



INSPE Académie de Limoges
Métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation
Master MEEF mention second degré
Parcours Physique chimie

2023/2025

**L'apport de l'histoire des sciences dans l'apprentissage des
concepts d'espace et de temps en physique**

Paul RIFFAUD

Encadrant : Bruno LUCAS

Maitre de conférences à l'université de Limoges



Remerciements

Je tiens, en premier lieu à remercier mon encadrant de mémoire M. Bruno Lucas dont les conseils m'ont été d'une grande aide dans la rédaction de ce mémoire.

Je souhaite également remercier mon tuteur de stage M Fournel qui a accepté de me laisser mettre en œuvre mon expérimentation pédagogique dans une de ses classe de seconde.

Je remercie l'ensemble des enseignants du Master MEEF Physique-chimie de l'INSPE de Limoges pour leurs retours au cours des séminaires de recherche. Je remercie tout particulièrement M Fatet, mon référent de stage qui m'a aidé à concevoir ma séance d'expérimentation et m'a fourni de nombreux conseils pédagogiques.

Pour terminer, je remercie ma famille pour leurs nombreuses relectures tout au long de mon travail de recherche.

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Table des matières

Introduction	6
1. Historique des notions d'espace et de temps.....	8
1.1. L'espace et le temps pour Aristote	8
1.2. L'espace et le temps en physique classique	9
1.2.1. Le principe de relativité de Galilée	9
1.2.2. L'espace et le temps absolu de Newton	10
1.3. L'espace et le temps en physique moderne	11
1.3.1. La transformation de Lorentz	11
1.3.2. L'espace-temps	13
1.3.3. Gravitation quantique	16
1.4. Synthèse des différentes approches	16
2. L'espace et le temps dans l'enseignement	18
2.1. L'espace et le temps dans les programmes, Du cycle trois à la terminale	18
2.1.1. Cycle 3	18
2.1.2. Cycle 4	18
2.1.3. Seconde générale	18
2.1.4. Enseignement scientifique	19
2.1.5. Première et terminale Spécialité physique chimie	19
2.2. Les difficultés liées à l'apprentissage des notions d'espace et de temps	20
3. L'histoire des sciences	22
3.1. L'histoire des sciences dans l'enseignement	22
4. Séance de travaux pratique d'introduction au principe d'inertie	23
4.1. Présentation générale	23
4.2. Objectifs	23
4.3. Contexte de l'expérimentation	24
4.4. Place de la séance dans la progression	24
4.5. Description de la séance	25
4.5.1. Activité documentaire : sonde Voyager 1	25
4.5.2. Galilée et l'expérience du bateau	25
4.5.3. Expérience en classe	26
4.6. Analyse de la séance	28
4.6.1. Analyse a priori	28
4.6.1.1. Activité documentaire : la sonde Voyager 1	28
4.6.1.2. Analyse historique : Galilée et l'expérience du bateau	29
4.6.1.3. Expérience en classe : skateboard et ballon de sable	29
4.6.2. Déroulé de la séance	30
4.6.3. Analyse a posteriori de la séance	31
4.6.3.1. La sonde Voyager 1	31
4.6.3.2. Galilée et l'expérience du bateau	32
4.6.3.3. Expérience pratique	34
4.7. Remédiation	35
Conclusion	37
Références bibliographiques	38
Annexes	40

Introduction

L'espace et le temps sont tous deux des concepts fondamentaux de la physique. L'étude de ces concepts date de l'antiquité et se poursuit encore de nos jours avec la recherche en physique moderne. Les deux notions d'espace et de temps sont aujourd'hui intrinsèquement liées par les théories modernes de la physique notamment au travers de la notion d'espace-temps. Ce lien n'a pas toujours été aussi solide au cours de l'histoire.

Il est important de noter que l'espace et le temps n'ont pas de définition claire qui serait restée inchangée au cours de l'histoire. Au fil des réflexions philosophiques et des découvertes scientifiques, les mots d'espace et de temps ont pu décrire des idées et des concepts très différents.

L'espace et le temps occupent également une place importante dans l'enseignement de la physique. Et ce, dès le début de l'enseignement de cette matière en classe de 6^{ème}. Ils représentent les bases de la mécanique classique vue au Lycée et sont également utilisés dans la plupart des thèmes des programmes. Ce sont donc des notions capitales dans la compréhension de l'enseignement de la physique. Cependant, l'espace et le temps étant des concepts très complexes, ils sont souvent source d'incompréhensions et de difficultés pour les élèves.

L'approche de la physique par l'histoire des sciences est encore aujourd'hui peu développée dans l'enseignement, bien qu'elle présente plusieurs intérêts. L'histoire des sciences est l'étude de la construction des savoirs scientifiques au cours du temps. Elle permet de mieux comprendre l'origine de nos connaissances actuelles ainsi que le processus qui a conduit à leur élaboration.

La première problématique à laquelle ce travail tente d'apporter une réponse est la suivante : « en quoi l'enseignement par l'histoire des sciences peut-elle aider dans l'apprentissage des concepts d'espace et de temps en physique ? »

Pour commencer nous ferons une mise au point bibliographique d'éléments d'histoire sur les concepts d'espace et de temps. Par la suite nous tenterons d'explicitier les intérêts de l'utilisation de l'histoire des sciences dans l'apprentissage de la physique en nous basant notamment sur l'épistémologie, puisqu'aujourd'hui l'histoire des sciences est présente dans les programmes scolaires. En physique, elle peut notamment être utilisée dans des domaines comme l'astronomie et la gravitation.

Ensuite, nous analyserons la place de l'espace et du temps dans l'enseignement de la physique, en examinant leur présence dans les programmes scolaires, du cycle 3 à la terminale. Cette analyse permettra d'identifier les attentes institutionnelles ainsi que les

notions clés abordées à chaque niveau d'enseignement. Nous nous intéresserons également aux difficultés que rencontrent les élèves dans l'apprentissage de ces concepts, en mettant en évidence les principales sources d'incompréhension et les obstacles épistémologiques liés à leur assimilation.

Enfin, pour illustrer concrètement l'apport de l'histoire des sciences dans l'enseignement de la physique, nous proposerons une séance de travaux pratiques portant sur le principe d'inertie. Cette séance, construite autour de l'expérience du bateau de Galilée et d'une expérimentation en classe, visera à confronter les élèves aux différentes conceptions initiales sur le mouvement et à leur faire prendre conscience de l'évolution des idées scientifiques au fil du temps. L'analyse de cette séance, menée à la fois a priori et a posteriori, permettra d'évaluer son efficacité pédagogique et de mieux comprendre l'impact d'une approche historique sur la compréhension des concepts d'espace et de temps par les élèves.

Ce travail a donc pour objectif d'explorer comment l'histoire des sciences peut être un levier pour améliorer l'apprentissage des notions fondamentales de la physique et de proposer des pistes de réflexion sur son intégration dans l'enseignement.

1. Historique des notions d'espace et de temps

Nous nous proposons ici de donner un aperçu de l'évolution des concepts du temps et de l'espace au long de l'histoire. En commençant par Aristote jusqu'à Einstein, en passant par Galilée, les théories de Newton, les deux révolutions que furent la relativité restreinte et générale, pour terminer par les questions encore ouvertes que posent les théories de la gravitation quantique.

1.1. L'espace et le temps pour Aristote

On considère que les sciences modernes débutent avec Galilée. Auparavant, on qualifiait la physique de « préscientifique »¹. Avant Galilée, la figure d'autorité était Aristote. On parle alors de physique aristotélicienne. Dès l'antiquité grecque, la tridimensionnalité de l'espace est considérée comme acquise². Aristote définit la première dimension comme deux points reliés. En ajoutant un troisième point et en les reliant, il définit la deuxième dimension : la surface. En ajoutant encore un autre point, on peut définir le volume. Aristote ne parle ici que des dimensions des corps. « L'espace n'a, pour Aristote, de sens physique que par les lieux »². Les « lieux » sont au nombre de trois et correspondent aux éléments : Eau, terre, air et feu. L'eau et l'air forment le lieu « intermédiaire » la terre forme le lieu « central » et le feu le lieu « extrême ».

Aristote considère que chaque objet possède une place qui lui est propre car celle-ci est conforme à sa nature. Par exemple, si on ramasse un caillou et qu'on le lance, celui-ci retombe car sa place naturelle est la terre. Aristote nomme cela le mouvement naturel. L'objet revient à sa position naturelle lorsqu'il en est écarté par une intervention extérieure, Aristote nomme cela le mouvement violent. La tendance naturelle de tout corps serait alors d'être au repos. Les deux états, en mouvement ou au repos, sont mutuellement exclusifs. Le repos n'est pas pensé comme un mouvement nul mais comme un état bien différent du mouvement.

Pour Aristote il n'existe que deux types de mouvements : rectiligne ou circulaire. Il considère le mouvement circulaire comme parfait, c'est celui des astres dans le ciel qui contiennent l'élément feu. Le mouvement rectiligne, lui, est réservé aux objets terrestres considérés imparfaits.

Dans l'antiquité le temps est un concept assez vague. Il est supposé avoir un début et une fin. On oppose en général le temps « petit », celui des hommes, historique, et le temps

¹ Françoise Balibar, Galilée, Newton lus par einstein, Espace et relativité, 2007

² Michel Paty. Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps. Flament, Dominique. Dimension, dimensions I., Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Paris., p. 87-112., 1998, Série Documents de travail. halshs-00167263

« grand », un temps cosmique et divin³. Aristote considérait le temps comme « le nombre de mouvement selon l'avant et l'après »

Pour lui le mouvement précède le temps et celui-ci ne peut exister sans mouvement⁴.

1.2. L'espace et le temps en physique classique

La physique en tant que telle débute avec les travaux de Galilée au XVI^{ème} siècle. Avant cela toute la physique se basait sur les théories aristotéliennes.

1.2.1. Le principe de relativité de Galilée

En 1632 Galilée publie : « *Le dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde* ». Il y expose différents arguments sur le modèle héliocentrique du système solaire sous la forme d'un dialogue entre trois personnages. L'un favorable au géocentrisme, l'autre à l'héliocentrisme et le troisième étant indécis. Au cours du dialogue il fait remarquer que lors du voyage d'un navire, les caisses de marchandises qu'il contient sont restées immobiles dans le navire. Il introduit ici pour la première fois l'idée de relativité du mouvement et du repos. Le mouvement et le repos ne sont plus deux états distincts. De plus le type de mouvement dont est animé l'objet ne dépend pas de la nature de celui-ci comme le disait Aristote. Il définit plutôt le mouvement comme la variation de la position d'un objet par rapport à un autre. Le mouvement et le repos sont par nature identiques. Les marchandises sont en mouvement par rapport au sol mais immobiles par rapport au bateau. Un mouvement absolu, sans référence n'a alors pas de sens. Le mouvement n'est plus propre à l'objet mais simplement une mesure de l'évolution du rapport entre deux corps : « Le mouvement [...] n'agit que sur la relation que ces mobiles entretiennent avec d'autres qui sont privés de ce mouvement. »⁵. Contrairement à Aristote, Galilée considère que le temps précède le mouvement : « Il est traité comme une grandeur continue dans la trame de laquelle le mouvement prend place et se développe »⁶.

