'autres théories.

Elle pourrait, aussi mettre à profit l'importance de la connaissance de l'histoire des sciences pour approfondir les recherches didactiques et pédagogiques utiles à l'enseignement de la physique et la philosophie au secondaire.

## **Bibliographies**

- Alquié. F. (2009). Leçons de philosophie, tome seconde, Ed. Henri Didier.
- Badiou.A. (2012). L'aventure de la philosophie française. Ed. La Fabrique. Paris.
- Baglio. J. (2005). De la mécanique galiléenne à la relativité restreinte. TIPE, Erreurs et progrès, rapport ENS.
- Balpe.C. (1987). Didactique et histoire des sciences. Aster n°5, pp: 140-142.
- Barreau.H.(1985). Les théories philosophiques de la connaissance face à la relativité d'Einstein, communication 41, in l'espace perdu et le temps retrouvé, pp : 95-110.
- Bergson.H. (1922). Durée et simultanéité. Ed.Numérique. Pierre Hidalgo.
- Biferale.N.(2000). La réforme éducative en Italie, in revue internationale d'éducation de sèvres, pp : 63-77.
- Boi.L. (1995). Leibniz sur l'espace, le continu et la substance : Mathématique, physique et métaphysique, philosophiques, vol. XXII, numéro2, pp : 407-436.
- Boilevin.J.M. (2005). Enseigner la physique par situation problème ou par problème ouvert, Aster n°5, pp : 1-25.
- Bonnet.G. (2003). De Galilée à nos jours, évolution de la notion de la vitesse de la lumière. Revue culture sciences physiques.
- Bouriau. C. et al. (2011). L'espace et le temps. Revue philosophia scientice n°3, pp : 9-16.
- Bracco.C. et al. (2004). Histoire des idées sur la lumière de l'antiquité au début du XXe siècle. Ed. Canopé.
- Bracco.C et Provost.J.P. (2013). Les points de vue de Poincaré sur la « mécanique nouvelle » et leurs rapports à l'enseignement et à sa pratique scientifique. Revue d'histoire des sciences. Vol. 66, pp : 137-165.
- Bracco.C. (2014). Einstein et Besso : de Zürich à Milan, HAL Id: hal-01198410.
- Bracco.C. et Provost.J.P. (2014). La relativité d'Einstein au premier ordre. Remarques pédagogiques et historiques. Bulletin de l'union des physiciens n°963, pp : 553-546.
- Bracco.C. et Haspot.S. (2015). Augustin Fresnel, cahier clairaut n°150, pp : 33-37.

- Butterlin.I.P. (2013). Quelle place pour la philosophie en général, la philosophie pratique en particulier dans la cité ? Hal, Id : halshs-00922268.
- Chabchoub.A.(2005). Les didactiques des disciplines peuvent-elles contribuer à la formation des enseignants, in colloque à Tunis. Regard actuel sur les didactiques des disciplines, pp : 187-194.
- De Hosson. C. (2011). L'histoire des sciences : un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique. HAL Id: tel-00655594.
- De Hosson.C. et Kermen.I. (2012). Recherche en didactique et relativité restreinte : difficultés conceptuelles et pistes pour l'enseignement, in U.P.P.C, volume 106, pp : 1041-1056.
- Deshays.C. (2008). Points de vues philosophiques sur la vérité. Société Française de Gestalt n°34, pp : 47-61.
- Dupin.J.J. (2006). L'enseignement de l'histoire des sciences et des techniques devait-il avoir sa place à l'école? Tréma, pp : 29-33.
- Einstein.A. (1916). La théorie de la relativité restreinte et générale. Ed. Dunod.
- Einstein. A. et Infeld.L. (1938). L'évolution des idées en physique. Ed.Flammarion.
- Enseigner la philosophie. (2009). faire de la philosophie in acte de séminaire national. Eduscol, juin 2009, Paris.
- Faire l'histoire des sciences pour mieux enseigner les sciences et développer la culture scientifique (2006). Rapport réalisé par un groupe de recherche Français sur l'éducation dans le cadre des projets PARI (Programme Académique de Recherche et d'Innovation).
- Fillon.P. (1991). Histoire des sciences et réflexion épistémologique des élèves. Aster n°12, pp : 91-120.
- Frenk.A et Kounetsov.B.(1974). La correspondance Einstein-Besso. Revue d'histoire des sciences, 27-1, pp : 77-82.
- Galilée.G. (1992). Dialogue sur les deux grands systèmes du monde : traduction R.fréreux et al. Paris: seuil.

Gerini.C. (2005). L'interdisciplinarité entre science dures et sciences humaines comme retour solvateur vers un état ontologique aboli par la spécialisation. Hal. Id : sic\_00001465.

Géoffroy.M.(2008). Théorie de la relativité et représentation relativiste, un débat entre idéalisme et réalisme. HAL Id: dumas-00334746.

Gim.J. (2016). Special theory of relativity in South Korean high school textbooks and new teaching guidelines. Sci. and Educ. N°25, pp : 575-610.

Guedj.M. (2005). Utiliser les textes historiques dans l'enseignement des sciences physiques. Didaskalia 26, pp : 75-95.

Guy.B. (2011). Penser ensemble le temps et l'espace. Philosophia scientioe n°15 (3), pp : 91-113.

Halkia.K et Dimitriadi.K. (2012). Secondary students' understanding of basic ideas of special relativity. International journal of science education, vol. 34, n°16, pp : 2565-2582.

Hulin.N. (1984). L'histoire des sciences dans l'enseignement scientifique (aperçu historique). Revue Française de Pédagogie ». Volume 66, pp 15-27.

Hulin.N. (1987). La physique ou l'enseignement impossible. Séminaire de philosophie et mathématiques, fascicule 11, pp : 1-30.

Israel-Jost.V. (2013). Mesure et observation à la lumière des techniques instrumentales contemporaines. Cahiers philosophiques n°135, pp : 23-35.

Jandaly.J. (1999). Le temps. BUP (819), pp : 1799-1813.

Johsua.S. et Dupin.J.J. (1989). Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques. Paris. PUF.

