



HAL
open science

Une reconstruction de la théorie de la gravitation newtonienne : proposition d'une approche d'enseignement inspirée de l'histoire des idées

Valentin Maron, Philippe Colin

► To cite this version:

Valentin Maron, Philippe Colin. Une reconstruction de la théorie de la gravitation newtonienne : proposition d'une approche d'enseignement inspirée de l'histoire des idées. RDST - Recherches en didactique des sciences et des technologies , 2017, 16, pp.93-128. 10.4000/rdst.1594 . hal-03615996

HAL Id: hal-03615996

<https://hal.science/hal-03615996>

Submitted on 22 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Une reconstruction de la théorie de la gravitation newtonienne : proposition d'une approche d'enseignement inspirée de l'histoire des idées.

Maron, Valentin⁽¹⁾, email : valentin.maron@gmail.com

Colin, Philippe⁽¹⁾⁽²⁾, email : colin.didac@wanadoo.fr

⁽¹⁾Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR), Université Paris Diderot – France

⁽²⁾Université d'Artois – France

Résumé

Cet article propose une approche d'enseignement de la théorie de la gravitation newtonienne, à un niveau de fin d'études secondaires ou début d'études supérieures. Après un point sur le contexte institutionnel et la tendance générale pour l'enseignement de ce sujet, les positionnements théoriques sur lesquels cette approche s'appuie sont présentés. L'intention centrale consiste à chercher à justifier autant que possible les concepts et expressions mathématiques constituant la théorie, via un cheminement permettant de la reconstruire progressivement. A cette volonté s'ajoute la prise en compte des difficultés d'apprentissage, réunies en deux problèmes centraux : le fait qu'il ne soit pas évident de relier la chute libre à la présence de la Terre, et la distinction faite par les élèves entre les phénomènes sur Terre et les phénomènes dans l'espace. Face à ces difficultés, la manière de présenter la dynamique est considérée comme ayant un rôle fondamental. Une formulation des lois du mouvement prenant en compte ces problèmes est exposée, avant de présenter la reconstruction de la théorie de la gravitation proposée. Celle-ci explicite un raisonnement menant à relier les mouvements de révolution des planètes, de la Lune, et le mouvement de chute libre. Ce raisonnement - inspiré en partie de celui de Newton - permet de justifier en quoi la chute peut être reliée à la présence de la Terre, et d'aboutir à l'idée de gravitation universelle, ainsi qu'à l'expression de la force qui la quantifie. Au niveau épistémologique, le cheminement mettant en relation ces différents phénomènes permet d'illustrer le rôle d'unification d'une théorie physique.

Mots clés : physique ; mécanique ; gravitation ; reconstruction ; histoire des sciences.

A Reconstruction of the Newtonian Theory of Gravitation : Proposition of a Teaching Approach Inspired by History of Ideas

Abstract

This article proposes a teaching approach to the Newtonian theory of gravitation, for the end of secondary education or the beginning of higher education. After a consideration of the institutional context and the general trend for the education of this subject, the theoretical positions on which the approach is based are exposed. The central intention consists in justifying as far as possible the concepts and formulae constituting the theory, via a progressive pathway aiming at reconstructing it. The teaching approach is in addition designed to address the learning difficulties, gathered in two central problems: the fact that it is not self-evident to relate free fall and the presence of the Earth, and the distinction made by students between phenomena on Earth and phenomena in space. Regarding these difficulties, the way of presenting Dynamics is argued to have a fundamental role. A formulation of the laws of motion taking into account these problems is exposed, before presenting the reconstruction of the theory of gravitation proposed. This consists in making explicit a reasoning leading to relate the motions of revolution of planets, of the Moon, and the motion of free fall. This reasoning allows to justify why free fall can be related to the presence of the Earth, and furthermore to justify the idea of universal gravitation, as well as the expression of the force which quantifies it. At the epistemological level, the pathway relating these various phenomena allows to illustrate the role of unification of a physical theory.

Key words : physics ; mechanics ; gravitation ; reconstruction ; history of sciences.

1. Introduction

1.1. Contexte

L'approche proposée dans cet article s'insère dans un courant de valorisation de l'usage de l'histoire des sciences dans l'enseignement, apparaissant dans les recommandations officielles des programmes actuels français :

« La perspective historique donne une vision cohérente des sciences et des techniques et de leurs développements conjoints. Elle permet de présenter les connaissances scientifiques comme **une construction humaine progressive et non comme un ensemble de vérités révélées** » (MEN, 2008) (emphase ajoutée)

« Faire connaître à l'élève **l'histoire de la construction de la connaissance scientifique** est source d'inspiration pour la liberté intellectuelle, l'esprit critique et la volonté de persévérer. » (MEN, 2010) (emphase ajoutée)

Comme le soulignent Maurines et Beaufils (2011), ces intentions générales, bien qu'assez consensuelles, restent peu concrétisées dans les manuels et dans les pratiques des enseignants.

Un cas particulièrement paradoxal est le traitement de la notion d'attraction terrestre, la plupart du temps introduite sans justification, bien qu'elle soit très éloignée du sens commun. C'est le cas par exemple dans le cours de seconde proposé par le CNED¹, lors de la première évocation de la notion de poids :

« Tout objet situé sur la Terre est soumis à des actions mécaniques dont les effets se manifestent à tout moment. Prenez votre gomme et placez-la à une certaine hauteur ; lâchez-la ; elle tombe. **Pourquoi cette gomme est-elle tombée ? Parce qu'elle est soumise à des actions mécaniques exercées par la Terre** ; ces actions s'exercent à distance et sont réparties sur toute la gomme. Pour simplifier nous modéliserons ces actions par « une force » ; **on dira que la gomme est soumise à une force exercée par la Terre.** »² p.69 (emphase ajoutée)

Bien que nous soyons fortement habitués à cette interprétation en termes d'attraction terrestre, celle-ci représente un lien entre un phénomène de la vie quotidienne – la chute des objets – et quelque chose de l'ordre de dix millions de fois plus grand : la planète Terre. Ainsi si aucun argument n'est évoqué pour justifier ce lien, il convient de reconnaître son statut de « vérité révélée », désapprouvé par les programmes. Le fait qu'une telle interprétation puisse faire sens pour les élèves est d'ailleurs mis en doute, notamment par Halbwachs :

¹ Centre National d'Enseignement à Distance : établissement public national à caractère administratif placé sous la tutelle du ministère de l'éducation nationale de l'enseignement supérieur et de la recherche.

² Cours du CNED « Seconde - Notions fondamentales - Physique » proposé par "Académie en ligne" (plus disponible actuellement sur le site web <http://www.academie-en-ligne.fr/>).

« [...] l'enfant peut-il comprendre les affirmations selon lesquelles le poids est une attraction à distance par la Terre ? Ne considère-t-il pas plutôt, comme l'ont fait tous les penseurs antérieurs au XVII^{ème} siècle, que le poids est inhérent au corps, avec peut-être l'arrière-pensée animiste que le corps pesant « tend » vers le bas parce qu'il veut tomber ? » (Halbwachs, 1979, p.871)

Ainsi, en l'absence de justification, introduire la notion d'attraction terrestre revient à donner une information – qui n'est pas forcément difficile à conceptualiser (par exemple par analogie avec le magnétisme), ni à retenir – mais une information dont la légitimité, la vraisemblance, ne vient finalement que de l'argument d'autorité scolaire d'un manuel ou d'un enseignant.

On retrouve des traces de la perplexité que peut susciter ce genre de présentation chez les élèves dans les propos rapportés par Weil-Barais et Lemeignan (1993) :

« Oui c'est la Terre, mais il faudrait qu'on le démontre... parce qu'on le sait, on l'a appris mais... » (Weil-Barais & Lemeignan, 1993, p.105)

Dans un rapport d'innovation sur l'étude de la chute des corps, Baldy et Aubert (2005) constatent également l'insuffisance des présentations traditionnelles de la gravitation pour les élèves :

« La discussion [...] montre que les élèves se demandent *d'où provient la force d'attraction*. Pour répondre à cette interrogation, nous avons présenté le modèle de l'interaction entre les corps : tous les corps massifs s'attirent entre eux par un phénomène différent de l'attraction entre des corps aimantés ou entre des corps électrisés. Mais on se rend compte que cette explication ne suffit pas. Certains élèves se demandent quelle est la nature de cette force « mystérieuse » qui attire les corps et que l'on représente par une flèche partant d'un point situé au centre de l'objet. » (Baldy & Aubert, 2005)

Ces différents constats – l'absence de justification, le décalage avec les recommandations officielles, la perplexité des élèves – incitent à considérer d'autres manières pour introduire ce sujet.

Par ailleurs, les recherches en didactique mettent en évidence un certain nombre d'idées du sens commun posant problème dans l'apprentissage des concepts en jeu, qui nécessitent d'être considérées pour leur enseignement.

1.2. Problématique

La proposition d'approche d'enseignement développée dans cet article répond ainsi à la problématique suivante : comment présenter la théorie de la gravitation newtonienne en apportant une justification aux notions qui la constituent, tout en prenant en compte les problèmes d'apprentissage identifiés à son sujet ?