Galilée suppose que l'intensification de la vitesse est proportionnelle à l'extension du temps. Cette affirmation qui semble évidente ne l'a pas toujours été. En effet, avant cela on définissait la croissance de la vitesse en fonction de l'espace plutôt que du temps⁷. Galilée géométrise le mouvement et propose des lois quantitatives en s'appuyant grandement sur les mathématiques. On passe d'une explication qui tente de répondre au « pourquoi » à une qui

³ Aline Canellis, Christine Vulliard. Le temps dans l'Antiquité. Le temps dans l'antiquité, Lyon, France. 2018. fhalshs-01837053f

⁴ Aristote, *Physique*, IV, 11, 219 b 1-2, 2 vol., éd. Carteron, Paris, Les Belles Lettres, 1952.

⁵ Galilée, *Le dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde*, 1632

⁶ Maurice Clavelin, *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris, Albin Michel, 1996, 2e éd., (1968), p.299

⁷ Céline Ruffin-Bayardin. Le présent : entre physique et philosophie. Vers un présentisme quantique. Philosophie. Université Paris Cité, 2019. Français. NNT : 2019UNIP7005. tel-04325880

tente de répondre au « comment ». Cela s'exprime notamment à travers la place importante de l'expérimentation et de l'observation.

L'idée la plus importante introduite par Galilée est celle de la relativité. Galilée affirme qu'il n'existe aucun moyen de différencier le mouvement d'un corps par rapport à un référentiel, du mouvement de ce même corps par rapport à un autre référentiel du moment que le mouvement est rectiligne et uniforme. Il prend pour cela l'exemple d'une cabine de bateau dans laquelle se trouvent des animaux et de multiples objets, il indique qu'aucun phénomène ne sera changé quelle que soit la vitesse du bateau pourvu qu'elle soit constante. Tout cela étant vrai si on se place dans un référentiel - nommé plus tard Galiléen en son hommage - ou inertiel pour étudier le mouvement. Un référentiel galiléen doit être homogène, isotrope et le temps doit y être uniforme. Il explique de plus que tout référentiel en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui aussi galiléen. En connaissant les coordonnées d'un point dans un référentiel on peut alors utiliser la transformation dite de Galilée pour calculer les coordonnées dans le deuxième référentiel. Si on considère un événement de coordonnées d'espaces et de temps (x, y, z, t) dans un référentiel $R(o, x, y, z)$ et un référentiel $R'(o', x', y', z')$ initialement confondu avec R qui se déplace à une vitesse v selon l'axe des x . Soit un mouvement de translation rectiligne uniforme. Les coordonnées de l'événement dans le repère R' seront alors :

$$x' = x - v \times t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Les résultats les plus importants de cette transformation sont la conservation des distances et des durées. La distance entre deux points est la même dans tous les référentiels. De même, la durée qui sépare deux événements est identique dans tous les référentiels. La vitesse d'un point, elle, dépend du référentiel.

1.2.2. L'espace et le temps absolu de Newton

Une autre révolution scientifique est la publication par Isaac Newton du livre : « *Philosophiæ Naturalis principia Mathematica* » (1687). Ce livre représente une continuation des travaux de Galilée. Newton y utilise le calcul infinitésimal pour démontrer de nombreuses lois, telle que la gravitation universelle. Newton considère le temps comme une notion naturelle qui ne nécessite pas de définition précise². Pour lui, le temps est une entité fondamentale et absolue, indépendante de tout système de référence. Il le considère comme une sorte de cadre fixe dans lequel tous les événements se produisent. Un flux universel et inchangeable qui s'écoule

de manière uniforme et constante, indépendamment de tout le reste⁸. Selon Newton, le temps est une dimension linéaire et unidirectionnelle allant du passé au présent et vers le futur. Le temps est alors absolu. Cette vision du temps est un des piliers de la physique newtonienne. Dans la mécanique de Newton, le temps et les durées sont les mêmes dans tous les référentiels. Il mentionne également un temps relatif, celui des durées ressenties, qu'on utilise dans la vie courante à la place du temps « vrai ». Ce temps-là est propre à chacun mais ne représente aucune réalité physique.

Il en va alors de même pour l'espace, lui aussi considéré comme absolu. Il fixe le cadre dans lequel se déroulent les phénomènes physiques. Cette vision absolue du temps et de l'espace est en partie guidée par la nature des outils mathématiques utilisés par Newton. Pour que le temps puisse être utilisé comme grandeur universelle, il doit être continu, uniforme et absolu.

Comme le dit Michel Paty : « La conceptualisation d'un temps et d'un espace, supposés naturels, est, en vérité, une construction. Le statut absolu de l'espace et du temps est lié à leur caractère mathématique qui en fait aussi des grandeurs continues »⁹

1.3. L'espace et le temps en physique moderne

1.3.1. La transformation de Lorentz

Comme nous l'avons vu plus tôt, le principe de relativité si souvent rattaché à Einstein le précède en fait de plusieurs siècles. En effet, le concept de relativité est déjà présent en physique depuis Galilée. Ce principe indique que les lois de la physique sont les mêmes quel que soit le référentiel inertiel dans lequel on se place. Les lois de la mécanique de Newton sont en accord avec ce principe. Elles sont invariantes par la transformation de Galilée. Cela signifie que les mêmes équations données dans deux référentiels différents donneront les mêmes résultats.

Ce principe fonctionne très bien jusqu'à la découverte des lois de l'électromagnétisme de Maxwell. En effet, celles-ci semblent ne pas obéir au principe de relativité galiléenne. La mesure de la valeur des champs électriques et magnétiques, à un point donné, à un moment donné, n'est pas la même dans deux référentiels galiléens¹⁰. Cela provient du fait qu'en

⁸ André Lausberg. Le temps selon Newton et Einstein, Bulletin de la société royale des sciences de Liège, vol 74, 4, 2005, pp 271-283

⁹ Michel Paty, « Sur l'histoire du problème du temps. Le temps physique et les phénomènes », in Etienne Klein et Michel Spiro, (éds.), *Le temps et sa flèche*, Gif-sur-Yvette, Éditions Frontières, 1994, p. 21-58

¹⁰ Richard P. Feynman, Robert B. Leighton et Matthew Sands(en), *Le Cours de physique de Feynman*, électromagnétisme 2, chap 26, Dunod, 1999

électromagnétisme on pose que c , la vitesse de la lumière, est une constante, même si la source est en mouvement. Pour expliquer cela on suppose la présence d'un « fluide » qu'on nomme l'éther, au repos par rapport à l'espace absolu⁷. Cette théorie est incompatible avec la relativité Galiléenne qui indique que la vitesse est relative au référentiel.

En 1892 Hendrik Lorentz propose une première piste de réponse avec la publication de « *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps en mouvement.* » Dans cet ouvrage, il propose une autre transformation, similaire à celle de Galilée mais plus complexe. Celle-ci permet de retrouver l'invariance des lois de Maxwell par changement de référentiel. De plus cette invariance est également vraie pour toutes les autres lois de la physique, notamment celles de Newton. La transformation de Lorentz est un ensemble d'équation reliant les coordonnées d'espace et de temps d'un évènement dans deux référentiels en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre. Si on considère un évènement qui aura pour coordonnées (x, y, z, t) dans un référentiel R et (x', y', z', t') dans un autre référentiel R' qui se déplace à une vitesse v par rapport à R , les transformations de Lorentz sont les relations qui existent entre ces deux ensembles de coordonnées en donnant les résultats suivants¹¹ :

$$x' = \gamma(x - v \times t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma(t - v \times x/c^2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

γ représente le facteur de Lorentz

La différence majeure entre la transformation de Galilée et la transformation de Lorentz est la conservation des durées. Avec la transformation de Lorentz, la durée qui sépare deux évènements dépend du référentiel. Cette conséquence est très difficile à appréhender intuitivement car elle va à l'encontre de toutes nos expériences personnelles.

En 1905 dans son article « *de l'électrodynamique des corps en mouvement* », Einstein propose d'utiliser la transformation de Lorentz plutôt que celle de Galilée¹². Il part du postulat de la constance de la vitesse de la lumière et développe la relativité restreinte. Comme nous l'avons dit plutôt, cela a pour conséquence majeure de rendre les durées dépendantes de

¹¹ Hendrik Anton Lorentz, *La théorie électromagnétique de Maxwell et on application aux corps en mouvement.* 1892

¹² Albert Einstein, *De l'électrodynamique des corps en mouvement.* 1905

l'observateur. Cela va totalement à l'encontre de la physique newtonienne qui postule un temps absolu. En relativité restreinte, le temps n'est plus absolu, tout comme la vitesse, il dépend des référentiels. De cela découlent d'autres effets étranges comme la contraction des longueurs et la dilatation du temps. Ainsi un observateur animé d'une vitesse par rapport à un objet verra sa longueur plus courte qu'un autre observateur immobile par rapport à l'objet. De même, la durée qui sépare deux phénomènes qui affectent l'objet paraîtra plus longue à l'observateur en mouvement par rapport à lui.

De plus, il découle des transformations de Lorentz que la vitesse de la lumière est la vitesse la plus haute atteignable. En effet, si un objet se déplaçait à une vitesse supérieure à celle de la lumière, le facteur de Lorentz deviendrait un nombre complexe. Or comme les durées et les positions sont des grandeurs mesurables elles sont nécessairement réelles. Cela implique que la vitesse de la lumière dans le vide est une vitesse « palier » qui est constante dans tous les référentiels inertiels. Pour finir, ces considérations rendent la notion de simultanéité obsolète. En effet, comme les durées dépendent de l'observateur, cela n'a plus de sens de dire que deux événements se produisent en même temps⁸.

Il faut également noter que pour des vitesses très inférieures à la vitesse de la lumière, les transformations de Lorentz se simplifient et redonnent les transformations de Galilée. C'est-à-dire que les lois de Newton sont encore valables pour des vitesses faibles devant celles de la lumière. Ce point est essentiel pour accorder du crédit à la théorie de la relativité générale, en effet elle remet en cause la théorie de Newton, existant depuis plus de deux cents ans et ayant donné des résultats expérimentaux formidables. Les lois de Newton ont par exemple permis de détecter Neptune, la planète la plus éloignée du système solaire, grâce à l'observation d'anomalies dans la trajectoire d'autres planètes. L'astronome Urbain Le Verrier suppose que ces anomalies sont dues à la présence d'un corps inconnu dans le système solaire¹³. Il en calcule alors la masse et la position théorique puis il réussit à observer Neptune à la position calculée. La relativité restreinte ne remet pas en cause les lois de Newton, elle en restreint simplement l'utilisation à des cas précis.

Le temps et les trois directions de l'espace sont maintenant indissociables. Hermann Minkowski propose de considérer le temps comme la quatrième coordonnée et nomme le tout : l'espace-temps².

1.3.2. L'espace-temps

En physique contemporaine on ne considère plus l'espace et le temps comme des concepts distincts. Ils sont rassemblés sous le terme d'espace-temps. Quand Minkowski le théorise au

¹³ Francois Arago, *astronomie populaire*, Paris, Gide, 1857

début du XX^{ème} siècle, il le considère toujours comme fixe et absolu. Il faudra attendre 1916 et la publication de sa théorie de la relativité générale¹⁴ pour que le terme prenne son sens définitif.