Kahan.T. (1959). Sur les origines de la théorie de relativité restreinte. Revue d'histoire des sciences n°2, pp : 159-165.

Lausberg.A. (2005). Le temps selon Newton et Einstein. Bulletin de la société royale des sciences de Liège vol, 4, pp : 271-283.

Lelionnais.F. (1952). Descartes et Einstein. Revue d'histoire des sciences et leurs applications, tome 5, n°2, pp : 139-154.

Lévy.M et al. (2005). Enseigner la philosophie en interdisciplinarité : un pari risqué dans un gymnase (lycée) suisse romand. *Revue internationale de didactique de la philosophie*, DIOTIME n°25.

Longo.T. (2008). Le système éducatif italien. *Revue internationale d'éducation de sèvres*, n°38, pp : 1-7.

Maurines.L. (2005). L'histoire des sciences comme outil de recherche et d'enseignement : exemples des couleurs obtenues par passage de la lumière à travers un prisme. *Actes des quatrièmes journées de l'ARDiST*, Lyon.

Maurines.L. et Mayrargue.A. (2001). Regards croisés de l'histoire des sciences et de la didactique de la physique sur le concept onde. *Actes de l'université d'été juillet 2001*. Poitiers.

Maurines.L. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *Recherche en didactique des sciences et des technologies* n°3, pp : 271-305.

Montminy.J. (1995). Origines et fondements philosophiques de la relativité : Les conceptions de Mach, Galilée et Einstein. *Philosophiques*, vol, 22, n°1, pp : 21-34.

Martinant.J.L.(1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia* n°2, pp : 89-99.

Marchal.C. (2005). Henri Poincaré : une contribution décisive à la relativité. *Histoire des sciences* vol.99, pp : 599-612.

Mayrargue.A et Savaton.P. (2006). Quels liens entre l'histoire des sciences, l'épistémologie et la didactique des disciplines ? *Tréma* n°26.

Nys.D. et Van Biéma.E. (1998). L'espace et le temps chez Leibniz et chez Kant. *Revue néo-scolastique* n°59, pp : 420-423.

Paty.M. (1989). Physique, philosophie et vulgarisation aujourd'hui. *Bulletin d'information de l'association des écrivains scientifiques de France* n°38, pp : 77-83.

Paty.M. (2007). *La philosophie et la physique*". HAL Id: halshs-00167295.

- Parrini.P. (2009). Science et philosophie. Diogène n°228, pp : 114-130.
- Piaget.J.(1976). Logique et connaissance scientifique. Ed. Gallimar.
- Pietrocola.M et Zylberstajn.A. (1999). The use of the principale of relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students. International journal of science education, vol. 21, n° 3, pp : 261-276.
- Poincaré.H. (1900). La théorie de Lorentz et le principe de réaction. Wikisources.
- Poincaré.H. (1902). La science et l'hypothèse. Ed. Flammarion.
- Provost.J.P. et Bracco.C. (2016). The 1895 Lorentz transformation : Historical issues and present teaching. European journal of physics 37/4, in Higlhts.
- Roardet.G. (2001). Quelle démarche expérimentale en classe de physique ? Notion de situation problème BUP n°836, vol.95, pp : 1173-1189.
- Rosmorduc.J. (1985). L’histoire de la physique peut-elle éclairer les obstacles épistémologiques ? Aster n°5, pp : 117-141.
- Renoirte.F. (2005). Physique et Philosophie. Revue néo-scholastique de philosophie.
- Tonnelat.M.A. (1971). Histoire du principe de relativité. Ed. Flammarion.
- Vergne.G. (2012). L’exemple italien de l’enseignement de la philosophie. Revue skhole.fr.
- VIENNOT.V. (1996). Raisonner en physique. Ed. De Boeck.
- Vorms.M. (2011). Qu’est-ce qu’une théorie scientifique ? Ed. Vuibert.
- Weisbush.G. (2014). Réflexion sur l’enseignement des sciences physiques au lycée : une mission impossible ? Revue skhole.fr.

## **Les Annexes**

Annexe n°1

Entretien ouvert avec Monsieur l'inspecteur principal Mohamed Elbitri (M.B) des sciences  
physiques

Mars 2019

Q1/ L'éducation Tunisienne attend la réforme du système éducatif après la révolution 2011,

Quelle place d'après vous pour les sciences physiques au secondaire ?

M.B : Les sciences physiques forment au raisonnement, à la modélisation et à la confrontation modèle/expérience. Dans un monde où les connaissances progressent rapidement, elles ont pour missions de promouvoir la science éducatrice, en faisant face à la montée de l'obscurantisme, le doute qui s'installe dans l'utilisation de la science, favoriser la multiplicité des intelligences, développer l'autonomie et acquérir l'esprit critique et les facultés d'initiative et de créativité pour un apprentissage tout au long de la vie.

Q2/ Que pensez vous des liens entre les programmes des sciences physiques actuels au collège et au secondaire ? Quelles nouveautés proposez-vous dans la réforme ?

M.B : Tout d'abord les programmes du collège sont élaborés suite à une décision politique qui ne rend pas de service pour l'éducation à la science, ensuite les évaluations interne et externe sont absentes dans l'élaboration de ces programmes. Je suis convaincu que la réforme doit tenir compte de 4 domaines :

- L'apprentissage : créativité, esprit critique, résolution de problèmes.
- L'autonomisation : communication, résilience, autogestion.
- L'éducation à une citoyenneté active : participation, respect de la diversité.
- Employabilité : coopération, négociation, prise de décision.

Q3/ Que pensez vous de la place actuelle des sciences physiques au secondaire : nombre d'heures par semaine, coefficient, programme officiel ?

M.B : Pratiquement le volume horaire et en adéquation avec les contenus du programme officiel sauf peut être pour la 2<sup>ème</sup> science ou certains enseignants pensent que le contenu est assez chargé. Au secondaire il y a une forte concentration sur le savoir c'est-à-dire les contenus du programme tout ce qui est en rapport avec le statut de la matière est ignoré.

Q4/ Pourquoi les élèves du secondaire deviennent de plus en plus moins motivés en sciences physiques ? Moyennes, notes, orientation...