En opposition à une présentation synthétique du contenu, la piste suivie consiste à reconstruire un cheminement menant à la connaissance visée, en s'inspirant de « l'histoire de la construction de cette connaissance », valorisée par les programmes. Ce cheminement a pour but de fournir aux élèves des arguments pour légitimer les concepts

et expressions mathématiques de la théorie, en explicitant en particulier les raisons pour lesquels ceux-ci se détachent des idées du sens commun.

1.3. Situation dans le projet de recherche

L'approche présentée fait partie d'un projet de recherche sur l'enseignement de la mécanique newtonienne, orienté par l'intention de reconstruction des notions et lois. Une spécificité de cette recherche est de chercher à considérer ensemble les problèmes d'apprentissage de la dynamique et de la gravitation. L'examen de ces problèmes, mis en regard d'une analyse historique et épistémologique de ces deux contenus, est à la base du développement d'une approche d'enseignement conjointe des lois du mouvement et de la force gravitationnelle. A partir des grandes lignes de cette approche, une séquence d'enseignement a été développée et expérimentée au niveau lycée (première et terminale S) et en première année d'université. Cette séquence, la méthodologie d'expérimentation et ses premiers résultats sont disponibles dans (Maron, 2015), et ne seront pas abordés ici.

L'objectif de cet article est de présenter et justifier les idées principales de l'approche proposée, en amont de sa mise en œuvre concrète dans une séquence d'enseignement. La structure logique de la progression qui va être exposée pourrait ainsi être adaptée de manières diverses dans des séquences différentes, dont celle développée dans (Maron, 2015) n'est qu'une possibilité.

Bien que la réflexion globale s'appuie sur l'articulation de la dynamique et de la gravitation, cet article se focalise sur la présentation de la partie gravitation. La justification de l'approche de la dynamique est exposée synthétiquement dans (Maron, 2017), et exhaustivement dans (Maron, 2015, chapitre 3). Les points essentiels seront cependant repris ici.

1.4. Situation relativement aux approches existantes de la gravitation

Il existe déjà plusieurs séquences d'enseignement sur la gravitation s'appuyant sur l'histoire des idées. Parmi celles-ci figurent notamment celles de Penot et Teyssandier (1983), Giancoli (1993), Lindemann (1999), Vigoureux (2003), Hecht (2003), Séguin, Descheneau, et Tardif (2010) et Develaki (2012). Le travail présenté ici s'inspire en partie de l'analyse de ces différentes approches, à la fois par la réutilisation de certains points jugés pertinents, et par la critique et l'approfondissement d'aspects jugés problématiques ou insuffisants.

Une différence importante avec les séquences citées est l'intention d'explicitier chacune des étapes du raisonnement menant au savoir en jeu, là où la plupart des approches existantes expriment sous le mode du discours indirect certaines de ces étapes. C'est le cas par exemple dans la séquence dans (Lindemann, 1999), où après une reconstruction intéressante de la dépendance de l'accélération gravitationnelle en la distance, l'influence de la masse est ajoutée sans apporter d'argument :

« [Newton] *se rend compte* qu'il n'y a pas que la distance r qui intervient, mais que les masses jouent également un rôle. » (Lindemann, 1999, p.161, emphase ajoutée)

En particulier parmi les étapes non explicitées, si le lien entre la chute terrestre et la révolution de la Lune est généralement développé, la suite de raisonnement consistant à faire le lien avec la révolution des planètes, puis la généralisation finale pour toutes masses deux à deux, n'est jamais argumenté, excepté dans (Vigoureux, 2003), qui par ailleurs n'explicité pas d'autres aspects.

Une situation de l'approche qui va être présentée ici vis-à-vis des séquences citées précédemment est synthétisée dans l'annexe A.

En amont de cette comparaison, cet article vise à présenter et justifier les intérêts *a priori* de l'approche développée :

- compte tenu de certains positionnements épistémologiques et didactiques, qui vont être explicités dans la section suivante,
- et relativement à certains problèmes d'apprentissage précis, qui seront exposés ensuite.

2. Positionnements épistémologiques et didactiques

L'intention de reconstruction du savoir visé – la force gravitationnelle – implique une identification et articulation de tous les éléments nécessaires à la compréhension d'un cheminement logique menant à la connaissance en jeu. Il s'agit en particulier de faire apparaître les faits expérimentaux initiaux et le problème de départ, à l'origine de la réflexion théorique.

Cette posture, pour la conception d'une approche d'enseignement, s'appuie sur plusieurs positionnements théoriques.

D'un point de vue épistémologique d'une part, l'importance de l'identification du problème initial prolonge le point de vue de Bachelard « Toute connaissance est une réponse à une question » (Bachelard, 1938), en accord avec le courant français de l'apprentissage par problématisation (Orange, 2002).

Une construction progressive et argumentée permet d'autre part d'éviter de faire passer la forme finale du savoir comme un « coup de génie » du scientifique. Elle laisse apparaître le caractère critiquable et provisoire de la théorie. En effet, celle-ci s'appuyant sur des faits et hypothèses, un raisonnement différent, prenant en compte d'autres faits ou d'autres hypothèses, peut toujours la remettre la question.

Vis-à-vis de la motivation des élèves, la justification de l'enchaînement des étapes de présentation, à la fois dans sa logique globale et ses transitions locales, est ici jugée déterminante. Cette posture rejoint en particulier la « problem posing approach » définie par Klaassen (1995), insistant sur l'importance « d'amener les élèves dans une position où ils voient eux-mêmes la pertinence d'étendre leur connaissance conceptuelle, leurs

expériences et leur système de croyances dans une certaine direction³ » (Lijnse & Klaassen, 2004).

Par ailleurs, en plus d'être plus conforme aux recommandations officielles - « présenter les connaissances scientifiques comme une construction humaine progressive et non comme un ensemble de vérités révélées » (MEN, 2008, p. 1) - le fait de ne pas mettre en jeu (même implicitement) l'idée de « génie scientifique » peut également être un aspect positif relativement à la motivation des élèves, ainsi que l'évoquent Maurines et Beaufils (2011) :

« Il est à craindre que l'évocation de génies puisse détourner prématurément bon nombre d'élèves considérant « à juste titre » d'une certaine manière que cela leur est inaccessible. » (Maurines & Beaufils, 2011)

Enfin du point de vue de l'apprentissage, la démarche de reconstruction peut également contribuer au dépassement d'idées du sens commun, en explicitant, dans le raisonnement menant à une conception scientifique, des arguments justifiant que celle-ci soit en contradiction certaines idées a priori. Cela implique d'identifier les aspects de cette conception particulièrement non évidents du point de vue du sens commun, dans le but d'accorder une attention particulière à leur justification.

3. Problèmes d'apprentissage visés

L'approche d'enseignement proposée vise à prendre en compte les différentes difficultés identifiées dans la recherche en didactique, concernant l'apprentissage des notions associées à la gravitation. Celles-ci ont été rassemblées en deux problèmes centraux. La non-évidence de l'attraction terrestre, abordée en introduction, constitue le premier problème visé. Le second concerne la distinction faite par les élèves entre les phénomènes sur Terre et dans l'espace, par contraste avec l'universalité de la loi de la gravitation.

3.1. Premier problème visé : la non évidence de l'attraction terrestre

Il n'est pas évident d'associer une force à la chute verticale

Seul le cas de la chute verticale vers le bas, *i.e.* sans vitesse initiale, sera considéré ici. De nombreuses recherches rapportent que ce mouvement est fréquemment considéré comme ayant lieu de lui-même, c'est-à-dire ne nécessitant pas de « force » pour se produire.

³ «The emphasis [...] is on bringing students in such a position that they themselves come to see the point of extending their existing conceptual knowledge, experiences and belief system in a certain direction.» (Lijnse & Klaassen, 2004)

« [...] certains utilisent la gravité plus comme une propriété d'un objet particulier, i.e., "la gravité est la tendance des objets à aller vers le bas" plutôt qu'une action exercée par la Terre sur l'objet. » (Minstrell, 1982)⁴

Cette observation sur des classes de lycée se retrouve également à l'université, comme le rapportent Halloun et Hestenes (1985), par exemple via le témoignage de cet élève de première année :

« Il n'y a pas de force sur la balle qui tombe... Il y avait une force quand on la tenait, mais quand on la lâche il n'y a plus de force et la balle est libre de tomber. » (Halloun & Hestenes, 1985) (notre traduction)⁵

Dans une tentative de synthèse des modes de raisonnement du sens commun, « Sketch for a common-sense theory of motion », (Bliss & Ogborn, 1993) font apparaître également ce point :

« La chute a une cause initiale, la perte de support, mais est un mouvement naturel au sens où il n'est pas nécessaire de lui chercher une cause pour continuer, hormis une absence continue de support » (Bliss & Ogborn, 1993) (notre traduction)⁶

La fréquence de la tendance à penser la chute comme un mouvement naturel implique que son interprétation en termes de force n'est pas une évidence. Le second point concerne le lien à la planète Terre.

Il n'est pas évident que la chute soit liée à la présence de la Terre

Une revue relativement récente des travaux sur les difficultés d'apprentissage concernant la gravitation a été effectuée par Kavanagh et Sneider (2006a, 2006b), synthétisant les résultats de 60 articles de recherche sur ce sujet.