Minkowski suppose que la dimension temporelle n'est pas différente des trois autres. Elles sont toutes les quatre de même nature. De même, Arthur Eddington pense qu'aucune des quatre dimensions n'est fondamentalement différentes des autres² : « Pour la réalité physique, le continuum formé par l'espace et le temps imaginaire est complètement isotrope pour toutes les mesures ». D'autres, comme Langevin² ou encore Einstein, ne sont pas d'accord et considèrent le temps comme à part des trois autres dimensions de l'espace.

Dans la théorie de la relativité générale (1916) l'espace-temps n'est plus absolu. Il est courbe, sa forme dépend des objets qu'il contient¹⁵. L'espace-temps est affecté et modifié par les phénomènes qui s'y déroulent. Une autre considération importante est le statut de la gravité. Einstein ne la conçoit plus comme une force mais comme une conséquence de la géométrie de l'espace-temps. Il en résulte alors qu'un objet qui ne subit aucune force n'est plus au repos. Il suit ce qu'on appelle une géodésique, c'est-à-dire sa trajectoire naturelle dans l'espace-temps. La présence d'autres objets va modifier la courbure de l'espace-temps et ainsi provoquer une modification des géodésiques. Les planètes ne tournent pas autour du soleil car il exerce sur elles une force proportionnelle au produit de leur masse, divisé par la distance qui les sépare au carré. Le soleil, de par sa masse, déforme l'espace-temps et provoque un changement dans les géodésiques, les trajectoires naturelles, des planètes¹¹.

Cette fois encore, cette nouvelle théorie bouleverse totalement la façon que les physiciens ont de voir le monde. Rapidement, de nombreux tests expérimentaux viennent confirmer la validité de la théorie. Le premier concerne l'avance du périhélie de Mercure. Etant la planète du système solaire la plus proche du soleil, Mercure est soumise à des effets relativistes, non pris en compte par les lois de Newton. La trajectoire de la planète subit une lente précession. Elle forme une ellipse dont le soleil est un des foyers et l'ellipse tourne lentement autour du soleil. Or la vitesse de rotation mesurée en utilisant les lois de Newton était légèrement différente de la vitesse calculée. Cet écart est longtemps resté inexplicé et on a supposé comme pour la découverte de Neptune qu'il était lié à la présence d'une autre planète qui perturbait la trajectoire. Cependant toutes les tentatives de localiser cette planète hypothétique se sont

¹⁴ Albert Einstein, *la théorie de la relativité restreinte et générale*. 1916, édition française Gauthier-Villars 1956

¹⁵ Aurélien Barrau, *Relativité générale*. Dunod, collection sciences sup. 2023

soldées par des échecs. En utilisant les principes de la relativité générale, Einstein calcule une valeur de vitesse de rotation qui correspond à la valeur mesurée expérimentalement.

D'après Michel Paty : « en relativité générale, l'espace et le temps se voient privés de leur signification physique usuelle et rendus à l'état de simples variables mathématiques, exprimant des coordonnées par rapport à un système de référence arbitraire, dépourvu de signification particulière par rapport aux corps ou aux phénomènes »¹⁶. Les coordonnées n'ont plus de significations physiques, elles ne sont que des paramètres mathématiques. La modification des concepts d'espace et de temps n'était pas le point de départ de la réflexion d'Einstein. Ce changement n'est en fait qu'une conséquence nécessaire à la résolution du problème de la nature du champ de gravitation.

La théorie de la relativité générale permet de faire de nombreuses prédictions qui seront ensuite confirmées expérimentalement. On peut citer par exemple l'existence des lentilles gravitationnelles, des trous noirs ou encore des ondes gravitationnelles. Tous sont des phénomènes qui ont pu être observés parfois près d'un siècle après leur formulation. Elle permet aussi à George Lemaitre de proposer en 1927 une théorie de l'origine de l'univers : le Big Bang.

La relativité générale a permis de répondre à de nombreuses questions dans le domaine de la physique mais en a également posé d'autres. En parallèle de la théorie de la relativité, se développe la mécanique quantique, une théorie de l'infiniment petit qui permet d'expliquer de nombreux phénomènes à l'échelle atomique et subatomique. Cette théorie est remarquablement fructueuse et permet de démontrer une quantité importante de résultats fondamentaux. A priori ces deux théories ne devraient pas interférer car la première traite d'objet à l'échelle cosmologique et la deuxième à échelle subatomique. Il existe cependant des cas dans lesquelles elles peuvent toutes deux s'appliquer et elles donnent alors des résultats différents.

On peut notamment prendre l'exemple du Big bang. Le « début » de l'univers. La théorie du Big bang suppose que l'univers est en expansion et qu'en rembobinant le temps on peut en déduire son histoire passée. On trouve alors qu'il y a environ 13,8 milliards d'années la taille de l'univers tendait vers zéro. Il était entièrement condensé en un volume minuscule. Il faut alors prendre en compte des principes de mécanique quantique. Or, comme dit plus tôt, les deux théories sont incompatibles. Cette incompatibilité est encore aujourd'hui la plus grande question ouverte de la physique fondamentale.

¹⁶ Michel Paty. *L'espace-temps de la théorie de la relativité*. in Piettre Bernard (dir.), *le temps et ses représentations*, coll. Les Rendez-vous d'Archimède, L'Harmattan, 2001. halshs-00004245

1.3.3. Gravitation quantique

La mécanique quantique est l'autre grande théorie physique du XX^{ème} siècle. En mécanique quantique, l'espace et le temps représentent simplement un cadre dans lequel se déroulent les phénomènes, les effets relativistes ne sont pas pris en compte¹⁷. La mécanique quantique se démarque de la relativité par les outils mathématiques utilisés. Ils sont complètement différents. La théorie tire son nom du fait que certaines grandeurs sont quantifiées. Elles ne peuvent prendre qu'un nombre fini de valeur. C'est notamment le cas de l'énergie ou du moment cinétique. De plus, elle introduit une dimension probabiliste. En mécanique quantique cela n'a pas de sens de se demander quelle est la position d'une particule. On parlera plutôt de sa probabilité de présence en un point donné.

Pour adapter la gravitation à la mécanique quantique il faudrait la quantifier et donc quantifier l'espace et le temps¹³. Plusieurs pistes ont été explorées pour tenter de lier les deux théories, pour créer une « théorie du tout ». Les plus connue est la théorie des cordes ou encore la gravitation quantique à boucles qui propose de considérer l'espace-temps comme discret, composé de sorte « d'atome » d'espace¹⁸

1.4. Synthèse des différentes approches

- Tous les référentiels galiléens sont équivalents du point de vue mécanique. La vitesse d'un objet est relative à son référentiel.
- Newton (1687) s'appuie sur la relativité galiléenne. Le temps ne se transforme pas quand on passe d'un référentiel à un autre et la longueur d'un objet est également invariante.
- Dans la théorie de la relativité restreinte formulée par Einstein (1905), l'espace et le temps ne peuvent plus être conçus séparément car ils se transforment entre eux quand on passe d'un référentiel à un autre (transformation de Lorentz). L'intervalle de temps entre deux événements dépend du référentiel ainsi que la longueur d'un objet, le temps et les distances sont relatives.
- En 1908, Minkowski développe un cadre géométrique pour l'espace-temps de la relativité restreinte. Pour décrire un événement physique, il est plus commode d'adopter un repère spatio-temporel dans un espace-temps à 4 dimensions.
- La relativité générale (1916) apporte une profonde modification du concept d'espace-temps pour décrire les interactions entre objets matériels. La gravitation est décrite

¹⁷ Bernard Guy. Relier la mécanique quantique et la relativité générale ? Réflexions et propositions. 2016. hal-00872968v2

¹⁸ Carlo Rovelli. *Et si le temps n'existait pas ? Un peu de science subversive*. Dunod, 2012

comme la courbure d'espace-temps, on n'a plus de gravitation universelle comme selon la vision de Newton.

- La relativité générale ne tient pas compte de l'infiniment petit et des phénomènes quantiques, d'où la nécessité de corrélérer la relativité avec la mécanique quantique.

2. L'espace et le temps dans l'enseignement

2.1. L'espace et le temps dans les programmes, Du cycle trois à la terminale

Avant d'étudier les difficultés posées par les concepts d'espace et de temps, il convient de détailler quelle place ils occupent dans les différents programmes¹⁹. On se concentrera ici uniquement sur l'enseignement général.

2.1.1. Cycle 3

Le cycle 3 commence en école primaire et se termine en 6^{ème}. Il se concentre sur la construction de nouveaux modes de raisonnement, notamment la formulation et la vérification d'hypothèse. On retrouve l'espace et le temps dans le thème « observer et décrire les différents types de mouvements », le point central est la notion de vitesse. On présente également quelques mouvements simples, rectilignes ou circulaires. On aborde également l'accélération et la décélération.

2.1.2. Cycle 4

Le cycle 4 se poursuit de la 5^{ème} à la 3^{ème}. On cherche à faire adopter aux élèves une posture scientifique au travers de la curiosité, du questionnement des idées et de l'ouverture d'esprit. L'élève acquiert également des compétences d'expérimentation et de raisonnement. L'espace et le temps sont abordés dans le thème « Mouvement et interactions »

Le programme propose d'approfondir les notions de mouvement et de vitesse en parlant de mouvement uniforme et en caractérisant la vitesse par leur direction, sens et valeur. Cela permet une introduction à la nature vectorielle de la vitesse. On commence également à aborder le principe de relativité du mouvement dans des cas très simples comme un train qui démarre en gare. On introduit ainsi le concept d'observateur immobile ou en mouvement.

La notion de force est également abordée avec la loi de la gravitation universelle. On apprend à décrire une force par sa direction, son sens et son intensité, toujours sans expliciter sa nature vectorielle.

En mathématiques on introduit les notions de repère et de coordonnées qui seront par la suite indispensables.

2.1.3. Seconde générale

L'arrivée en seconde représente un changement important dans l'enseignement de la physique. Les mathématiques y occupent une place bien plus importante qu'au collège. La

¹⁹ Bulletins officiels de l'éducation nationale. Education.gouv.fr

pratique expérimentale prend également de l'importance. On introduit également le concept de modélisation. On retrouve le thème « Mouvement et interaction » qui s'inscrit donc dans la continuité du cycle 4. L'apprentissage de la mécanique en tant que telle commence en seconde. Le but de ce thème est de préparer la mise en place du principe fondamental de la dynamique. Pour cela on fait le lien entre force et vitesse.

On explicite la notion de référentiel et de vecteur car le formalisme vectoriel a été vu en cours de mathématiques. On explique l'impact du choix du référentiel sur la description du mouvement. La notion de trajectoire est également abordée. Le principe d'inertie ainsi que la loi des actions réciproques sont vus.