M.B : Le cloisonnement des disciplines, l'inexistence de liens avec l'environnement et le quotidien de l'élève, le manque de matériel didactique comme entre autres le numérique et les espaces qui répondent aux attentes de l'élève. Personnellement , tout étudiant que j'étais, je me rebellais contre la nature de l'enseignement qui nous était dispensé et que j'estimais alors comme étant à cloisons !

En tant qu'inspecteur, métier que j'ai exercé pendant 25 ans, je voyais à l'œil nu le mal qui rongait l'enseignement et cela jusqu'à présent :

- au niveau du laboratoire de physique, tomber sur un laborantin de métier est une monnaie rare. Vous allez me rétorquer qu'il faut les former ! Je vous répondrais qu'il est impossible de former un Bac Lettre recruté moyennant des connaissances à droite et à gauche....
- Sur une dizaine d'enseignants de sciences physiques, il n'existe pas deux qui disposeraient de quelques minutes pour discuter des problèmes du laboratoire de sciences physiques ; donc aucun travail de groupe !
- un jeune enseignant, qui vient d'être titularisé moyennant les deux années de stage 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année , profite de sa présence dans une réunion d'information ayant lieu au mois de septembre et réunissant quelque chose comme 300 enseignants, demande de prendre la parole et d'enchaîner « comme vous nous avez conseillé de le faire au cours du stage, je consacre mes matinées de libre à la préparation de mes expériences ; malheureusement deux de mes collègues anciens dans le métier ne se gênent pas de me faire remarquer à voix haute que le parcours est trop long et que j'allais finir par lâcher ! ». Je me contentais alors, pour lui remonter le moral, de lui dire «il faut continuer sur votre lancée et rappeler aux deux mecs qu'ils feraient mieux qu'ils s'occupent de leurs affaires » .  
Bien sûr que dans l'état actuel des choses, Mr l'inspecteur ne vaut plus rien compte tenu

de l'hégémonie du syndicat qui fait régner la médiocrité en puissance ; le passage de grade est systématique et où la note pédagogique ne sert à rien ; Mr l'Inspecteur est sollicité indirectement par l'enseignant juste pour une augmentation systématique de la note pédagogique pour « valoir ce que de droit » !

- Dans tout ce contexte moribonde notre monde scolaire et universitaire que nous avons bâti sur des bases solides depuis les années soixante, et a fait les beaux jours de notre enseignement , tout a commencé à s'effriter. A titre indicatif et pour vous donner une idée sur l'essor qu'a connu notre enseignement entre les années soixante jusqu'à l'aube del'an 2010, rien que ces dernières années, le nombre d'universitaires qui ont migré vers le Golfe se chiffre en milliers.
- J'ai pris en charge le sujet de Bac en sciences physiques depuis la session de contrôle 1996 jusqu'à la session de juin 2005 (en tout 19 sujets entre sessions principales et de contrôle). Dans chaque sujet l'expérience de Physique ou de Chimie est là. Ceci avait pour but d'inciter les élèves à obliger les enseignants à accorder l'intérêt qu'il faut à l'expérimentation. Et je vous assure que cela a bien fonctionné.

Q5/ Que pensez vous du rôle de la formation des enseignants des sciences physiques au secondaire?

M.B : La formation doit répondre aux besoins des enseignants ; ces derniers n'expriment pas leurs besoins spontanément. C'est pour cela que les contenus de la formation doivent faire l'objet d'une concertation entre Mr l'Inspecteur et les enseignants pour garantir l'implication de ces derniers dans le processus de formation. C'était possible cela fait 20 ans ; ce n'est plus possible maintenant.

Q6/ Actuellement, Quels liens existent –ils entre les sciences physiques et les autres disciplines ?

M.B : En terminale S (programme français) en sciences physiques on traite les ondes sonores début octobre ce qui nécessite l'utilisation de l'outil mathématique « Logarithme » . Or le Logarithme n'est traité en maths qu'à partir du mois de Février !

Et les exemples se multiplient même dans le programme tunisien...

Q7/ Pensez vous que la réforme éducative en cours tiendra compte des liens entre les sciences physiques et les autres disciplines tel que la philosophie ?

M.B : J'espère. Mais sur le terrain il y a beaucoup de travail dans l'avenir proche..

Q8/ Pensez vous que la relativité Galiléenne ou Newtonienne était bien introduite dans les programmes ? Pourtant son enseignement en sciences physiques n'a commencé qu'au début des années 90 (exactement en 1993) ?

M.B : Le concept relativité a bien été construit dans l'esprit des enseignants et par conséquent des élèves.

Q9/ Revenant au programme officiel des sciences physiques actuellement, pourquoi dans ces programmes, nous ne trouvons pas la théorie de la relativité restreinte ? Pourtant elle constitue la physique contemporaine.

M.B : L'absence d'une vision systémique tenant compte des 4 domaines déjà mentionnés.

Je vais répondre simplement, la théorie de la relativité restreinte a perdu sa place dans les programmes à cause à chaque fois de l'allégement du volume horaire et la forte centration sur le savoir et le fait d'ignorer l'histoire des sciences, la religion, la philosophie, la technologie le lien avec la réalité etc.

Q10/ Une des applications de la théorie de la relativité restreinte est le GPS très connu par nos élèves. Pensez- vous que son introduction dans les cours comme application directe de la théorie justifie son apprentissage ?

M.B : Dire que le GPS est très connu au niveau des élèves et des enseignants, c'est oui mais en tant qu'application existant dans les téléphones portables. Mais dire que le GPS en tant qu'application de la théorie de la relativité restreinte fait partie de la culture scientifique de ces populations, c'est exagéré ; donc c'est non.

Q11/ Pourquoi cette théorie a été introduite au début des années 90 puis éliminée à la fin de ces années ?

M.B : Introduire la théorie de la relativité restreinte est légitime ; un élève de terminale scientifique est capable de tout assimiler.

Quand à son élimination des programmes, ces derniers sont tout simplement jugés trop chargés d'où l'allègement du volume horaire en rapport avec les programmes.