Une idée d'élèves se retrouvant dans la grande majorité de ces travaux est le lien fait entre la chute libre et la présence de l'air. La chute est ainsi expliquée par la présence de l'atmosphère ou par la pression atmosphérique, c'est-à-dire par les circonstances physiques de la surface terrestre. Il n'y a ainsi pas de nécessité pour les élèves que la planète Terre elle-même ait une influence sur le phénomène de chute.

3.2. Second problème visé : la distinction entre les phénomènes sur Terre et dans l'espace

« Il n'y pas de gravité dans l'espace »

Le lien entre la chute et la présence de l'air est cohérent avec l'idée la plus répandue concernant la gravité : la conception selon laquelle la gravité n'agit pas dans l'espace.

⁴ « [...] some used gravity more like a property of the particular object, e.g., "gravity is the tendency for objects to go down" rather than a pull exerted by the earth on the object. » (Minstrell, 1982)

⁵ « There is no force on the ball [falling down]... There was a force when you were holding it, but when you let it go there is no more force and the ball is free to fall... » (Halloun & Hestenes, 1985)

⁶ « Falling has an initial cause, namely a loss of support, but is a natural motion in that one need not look for a cause (a force or agency) for it to continue, only for a continued lack of support » (Bliss & Ogborn, 1993)

Elle se retrouve en particulier dans une recherche plus récente de Williamson et Willoughby (2012) pour la tranche d'âge qui concerne ce travail : 17-19 ans. Cette étude se base sur plusieurs questionnaires distribués à 312 étudiants en première année d'université en Australie, inscrits dans un cours d'introduction à l'astronomie. De l'analyse de leurs résultats, les auteurs concluent en effet que « la conception selon laquelle il n'y a pas de gravité dans l'espace est l'une des plus représentées » (Williamson & Willoughby, 2012) (notre traduction)⁷

Les auteurs interprètent leurs résultats par plusieurs modèles, dont le plus important est ce qu'ils nomment le "Boundary model". Il s'agit de l'idée qu'il existerait une frontière délimitant la zone où la gravité agit. La limite peut être la surface de la planète, le bord de l'atmosphère, ou encore une orbite. Elle peut représenter une enveloppe délimitant la gravité d'une planète, ou bien un « check point » à partir duquel la gravité disparaît ou diminue. Quantitativement, les différentes réponses s'inscrivant dans ce type de raisonnement sont de l'ordre 50%.

En résumé, les conceptions les plus représentées sont les suivantes :

- Il n'y a pas de gravité dans l'espace.
- La gravité nécessite la présence de l'air.
- La force de gravité diminue très rapidement quand l'altitude augmente.

Une interprétation de ces conceptions relativement au sens commun

Une première analyse de ces idées est celle de leur légitimité, du point de vue du langage courant et de l'expérience quotidienne, dans la perspective exprimée par Lijnse :

« Partant du fait que, fondamentalement, nous vivons dans le même monde que nos élèves, nous pouvons conclure que nous ne comprenons pas leurs propos tant que nous n'avons pas le sentiment que, dans certaines circonstances, ce qu'ils disent a du sens. » (Lijnse, 1994)

Dans le langage courant, le terme de « gravité » est essentiellement utilisé relativement au phénomène de chute des objets. Or d'après des images d'astronautes en apesanteur - couramment présentes dans les médias - ce phénomène n'a manifestement pas lieu dans l'espace. Ainsi l'idée qu'il n'y ait pas de gravité dans l'espace peut simplement exprimer l'observation que les objets, à l'extérieur ou à l'intérieur d'une navette spatiale, *ne tombent pas*, ni vers la Terre, ni sur le sol de la navette. Avec ce sens associé au mot de gravité, il s'agit donc uniquement de la déclaration d'un fait.

Lorsque la notion de « force de gravité » (ou « force de gravitation ») est présentée à l'école, celle-ci est associée au phénomène de chute : « les objets tombent à cause de la force de gravité exercée par la Terre ». Ce lien entre le sens courant de « gravité » et le nouveau concept introduit incite à généraliser le constat précédent : « il n'y a pas de *force de gravité* dans l'espace ». Il s'agit du type d'attitude mentionné par Bliss et Ogborn (1993) :

⁷ « In the present study, the misconception that there is no gravity in space was one of the most prevalent. » (Williamson & Willoughby, 2012)

« [...] on entend de tels mots employés et on leur donne des sens et des rôles cohérents avec ce que l'on pensait initialement » ((Bliss & Ogborn, 1993) (notre traduction)⁸

En d'autres termes, cette conclusion peut relever d'une déduction logique : si la notion de force de gravité est comprise comme la cause de la chute ($A \Rightarrow B$), alors s'il n'y a pas de chute dans l'espace, c'est donc qu'il n'y a pas de *force de gravité* dans l'espace (non $B \Rightarrow$ non A).

A partir de ces interprétations, les autres conceptions citées ci-dessus peuvent être interprétées comme une adaptation cohérente aux précédentes :

- S'il y a une force de gravité sur Terre et pas dans l'espace, c'est donc que la force de gravité diminue très rapidement quand l'altitude augmente, jusqu'à disparaître dans l'espace.
- Puisqu'une différence majeure entre la Terre et l'espace est la présence de l'atmosphère, celle-ci a un rôle à jouer dans le phénomène de chute, c'est-à-dire pour la « gravité » (au sens courant), et donc également pour la « force de gravité », par extrapolation.

Le fait que ces différentes conceptions puissent être reliées à une description valable *du point de vue du langage courant* leur confère une légitimité particulière, qui pourrait fortement contribuer à leur généralité et leur persistance. Cette analyse appuie ainsi l'importance de proposer une stratégie pour prendre en compte ces conceptions. Une approche consiste à les considérer ensemble, en examinant leur point commun.

La distinction entre phénomènes sur Terre et dans l'espace

L'idée qu'il n'y ait pas de gravité dans l'espace, que la gravité soit due à la présence de l'air, de l'atmosphère, ou de la pression atmosphérique, impliquent la considération d'une distinction entre les phénomènes sur Terre et dans l'espace. Il s'agit du second problème central visé dans cette étude, relativement à la compréhension du caractère universel de la loi de la gravitation.

Les différents problèmes d'apprentissage visés ayant été exposés, nous présentons maintenant les différents niveaux de stratégie proposés pour les prendre en compte.

4. Une reconstruction conjointe de la dynamique et de la gravitation face aux problèmes d'apprentissage visés

4.1. L'utilisation de l'histoire de la gravitation

Le constat de la distinction des élèves entre phénomènes sur Terre et dans l'espace a fréquemment été rapproché des anciennes représentations du monde, comme en témoignent Kavanagh et Sneider (2006a) :

« Les chercheurs ont remarqué que comme les scientifiques des générations passées, une large proportion des élèves pensent la Terre comme un environnement unique au-delà duquel les lois de la physique ne s'applique pas. Ce résultat confirme l'étude de Bar *et al.* (1994) avec 400 élèves israéliens de 9-13 ans, dans laquelle de nombreux élèves maintiennent que les objets célestes ne sont pas sujet à la gravitation car ils sont au-delà de l'atmosphère, où il n'y a pas de gravité. » (Kavanagh & Sneider, 2006a) (notre traduction)⁹

Une remarque également faite par Launer (2014) :

« Le premier niveau de conception rencontré chez les élèves n'est pas très éloigné des conceptions pré-newtoniennes selon lesquelles les lois de la nature étaient différentes pour le ciel et pour la Terre. Il leur suffit alors d'énoncer que les astronautes sont « dans l'espace » et tout est dit. La gravitation universelle du cours de physique s'arrête aux portes de « l'Espace » (avec un grand E) : on flotte parce qu'on est dans l'Espace. » (Launer, 2014)

Ce rapprochement sera à la base de la piste développée dans ce travail pour présenter la théorie de la gravitation. L'objectif de l'approche proposée est d'essayer de favoriser la compréhension des liens entre les phénomènes sur Terre et dans l'espace, en s'inspirant de l'histoire des idées ayant mené à leur unification.

Cette intention s'inspire de la démarche de « reconstruction de didactique » (Hosson, 2011), promouvant l'idée d'une relecture de l'histoire des sciences guidée par la connaissance des difficultés d'élèves, afin de trouver des éléments permettant d'y remédier.