2.1.4. Enseignement scientifique

L'enseignement scientifique n'a pas pour vocation de constituer chez les élèves un savoir exhaustif. Il cherche plutôt à faire des élèves des personnes responsables, lucides, informées et capables d'esprit critique et de capacité d'analyse. De ce fait, l'espace et le temps ne sont pas très présents dans le programme. En effet, une étude plus poussée que celle faite les années précédentes demande la maîtrise d'outils mathématiques qui fait défaut aux élèves qui ne suivent pas d'enseignement de spécialité en mathématiques ou en physique chimie. On retrouve néanmoins le thème « La terre dans l'univers » en 1^{ère}. Ce thème aborde les différences entre le modèle géocentrique et héliocentrique. L'enseignement scientifique tend à favoriser une approche documentaire et préconise l'utilisation de l'histoire des sciences comme accroche pour les élèves.

2.1.5. Première et terminale Spécialité physique chimie

En classe de première, les thèmes abordés sont les mêmes qu'en 2^{nde}, tout en étant approfondis. On utilise les forces gravitationnelles et électrostatiques pour introduire la notion de champ. La deuxième loi de Newton, le principe fondamental de la dynamique, est abordé de façon détournée. On étudie le lien entre la variation du vecteur vitesse et la somme des forces qui s'appliquent à un système sans expliciter les lois mathématiques.

En terminale, les thèmes restent les mêmes. On traite maintenant la deuxième loi de Newton. L'étude de la dérivation et de l'intégration permet de manipuler la loi dans des cas simples comme la chute libre. En effet, les équations différentielles qui permettent de résoudre des cas plus complexes ne sont pas vues au lycée. On explicite également la notion d'accélération comme étant la dérivée de la vitesse par rapport au temps.

Les lois de Kepler sur le mouvement des planètes sont aussi étudiées.

2.2. Les difficultés liées à l'apprentissage des notions d'espace et de temps

Comme nous avons pu le voir au travers des différents programmes, les notions d'espace et de temps sont présentes tout au long du parcours scolaire des élèves. La mécanique au lycée et dans le supérieur est source de difficultés pour de nombreux élèves.

Les mathématiques sont souvent la première source de difficulté pour les élèves. L'étude de la mécanique demande la maîtrise d'outils mathématiques variés comme le calcul vectoriel, la trigonométrie, la dérivation et l'intégration ou encore la résolution d'équations différentielles. Les difficultés peuvent être accentuées par un manque de coordination de l'équipe pédagogique. Si les notions n'ont pas été préalablement abordées en cours de mathématiques, leurs applications en mécanique est encore plus compliquée. La bonne maîtrise de l'outil mathématique ne garantit cependant pas une bonne compréhension du sujet.

Les élèves rencontrent également des difficultés plus conceptuelles. La mécanique étudie des phénomènes de la vie courante, la trajectoire d'un objet, la chute d'un corps. Tout cela est déjà connu des élèves par leur expérience du monde extérieur²⁰. Ces expériences personnelles empiriques sont cependant souvent source de difficultés chez les élèves car elles entraînent la création de conceptions initiales. Ces conceptions sont ce que Gaston Bachelard appelle des obstacles épistémologiques dans *La formation de l'esprit scientifique, 1938*. Pour Bachelard, l'apprentissage des connaissances se fait en opposition à ce que l'on connaît déjà. Les expériences antérieures à l'apprentissage forment des croyances qui rendent difficile l'apprentissage qui va devoir les déconstruire avant de pouvoir être pleinement intégré par l'élève.

Les conceptions initiales les plus répandues chez les élèves concernent les notions de force et de mouvement. Un nombre important d'élèves ne maîtrise pas bien la notion de force. Une force constante appliquée à un objet est souvent associée à une vitesse constante²¹. Ils considèrent souvent que si un objet est au repos, aucune force ne s'applique sur lui. On observe une très forte contextualisation. Dans le cadre de la classe les élèves connaissent leur cours et savent répondre à des questions mais dès lors qu'on les interroge sur des sujets de la vie courante ils se montrent incapables de faire appel aux connaissances scientifique et semblent répondre d'instinct en utilisant leurs conceptions initiales. La relativité du mouvement cause également beaucoup de problèmes. Les élèves ont des difficultés à utiliser ce concept pour répondre à des questions qui leur sont posées. Des questions du type : « que se passe-

²⁰ Réussir en mécanique du cycle 3 au cycle terminal du lycée, éducol

²¹ Lillian C. McDermott, Department of physics, University of Washington, Seattle, Washington, USA. *Conceptions des élèves et résolutions de problèmes en mécanique*. 2004

t-il si on laisse tomber un objet au sol dans un train qui avance en ligne droite à vitesse constante ? » entraînent souvent des réponses incorrectes notamment : « l'objet ne tombe pas à la verticale mais vers l'arrière »

Une autre conclusion intéressante qui ressort de l'analyse de diverses études par Lillian C. McDermott est que la proportion de bonnes réponses chez des élèves ayant suivi un cours de mécanique n'est pas significativement plus élevée que chez des élèves n'ayant jamais suivi ce cours. L'apprentissage ne semble donc pas être efficace dans la déconstruction des conceptions initiales en mécanique.

Il est également intéressant de relever que la plupart des idées erronées des élèves ressemblent à la pensée d'Aristote, brièvement décrite plus haut. Un objet reste en mouvement tant qu'on lui applique une force. Les objets tendent à revenir à leur position « naturelle ».

3. L'histoire des sciences

L'histoire des sciences se concentre sur l'étude du développement des sciences tout au long de l'histoire. Elle examine comment les idées, les théories et les découvertes scientifiques ont évolué, en mettant l'accent sur les contextes culturels, sociaux et intellectuels dans lesquels ces avancées ont eu lieu. L'histoire des sciences explore les contributions de différents scientifiques, les changements de paradigmes scientifiques, les controverses, les découvertes et les progrès qui ont amené la science dans son état actuel.

3.1. L'histoire des sciences dans l'enseignement.

L'histoire des sciences joue un rôle important dans l'enseignement de la physique chimie au collège et au lycée. Son utilisation présente de nombreux avantages²². Elle permet aux élèves de replacer les concepts physiques dans leur contexte historique. En étudiant comment ces concepts ont été créés, réfutés, améliorés et modifiés au fil du temps, les élèves peuvent plus facilement saisir leur pertinence et la place qu'ils occupent dans la physique actuelle.

L'étude de l'histoire des sciences encourage également le développement de la pensée critique chez les élèves. Les comparaisons entre différents modèles et les controverses historiques permettent aux élèves de travailler leur esprit critique en comparant la pertinence de différents arguments à la lumière des connaissances scientifiques disponibles à cette époque. L'histoire des sciences permet, de plus, de mieux comprendre l'établissement des savoirs scientifiques avec l'établissement de la méthode scientifique au cours des siècles. L'histoire des sciences peut aussi servir d'accroche pour intéresser les élèves. Apprendre l'origine d'une loi ou d'un principe physique peut permettre de mieux comprendre son utilité.

Pour finir, cela permet également de lutter contre l'idée reçue selon laquelle la science est construite par une poignée de génies qui ont conçu les théories scientifiques seules. Cela permet de mettre en lumière les étapes qui ont permis d'aboutir aux lois physiques. Cela permet d'expliquer qu'il s'agit le plus souvent d'un travail de coopération de longue durée entre de multiples scientifiques qui s'appuient sur les découvertes des uns et des autres pour faire progresser la recherche. Cette idée de génie peut souvent décourager les élèves qui ne pensent pas avoir les qualités nécessaires pour comprendre les sciences.

²² Evelyne Barbin, *Apports de l'histoire des mathématiques et de l'histoire des sciences dans l'enseignement*, 1997

4. Séance de travaux pratique d'introduction au principe d'inertie

4.1. Présentation générale

La recherche dans le domaine de l'apprentissage tend à montrer que les thèmes des programmes qui regroupent les notions d'espace et de temps présentent d'importantes difficultés chez les élèves. Nous avons précédemment évoqué les raisons de ces difficultés. Une approche de ces sujets par l'histoire des sciences et l'épistémologie pourrait permettre d'aider les élèves dans ces domaines. Comprendre pas à pas comment les théories ont été construites peut-être un moyen efficace pour permettre aux élèves d'accéder à une compréhension plus profonde qui semble leur faire défaut. La vérification de ces hypothèses pourra être faite au cours du stage de pratique accompagnée au Lycée en deuxième année de master MEEF.

Cette expérimentation prendra la forme d'une séance de cours structurée autour de l'histoire des sciences et de la mise en activité des élèves par une démarche d'investigation. L'objectif sera de les engager activement dans le processus de découverte, en leur permettant de reconstruire, à leur échelle, le cheminement intellectuel qui a conduit à la construction des savoirs scientifiques. Cette méthode, en favorisant une approche progressive et contextualisée, pourrait contribuer à combler les lacunes souvent observées dans leur compréhension de ces notions complexes.

La séance proposée aux élèves fait partie du thème mouvement et interaction : principe d'inertie. Il s'agit donc d'une séance expérimentale basée sur l'histoire des sciences et servant d'introduction au principe d'inertie.

4.2. Objectifs

Les principaux objectifs visés sont :

- Identifier les conceptions initiales des élèves et vérifier si elles correspondent à celles décrites dans la littérature sur le sujet
- Utiliser l'approche de l'histoire des sciences pour faire réfléchir les élèves sur leurs propres conceptions initiales.
- Exercer l'esprit critique des élèves.

4.3. Contexte de l'expérimentation

La séance aura lieu dans un grand lycée général et technologique de centre-ville dans une classe de 2^{nde} générale. La séance a lieu sur un créneau de travaux pratiques d'une durée d'1h30. La classe est alors séparée en deux groupes, dont les effectifs sont de 16 élèves chacun. L'expérience pourra ainsi être menée deux fois. De plus, le faible effectif permet une meilleure interactivité et laisse plus de place à l'échange avec les élèves. Les élèves sont répartis en binôme. Les deux séances ont eu lieu le vendredi 6 décembre 2024 de 10h à 11h30 pour le premier groupe et de 12h30 à 14h pour le second.

4.4. Place de la séance dans la progression

Le thème « mouvement et interactions » du bulletin officiel est découpé en trois parties :

1. Décrire un mouvement dans lequel on aborde les notions de trajectoires, de référentiels, de relativité du mouvement et de vecteur vitesse.
2. Modéliser une action sur un système. Elle aborde la modélisation d'une action par une force ainsi que plusieurs exemples de forces.
3. Principe d'inertie qui aborde la notion de point matériel, le principe en lui-même ainsi que le cas de la chute libre.

Il est, en général, judicieux d'aborder les notions dans cet ordre, car la formulation exacte du principe d'inertie, à savoir :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \times \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0}$$

que l'on peut traduire par : « Si les forces qui s'appliquent sur un objet se compensent, alors cet objet est soit en mouvement rectiligne uniforme soit il est au repos », nécessite de connaître la notion de force, de vecteur et de trajectoire puisqu'il est question de mouvement rectiligne uniforme.

Pour des raisons d'emploi du temps, la séance est la première dans laquelle on aborde le thème mouvement et interactions. Il a donc été nécessaire de l'adapter afin qu'elle puisse être réalisable sans les éléments cités dans les parties 1 et 2 du thème.

On peut néanmoins noter que le programme du cycle 4 comprend les notions de forces, notamment par la loi de la gravitation universelle et de trajectoire. La nature vectorielle des forces et le vecteur vitesse ne sont en revanche pas explicités.