Q12/ Pensez vous qu'il y a des liens historiques entre la relativité Newtonienne et la théorie de la relativité restreinte que nous devons en tenir compte dans l'apprentissage des élèves et dans l'élaboration des nouveaux programmes ?

M.B : Mais bien sûr ! En physique classique le temps est absolu ; il s'écoule de la même manière quelque soit le référentiel d'étude, alors que la vitesse varie. En relativité restreinte c'est le contraire, le temps est relatif au référentiel choisi et la lumière se propage dans le vide avec une célérité indépendante du référentiel.

Q13/ Dans la nouvelle réforme éducative, nous nous attendons à un changement des programmes en sciences physiques, pensez vous que la théorie de la relativité restreinte sera introduite de nouveau ? Et si oui, de quelle manière : identique ou non à celle introduite au début des années 90 ?

M.B : Sincèrement je suis à la retraite depuis 12 ans. Je ne suis plus au fait des évènements.

Q14/ Pensez vous que l'introduction de l'équivalence masse – énergie et de la constance de la célérité de la lumière dans les programmes officiels actuels des sciences physiques est suffisante pour comprendre la théorie de la relativité restreinte ?

M.B : En relativité restreinte le temps est relatif au référentiel choisi et la lumière se propage dans le vide avec une célérité indépendante du référentiel choisi. Ceci est le postulat sur lequel s'est basé A.Einstein pour bâtir sa mécanique relativiste.

La démarche adoptée par les français pour enseigner la mécanique relativiste me semble appropriée.

Q15/ Souhaitez vous l'introduction de la théorie de la relativité restreinte au secondaire ? Si oui quand ? et comment ? Sur quel point mettre l'accent en particulier ? Si non pourquoi ?

M.B : Je suis pour la réintroduction de la mécanique relativiste.

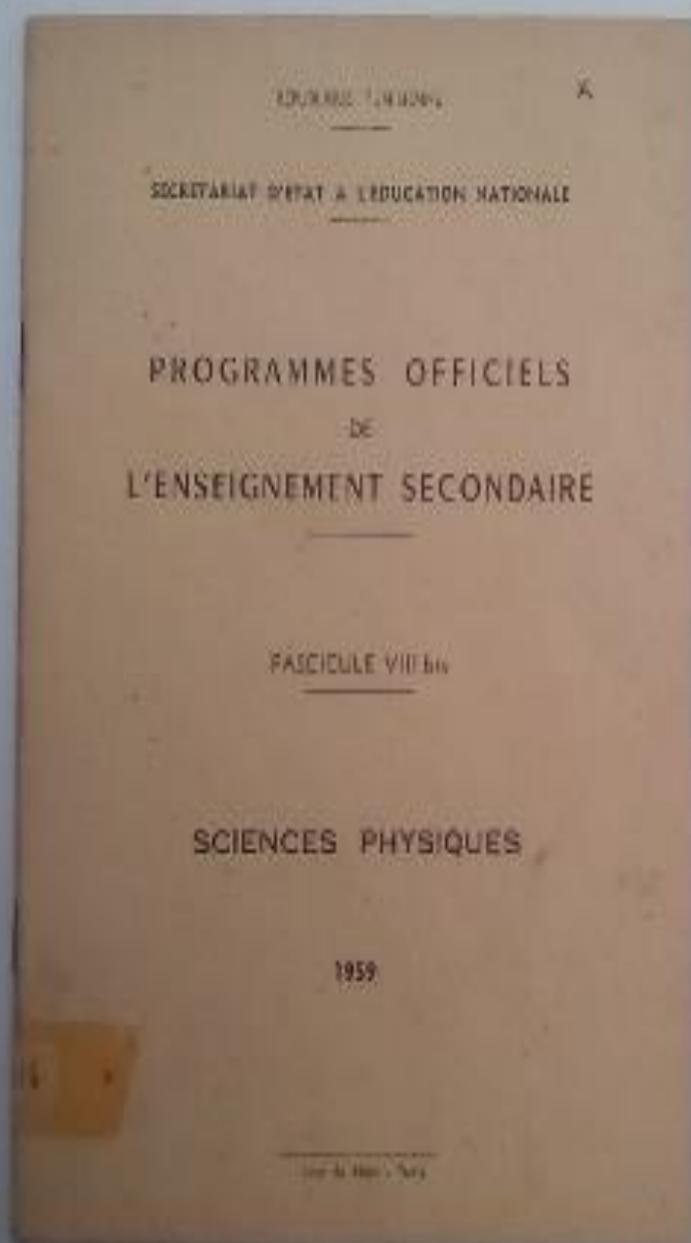
Q16/ Supposant que la théorie de la relativité restreinte sera introduite dans les prochains programmes officiels, pensez vous que les enseignants auront besoin d'une formation concernant cette théorie ?

M.B : La formation est incontournable; mais penser à l'autoformation, au travail collectif, à la manière d'animer ces séances de formation, à la motivation des enseignants, à l'infrastructure, au matériel didactique etc.

Sincèrement depuis « la révolution du 14 Janvier 2011 » Mr l'Inspecteur perd sa qualité de gérer le corps enseignant comme je l'ai expliqué précédemment.

Merci d'avance.