Pour le cas de la gravitation, l'intention n'est pas nouvelle, et se retrouve par exemple dans les « High School Standards » du « Benchmarks for Science Literacy », ainsi que le rapportent Kavanagh et Sneider (2006a) dans leur synthèse de ces recommandations officielles américaines pour le niveau lycée :

« Gravitation universelle : **les mêmes lois naturelles qui s'appliquent sur Terre sont valables dans l'univers entier.** Les élèves devraient apprendre à quel point le principe de gravitation universelle permet d'expliquer l'architecture de l'univers et beaucoup de phénomènes ayant lieu sur Terre. **Le principe deviendra familier** à partir de nombreux exemples (la formation d'étoile, les marées, les orbites des comètes, etc.) **et à partir de l'étude de l'histoire menant à cette unification entre Terre et ciel.** » (Kavanagh & Sneider, 2006a) (notre traduction)¹⁰ (emphase ajoutée)

⁹ « The researchers noted that like scientists of past generations, a large proportion of the students thought of the Earth as a unique environment beyond which the rules of physics do not apply. This finding confirms Bar et al.'s (1994) study of 400 Israeli children, aged 9–13, in which many children maintained that celestial objects are not subject to gravity because they are beyond the Earth's atmosphere, where there is no gravity. » (Kavanagh & Sneider, 2006a)

¹⁰ « Universal gravitation : The same natural laws that apply on Earth operate throughout the universe. Students should learn how well the principle of universal gravitation explains the architecture of the universe and much that happens on Earth. The principle will become familiar from many different

4.2. L'utilisation d'une formulation de la dynamique prenant en compte les problèmes visés

L'utilisation de l'histoire des idées – relativement au problème de la distinction Terre/Espace – s'articule avec un autre niveau de stratégie, visant à prendre en compte le premier problème considéré, celui de la non évidence de l'attraction terrestre.

Le fait que la notion d'attraction terrestre soit fréquemment introduite sans justification peut être relié à la manière la plus courante de présenter la mécanique. La majorité des approches existantes de la dynamique introduisent et/ou manipulent le concept de force comme ayant un sens autonome, c'est-à-dire dire ayant un sens avant d'apparaître dans les lois du mouvement. Ce type de présentation se retrouve autant dans les manuels de physique que dans des recherches en didactique (Tiberghien, Vince, & Gaidioz, 2009 ; Viennot, 1996 ; Weil-Barais & Lemeignan, 1993). Le sens du concept de force utilisé s'appuie explicitement ou implicitement sur une modélisation de la notion intuitive d'action, dont une caractéristique essentielle est d'être *exercée par* quelque chose. Une telle formulation a pour conséquence que la force associée à la chute, le poids, est identifié dès son introduction à une force *exercée par* la Terre. Ainsi la manière même de définir le concept de force implique de devoir admettre directement la notion d'attraction terrestre. Ce type de formulation de la dynamique est ainsi incompatible avec l'intention centrale de justification des idées non évidentes pour le sens commun, soutenue par les positionnements épistémologiques et didactiques annoncées dans la section 2.

Une approche du concept de force et des lois du mouvement a alors été développée, dans l'optique de pouvoir justifier que la chute soit associée à une force, tout en permettant de ne pas se prononcer immédiatement sur l'origine de cette force (qui pourrait être par exemple la présence de l'air). Le lien à la Terre peut alors n'apparaître qu'ensuite, lors du cheminement aboutissant à la gravitation. Cette approche a été conçue également en prenant en compte les difficultés connues pour l'apprentissage de la dynamique (l'association force-vitesse, la recherche d'une force dans le passé du mouvement, le raisonnement en termes de capital de force, etc).

Ce choix de reconstruction conjointe de la dynamique et de la gravitation va dans le sens de l'analyse historique de Jammer (1957), qui insiste sur le lien profond entre ces deux aspects de la théorie newtonienne :

« Le concept de force de Newton est intimement relié, de façon historique aussi bien que méthodologique, à sa profonde étude de la gravitation. La relation est historique, car son exposition des idées fondamentales de la mécanique était destinée, avant tout, à servir de

examples (star formation, tides, comet orbits, etc.) and from the study of the history leading to this unification of the Earth and sky. » (Kavanagh & Sneider, 2006a)

fondement axiomatique à ses déductions mathématiques des phénomènes gravitationnels dans le système solaire. » (Jammer, 1957, p.116) (notre traduction)¹¹

Les grandes lignes de la formulation de la dynamique utilisée vont être présentées dans la section suivante. Le développement de la réflexion didactique sous-tendant cette approche est disponible dans (Maron, 2017), et son développement plus exhaustif ainsi que l'ensemble des références utilisées sont accessibles dans (Maron, 2015, chapitre 3).

5. La formulation de la dynamique utilisée

Dans le but d'éviter les problèmes posés par l'utilisation de la notion intuitive d'action, l'approche choisie consiste à reconstruire le concept de force à *partir* des lois du mouvement (un type d'approche défendu notamment dans (Coelho, 2010 ; Klaassen, 2005)). Cette reconstruction mène à une formulation particulière des trois lois du mouvement. Elle suppose au préalable une familiarisation au formalisme vectoriel et à la cinématique, en particulier le concept d'accélération.

5.1. Première « loi », comme définition du mouvement de référence

En premier lieu est mise en avant l'idée que la définition d'une force soit relative à un mouvement de référence, considéré comme ne nécessitant pas d'explication. Cela peut être mis en évidence en considérant la distinction, chez Aristote et encore chez Galilée, entre les mouvements considérés comme naturels – dont en particulier la chute libre – et les mouvements expliqués par une force (« mouvements violents »).

La force est ainsi introduite comme *ce qui permet d'expliquer l'écart à un certain mouvement de référence*, et la première loi de Newton est alors présentée comme la *redéfinition du mouvement de référence de la théorie* : le mouvement rectiligne uniforme.

Ce changement de référence implique un changement de sens du concept de force dans la théorie newtonienne, que l'on peut alors relier mathématiquement au vecteur accélération, en tant qu'il quantifie l'écart au mouvement rectiligne uniforme. Ce nouveau sens justifie ainsi l'interprétation du mouvement de chute en termes de force, du fait de son caractère accéléré.

5.2. Seconde « loi », comme définition quantitative de la grandeur force

Le concept de force est alors défini comme *caractérisant les circonstances physiques associées à l'accélération* d'un objet. Cette formulation permet d'éviter de s'appuyer sur la notion d'action. L'expression « un aimant exerce une action sur un clou », par

¹¹ « Newton's concept of force is intimately related, historically as well as methodologically, to his profound study of gravitation. The relation is historical, because his exposition of the fundamental ideas of mechanics was intended to serve, first and foremost, as an axiomatic foundation for his mathematical deductions of gravitational phenomena in the solar system. » (Jammer, 1957, p.116)

exemple, est explicitée directement *relativement au mouvement*, en considérant que *l'accélération du clou* peut être « expliquée par », c'est-à-dire *reliée*, à certaines *circonstances physiques*, ici : la présence d'un aimant, leur distance relative et leurs matériaux respectifs.

Dans la mesure où l'expression « *exercée par* » n'est pas introduite dès le départ comme constitutive de la définition d'une force, la formulation proposée permet d'envisager les cas – comme celui de la chute libre – où une accélération est observée mais que les circonstances physiques associées à cette accélération ne sont pas directement identifiables¹². L'expression « *exercée par* » peut être définie dans un second temps, à partir de la notion de circonstances physiques (cf. (Maron, 2015, p.103)).

Basé sur cette définition qualitative du concept de force, un raisonnement prenant en compte des observations expérimentales permet ensuite d'amener la deuxième « loi » de Newton comme une définition quantitative de la grandeur force, pour quantifier les circonstances associées à l'accélération, $F = ma$ ¹³.

5.3. Troisième loi

La troisième loi est ensuite présentée comme une reformulation de la conservation de la quantité de mouvement (empirique), dans le formalisme introduit.

5.4. Référentiel galiléen : une redéfinition

Un choix majeur de cette approche est de commencer par définir les trois lois du mouvement uniquement dans le référentiel terrestre. Cette option permet d'éviter le problème de circularité entre le principe d'inertie et la notion de référentiel galiléen¹⁴. Commencer par établir les lois de Newton dans le référentiel terrestre permet d'éviter l'autoréférence, en dissociant cette introduction en deux étapes :

- la construction d'un formalisme valable dans le référentiel terrestre, justifié par certaines observations sur Terre (les relations entre masse et accélération),
- la généralisation de ce formalisme à d'autres référentiels, via une discussion sur les types d'accélération qui y sont observés, menant à une redéfinition d'un référentiel galiléen, à partir de la notion de circonstances physiques.

¹² La présence de la Terre, en tant que circonstance associée à l'accélération de chute, n'est pas directement identifiable comme telle, mais il s'agit de la conclusion d'une réflexion théorique.

¹³ La considération de cas où l'accélération d'un objet est inversement proportionnelle à sa masse - lorsque les mêmes circonstances physiques sont en jeu - suggère l'utilisation du produit de la masse par l'accélération pour caractériser ces circonstances physiques.

¹⁴ La définition la plus courante d'un référentiel galiléen consiste à dire qu'il s'agit d'un référentiel dans lequel le principe d'inertie est vrai, c'est-à-dire un référentiel dans lequel si la force totale s'exerçant sur un objet est nulle, la vitesse se conserve. Or la notion de force est directement quantifiée par l'accélération, et l'accélération dépend du référentiel choisi, ce pourquoi l'expression définissant la force est limitée à certains référentiels : les référentiels galiléens. Ainsi la définition d'une force nécessite au préalable la définition d'un référentiel galiléen. Mais la définition d'un référentiel galiléen nécessite au préalable la définition d'une force.

Dans le référentiel d'un train qui accélère, ou d'un tourniquet en rotation, on observe la présence d'une composante d'accélération supplémentaire relativement à celle pour un même objet dans le référentiel du sol, bien que les circonstances physiques soient identiques par ailleurs (la présence des objets environnants et leurs propriétés).