Le fait de positionner cette séance d'introduction au principe d'inertie en début de séquence n'est pas non plus entièrement dénué de sens. Il s'agit d'un principe fondateur en mécanique

et sa compréhension, même si elle est seulement intuitive, facilite grandement l'apprentissage des autres notions du programme.

4.5. Description de la séance

La séance est découpée en plusieurs parties, une étude documentaire, puis une partie pratique et enfin une conclusion. Dans chaque partie, des mises en communs seront effectuées afin de recenser les idées des élèves ainsi que les potentiels conceptions initiales. Le document élève est consultable en annexe.

4.5.1. Activité documentaire : sonde Voyager 1

L'accroche choisie pour la séance est la sonde Voyager 1. Le but de cette première partie est d'enclencher une réflexion sur la relation entre force et mouvement. Une des conceptions initiales identifiée dans le cadre théorique est le lien erroné entre vitesse et force fait par les élèves.

Dans l'activité, on demande aux élèves quelles sont les forces extérieures qui s'exercent sur la sonde. Cette première question permet de sonder les élèves afin de déterminer où en sont leurs connaissances sur les forces. On leur demande ensuite d'effectuer le calcul de la force de gravitation exercée sur la sonde Voyager par le soleil. Cela permet de réinvestir la formule de la gravitation universelle normalement déjà vue en 3^{ème}.

Le calcul donne une valeur très faible. Le but est ici de les amener à conclure que la sonde n'est soumise à aucune force alors qu'elle avance en ligne droite dans l'espace depuis près de cinquante ans. On souhaite ici les amener à cette conclusion par leurs propres réflexions afin de confronter la conception selon laquelle une force doit s'appliquer pour que le mouvement ait lieu.

4.5.2. Galilée et l'expérience du bateau

C'est ici que l'histoire des sciences entre dans la conception de la séance. Le support pour cela est « le dialogue sur les deux grands systèmes du monde » écrit par Galilée en 1632, déjà mentionné dans le cadre théorique.

Le dialogue, comme son nom l'indique, est constitué d'une discussion entre trois personnages. On ne s'intéresse ici qu'à Salviati, qui porte les idées de Galilée et à Simplicio qui suit la pensée d'Aristote. La différence entre les deux personnages est intéressante, en effet comme dit plus tôt, la plupart des conceptions initiales des élèves sont semblables aux théories d'Aristote, tandis que Salviati représente la « bonne réponse » de la physique moderne.

Le premier passage du livre utilisé est celui où Galilée propose une expérience de pensée dans laquelle le sujet se trouve dans la cabine fermée d'un bateau. Toutes sortes d'objets sont accessibles et le but est de savoir si une expérience permet de déterminer si le bateau est à l'arrêt ou s'il avance tout droit à vitesse constante.

La question est posée ici de façon ouverte afin de faire réfléchir les élèves, d'abord en groupe de deux puis de manière commune via une mise en commun. La question est posée de façon piègeuse car il n'existe aucun moyen de différencier le repos et le mouvement rectiligne uniforme. Cette question permet, encore une fois, de faire ressortir les conceptions des élèves afin de, par la suite, les mettre face aux contradictions que ces conceptions génèrent dans leurs raisonnements. L'une des réponses attendues est l'idée selon laquelle un objet lâché tombera vers l'arrière. On cherche ici à illustrer une conséquence importante du principe d'inertie : l'équivalence entre repos et mouvement rectiligne uniforme.

Dans la suite on utilise un extrait du dialogue. Cet extrait porte sur l'expérience du boulet de canon lâché du haut du mât d'un navire. Chaque personnage donne son avis sur l'endroit où va atterrir le boulet si le bateau est en mouvement. Les élèves vont alors, à partir du texte identifier les deux hypothèses :

- Le boulet tombe derrière le mât car il tombe en ligne verticalement et le navire continue d'avancer pendant sa chute (théorie aristotélicienne).
- Le boulet tombe à l'aplomb du mât car quand il commence à tomber il possède la même vitesse que le navire (théorie galiléenne).

On demande ensuite aux élèves quelle hypothèse leur paraît la plus crédible. C'est l'occasion d'organiser un petit débat dans la classe pour évaluer la proportion d'élèves adhérant à chacune des hypothèses.

4.5.3. Expérience en classe

La troisième partie consiste en une mise en pratique des expériences de pensée émises au-dessus. Dans la classe, les élèves disposent d'un skateboard et d'un ballon de baudruche rempli de sable. Le ballon rempli de sable est plus judicieux qu'une balle car cela évite les rebonds.

L'expérience est la suivante. On trace une ligne au sol à la craie, un élève monte sur le skateboard et lâche le ballon quand il se situe à l'aplomb de la marque au sol.

L'expérience, bien que différant de celle du boulet lâché du mât du bateau, est en fait analogue. Le skateboard représente le navire et le ballon de sable, le boulet de canon.

On peut formuler sur le résultat les deux hypothèses suivantes :

- Le sac tombe à la verticale quand on le lâche et atterrit donc sur le marquage au sol (théorie aristotélicienne).
- Quand le sac est lâché il possède la même vitesse que la personne sur le Skateboard, il va donc tomber après le marquage au sol.

On réalise l'expérience plusieurs fois avec plusieurs élèves et on marque d'une croix l'endroit où tombe le ballon à chaque fois. Le côté ludique de cette expérience permet un meilleur investissement des élèves mais nécessite néanmoins une vigilance accrue de la part de l'enseignant.

La recherche en didactique tend à montrer que la démonstration pratique de l'impossibilité d'une conception initiale erronée, bien qu'utile, ne suffit pas à effacer cette conception. Il est donc important de permettre aux élèves de prendre du recul sur leur propre réflexion afin de mieux ancrer les connaissances scientifiques afin qu'elles puissent être mobilisées dans des contextes différents, hors du contexte scolaire.

Une fois l'expérience terminée, on organise la conclusion : un objet en mouvement garde son mouvement tant qu'aucune force ne vient s'y opposer. Cela permet de conclure sur la nature du mouvement de la sonde spatiale. Si aucune force ne s'applique alors la vitesse est constante. On fait alors le lien avec le mouvement de la sonde Voyager 1 que l'on a étudié dans l'introduction de l'activité

Cette formulation du principe d'inertie est incomplète car elle ne tient pas compte du cas où les forces extérieures qui s'appliquent sur l'objet se compensent. Ce choix a été fait au vu de la place de l'activité dans la progression. La nature vectorielle de la force n'a pas été abordée avec les élèves. Il est donc impossible de parler rigoureusement de bilan des forces.

La position de cette activité dans la progression peut ainsi créer des difficultés chez les élèves mais peut également permettre une approche différente et plus intuitive des concepts abordés dans le bulletin officiel.

4.6. Analyse de la séance

4.6.1. Analyse a priori

L'analyse a priori permet d'anticiper les enjeux pédagogiques de la séance, en identifiant les objectifs d'apprentissage, les difficultés prévisibles des élèves, les stratégies mises en œuvre pour y remédier, ainsi que les points d'attention pour l'enseignant. Cette analyse repose sur les éléments théoriques et pratiques abordés précédemment dont on fera ici la synthèse.

4.6.1.1. Activité documentaire : la sonde Voyager 1

Objectifs :

- Identifier les forces en jeu sur la sonde.
- Calculer la force de gravitation exercée par le Soleil.

Anticipation des difficultés :

- **Conceptions initiales erronées** : Les élèves associent souvent vitesse et force, pensant qu'une force constante est nécessaire pour maintenir un mouvement.
- **Mathématiques** : Certains élèves pourraient rencontrer des difficultés à manipuler la formule de la gravitation universelle.
- **Abstraction** : Comprendre qu'une force très faible peut être considérée comme négligeable dans un contexte donné.

Stratégies :

- Proposer un schéma simplifié pour visualiser les forces qui agissent sur la sonde.
- Réaliser collectivement le calcul de la force gravitationnelle pour guider les élèves.
- Encourager les élèves à discuter et argumenter leurs réponses lors de la mise en commun.

4.6.1.2. Analyse historique : Galilée et l'expérience du bateau

Objectifs :

- Illustrer le principe d'inertie à travers une expérience de pensée.
- Mettre en évidence l'équivalence entre repos et mouvement rectiligne uniforme.
- Comparer les conceptions aristotéliennes et galiléennes.

Anticipation des difficultés :

- **Interprétation du texte** : Certains élèves pourraient avoir du mal à comprendre les arguments de Salviati et Simplicio.
- **Conceptualisation** : L'idée que le mouvement rectiligne uniforme est indiscernable du repos peut sembler contre-intuitive.

Stratégies :

- Lire et analyser le texte en petits groupes pour favoriser les échanges.
- Revenir systématiquement aux situations concrètes (ex. : objets dans une cabine de bateau) pour ancrer la réflexion.
- Organiser un débat pour comparer les hypothèses et engager les élèves dans une réflexion critique.

4.6.1.3. Expérience en classe : skateboard et ballon de sable

Objectifs :

- Vérifier expérimentalement le principe d'inertie.
- Confronter les hypothèses aristotéliennes et galiléennes à la réalité.
- Renforcer l'appropriation des notions par une activité ludique et concrète.

Anticipation des difficultés :

- Difficulté d'obtenir un mouvement rectiligne uniforme
- Certains élèves pourraient mal interpréter le décalage entre la position du ballon et la ligne de craie.

Stratégies :

- Réaliser plusieurs essais pour minimiser les erreurs expérimentales.
- Favoriser un retour réflexif en comparant les résultats obtenus avec les hypothèses initiales.

Le déroulement de la séance est conçu pour confronter les élèves à des situations où leurs conceptions initiales se révèlent inadaptées. Par exemple :

- La très faible force gravitationnelle sur Voyager 1 contraste avec son mouvement rectiligne uniforme.
- L'expérience du ballon de sable montre que le ballon conserve une composante horizontale de vitesse, contrairement à l'idée qu'il tombe simplement à la verticale.

Ces contradictions amènent les élèves à réviser leurs idées pour adopter des concepts scientifiques plus robustes.

4.6.2. Déroulé de la séance

La première séance de TP se déroule en demi-groupe, de 10h à 11h30. Tous les élèves sont présents, soit un total de 16 élèves répartis en 8 binômes. Trois enseignants sont présents dans la salle : mon tuteur de stage, M. Fournel, mon encadrant INSPE, M. Fatet, venu en observation et moi-même. Ayant intervenu à plusieurs reprises avec cette classe tout au long de l'année, j'ai mené la séance seul. La deuxième séance a eu lieu de 12h30 à 14h dans les mêmes conditions, à l'exception de l'absence de M. Fatet. Un élève étant absent, il y avait 7 binômes et un élève seul.

La première partie de la séance, portant sur la sonde voyager 1 s'est en grande partie déroulée comme prévu pour les deux classes. La durée de cette partie était d'environ 25 minutes dans les deux cas, soit un peu plus long que prévu. La majeure partie des élèves ont rencontré des difficultés lors de l'utilisation de la loi de la gravitation universelle. Certains ont indiqué qu'elle n'avait pas été vue l'année précédente bien qu'elle soit au programme du cycle 4.