Annexe2



REPUBLIQUE TUNISIENNE  
SECRETARIAT D'ETAT A L'EDUCATION NATIONALE

PROGRAMMES OFFICIELS  
DE  
L'ENSEIGNEMENT DU SECOND CYCLE

(Approuvés par décret N° 14 / 60)

PARTICULE N° 1

ANALYSE : ANCIENNE PRIMAIRE

ST D

1961

REPUBLIQUE TUNISIENNE

---

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION, DE LA JEUNESSE ET DES SPORTS

---

PROGRAMMES OFFICIELS  
DE  
L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

---

(Approuvés à compter du 14 septembre 1970)

---

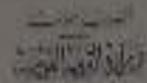
FASCICULE N° 15

---

SCIENCES PHYSIQUES

---

1970



PROGRAMMES OFFICIELS  
DE  
L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

**SCIENCES  
PHYSIQUES**



CENTRE NATIONAL DE COORDINATION

1982

REPUBLIC OF ALGERIA  
MINISTRY OF NATIONAL EDUCATION  
GENERAL PROGRAM  
OF PHYSICS

PROGRAMMES OFFICIELS  
DANS LES LYCEES  
SECONDAIRES

Version 1988 au 31 Mars 2000

SCIENCES PHYSIQUES

Maq 100

REPUBLIQUE TUNISIENNE  
MINISTRE DE L'EDUCATION  
DIRECTION DES PROGRAMMES

Programmes Officiels de  
l'Enseignement Secondaire

Décret n° 98-320 du 12 juin 1998

Annexe XIII

SCIENCES PHYSIQUES

الجمهورية التونسية

وزارة التربية الوطنية

إدارة البرامج

البرامج الرسمية للتعليم الثالث

سلسلة

1980 - 1979

الجمهورية التونسية  
\*\*\*\*  
وزارة التربية والعلوم  
\*\*\*\*  
الادارة العامة للبرامج والتكوين المستمر

## البرامج الرسمية بالمعاهد الثانوية

(الامر عدد 670 لسنة 1993 مؤرخ في 29 مارس 1993)

## الفلسفة

المعهد القومي لتكوين المعلمين  
مكتبة المتخصصين  
وصل في .....  
سجل تحت عدد ..... 14.9.2 .....  
مارس 1993

المركز القومي للتعليم



الجمهورية التونسية  
وزارة التربية  
إدارة البرامج

البرامج الرسمية  
للتعليم الثانوي

الأمر عدد 1280 لسنة 1998 المؤرخ في 15 جوان 1998

الملحق VIII

الفلسفة

70

Annexe 3 :

## برامج الفلسفة في التعليم الثانوي

- يرمي تدريس الفلسفة في السنوات الثالثة والرابعة من التعليم الثانوي إلى :
- تمكين التلميذ من التمرس بالحريّة بفضل ممارسة التفكير من خلال أعمال كبار الفلاسفة والمفكرين.
- تمكين التلميذ من فهم أفضل وتأويل أعمق لما يعرف سلفاء، والوعي بذلك وعيا أوضح وأشمل.
- تحرير التلميذ من قوالب الآراء المتداولة ومن سيطرة الأحكام المتسرّعة.
- إعداد التلميذ إعدادا يمكنه من تحصين نفسه تحصينا يربّيه على التبصّر في الحكم والثقة في النفس والثبات على المبدأ دون سقوط في الوثوقيّة، والاعتدال في الموقف والتسامح في التعامل دون سقوط في التبعيّة.
- مساعدة التلميذ على الارتقاء ذاتيا من وضع اللامبالاة إلى موقف واع يسند اختياراته فكرا وسلوكا، ويحمّله على الإبداع ويقيه التسطيح الفكري والوجداني والاستسلام إلى المجهود الأدنى.

العنوان	مطلب التفكير : من اليوميّ إلى الفلسفيّ
عناوين المسائل	المعاني
I- اليوميّ	الدّعاية - الرّأي السّائد - الوثوقيّة - الوهم
II- مقتضيات التفكير	أشباه المشاكل - الحجاج الباطل - الخلط بين المقولات المنطقيّة - المفارقة
1- في الوعي بالمغالطات	الأشكّلة - التّأسيس - التّعريف - الحجاج - النّحوض.
2- إجرائيات التفكير	التّعقّل - الحوار - النّقد
3- إتيقا التفكير	الاستقلاليّة - الإيديولوجيا - الشّجاعة - المسؤوليّة
III- تجربة الالتزام : شخصيات فكريّة	انظر القائمة المصاحبة
VI- دراسة مسترسّلة لأثر فلسفيّ	

المعاني	عناوين المسائل
التاريخ - الجسد - الذات - العالم - اللاوعي - الوعي.	<b>I- الإنساني بين الكثرة والوحدة :</b>
الأخر - الصورة - اللغة - الوساطة - المقدس.	<b>1- الإثنية والغيرية</b>
الاختلاف - العالمي - العولمي - الهوية - الكلي.	<b>2- الفواصل والأنظمة الرمزية</b>
	<b>3- الخصوصية والكونية</b>
	<b>II- العلم بين الحقيقة والنمجة :</b>
	<b>1- أبعاد النمجة</b>
الأكسمة - البنية - الترييض - الصورة	أ - البعد التركيبي
الافتراضي - القانون - الملائم - النظرية - الواقعي.	ب - البعد الدلالي
التفسير - التحقيق - الفهم - التجاعه.	ج - البعد التداولي
	<b>2- النمجة ومطلب الحقيقة</b>
الاختراية - التاريخية - الأنظمة التقنية.	أ - الحدود الأبيستيمولوجية
الحقيقة - المسؤولية - المعنى.	ب - الحدود الفلسفية
	<b>III - القيم بين النسبي والمطلق :</b>
الاغتراب - الانصاف - التحرر - السوق - المال - المنفعة.	<b>1- العمل : النجاعة والعدالة</b>
الحق - الديمقراطية - السلطة - العنف - المقاومة - المواطن العالمي.	<b>2- الدولة : السيادة والمواطنة</b>
الحرية - الرقاه - الفضيلة - الواجب.	<b>3- الأخلاق : الخير والسعادة</b>
الإبداع - التذوق - المحاكاة.	<b>4- الفن : الجمال والحقيقة</b>
انظر القائمة المصاحبة	<b>VI-دراسة مسترسلة لآثر فلسفي :</b>

### III - القيم بين النسبي والمطلق :

- إن التفكير في الممارسات العملية، يستوجب منا اليوم الربط بين ما يقتضيه واقع تنوع القيم التي تستند إليها هذه الممارسات من نسبية، وما يستوجبه تواجدها من توك إلى الكونية.
- إن الوعي بهذه الحركة المزدوجة هو ما يوجه التفكير الفلسفي إلى بلورة :
- التوثر القائم بين مقتضى النجاعة ومطلب العدالة.
  - التوثر بين قيمتي السيادة والمواطنة.
  - التوثر بين الخير بما هو قيمة مطلقة والسعادة بما هي مطلب ذاتي.
  - التوثر بين قيمتي الجمال والحقيقة في الممارسة الفنية.