Cette observation conduit à distinguer, dans un certain référentiel, deux types d'accélération possibles :

- celles pouvant être interprétées comme associées à des circonstances physiques (par exemple : la présence d'aimants),
- celles que l'on peut attribuer uniquement au choix du système de référence pour décrire le mouvement (le train en accélération relativement au sol).

Un référentiel galiléen est alors défini comme *un référentiel dans lequel toutes les accélérations observées peuvent être reliées à des circonstances physiques, indépendamment du mouvement du référentiel (relativement à un autre système de référence).*

Dans un tel référentiel, par analogie avec les expériences faites dans le référentiel terrestre sur les relations entre accélération et circonstances physiques associées, on peut extrapoler les lois du mouvement considérées pour le référentiel terrestre.

5.5. Vers la gravitation

Les concepts fondamentaux de dynamique étant introduits, il s'agit ensuite de justifier pourquoi l'accélération de chute devrait être associée à la présence de la Terre, plutôt qu'à d'autres circonstances physiques, comme la présence de l'air. L'approche choisie à cette fin consiste à expliciter le raisonnement – s'inspirant de celui exposé par Newton – conduisant à établir le lien entre l'accélération de chute libre et l'accélération centripète du mouvement de révolution des astres.

Vont être présentées maintenant les choix constituant cette proposition, qui à la fois s'appuient sur et s'écartent de l'histoire des idées.

6. L'utilisation d'un cheminement historique menant à la théorie de la gravitation

L'utilisation de l'histoire des idées pour une approche d'enseignement nécessite une étude approfondie de celle-là. En complément des analyses d'historiens des sciences (Duhem, 1913 ; Koyré, 1968), une source de première importance est le texte original de Newton, où il présente son raisonnement menant à la force de gravitation universelle. Il s'agit du troisième livre des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, intitulé *Du système du monde* (Newton, 1687). Une synthèse de la logique de cette présentation est disponible dans (Maron, 2015, p.131-142).

L'étude de la présentation faite par Newton montre qu'il s'appuie sur un certain nombre d'éléments préalables, de différentes natures. Reconstruire un cheminement menant à la théorie implique d'effectuer une sélection parmi ces éléments.

6.1. Critères de sélection

Cette sélection est orientée par deux tendances opposées :

1. La volonté d'intégrer tout ce qui est nécessaire à la compréhension du déroulé logique, sans omettre ni avoir à faire admettre des étapes cruciales du raisonnement. En particulier, faire apparaître les faits expérimentaux initiaux et le problème de départ, à l'origine de la réflexion théorique.
2. La volonté de se restreindre au minimum nécessaire contribuant directement à la construction de la théorie.

Le premier critère exprime la posture annoncée précédemment, s'appuyant sur les positionnements épistémologiques et didactiques explicités en section 3.

Le second critère de sélection - la restriction au minimum nécessaire - est lié à la nature du contenu en jeu : étant donnée la complexité de la construction de la théorie de la gravitation, développer des éléments qui n'y sont pas directement reliés reviendrait à diluer l'articulation des idées dans une quantité de connaissances plus grande encore.

En plus du choix des éléments à utiliser, la réflexion sur la construction du cheminement doit également s'adapter à la formulation de la dynamique présentée précédemment.

6.2. Les éléments préalables nécessaires pour une reconstruction de la théorie de la gravitation

La distinction entre Terre et Ciel

L'objectif de l'approche d'enseignement est d'aboutir à l'expression de la force de gravitation, via l'unification qu'elle implique entre phénomènes terrestres et célestes. Saisir pleinement la portée de cette unification requiert de pouvoir la resituer dans le contexte historique antérieur, où au contraire la distinction entre Terre et Ciel était une caractéristique essentielle des représentations du monde. Parmi les très nombreuses incidences culturelles de cette distinction, il est possible de se limiter au minimum en ne considérant que le point de vue physique, qui la justifie. L'argument central se joue au niveau des mouvements considérés comme naturels, c'est-à-dire ayant lieu par eux-mêmes. Il s'agit sur Terre de mouvements verticaux, dont la chute libre, et dans le ciel de mouvements circulaires, la révolution de planètes.

Cette distinction peut de plus être légitimée par l'évocation de la théorie du mouvement d'Aristote (-350 av. JC). Selon celle-ci, les mouvements naturels des corps dépendent de leur composition, selon les quatre éléments : Terre, Eau, Air, Feu. La direction de leur

mouvement correspond à la hiérarchie des “lieux naturels” de chaque élément : la Terre au centre, puis l'Eau, l'Air et le Feu¹⁵.

Si les mouvements naturels terrestres - verticaux, ascendants ou descendants - sont liés à leur composition selon leur proportion des quatre éléments, alors la présence d'un autre mouvement naturel dans le Ciel - le mouvement circulaire - implique que le monde céleste soit constitué d'un autre élément : le cinquième élément, la “quint-essence”, retenu sous le nom “d'Éther”. Ainsi la différence entre les mouvements naturels est interprétée comme liée à une différence de composition entre les deux mondes, impliquant leur séparation fondamentale.

La remise en question de la distinction entre Terre et Ciel

La distinction entre monde terrestre et monde céleste s'est maintenue jusqu'au Moyen Age, où l'idée d'unité a commencé à émerger.

« Si l'on voulait, par une ligne précise, séparer le règne de la Science antique du règne de la Science moderne, il la faudrait tracer, croyons-nous, à l'instant où Jean Buridan [(1292 - 1363)] a conçu cette théorie, à l'instant où l'on a cessé de regarder les astres comme mus par des êtres divins, où l'on a admis que les mouvements célestes et les mouvements sublunaires dépendaient d'une même Mécanique. » (Duhem, 1906)

Le fait qu'à l'époque de Newton, la remise en question de la distinction entre Terre et Ciel soit déjà bien installée, joue un rôle dans la construction de la théorie. En effet, l'étude du livre 3 des *Principes* montre l'importance des lois du mouvement dans l'établissement de la force de gravitation, en particulier pour l'analyse du mouvement des astres. Ainsi cela constitue déjà en soi un premier pas vers l'unification, en faisant l'hypothèse que le même cadre théorique puisse être utilisé pour analyser les deux types de phénomènes, terrestre et céleste.

Dans le cadre de la reconstruction - sans reprendre la genèse complète de l'idée d'unité de la Terre et du Ciel - il est possible de se restreindre aux éléments majeurs remettant en question leur séparation. Il s'agit essentiellement des suivants :

- La possibilité et l'efficacité de la description du mouvement des astres dans le référentiel héliocentrique, où la Terre se retrouve à une place quelconque au milieu des autres planètes (Copernic, 1542).
- Le fait que plusieurs centres de révolution soient possibles avec la découverte des satellites de Jupiter, donnant du crédit au point de vue héliocentrique (Galilée, 1609).

¹⁵ L'interprétation d'exemples de la vie quotidienne permet de saisir cette idée :

- Une pierre, constituée de l'élément Terre, tombe car son lieu naturel est au centre. Elle coule aussi dans l'eau puisque le lieu naturel de l'Eau se situe également au-dessus de la Terre.

- Une bulle d'air remonte à la surface car le lieu naturel de l'élément Air est situé au-dessus de celui de l'Eau.

- Une goutte d'eau de pluie descend car l'élément Eau est situé au-dessous de l'Air.

- Les flammes d'un feu montent vers le haut car le lieu naturel de l'élément Feu est situé au-dessus de celui de l'Air.

- La mise en évidence des trajectoires elliptiques et des vitesses non uniformes des planètes, impliquant la perte du caractère circulaire uniforme du mouvement des planètes, symbole de perfection du monde céleste (Kepler, 1609).
- La disparition d'une étoile (explosion d'une supernova), remettant en question l'immutabilité du monde céleste (Tycho Brahe, 1572).
- L'observation de montagnes et de vallées sur la Lune, la rapprochant du monde terrestre (Galilée, 1609).
- L'observation de tâches sur le Soleil, remettant en cause son caractère parfait (Galilée, 1609).

Le problème à l'origine de la théorie newtonienne

Ces différents éléments permettent de poser le problème à l'origine de la théorie newtonienne. En effet malgré ces remises en question de la distinction Terre Ciel, et même dans le modèle héliocentrique, les mouvements naturels des objets sur Terre et des astres - chute verticale et révolution - restent distincts, encore pour Galilée en 1630.

Se pose ainsi la question suivante : *S'il y a des raisons de penser que les mondes terrestre et céleste ne sont pas si différents, comment se fait-il que les mouvements naturels en chacun de ces lieux le soient ? Quels liens pourrait-il bien y avoir entre ces deux types de mouvement ?*

En plus de formuler le problème initial, cela permet également de donner une motivation pour l'étude de la dynamique : puisqu'il s'agit de chercher un lien entre des plusieurs types de mouvements, il faut disposer d'une manière suffisamment précise d'analyser le mouvement. C'est ce que vont permettre les trois lois de la dynamique newtonienne.

Les données expérimentales pour la chute verticale et le mouvement de révolution

Une fois le contexte, le problème, et le cadre théorique de la dynamique posés, les deux types de mouvement dont on cherche à montrer l'unification doivent être analysés plus précisément. Cela demande d'avoir à disposition certains éléments expérimentaux.