La deuxième partie de la séance dans laquelle on aborde les travaux de Galilée s'est déroulée sous la forme d'un débat, d'abord au sein des binômes puis entre binômes. Elle a donné lieu à de nombreuses discussions entre les élèves et a duré le temps prévu, soit environ 40 minutes. Pour terminer cette partie, une mise en commun des idées de la classe a été effectuée au tableau en récapitulant les différentes hypothèses afin de donner plus de structure à la séance.

La demi-heure restante a pu être consacrée à la mise en pratique et à l'expérimentation des élèves. Ceux-ci étaient très enthousiastes et parfois un peu difficiles à canaliser. L'engagement et la participation des élèves étaient toutefois très bons.

4.6.3. Analyse a posteriori de la séance

Dans la suite de ce travail, nous allons analyser en détail le déroulement et les résultats de cette séance pédagogique. Pour mener cette analyse de manière structurée, nous procéderons en trois parties, correspondant aux différentes étapes de la séance.

Tout d'abord, nous examinerons la mise en place de chaque activité, en décrivant leur déroulement précis et les réactions des élèves face aux différentes tâches proposées. Nous évaluerons ensuite l'efficacité des solutions pédagogiques mises en place en fonction des objectifs initiaux : ont-elles permis aux élèves de mieux comprendre les notions d'espace et de temps ? Ont-elles facilité l'assimilation du principe d'inertie ? Enfin, nous comparerons les difficultés réellement rencontrées par les élèves aux difficultés que nous avons anticipé dans l'analyse a priori. Cette comparaison nous permettra de mieux comprendre les obstacles à l'apprentissage et d'identifier les ajustements nécessaires pour améliorer l'approche pédagogique proposée. On peut ici noter qu'aucune disparité significative a été observée entre les deux groupes et que les deux séances se sont déroulées de façon similaire. L'analyse ne fera donc pas de différence et les considérera comme un seul groupe.

4.6.3.1. La sonde Voyager 1

L'objectif principal de cette première partie était d'amener les élèves à comprendre que le mouvement et la force ne sont pas nécessairement liés. Il s'agissait également de les encourager à adopter une démarche critique face aux résultats obtenus, notamment en ce qui concerne le calcul de la force de gravité. Le but étant d'amener les élèves à identifier les paramètres pouvant être négligés dans l'étude d'un système, une compétence essentielle en physique pour simplifier et modéliser des situations réelles.

Les principales difficultés rencontrées par les élèves ont été d'ordre mathématique, comme nous l'avons anticipé. Une part significative d'entre eux, environ la moitié, a indiqué ne pas connaître la formule de la force de gravitation. Toutefois, malgré ce manque de familiarité, la majorité des élèves a réussi à l'appliquer, bien que certaines erreurs récurrentes aient été relevées. Parmi celles-ci, on note notamment l'oubli du carré dans l'expression de la distance et des confusions liées aux unités.

La troisième question a été globalement mal comprise par les élèves, ce qui a nécessité des explications supplémentaires au tableau. L'objectif de cette question était d'amener les élèves à conclure sur la possibilité de négliger la force gravitationnelle exercée par le Soleil sur la sonde. Cependant, la formulation de la question semble avoir induit une confusion.

En effet, elle demandait aux élèves d'établir un lien entre la force exercée par le Soleil sur la sonde et celle exercée par un objet d'un kilogramme, situé à quelques centimètres de celle-ci.

L'idée était qu'en reconnaissant que la force exercée par un objet d'un kilogramme à cette distance est extrêmement faible, ils en déduisent que la force de gravité du soleil sur la sonde, de même intensité, est négligeable. Or, cette approche ne semble pas avoir été suffisamment explicite pour les élèves.

Afin d'améliorer la compréhension, il pourrait être pertinent de reformuler la question en fournissant un point de comparaison plus familier. Par exemple, on pourrait donner aux élèves la valeur de la force exercée par la Terre sur la sonde lorsqu'elle se trouve à sa surface, puis leur demander de comparer cette force à celle exercée par le Soleil. Une telle reformulation permettrait aux élèves de mieux visualiser l'échelle des forces en jeu et de faciliter leur conclusion sur la possibilité de négliger ou non l'influence gravitationnelle du Soleil dans ce contexte.

4.6.3.2. Galilée et l'expérience du bateau

Dans cette partie, on présente aux élèves les idées de Galilée. LA question 5 dans laquelle ils devaient tenter d'imaginer des expériences permettant de déterminer si un observateur se trouve en mouvement rectiligne uniforme ou au repos a été très apprécié des élèves qui se sont tous pris au jeu. Les premières réponses proposées par les élèves sortent du cadre scientifique avec des réponses du type : « *il suffit de sortir de la cabine et de regarder dehors* » ou encore « *on attend que le bateau tourne et ça fera comme en voiture* » cela a été l'occasion pour discuter avec les élèves sur le statut des expériences de pensée.

La deuxième réponse la plus courante était d'observer le mouvement du bateau par l'intermédiaire du mouvement d'un objet dans la cabine avec, par exemple, une balle posée sur la table qui devrait rouler vers l'arrière si le bateau avance.

Un élève a fait une remarque pertinente en expliquant : « *quand on est dans un avion on n'a pas l'impression de bouger alors qu'il avance super vite* » un autre propose une chose similaire avec un train. Ces deux observations convainquent une partie des élèves qu'ils n'est pas possible de déterminer si le bateau est en mouvement ou non. A ce stade du cours je fais le choix de ne pas donner la bonne réponse afin de permettre aux élèves de comprendre par eux même.

On peut remarquer la présence des conceptions initiales erronées pressentis dans la partie **4.6.1**. Cependant, une part non négligeable des élèves se laisse convaincre par les arguments de l'avion. On peut cependant noter qu'une autre partie semble hésiter. Leurs réponses laissant percevoir un conflit entre leurs conceptions et les arguments avancés par leurs camarades. On voit ici que les conceptions des élèves résistent même lorsqu'on présente des arguments valables pour les contrer. Cela appuie l'intérêt de l'expérimentation dans la suite de la séance.

Dans la suite, les élèves doivent s'appuyer sur un texte de Galilée. La principale difficulté rencontrée est la compréhension du texte. Le langage employé par Galilée demeure complexe pour des élèves de seconde. Il a donc été nécessaire d'expliquer le texte au tableau, en réexpliquant les idées essentielles avec des formulations plus accessibles.

L'utilisation de schéma au tableau a permis de faire ressortir les idées principales du passage. La représentation graphique des trajectoires attendues selon chaque hypothèse a aidé les élèves à visualiser concrètement les différences entre les deux raisonnements.

D'une part, l'hypothèse avancée par Simplicio, qui repose sur une conception intuitive du mouvement selon laquelle un objet en chute libre se déplace uniquement en ligne droite vers le sol sans tenir compte du mouvement initial qu'il possède ; d'autre part, l'hypothèse de Salviati, qui démontre par l'expérience que la boule conserve la vitesse horizontale du navire et tombe donc au pied du mât, quelle que soit la vitesse du navire, pourvu qu'elle soit constante.

Une autre difficulté importante est apparue avec la question suivante lors de l'analogie avec l'expérience du bateau et de l'expérience du skateboard réalisée en classe. Une partie des élèves n'arrivait pas à voir que les deux expériences étaient assimilables. Une des raisons principales est que d'après eux le boulet de canon reste « Dans le bateau » au long de sa chute alors que le ballon rempli de sable « quitte » le Skateboard dès qu'il est lâché. De plus, les résultats des expériences sont inversés. Selon la thèse de Salviati, le boulet tombe au pied du mat car il conserve la composante horizontale de sa vitesse. Dans le cas du ballon de sable lâché du skateboard, il atterrit après la ligne car celle-ci est au sol et ne se déplace pas avec le skateboard au contraire du pont du bateau dans l'expérience de Galilée.

Le temps le plus long de la séance a eu lieu avec la question suivante : la prédiction des résultats de l'expérience du skateboard. Cette question a pris la forme d'un débat. D'abord entre les élèves d'un même binôme puis d'un débat plus généralisé.

Le texte de Galilée mentionne deux hypothèses :

- La balle tombe sur la marque au sol
- La balle tombe après la marque au sol

On peut remarquer l'apparition d'une troisième hypothèse chez certains élèves : La balle tombe avant la marque au sol. Cette hypothèse impliquerait un mouvement vers l'arrière de la balle. Cette conception initiale erronée peut s'expliquer par une situation courante. Lorsqu'un objet tombe de notre poche pendant que l'on marche ou court. On continue d'avancer avec de se rendre compte que l'objet est tombé. Il se retrouve donc derrière nous. On peut alors faussement en déduire qu'il a eu une trajectoire vers l'arrière.

On peut également noter un commentaire pertinent entendu pendant le débat : « Quand tu dribbles au basket et que tu avances pour marquer, la balle reste pas derrière toi, là c'est pareil » Ce qui montre la capacité de l'élève à appliquer le même raisonnement dans une autre situation de façon pertinente.

Dans le deuxième groupe, 'avis des élèves à été relevé à main levé

Hypothèse	La balle tombe avant la marque	La balle tombe sur la marque	La balle tombe après la marque
Nombre d'élèves	3	5	7

On voit donc que seule la moitié des élèves à la bonne réponse malgré l'explication du texte de Galilée et les débats entre eux. Cela montre à nouveau la robustesse des conceptions initiales face à l'apprentissage pratique.

4.6.3.3. Expérience pratique

La séance s'est conclue sur la vérification des hypothèses des élèves. Il s'agit de la partie la plus appréciée des élève de part son coté ludique et inhabituel.

L'expérience à été réalisé une première fois dans la salle de classe mais la taille de la salle et l'espace disponible n'a pas permis d'observer de résultats significatifs. J'ai donc décidé de déplacer les élèves dans le couloir afin d'obtenir un meilleur résultat. Il était possible aux élèves de prendre plus d'élan sur le skateboard. L'expérience a été réalisée 5 fois par des élèves différents. Le point d'impact de la balle était marqué à la craie à chaque fois. Les cinq résultats sont concluants, la balle atterrit après le trait de façon bien visible. Pour certaines tentatives, la balle atterrit juste avant la marque au sol. Les autres élèves ont cependant remarqué que la balle avait été lâchée avant que le skateboard soit au niveau de la marque au sol. On peut supposer que la conception initiale des élèves selon laquelle la balle doit atterrir sur la marque les pousse inconsciemment à la lâcher la balle plus tôt pour tenter de la faire atterrir sur la marque

Après le retour en classe, les élèves arrivent facilement à la conclusion qu'il n'est pas possible de différencier le repos du mouvement rectiligne uniforme en expliquant que la chute de la balle sera identique si on se trouve au repos ou en mouvement rectiligne uniforme.

La conclusion sur la conservation du mouvement tant que rien ne vient s'y opposer se fait également facilement. Cela à permis de remonter au mouvement de la sonde puis à l'énoncé du principe d'inertie.

Il reste cependant à évaluer l'efficacité réelle de cette séance sur la compréhension des élèves. On peut ajouter que deux semaines après la séance, lors d'un TP sur les trajectoires avec des pointages sur logiciel. Au cours de ce TP une question était posée aux élèves sur le point d'impact d'une balle lâchée depuis un vélo en mouvement rectiligne uniforme. Seuls deux élèves sur les trente deux de la classe n'ont pas répondu correctement à cette question. Cela semble montrer l'efficacité de la séance bien que le résultat soit trop mince pour pouvoir en tirer une conclusion exacte. Il est impossible de savoir si cette réussite vient bien de la forme de la séance et à l'utilisation combinée de l'histoire des sciences et de la mise en pratique.