35	ماركس	مخطوطات 1844
36	انغلز	ضد ديهرتق
37	نيتشه	جينالوجيا الأخلاق
38	فرويد	قلق في حضارة
39	م. فيبر	العالم والسياسي
40	برغسون	منبع الأخلاق والدين
41	راسل	مسائل فلسفية
42	انشتاين/اينفلد	تطور الأفكار في الفيزياء
43	كاسيرار	مقال في الإنسان
44	مرلوبونتي	تقريب الفلسفة
45	بشارل	نشوء الفكر العلمي
46	ل. ستروس	العرق والتاريخ
47	مونو	المصانفة والضرورة
48	فوكو	المراقبة والعقاب
49	ريكور	التاريخ والحقيقة
50	ج.غ. غرانجي	العقل

Annexe 4

Questionnaire proposé aux élèves de terminale avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne ( Avril 2019)

Nom et prénom.....classe et section :.....

Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Comment pourrez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

.....

Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

.....  
.....

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

.....

Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

.....

Q5 : Enoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

.....

Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

.....  
.....

Q7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

.....

- le temps est-il absolu ou relatif ? Justifier.

.....

- le mouvement est-il absolu ou relatif ? Justifier.

.....  
Q8 : Avez-vous entendu parler de transformation galiléenne en mécanique classique ? Si oui en quelle année d'étude ?

.....  
Q9 : Soit  $R(O, x, y, z)$  un référentiel d'origine  $O$  et d'axes  $x, y$  et  $z$  et soit  $R'(O', x', y', z')$  un référentiel mobile animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme à la vitesse  $V$  dans  $R$ , parallèlement à la direction  $(Ox)$ . On suppose qu'à l'instant initial  $t = 0$  les origines  $O$  de  $R$  et  $O'$  de  $R'$  des deux référentiels sont confondues.

Faire un schéma à un instant  $t$  quelconque des deux référentiels  $R$  et  $R'$ .

.....  
.....  
.....  
Donner l'expression mathématique de la relation entre les coordonnées dans  $R'$  et celles dans  $R$ ,  $x' = f(x, V, t)$ ,  $y' = f(y)$ ,  $z' = f(z)$ .

.....  
Partie B : Relativité restreinte

Q10 : Que signifie en physique la vitesse de la lumière ? Donner sa notation et sa valeur.....

.....  
.....  
Cette valeur dépend-elle de la vitesse de déplacement de la source lumineuse?

.....  
Cette valeur dépend-elle de la vitesse de l'observateur qui reçoit le signal lumineux ?

.....  
Q11 : Quels noms de scientifiques sont attachés à la détermination de la vitesse de la lumière ? À quelles époques ?  
.....  
.....

Q12 : Quels liens existent-ils entre la vitesse de la lumière et la théorie de la relativité restreinte? Connaissez-vous le nom du physicien, inventeur de cette théorie ?  
.....  
.....  
.....

Q13: En relativité restreinte :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.  
.....

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.  
.....

Q14 : D'après ce que vous avez étudié en philosophie, avez-vous appris quelques discussions philosophique sur la relativité en physique ? Citer un exemple.....  
.....

Q15 : D'après ce que vous avez étudié en physique et en philosophie, Pensez vous qu'il y a un lien entre physique et philosophie ?  
.....

Merci.

Annexe 5

Questionnaire proposé aux élèves de terminale après enseignement de la théorie de la relativité (post Test) le 30 Mai 2019

Nom et prénom.....classe et section :.....

Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

.....  
.....

Q2 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

.....

Q3 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

.....

Q4 : En mécanique newtonienne :

- le mouvement est-il absolu ou relatif ? Justifier.

.....

- le temps est-il absolu ou relatif ? Justifier.

.....

Q5 : Soit  $R(O, x, y, z)$  un référentiel d'origine  $O$  et d'axes  $x, y$  et  $z$  et soit  $R'(O', x', y', z')$  un référentiel mobile animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme à la vitesse  $V$  dans  $R$ , parallèlement à la direction  $(Ox)$ . On suppose qu'à l'instant initial  $t = 0$  les origines  $O$  de  $R$  et  $O'$  de  $R'$  des deux référentiels sont confondues.

Faire un schéma à un instant  $t$  quelconque des deux référentiels  $R$  et  $R'$ .

.....  
.....  
.....  
.....

Donner l'expression mathématique de la relation entre les coordonnées dans  $R'$  et celles dans  $R$ ,  $x' = f(x, V, t)$ ,  $y' = f(y)$ ,  $z' = f(z)$ .

.....  
.....

### Partie B : Relativité restreinte

Q6 : Comment est elle la valeur de la vitesse de la lumière ? Justifier.

.....

Q7 : Quels liens existent-ils entre la vitesse de la lumière  $c$  et la théorie de la relativité restreinte? Connaissez-vous le nom du physicien, inventeur de cette théorie ?

.....  
.....  
.....

Q8: En relativité restreinte :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

.....

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.

.....

Q9 : Pensez- vous que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire. Justifier.

.....  
.....

Q10 : D'après vous comment faut il exploiter les liens entre la physique et la philosophie pour améliorer l'enseignement de la physique et de la philosophie.

.....  
.....  
.



## Annexe n°6.

Questionnaire proposé aux élèves de terminales avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne

Nom et prénom... Essaidi Dina ..... classe : H.S.C 1 :

### Partie A : Relativité Galiléenne

**X** Q1 : Comment pourrez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

Corps en mouvement :  $v \neq 0$  / Corps en repos :  $v = 0$  .....

Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

Un repère peut être spécialisé pour une certaine représentation graphique, mais un référentiel est général :

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

Je ne sais pas .....

Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

Un événement est la passage de l'état de mouvement à un état de repos ou vis versa. On le repère grâce au calcul du tra :

Q5 : Énoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton). du mouvement.

C'est la somme des forces extérieures et intérieures est égal au vecteur centre d'inertie multiplié par l'accélération.

Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

Je ne sais pas .....

Q7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

# Annexe n° 7

Doc Nat

Questionnaire proposé aux élèves de terminale avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne (Avril 2019)

Nom et prénom.....classe et section :.....

## Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Comment pourrez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

si la vitesse est nul le corps est en repos, si elle est différente de zéro alors le corps est en mouvement.

X Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

Un référentiel est utilisé en physique pour parler dans l'espace et un repère est l'application mathématique.....

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

un référentiel où si la 1<sup>ère</sup> loi de Newton est vérifiée.....

X Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

un événement en physique est une perturbation ou un mouvement dans l'espace, la réplique ou le repère par un référentiel

Q5 : Énoncez le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

.....

Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

Absolu : justifié sur tout les cas sans condition.....  
Relatif : conditionné.....

Q7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

..... Absolu.....

## Annexe n° 8.

Questionnaire proposé aux élèves de terminale avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne (Avril 2019)

Nom et prénom... Amir D. Rab ..... classe et section : SC 3

### Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Comment pourrez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

Le corps est en état de mouvement lorsqu'il présente une vitesse du M.T

Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

Un référentiel peut être mobile alors qu'un repère est fixe

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

Un référentiel galiléen est la mécanique appliquée en galilé pour ces cas

**X** Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

Un événement est une observation physique et se repère en coordonnées

Q5 : Enoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

Le M.T d'un corps est illimité si l'on ne considère pas la force de frottement de la terre

Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

absolu = illimité, inf. infini  
relatif = limite, infini

## Annexe n°9

Questionnaire proposé aux élèves de terminale avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne (Avril 2019)

Nom et prénom..... classe et section : *Bienvenue*

### Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Comment pourrez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

*Pour l'identifier il faut choisir un référentiel*

Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

.....

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

*c'est un référentiel espace et temps*

X Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

*Un événement c'est un corps en mouvement par rapport à un référentiel*

Q5 : Énoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

.....

Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

*absolu : c'est quelque chose exacte*

*relatif : c'est quelque chose qui peut changer au cours du temps*

Q7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

*L'espace est relatif car il se dilate de saint A*

## Annexe n° 10

Questionnaire proposé aux élèves de terminale avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne (Avril 2019)

Nom et prénom..... classe et section : Étudiant 1<sup>ère</sup> année

### Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Comment pourrez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

.. On calcule la vitesse de cet corps : 0 = en repos ;  $\neq 0$  = en mouvement

Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

.. Le référentiel est un repère qui prend le temps en compte

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

.. Un référentiel qui utilise 3 axes fixes

Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

On repère un événement en utilisant le moment de son début et son fin et l'espace qu'il occupe

Q5 : Enoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

.. La somme des forces est égale à zéro

Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

.. Absolu : inchangeable dans tout les perspectives  
.. Relatif : change la valeur en changeant la perspective

Q7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

Annexe n°11.

Questionnaire proposé aux élèves de terminale avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne (Avril 2019)

Nom et prénom... Choumadi... mada...... classe et section : 4<sup>ème</sup> science

Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Comment pourrez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

.....

Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

le repère est une zone où référentiel est le référentiel est un sol de pos. rapport auquel est le repère des position ou des mouvement...

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

est un référentiel dans lequel un objet est en mouvement rectiligne uniforme sachant que l'espace est homogène et isotrope.

Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

un événement est un point de l'espace et temps... car on prendrait un certain lieu et un certain instant

X

Q5 : Enoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

.....  $\sum \vec{F} = \vec{0}$  .....

Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

absolu : il  
relatif : .....

Q7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

l'espace est absolu.....

## Annexe n° 12

1000

Questionnaire proposé aux élèves de terminale avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne (Avril 2019)

Nom et prénom..... classe et section :.....

### Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Comment pourrez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

un état... de... mouvement... ou... de... repos... <sup>du corps</sup> est... déterminé... par... rapport... à un autre corps qui est considéré comme référentiel par le corps

Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

le... repère... permet... de... déterminer... les... coordonnées... de... chaque... point... d'un... objet... ou... d'un... lieu... ou... dans... l'espace.....

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

... dans... le... référentiel... galiléen... l'objet... est... au... repos... ou... en mouvement rectiligne uniforme... et la somme des forces qui s'appliquent sur lui est nulle.

Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

un... événement... en... physique... est... le... temps... et... le... lieu... de... quel... on... a... constaté... d'un... nouveau... phénomène... physique

**X** Q5 : Enoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

la... somme... des... forces... s'exerçant... sur... le... corps... est... nulle.....

**X** Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

« absolu » signifie une chose qui n'a pas de limites.....  
« relatif » signifie une chose qui possède des limites.....

Q7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

l'espace est absolu car il ne'est pas limité par rien d'autre.

## Annexe n° 13

Questionnaire proposé aux élèves de terminale avant enseignement de la théorie de la relativité restreinte avec leurs connaissances acquises en relativité galiléenne (Avril 2019)

Nom et prénom... Souini Hiba ..... classe et section : 4<sup>Sc</sup> 2<sup>ly</sup>

### Partie A : Relativité Galiléenne

Q1 : Comment pourriez vous identifier si un corps est en état de mouvement ou en état de repos ?

corps en état de mouvement si sa vitesse est égale à une vitesse, état de repos si sa vitesse nulle

Q2 : Quelle différence existe-t-il entre un repère et un référentiel ?

.....  
.....

Q3 : Qu'est ce qu'un référentiel galiléen ?

.....

Q4 : Qu'est ce qu'un événement en physique ? Comment le repère-t-on ?

.....

Q5 : Énoncer le principe d'inertie (ou première loi de Newton).

.....

Q6 : Que signifient pour vous en physique les mots « absolu » et « relatif » ?

absolu : qui varie pas .....

relatif : qui varie .....

Q7 : En mécanique newtonienne :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

l'espace est relatif .....

Annexe n° 14

Nom.....