Pour la chute libre, il s'agit essentiellement des observations de Galilée : la chute d'un objet est un mouvement accéléré, avec une accélération constante, de valeur $9,8 \text{ m/s}^2$, indépendante de la masse de l'objet (lorsque la résistance de l'air peut être négligée).

Pour le mouvement de révolution, il s'agit des lois de Kepler, en particulier la relation entre la période et la distance moyenne pour chaque planète, $T^2 = C r^3$, relation permettant d'arriver à la loi en $1/r^2$.

Ces données expérimentales peuvent être intégrées aux points de remises en question de la distinction Terre Ciel, listés précédemment. L'ensemble de ces éléments constituent le plan de la première partie de la progression proposée, intitulée « La compréhension du monde avant Newton ».

1. L'opposition entre Terre et Ciel (la différence de mouvement naturel et sa justification via la théorie aristotélicienne)

2. Copernic et le changement de centre (un premier élément de remise en question de la distinction Terre Ciel)
3. Kepler et les lois du Ciel (un autre élément de remise en question et la loi quantitative nécessaire pour la suite)
4. Galilée et la chute des corps (les constats expérimentaux sur la chute, nécessaires pour la suite)
5. Galilée et la lunette astronomique (d'autres éléments de remise en question : les satellites de Jupiter, le relief sur la Lune et les tâches sur le Soleil)

L'ensemble de ces données permet de poser le problème à l'origine de la théorie, et de reconstruire le cheminement aboutissant à celle-ci.

6.3. Inspiration et écarts avec la présentation de Newton

Les grandes lignes de l'argumentation de Newton ont servi de base au développement de la reconstruction. Certaines étapes ont été explicitement reprises, et d'autres ont été laissées de côté ou modifiées. Ces choix seront présentés et justifiés ici, après avoir rappelé la logique de la démarche de Newton dans *Du système du monde* (Newton, 1687). (Une analyse détaillée de cette structure logique disponible dans (Maron, 2015).)

Résumé de la logique de l'exposition de Newton

Le première étape est l'analyse du mouvement de révolution des astres, décrit par les lois de Kepler, à partir des lois du mouvement. Newton obtient une accélération centripète variant avec la distance au centre en $1/r^2$ (nommée en ses termes de « forces accélératrice »). Il applique le même raisonnement aux satellites de Jupiter et de Saturne, qui satisfont également les relations de Kepler.

D'une façon un peu plus compliquée, il conclut d'après les petites variations de l'orbite de la Lune que son accélération centripète varie également en $1/r^2$.

En faisant l'hypothèse que cette « force accélératrice » ne s'exerce pas seulement dans le Ciel, mais également sur Terre, il calcule la valeur *qu'elle aurait* à la surface de la Terre, à partir de son intensité pour la Lune et la loi de décroissance en $1/r^2$. En pratique, il utilise la « distance de chute » de la Lune, comprise comme l'écart à une trajectoire rectiligne uniforme, pour un temps donné. La valeur obtenue par extrapolation à la surface de la Terre coïncide avec la distance de chute libre pour ce même temps. Cela conduit ainsi à l'identification de la « force accélératrice » s'exerçant sur les astres à la gravité terrestre (l'accélération de pesanteur).

La considération des caractéristiques des deux forces qui viennent d'être unifiées permet d'obtenir l'expression quantitative générale de la force de gravitation. La dépendance en $1/r^2$ vient de l'accélération centripète des astres, la présence de la masse vient du poids sur Terre, et la présence des deux masses est due au principe d'actions réciproques.

L'extrapolation des lois du mouvement à d'autres référentiels

Dans son exposé, Newton utilise les lois du mouvement dans différents référentiels, sans discussion particulière à ce niveau. Cela est en partie lié à son hypothèse initiale sur l'existence de l'espace absolu, qui permet d'éviter de nombreux problèmes conceptuels, ayant émergé plus tard lors de la critique de cette idée par Mach, Hertz et Poincaré (Coelho, 2010, 2011).

La définition d'un référentiel galiléen proposée précédemment permet de prendre en compte ces problèmes. Le choix a été fait d'introduire les lois du mouvement dans le référentiel terrestre, où il est possible de faire des expériences justifiant la construction du formalisme, plutôt que de les postuler directement pour l'espace absolu, et les référentiels supposés en translation rectiligne uniforme relativement à celui-ci, en premier lieu le référentiel héliocentrique.

Dans le cadre d'une première présentation du sujet à des élèves, l'hypothèse de la validité des lois du mouvement à l'échelle du système solaire peut en effet difficilement être reliée à l'expérience (Coelho, 2007). Celles-ci nécessitent d'identifier le lien entre masse et accélération - l'accélération dépendant du référentiel - or dans le référentiel héliocentrique, il est impossible d'avoir accès aux masses des planètes sans la théorie de la gravitation, elle-même nécessitant les lois du mouvement pour être construite. Ainsi le lien entre masse et accélération ne peut être expérimenté le plus généralement que pour le référentiel terrestre.

A partir de la définition proposée précédemment, le caractère galiléen d'un référentiel est jugé relativement à l'examen des accélérations observées. Si celles-ci peuvent être interprétées comme associées à des circonstances physiques - en l'occurrence pour le référentiel héliocentrique : la présence d'un astre au centre de la trajectoire, dans la direction du vecteur accélération - alors par analogie avec le référentiel terrestre, cela fait sens d'extrapoler la manière de caractériser les circonstances physiques utilisées sur Terre, via les lois du mouvement, c'est-à-dire utiliser le concept de force.

Une telle extrapolation peut garder le statut d'hypothèse de travail, pour être validée ensuite par la possibilité effective de déterminer explicitement et quantitativement les circonstances physiques associées aux accélérations centripètes (dans ce cas : la distance entre les corps en jeu et leur masse).

Dans la progression développée, ayant basé la définition d'un référentiel galiléen sur l'observation des accélérations, la première étape - pour justifier l'utilisation des lois du mouvement dans les référentiels héliocentrique ou géocentrique - est de déterminer le vecteur accélération des mouvements considérés dans ces référentiels.

L'approximation du mouvement circulaire uniforme

Dans la présentation de Newton, la détermination de ce qui correspond à l'accélération fait référence à des théorèmes mathématiques établis dans le premier livre, dont les démonstrations sont très techniques. En particulier, il utilise l'expression de

l'accélération centripète en fonction de la distance au centre r et de la vitesse v , $a = v^2/r$, dont la démonstration dans le cas général, même avec le formalisme actuel, est relativement complexe.

Cette expression est cependant nécessaire pour passer de la troisième loi de Kepler, $T^2 = C r^3$, à la proportionnalité en $1/r^2$ de l'accélération centripète, qui sera déterminante pour la suite du raisonnement. Newton fait ce passage directement pour le cas des orbites elliptiques, grâce à son théorème général pour l'accélération centripète.

Bien que l'on ne puisse pas démontrer simplement la relation $a = v^2/r$ dans le cas général, il est quand même possible de ne pas avoir à l'admettre, en choisissant de faire l'approximation d'un mouvement circulaire uniforme pour les planètes. Pour cela il faut considérer les ordres de grandeur d'ellipticité des trajectoires, pour observer que celles-ci soient effectivement très faibles, justifiant ainsi cette approximation (1,6 % d'écart maximum entre la trajectoire de la Terre et une trajectoire circulaire).

Ainsi en se restreignant au cas d'un mouvement circulaire uniforme, la démonstration peut se faire géométriquement, par l'utilisation du théorème de Thalès (cf. (Maron, 2015, p.364) pour son exposition explicite).

Une conséquence de ce choix est qu'il n'est pas nécessaire de présenter les deux premières lois de Kepler explicitement, avec le formalisme mathématique. En effet Newton utilise la loi des aires pour la démonstration du caractère centripète des accélérations sur une trajectoire elliptique, ce qui n'est plus nécessaire avec l'approximation du mouvement circulaire uniforme.

Les deux premières lois de Kepler peuvent ainsi être restreintes à une compréhension intuitive, dans un langage simple, économisant les difficultés potentielles liées à l'introduction de la définition formelle de l'ellipse, et à l'explication de la loi des aires (celle-ci peut par exemple se limiter à « le long de sa trajectoire - légèrement ovale - la vitesse d'une planète augmente lorsque celle-ci se rapproche du soleil »).

La troisième loi a cependant une importance centrale, dans la mesure où il s'agit de la relation empirique fondamentale à partir de laquelle on obtient la dépendance en $1/r^2$, cruciale pour la suite.

Historiquement, cette approximation circulaire a également été faite par Newton, comme première étape de son raisonnement (Chave, 2012).

Utilisation du cas de la Lune pour faire le lien

Le fait de considérer le cas de la Lune pour faire le lien entre la force centripète et le poids semble inévitable, il s'agit en effet de l'astre le plus près de la Terre.

Comme on l'a rappelé dans la section précédente, Newton montre que la dépendance de l'accélération en $1/r^2$ est également valable pour la Lune, via l'observation du « mouvement très lent à l'apogée lunaire ». Cependant cet argument demande un très

lourd traitement mathématique si on veut le démontrer, traitement tout à fait inaccessible au niveau concerné.