4.7. Remédiation

Dans cette dernière partie, nous apporterons un regard critique sur la séance menée et proposeront des pistes de changement et d'amélioration. Comme nous l'avons vu au-dessus, la séance semble avoir atteint ses objectifs. Des améliorations méthodologiques sont envisageables. Une piste intéressante serait de proposer une autre séance plus classique à une autre classe et de comparer les résultats obtenus. Cette comparaison pourrait se faire à l'aide d'un questionnaire commun, permettant d'évaluer la compréhension des élèves et l'impact de chaque méthode d'enseignement. Un tel protocole offrirait une image plus claire de l'efficacité de la séance testée et permettrait de confirmer ou non son intérêt.

Enfin, pour obtenir des résultats fiables d'un point de vue statistique, il serait utile d'élargir l'expérimentation à plusieurs classes issues de plusieurs établissements. Une analyse des réponses sur un échantillon plus large permettrait d'identifier des tendances générales et d'affiner les conclusions sur l'efficacité de la séance. Cela offrirait également l'opportunité d'adapter la démarche en fonction des retours des élèves et des enseignants.

Enfin, certains problèmes dans la construction de la séance ont été identifiés et mériteraient d'être corrigés pour améliorer la clarté et l'efficacité de l'activité. Comme mentionné précédemment, la question 3 doit être retravaillée afin d'être plus compréhensible pour les élèves. Son objectif n'a pas toujours été bien saisi, ce qui a nécessité des explications supplémentaires au tableau. Une reformulation plus explicite permettrait d'éviter ces confusions et de guider davantage les élèves dans leur raisonnement.

Un autre point soulevé concerne la question 5, qui n'a pas de "bonne" réponse définie. Cet aspect a encouragé certains élèves à réfléchir librement mais il en a aussi déstabilisé d'autres, qui s'attendaient à une réponse précise. Pour éviter cette frustration, il pourrait être intéressant d'ajouter, en fin d'activité, une question permettant de revenir sur l'expérience de pensée de la cabine du bateau et d'apporter une conclusion plus structurée.

Par ailleurs, le lien entre les expériences de Galilée et la sonde *Voyager* n'a pas toujours été évident pour les élèves. L'enchaînement des deux sujets a pu sembler abrupt, rendant difficile

de faire un lien entre les deux. Une solution pourrait être d'introduire une transition plus explicite pour relier ces deux contextes ou, alternativement, de découper la séance en deux séances distinctes : une première consacrée à l'étude de *Voyager*, permettant d'approfondir les implications physiques du mouvement de la sonde, et une seconde dédiée aux expériences de Galilée et à la réflexion sur le principe d'inertie.

Conclusion

L'objectif de ce travail était d'explorer l'intérêt de l'histoire des sciences dans l'enseignement des notions d'espace et de temps en physique. Ces concepts, bien que très présents dans les programmes, restent difficiles à appréhender pour les élèves, notamment en raison de leur abstraction. En nous appuyant sur un cadre historique et épistémologique, nous avons cherché à mieux comprendre comment l'intégration de l'histoire des sciences pouvait faciliter leur apprentissage.

Dans un premier temps, nous avons retracé l'évolution des notions d'espace et de temps, de l'Antiquité à la physique moderne. Nous avons mis en évidence les différentes conceptions développées par Aristote, Newton, Galilée et Einstein, illustrant ainsi la manière dont ces idées ont progressivement évolué vers le concept d'espace-temps. Cette mise en perspective pourrait permettre aux élèves de comprendre que les connaissances scientifiques ne sont pas figées, mais qu'elles résultent d'un long processus de questionnements et de découvertes.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la place de l'histoire des sciences dans l'enseignement et à ses apports pédagogiques. Malgré son potentiel, cette approche reste encore peu développée dans les programmes. Nous avons souligné qu'elle permet non seulement d'améliorer la compréhension des concepts en leur donnant du sens, mais aussi d'encourager la réflexion critique et l'autonomie des élèves.

Enfin, nous avons testé une mise en application de cette démarche à travers une séance pédagogique consacrée au principe d'inertie. En confrontant les élèves à des expériences de pensée inspirées de Galilée et en les amenant à réfléchir sur le mouvement de la sonde *Voyager 1*, nous avons cherché à les placer dans une démarche scientifique active. L'analyse de cette séance a montré que si les élèves ont été particulièrement engagés dans l'activité, certaines difficultés ont été relevées, notamment sur la formulation de certaines questions et le lien entre les différentes parties de la séance. Des améliorations méthodologiques ont été proposées, notamment en reformulant certains énoncés et en envisageant une expérimentation comparative avec d'autres méthodes d'enseignement.

En conclusion, ce travail semble montrer un intérêt à d'avantage utiliser l'histoire des sciences dans l'apprentissage de la physique. En contextualisant les concepts et en montrant leur construction progressive, cette approche permet d'améliorer la compréhension des élèves et de les sensibiliser à la démarche scientifique. Des recherches complémentaires pourraient être menées pour affiner cette approche, en testant son efficacité sur un plus large échantillon de classes et en explorant son application à d'autres champs du programme de physique.

Références bibliographiques

- 1- **Françoise Balibar**, *Galilée, Newton lus par einstein, Espace et relativité*, 2007
- 2- **Michel Paty**. *Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps*. Flament, Dominique. Dimension, dimensions I., Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Paris., p. 87-112., 1998, Série Documents de travail. halshs-00167263
- 3- **Aline Canellis, Christine Vulliard**. *Le temps dans l'Antiquité. Le temps dans l'antiquité*, Lyon, France. 2018. fhalshs-01837053f
- 4- **Aristote**, *Physique, IV, 11, 219 b 1-2, 2 vol.*, éd. Carteron, Paris, Les Belles Lettres, 1952.
- 5- **Galilée**, *Le dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, édition Points, 25 bd Romain-Rolland, Paris 14 ; 2000
- 6- **Maurice Clavelin**, *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris, Albin Michel, 1996, 2e éd., (1968), p.299
- 7- **Céline Ruffin-Bayardin**. *Le présent : entre physique et philosophie. Vers un présentisme quantique. Philosophie*. Université Paris Cité, 2019. Français. NNT : 2019UNIP7005. tel-04325880
- 8- **André Lausberg**. *Le temps selon Newton et Einstein*, Bulletin de la société royale des sciences de Liège, vol 74, 4, 2005, pp 271-283
- 9- **Michel Paty**, « *Sur l'histoire du problème du temps. Le temps physique et les phénomènes* », in Etienne Klein et Michel Spiro, (éds.), *Le temps et sa flèche*, Gif-sur-Yvette, Éditions Frontières, 1994, p. 21-58
- 10- **Richard P. Feynman, Robert B. Leighton et Matthew Sands**(en), *Le Cours de physique de Feynman*, électromagnétisme 2, chap 26, Dunod, 1999
- 11- **Hendrik Anton Lorentz**, *La théorie électromagnétique de Maxwell et on application aux corps en mouvement*.1892
- 12- **Albert Einstein**, *De l'électrodynamique des corps en mouvement*. 1905
- 13- **François Arago**, *astronomie populaire*, Paris, Gide, 1857
- 14- **Albert Einstein**, *la théorie de la relativité restreinte et générale*. 1916, édition française Gauthier-Villars 1956
- 15- **Aurélien Barrau**, *Relativité générale*. Dunod, collection sciences sup. 2023
- 16- **Michel Paty**. *L'espace-temps de la théorie de la relativité*. in Piettre Bernard (dir.), *le temps et ses représentations*, coll. Les Rendez-vous d'Archimède, L'Harmattan, 2001. halshs-00004245

17- **Bernard Guy**. Relier la mécanique quantique et la relativité générale ? Réflexions et propositions. 2016. hal-00872968v2

18- **Carlo Rovelli**. *Et si le temps n'existait pas ? Un peu de science subversive*. Dunod, 2012

19- Bulletins officiels de l'éducation nationale, Education.gouv.fr

20- Réussir en mécanique du cycle 3 au cycle terminal du lycée, eduscol.education.fr

21- **Lillian C. McDermott**, Department of physics, University of Washington, Seattle, Washington, USA. *Conceptions des élèves et résolutions de problèmes en mécanique*. 2004

22- **Evelyne Barbin**, *Apports de l'histoire des mathématiques et de l'histoire des sciences dans l'enseignement*, 1997

Annexes

Annexe 1. L'espace et le temps dans les bulletins officiels de l'éducation nationale	41
Annexe 1.1. Cycle 4	41
Annexe 1.2. Seconde générale	42
Annexe 1.3. Première spécialité	44
Annexe 1.4. Terminale spécialité.....	45
Annexe 2. Activité proposée aux élèves.....	47

Annexe 1. L'espace et le temps dans les bulletins officiels de l'éducation nationale

Annexe 1.1. Cycle 4

Mouvement et interactions

Attendus de fin de cycle

- Caractériser un mouvement.
- Modéliser une action exercée sur un objet par une force caractérisée par une direction, un sens et une valeur.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Caractériser un mouvement	
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">- Vitesse : direction, sens et valeur.- Mouvements rectilignes et circulaires.- Mouvements uniformes et mouvements dont la vitesse varie au cours du temps en direction ou en valeur.- Relativité du mouvement dans des cas simples.	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.
Modéliser une action exercée sur un objet par une force caractérisée par une direction, un sens et une valeur	
Identifier les actions mises en jeu (de contact ou à distance) et les modéliser par des forces. Exploiter l'expression littérale scalaire de la loi de gravitation universelle, la loi étant fournie. <ul style="list-style-type: none">- Action de contact et action à distance.- Force : direction, sens et valeur.- Force de pesanteur et son expression $P=mg$.	L'étude mécanique d'un système peut être l'occasion d'utiliser les diagrammes « objet-interaction ». Expérimenter des situations d'équilibre statique (balance, ressort, muscles). L'étude de la loi de gravitation est l'occasion d'aborder qualitativement la notion d'interaction. Pesanteur sur Terre et sur la Lune, différence entre poids et masse (unités). L'impesanteur n'est abordée que qualitativement.