Q9 : Soit  $R(O, x, y, z)$  un référentiel d'origine  $O$  et d'axes  $x, y$  et  $z$  et soit  $R'(O', x', y', z')$  un référentiel mobile animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme à la vitesse  $V$  dans  $R$ , parallèlement à la direction  $(Ox)$ . On suppose qu'à l'instant initial  $t = 0$  les origines  $O$  de  $R$  et  $O'$  de  $R'$  des deux référentiels sont confondues.

Faire un schéma à un instant  $t$  quelconque des deux référentiels  $R$  et  $R'$ .

.....  
.....  
.....

Donner l'expression mathématique de la relation entre les coordonnées dans  $R'$  et celles dans  $R$ ,  $x' = f(x, V, t)$ ,  $y' = f(y)$ ,  $z' = f(z)$ .

.....  
.....

Partie B : Relativité restreinte

X Q10 : Que signifie en physique la vitesse de la lumière ? Donner sa notation et sa valeur... elle est une constante physique universelle... et sa vitesse limite, elle est de l'ordre de 300.000 km/s

Cette valeur dépend-elle de la vitesse de déplacement de la source lumineuse?  
.....

Cette valeur dépend-elle de la vitesse de l'observateur qui reçoit le signal lumineux ?  
.....

Q11 : Quels noms de scientifiques sont attachés à la détermination de la vitesse de la lumière ? À quelles époques ?  
.....  
.....

## Annexe n°15

théorie ?

..... je ne sais pas .....

✗ Q13: En relativité restreinte :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

..... l'espace est relatif .....

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.

..... le temps est relatif car il n'est pas le même sur la terre que sur la lune .....

Q14: D'après ce que vous avez étudié en philosophie, avez-vous appris quelques discussions philosophiques sur la relativité en physique ? Citer un exemple.....

Q15: D'après ce que vous avez étudié en physique et en philosophie, pensez-vous qu'il y a un lien entre physique et philosophie ?

..... oui, il y a un lien entre physique et philosophie .....

Merci.

## Annexe n°16.

### Partie B : Relativité restreinte

Q6 : Comment est elle la valeur de la vitesse de la lumière ? Justifier.

elle est très grande et constante  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

X Q7 : Quels liens existent-ils entre la vitesse de la lumière  $c$  et la théorie de la relativité restreinte? Connaissez-vous le nom du physicien, inventeur de cette théorie ?

Albert Einstein est l'inventeur de cette théorie.  
la vitesse de la lumière reste constante et constitue une loi par rapport à la théorie de la relativité restreinte

Q8 : En relativité restreinte :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

l'espace est relatif

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.

le temps est relatif

Q9 : Pensez-vous que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire Justifier.

Qui tout à fait cela va nous enseigner sur les vraies lois de la physique en prenant compte de la théorie de la relativité inévitable pour la physique

Q10 : D'après vous comment faut-il exploiter les liens entre la physique et la philosophie pour améliorer l'enseignement de la physique et de la philosophie.

La philosophie est l'origine de la physique. Ce rapport nous aidera à mieux comprendre quelques phénomènes et d'améliorer notre culture générale

Merci.

## Annexe n° 17

### Partie B : Relativité restreinte

Q6 : Comment est elle la valeur de la vitesse de la lumière ? Justifier.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  .....

Q7 : Quels liens existent-ils entre la vitesse de la lumière  $c$  et la théorie de la relativité restreinte? Connaissiez-vous le nom du physicien, inventeur de cette théorie ?

.....  
.....

Q8 : En relativité restreinte :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

l'espace est absolu .....

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.

le temps est absolu relatif .....

X Q9 : Pensez-vous que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire. Justifier.

Oui, je pense que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire puisqu'elle est moderne et utile à la compréhension de phénomènes quotidiens.

Q10 : D'après vous comment faut-il exploiter les liens entre la physique et la philosophie pour améliorer l'enseignement de la physique et de la philosophie.

la philosophie peut être considérée comme un outil utile au développement de toutes les sciences. On peut alors utiliser l'une et l'autre pour améliorer l'enseignement.

Merci.

## Annexe n°16.

### Partie B : Relativité restreinte

Q6 : Comment est elle la valeur de la vitesse de la lumière ? Justifier.

elle est très grande et constante  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

X Q7 : Quels liens existent-ils entre la vitesse de la lumière  $c$  et la théorie de la relativité restreinte? Connaissez-vous le nom du physicien, inventeur de cette théorie ?

Albert Einstein est l'inventeur de cette théorie.  
la vitesse de la lumière reste constante et constitue une loi par rapport à la théorie de la relativité restreinte

Q8 : En relativité restreinte :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

l'espace est relatif

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.

le temps est relatif

Q9 : Pensez-vous que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire. Justifier.

Oui tout à fait. Cela va nous enseigner sur les vraies lois de la physique en prenant compte de la théorie de la relativité inévitable.  
Q10 : D'après vous comment faut-il exploiter les liens entre la physique et la philosophie pour améliorer l'enseignement de la physique et de la philosophie.

La philosophie est l'origine de la physique.  
Ce rapport nous aidera à mieux comprendre quelques phénomènes et d'améliorer notre culture générale

Merci.

## Annexe n° 17

### Partie B : Relativité restreinte

Q6 : Comment est elle la valeur de la vitesse de la lumière ? Justifier.

$c = 3 \cdot 10^8$  m/s

Q7 : Quels liens existent-ils entre la vitesse de la lumière  $c$  et la théorie de la relativité restreinte? Connaissez-vous le nom du physicien, inventeur de cette théorie ?

Q8 : En relativité restreinte :

- l'espace est-il absolu ou relatif ? Justifier.

l'espace est absolu

- le temps est-il relatif ou absolu ? Justifier.

le temps est absolu relatif

X Q9 : Pensez-vous que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire, Justifier.

Oui, je pense que l'enseignement de la théorie de la relativité restreinte est utile au secondaire puisqu'elle est moderne et utile à la compréhension de phénomènes quotidiens.

Q10 : D'après vous comment faut-il exploiter les liens entre la physique et la philosophie pour améliorer l'enseignement de la physique et de la philosophie.

la philosophie peut être considérée comme un outil utile au développement de toutes les sciences. On peut alors utiliser l'une et l'autre pour améliorer l'enseignement.

Merci.