Une autre option, s'écartant de la présentation de Newton, consiste à utiliser l'analogie avec les satellites de Jupiter. La Lune étant un satellite de la Terre, au même titre que les satellites de Jupiter, on peut raisonnablement faire l'hypothèse qu'*a priori*, l'accélération centripète qui s'exerce sur la Lune est liée aux mêmes types de circonstances physiques que celles associées aux accélérations des satellites de Jupiter, et ainsi extrapoler la décroissance en $1/r^2$ de l'accélération centripète.

Il s'agit là d'une hypothèse supplémentaire, qui n'est pas dans la présentation de Newton. Cependant dans l'étape suivante du raisonnement, une hypothèse est de toute façon nécessaire pour extrapoler la validité de cette dépendance jusqu'à la surface de la Terre. Utiliser l'analogie avec les satellites de Jupiter reste ainsi dans la logique d'extrapolation qui va être utilisée par la suite, en faisant remonter cette extrapolation à l'étape précédente, en évitant ainsi l'argument mathématique trop complexe de Newton.

Comparaison des accélérations plutôt que des distances de chute

Après avoir extrapolé la dépendance en $1/r^2$ de l'accélération centripète des satellites de Jupiter à celle de la Lune, l'étape suivante est de l'extrapoler jusqu'à la surface de la Terre. C'est là l'hypothèse fondamentale que fait Newton, qui rompt explicitement avec la distinction Terre Ciel. Celle-ci est directement testée par le calcul de la conséquence de cette accélération centripète sur Terre. Dans le texte de Newton, le calcul est fait avec les distances de chute par unité de temps. Une autre façon de faire est d'utiliser directement les accélérations. C'est celle qui a été choisie dans cette présentation, car elle évite d'introduire des difficultés supplémentaires, liées à la méthode elle-même (distance de chute, écart au mouvement rectiligne), avant même d'obtenir son résultat. De plus, avant même la comparaison des valeurs, la considération des accélérations permet de mettre en évidence un premier point commun entre les deux mouvements : pour la chute verticale et la révolution de la Lune, le vecteur accélération est dirigé vers le centre de la Terre. Leur valeur peut alors être comparée. L'accélération de la Lune s'obtient à partir de l'expression démontrée de l'accélération centripète : $a = v^2/r$. La vitesse peut s'obtenir à partir de la période, paramètre expérimental connu, de même que la distance. Le fait d'utiliser les accélérations permet de plus de retomber sur un chiffre connu, l'accélération de pesanteur, rendant ainsi la conclusion explicite.

Les satellites de Jupiter

Pour pouvoir utiliser l'analogie des satellites de Jupiter pour extrapoler la dépendance en $1/r^2$ pour la Lune, il est nécessaire de développer l'étude de ce système. Celle-ci est cependant relativement simple dans la mesure où elle est exactement analogue à celle des planètes. Par ailleurs, bien qu'absent de la majorité des présentations de la théorie de la gravitation, le système de Jupiter et ses satellites a cependant un rôle important dans sa formation. Il est en premier lieu un argument décisif pour le référentiel héliocentrique, en montrant que plusieurs centres de révolution sont possibles. D'autre

part la validité des lois de Kepler pour les satellites de Jupiter est un témoignage marquant de l'unité de la description mathématique des mouvements célestes. Ces aspects renforcent le choix d'intégrer cet élément à différents niveaux du cheminement.

Après avoir traité le cas du système de Jupiter, Newton l'étend également à celui de Saturne, dont les satellites - découverts peu de temps avant par Huygens, Cassini et Herschel - satisfont aussi les lois de Kepler. Afin de se restreindre au minimum d'éléments nécessaires, le choix a été fait de ne pas traiter le cas de Saturne, dans la mesure où il n'apporte qualitativement rien de plus que celui de Jupiter. Son évocation rapide reste cependant intéressante, appuyant la généralité des lois de Kepler, et ainsi la crédibilité de l'analogie pour la Lune.

7. Présentation de la reconstruction proposée de la force gravitationnelle

Dans la section 6.2 ont été vus les éléments préalables permettant une reconstruction de la théorie de la gravitation. Le plan de la première partie, intitulée, « La compréhension du monde avant Newton » avait alors été donné (fin de la section 6.2). Après avoir introduit le contexte de la distinction entre mondes terrestre et céleste, ses remises en question ont été abordées, menant au problème des liens entre mouvements terrestres et célestes.

Ce problème permet de situer et motiver l'étude menant à la force de gravitation Il représente également une motivation pour l'étude de la dynamique : la recherche d'un lien entre les mouvements de chute et de révolution nécessite de pouvoir décrire le mouvement de manière suffisamment précise. La présentation de la dynamique a donc été placée à la suite de cette première partie, comme réponse à la question intermédiaire posée par le problème global : *comment analyser plus précisément le mouvement ?*

Une fois les lois du mouvement introduites, dans le référentiel terrestre, vient la discussion sur l'extrapolation des lois du mouvement à d'autres référentiels, telle que développée plus haut. Ainsi pour l'étude du mouvement des astres, sont considérés des référentiels dans lesquels les accélérations peuvent être associées - même hypothétiquement au départ - aux circonstances physiques du contexte (la présence d'un astre au centre de la trajectoire, dans la direction du vecteur accélération).

Ces bases étant posées, la suite du cheminement – menant à l'unification Terre Ciel et à la force gravitationnelle – s'appuie sur les choix de reprise ou de modification des éléments du raisonnement exposé par Newton, justifiés dans la partie précédente (6.3). Va être présenté maintenant la proposition de reconstruction explicite de la fin de ce cheminement, aboutissant à l'expression quantitative de la force de gravitation.

Une comparaison de l'approche proposée avec d'autres séquences s'inspirant en partie d'un cheminement historique, qui à la fois critique et s'inspire de certains éléments utilisés, est disponible dans l'annexe A.

7.1. Le mouvement des planètes

La première étape consiste à analyser les mouvements des planètes, dans le référentiel héliocentrique, où la trajectoire est suffisamment simple et dans lequel on dispose des lois de Kepler. L'approximation d'un mouvement circulaire uniforme (justifiée par la considération des ordres de grandeur), permet de déterminer que le vecteur accélération est centripète, et d'utiliser la relation $a = v^2/r$, démontrée au préalable pour cette situation (cf. (Maron, 2015) p.364). En développant cette expression en fonction de la distance r et la période de révolution T (via $v = 2\pi r/T$) et en utilisant la relation de Kepler $T^2 = Cr^3$ on obtient la dépendance de l'accélération en fonction de la distance au centre, en $1/r^2$.

Cela permet ainsi de faire l'hypothèse que ces accélérations soient liées à deux circonstances physiques particulières : la présence du Soleil au centre des trajectoires, et la distance de chacune des planètes au Soleil.

7.2. Les satellites de Jupiter

Sont étudiés ensuite les satellites de Jupiter, dans le référentiel centré sur Jupiter. Leur mouvement étant (quasiment) circulaire uniforme, leurs accélérations sont également centripètes, ce qui permet à nouveau de les relier aux circonstances physiques : Jupiter au centre des trajectoires. Une relation du type de la troisième loi de Kepler étant valable pour les satellites de Jupiter, un calcul directement analogue au précédent permet d'obtenir la dépendance de l'accélération en $1/r^2$.

7.3. Comparaison du cas de la Lune à la chute libre sur Terre

En revenant sur la question du lien entre les mouvements céleste et terrestre, le système Terre - Lune est ensuite étudié. La Lune est en effet l'astre le plus près de la Terre, représentant la limite entre les deux mondes.

Le choix du référentiel géocentrique est justifié par la simplicité du mouvement de la Lune dans celui-ci, quasiment circulaire uniforme, où l'accélération est à nouveau centripète.

Le premier point commun avec la chute sur Terre peut alors être mis en avant : l'accélération de chute libre est dirigée également vers le centre de la Terre.

Peut alors être amenée l'idée fondamentale de Newton : *Et si les deux accélérations étaient liées aux mêmes types de circonstances physiques ? Autrement dit, et si l'accélération centripète de la Lune et l'accélération de chute libre sur Terre étaient deux cas particuliers d'un même type de phénomène, à des endroits différents.*

Le fait qu'elles aient une direction commune ne suffit cependant pas pour conclure. La valeur de l'accélération centripète de la Lune a_L est alors déterminée, à partir de la valeur de la période la Lune T_L , et la distance Terre – Lune r_L :

$$a_L = \frac{v_L^2}{r_L}, v_L = \frac{2\pi r_L}{T_L}, a_L = 2,72 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

7.4. Extrapolation de la dépendance en $1/r^2$ des satellites de Jupiter à la Lune

C'est alors qu'est ajoutée l'hypothèse supplémentaire à la présentation de Newton, afin d'éviter son argument mathématique très complexe sur le ralentissement du mouvement de la Lune.

Il s'agit de supposer que la loi en $1/r^2$, valable pour les planètes autour du Soleil, et pour les satellites de Jupiter autour de Jupiter, pourrait également s'appliquer au cas de la Lune, dont le point commun est d'être aussi un satellite : celui de la Terre.