Annexe 1.2. Seconde générale

1. Décrire un mouvement	
Systeme. Échelles caractéristiques d'un système. Référentiel et relativité du mouvement.	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.
Description du mouvement d'un système par celui d'un point. Position. Trajectoire d'un point.	Décrire le mouvement d'un système par celui d'un point et caractériser cette modélisation en termes de perte d'informations. Caractériser différentes trajectoires. Capacité numérique : 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>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 $\overline{MM'}$, où M et M' sont les positions successives à des instants voisins séparés de Δt ; 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> Capacité numérique : représenter des vecteurs vitesse d'un système modélisé par un point lors d'un mouvement à l'aide d'un langage de programmation. Capacités mathématiques : représenter des vecteurs. Utiliser des grandeurs algébriques.</p>
--	---

2. Modéliser une action sur un système

<p>Modélisation d'une action par une force. Principe des actions réciproques (troisième loi de Newton). Caractéristiques d'une force. Exemples de forces : - force d'interaction gravitationnelle ; - poids ; - force exercée par un support et par un fil.</p>	<p>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. Exploiter le principe des actions réciproques. 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.</p>
---	--

3. Principe d'inertie

<p>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.</p>	<p>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).</p>
--	--

Annexe 1.3. Première spécialité

3. Mouvement d'un système	
<p>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.</p>	<p>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 :</p> <ul style="list-style-type: none">- 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. <p><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></p> <p>Capacité numérique : 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.</p> <p>Capacité mathématique : Sommer et soustraire des vecteurs.</p>

Annexe 1.4. Terminale spécialité

1. Décrire un mouvement	
<p>Vecteurs position, vitesse et accélération d'un point.</p> <p>Coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour un mouvement circulaire.</p> <p>Mouvement rectiligne uniformément accéléré.</p> <p>Mouvement circulaire uniforme.</p>	<p>Définir le vecteur vitesse comme la dérivée du vecteur position par rapport au temps et le vecteur accélération comme la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps. Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées du vecteur position et/ou du vecteur vitesse.</p> <p>Citer et exploiter les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire.</p> <p>Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré, circulaire, circulaire uniforme.</p> <p><i>Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie pour déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération.</i></p> <p>Capacité numérique : Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, des vecteurs accélération d'un point lors d'un mouvement.</p> <p>Capacité mathématique : Dériver une fonction.</p>

2. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement	
<p>Deuxième loi de Newton</p> <p>Centre de masse d'un système.</p> <p>Référentiel galiléen.</p> <p>Deuxième loi de Newton.</p> <p>Équilibre d'un système.</p>	<p>Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système, cette position étant donnée.</p> <p>Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié.</p> <p>Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées pour en déduire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le vecteur accélération du centre de masse, les forces appliquées au système étant connues ; - la somme des forces appliquées au système, le mouvement du centre de masse étant connu.

<p>Mouvement dans un champ uniforme</p> <p>Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme.</p> <p>Champ électrique créé par un condensateur plan.</p> <p>Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</p> <p>Principe de l'accélérateur linéaire de particules chargées.</p> <p>Aspects énergétiques.</p>	<p>Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan.</p> <p>Établir et exploiter les équations horaires du mouvement.</p> <p>Établir l'équation de la trajectoire.</p> <p>Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan, son expression étant donnée.</p> <p>Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées.</p> <p>Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme.</p> <p><i>Utiliser des capteurs ou une vidéo pour déterminer les équations horaires du mouvement du centre de masse d'un système dans un champ uniforme. Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique.</i></p> <p>Capacité numérique : Représenter, à partir de données expérimentales variées, l'évolution des grandeurs énergétiques d'un système en mouvement dans un champ uniforme à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur.</p> <p>Capacités mathématiques : Résoudre une équation différentielle, déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.</p>
<p>Mouvement dans un champ de gravitation</p> <p>Mouvement des satellites et des planètes. Orbite.</p> <p>Lois de Kepler.</p> <p>Période de révolution.</p> <p>Satellite géostationnaire.</p>	<p>Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien.</p> <p>Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire.</p> <p>Capacité numérique : Exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.</p>

Annexe 2. Activité proposée aux élèves

Seconde générale

activité documentaire

Le principe d'inertie

Notions et contenus	Compétences attendues
Principe d'inertie	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

Compétences travaillées :

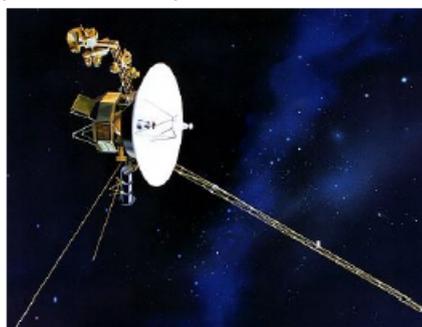
- ✓ VALIDER : vérifier une hypothèse
- ✓ S'APPROPRIER : rechercher et extraire des informations.
- ✓ ANALYSER/RAISONNER : formuler une hypothèse

Objectif :

Le but de cette activité est d'introduire le principe d'inertie et d'en comprendre les conséquences.

Document 1 : La sonde Voyager 1

Voyager 1 est une sonde spatiale lancée par la NASA en 1977. Elle est destinée à l'étude de l'espace en dehors du système solaire. La sonde fonctionne encore aujourd'hui et continue d'envoyer des données sur terre. Elle voyage à une vitesse de 17 km/seconde sans moteur actif et se trouve actuellement à une distance de 24 milliards de kilomètres du soleil, ce qui en fait l'objet humain le plus éloigné de la terre. Elle mesure un peu moins de 2 mètres et pèse environ 800kg.



1. La sonde voyager 1 est-elle soumise à des forces extérieures, si oui, lesquelles ?

.....

.....

Document 2 : rappel sur la force de gravité :

La force de gravité exercée sur un objet A par un objet B est :

$$F_{A/B} = G \times \frac{M_A \times M_B}{d^2}$$

M_A La masse de l'objet A en kilogrammes, M_B la masse de l'objet B en kilogrammes, d la distance entre les deux objets en mètres et $G = 6.67 \times 10^{-11} N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$ la constante de gravitation universelle.

2. Calculer l'intensité de la force de gravité exercé par le soleil de masse $m_{\text{soleil}} = 2 \times 10^{30} kg$ sur la sonde

.....

.....

3. La force exercée par le soleil sur la sonde est similaire à celle exercée par un objet d'une masse d'un kilogramme situé à quelques centimètres de la sonde. Est-il possible de négliger la force de gravité du soleil sur la sonde ?

.....
.....

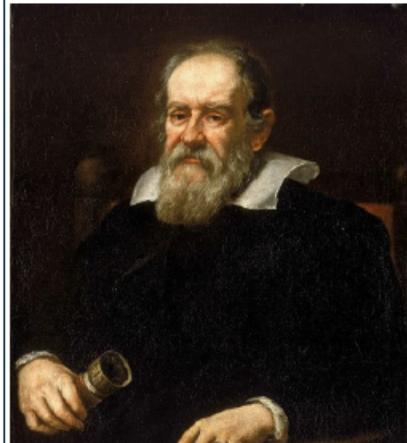
4. Quelles conclusions peut-on en tirer concernant les forces qui agissent sur la sonde ?

.....
.....

Document 3 :

Galilée est un scientifique italien du XVII^{ème} siècle. Il est souvent considéré comme le fondateur de la physique moderne notamment pour ses travaux sur les mouvements des objets. En 1632 Il publie « *Le dialogue sur les deux grands systèmes du monde* » dans lequel il remet en cause la vision du monde défendue par l'Eglise, qui repose sur un modèle géocentrique. Il est rédigé comme un dialogue entre trois personnes, Salviati qui est favorable au système héliocentrique, Simplicio, favorable au système géocentrique et Sagredo sans avis arrêté sur la question.

Dans ce livre il propose une expérience de pensée qui présente une situation analogue à celle de la sonde. Il suppose qu'on se situe dans la cabine fermée d'un bateau dans laquelle se trouve toutes sortes d'objets. On ignore si le bateau est à l'arrêt ou s'il avance en ligne droite à vitesse constante.



5. Quelles expériences pourrait faire le voyageur dans la cabine pour savoir si le bateau est à l'arrêt ou s'il avance en ligne droite à vitesse constante ?

.....
.....
.....
.....
.....

Document 4 : chute d'une boule depuis le mât d'un bateau

Simplicio : Laissons tomber une boule de plomb du haut du mât d'un navire au repos et notons l'endroit où elle arrive, tout près du pied du mât ; si, du même endroit, on laisse tomber la même boule quand le navire est en mouvement, le lieu de sa percusion sera éloigné de l'autre d'une distance égale à celle que le navire aura parcouru pendant le temps de la chute, tout simplement parce que le mouvement naturel de la boule, laissée en liberté. Se fait en ligne droite vers le centre de la terre.

Salviati : Que n'importe qui fasse l'expérience et il trouvera en effet qu'elle montre le contraire de ce qui est écrit : la pierre tombe au même endroit du navire, que celui-ci soit à l'arrêt ou qu'il avance à n'importe quelle vitesse pourvu qu'elle soit constante.

Le dialogue sur les deux grands systèmes du monde, Galilée, 1632

6. Quelles sont les deux hypothèses émises par Galilée dans le document 4

.....

.....

.....

7. Proposer une expérience, réalisable en classe qui permet de vérifier ce que propose Galilée dans ce passage

.....

.....

.....

.....

8. Faire un schéma du résultat attendu de l'expérience



9. Que peut-on conclure du résultat de l'expérience ?

.....
.....
.....
.....
.....

10. Quelles conclusions peut-on tirer concernant le mouvement de la sonde Voyager 1

.....
.....
.....
.....

11. Enoncer le principe mis en évidence par ces expériences

.....
.....
.....
.....

Attention, ne supprimez pas le saut de section suivant (pied de page différent)

L'apport de l'histoire des sciences dans l'apprentissage des concepts d'espace et de temps en physique

Les notions fondamentales d'espace et de temps sont une partie importante des programmes du collège et du lycée. Ils présentent cependant des difficultés pour la plupart des élèves. Pour lever ces difficultés, ce mémoire propose de combiner une approche historique et expérimentale. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'évolution de ces concepts, depuis les idées d'Aristote jusqu'aux théories modernes de la relativité et de la gravitation quantique.

On présente ici une proposition de séance sur le principe d'inertie en classe de seconde générale. Cette séance est construite de façon à favoriser l'autonomie et la réflexion des élèves avec des phases de débats, de présentations d'hypothèses puis de tests de ces hypothèses. On y combine histoire des sciences et mises en pratiques expérimentales afin de tenter d'améliorer la compréhension des élèves sur un sujet abstrait qui est souvent source de confusion.

Enfin, la séance pédagogique a été analysée a posteriori afin d'évaluer son efficacité et les difficultés rencontrées. Cette réflexion permet d'affiner les stratégies d'enseignement et d'adapter au mieux la transmission des concepts d'espace et de temps aux élèves.

Mots-clés : enseignement, physique, lycée, espace, temps, histoire des sciences, mécanique, principe d'inertie

Contribution of the history of science to the teaching of space and time concepts in high school

The fundamental concepts of space and time constitute a significant component of the middle and high school curricula. However, they often pose considerable difficulties for most students. In order to address these challenges, this dissertation proposes a combined historical and experimental approach.

This study examines the evolution of these concepts, tracing their development from Aristotle's ideas to modern theories of relativity and quantum gravity.

A specific lesson on the principle of inertia, designed for tenth-grade general education students is presented here. This lesson is structured to foster students' autonomy and critical thinking through phases of debate, hypothesis formulation, and experimental validation. By integrating the history of science with hands-on experimentation, the approach aims to enhance students' comprehension of an abstract concept that frequently leads to confusion.

Finally, the pedagogical session was analyzed retrospectively to assess its effectiveness and identify any difficulties encountered. This reflection enables the refinement of teaching strategies, allowing for a more effective transmission of the concepts of space and time to students.

Keywords : Teaching, physics, high school, space, time, history of sciences, mechanics, principle of inertia