Sachant que la distance entre la Terre et la Lune vaut soixante fois le rayon terrestre, et donc que $R_{Terre} = 1/60 r_L$, alors en supposant que l'accélération centripète de la Lune varie en $1/r^2$, sa valeur à la surface de la Terre vaudrait $a_L \times 60^2$.

On trouve alors $a_L \times 60^2 = 9,8 \text{ m/s}^2$, c'est-à-dire précisément la valeur de l'accélération de chute libre. Celle-ci peut ainsi être vue comme un cas particulier de l'accélération centripète céleste, lorsqu'on est à la surface de la Terre.

Ce calcul amène ainsi à la conclusion que l'accélération de chute libre des objets sur Terre et l'accélération centripète de la Lune sont liées aux mêmes types de circonstances physiques, dont leur distance au centre de la Terre.

Ainsi la force associée à l'accélération de chute libre, le poids, pourrait alors être généralisée pour le cas de Lune, en prenant en compte la dépendance en la distance.

7.5. Quelles sont les circonstances physiques associées à ces accélérations ?

L'établissement de l'expression quantitative de la force de gravitation s'appuie sur la formulation choisie pour définir la grandeur physique de force. Celle-ci a été construite comme *caractérisant les circonstances physiques associées à l'accélération considérée*. Cette formulation permet en particulier de prendre en compte une difficulté majeure des élèves : l'idée que le phénomène de gravité soit lié à la présence de l'air, en reconnaissant sa légitimité.

- Des accélérations liées à la présence de la Terre

Le phénomène de chute libre peut avoir lieu de la même façon partout sur Terre, indépendamment du type de matériau des objets. On pourrait donc supposer qu'il est associé à des circonstances physiques qui sont toujours présentes à la surface de la Terre, comme la présence de l'air ou de l'atmosphère. Cependant si l'accélération de chute libre est de même nature que l'accélération de la Lune, alors elle ne peut plus être associée aux circonstances physiques uniquement de la surface de la Terre. Une

circonstance restant commune aux deux mouvements : la présence de la Terre, vers laquelle sont dirigées les accélérations. On peut donc parler d'une force (au sens de Newton) exercée par la Terre sur les corps, où la notion de « corps » désigne aussi bien les objets sur Terre que la Lune. Sa valeur est notée $F_{Terre/corps}$.

- *Des accélérations liées à la distance au centre de la Terre*

Le lien entre l'accélération de chute libre et l'accélération de la Lune est leur dépendance à la distance au centre de la Terre : $a \propto \frac{1}{r^2}$. Il s'agit donc d'une circonstance physique essentielle associée à ces accélérations. A partir de la définition quantitative de la grandeur force $F = ma$, on a :

$$F_{Terre/corps} \propto \frac{1}{r^2}$$

- *L'accélération de chute libre liée à la valeur de la masse du corps*

Pour le cas de la chute libre, l'observation d'une accélération \vec{g} indépendante de la masse m de l'objet qui tombe, implique formellement¹⁶ que la force associée dépende de la masse : $P = m g \propto m$.

Si le poids est finalement un cas particulier, à la surface de la Terre, de la force exercée par la Terre sur un corps, c'est-à-dire : $P = F_{Terre/corps}(r = R_T)$, alors d'une manière générale :

$$F_{Terre/corps} \propto m_{corps}$$

- *Troisième loi du mouvement et lien à la valeur de la masse de la Terre*

La dépendance en la seconde masse en jeu vient de la troisième loi du mouvement : à la force exercée par la Terre sur un corps, $F_{Terre/corps}$, devrait correspondre une force exercée par le corps sur la Terre, $F_{corps/Terre}$, tel que

$$F_{Terre/corps} = F_{corps/Terre} = F$$

Or si $F_{Terre/corps} \propto m_{corps}$, alors on devrait avoir aussi : $F_{corps/Terre} \propto m_{Terre}$.

Et donc l'unique façon pour que cela soit possible est : $F \propto m_{corps} \times m_{Terre}$.

Donc en particulier : $F_{Terre/corps} \propto m_{corps} \times m_{Terre}$

En regroupant les différentes dépendances ensemble, on a :

¹⁶ Il est aussi possible de considérer intuitivement cette dépendance. Lorsqu'on lâche un objet sur un coussin, le coussin se déforme, et la déformation est d'autant plus grande que la masse de l'objet est grande. On peut exprimer cela en disant qu'une circonstance physique associée à la déformation du coussin est la masse de l'objet. Or si le coussin n'avait pas été là, l'objet aurait continué sa chute accélérée, donc il s'agit des mêmes circonstances associées à la déformation du coussin que celles associées à l'accélération du mouvement de chute. On peut donc dire qu'une circonstance physique associée à l'accélération de chute libre est la masse de l'objet en jeu.

$$F_{Terre/corps} \propto \frac{m_{corps} \times m_{Terre}}{r^2}$$

A ce stade, cette formule ne vaut encore que pour le cas du système Terre - Lune. Vient ensuite la discussion de sa généralisation.

7.6. Généralisation

Dans le raisonnement menant à cette expression, un point crucial est la mise en relation de l'accélération de chute libre sur Terre avec l'accélération de la Lune, via la dépendance en $1/r^2$. Or cette dépendance a été extrapolée par analogie au cas des satellites de Jupiter, et elle est également valable pour le cas analogue des planètes autour du Soleil dans le référentiel héliocentrique. Ainsi, l'accélération centripète de la Lune semble liée aux mêmes circonstances physiques :

- que les accélérations centripètes des astres (satellites de Jupiter et planètes autour du Soleil),
- que l'accélération de chute libre sur Terre.

Les circonstances physiques extrapolées de l'accélération de chute libre à l'accélération de la Lune (les valeurs des deux masses), peuvent donc également être étendues aux accélérations des satellites de Jupiter et celles des planètes.

La dernière étape de généralisation vient alors. Finalement les seules circonstances physiques associées aux accélérations considérées sont la masse des corps en jeu et leur distance relative. Or la masse est intrinsèque à la définition même d'un corps (du moins en mécanique classique), de même qu'il est toujours possible de définir la distance entre deux corps. Ainsi ces circonstances sont tellement fondamentales que l'on peut supposer que ces accélérations pourraient avoir lieu entre tous corps deux à deux. Un corps pourrait donc avoir une composante d'accélération dans la direction de chacun des autres corps, dont la valeur dépendrait de la masse de chacun de ces corps et de leur distance respective.

Bien que légitime, il s'agit d'une hypothèse très forte, dans la mesure où elle généralise un résultat obtenu seulement dans les cas où un astre était en jeu, et dont les effets – à l'époque de Newton – n'ont jamais été observés sur Terre. Le fait que les accélérations entre deux objets sur Terre ne soient pas perceptibles peut cependant être interprété par le fait que leurs valeurs sont proportionnelles à la masse de ces objets, et donc infimes relativement à l'accélération de chute libre, proportionnelle à la masse de la Terre.

La grandeur force associée d'abord à l'accélération de chute libre, le poids, a donc finalement pu être généralisée au cas de la Lune, au cas des planètes autour du Soleil, et même à chaque corps avec tous les autres corps. Par extension du terme de gravité désignant au départ la chute des objets, on nomme cette force la force de gravitation, et on parle de l'interaction gravitationnelle.

7.7. *Interprétation*

La compréhension du caractère révolutionnaire de la conclusion obtenue demande de replacer celle-ci dans le contexte historique, celui de la distinction entre mondes terrestre et céleste. Bien que cette remise en question ait été pensée avant la théorie newtonienne, aucun argument décisif permettant de relier explicitement les deux mondes n'avait été énoncé. La théorie de Newton acte pour la première fois leur unification. Le système du monde peut désormais être décrit de façon unique, avec un même concept expliquant à la fois la pesanteur terrestre et la révolution des astres.

Par cette unification des mondes terrestre et céleste, Newton donne naissance à la notion d'Univers. Il s'agit d'une révolution caractérisée par Alexandre Koyré, dans *Sens et portée de la synthèse newtonienne*, comme « l'une des plus profondes sinon la plus profonde des mutations et des transformations accomplies - ou subies - par l'esprit humain » (Koyré, 1968).

8. Conclusion

Une approche d'enseignement de la théorie de la gravitation newtonienne a été développée, visant à apporter une justification à ses notions et lois, en tenant compte des problèmes d'apprentissage qu'elle présente.

La proposition consiste en une reconstruction du cheminement historique menant à l'unification entre la chute des corps et les mouvements des astres. Celui-ci permet d'explicitier un raisonnement justifiant l'universalité de la gravitation, face à la tendance des élèves à dissocier les phénomènes sur Terre et dans l'espace. Ce cheminement, exprimé avec une certaine formulation de la dynamique, permet également de pointer les arguments précis conduisant à associer la chute verticale à la présence de la Terre, plutôt qu'à d'autres circonstances comme la présence de l'air. Le cheminement d'unification rend par ailleurs possible la justification de l'expression quantitative de la force gravitationnelle, la plupart du temps donnée à admettre.

La démarche de reconstruction proposée combine plusieurs intentions distinctes. D'un point de vue épistémologique, elle vise à promouvoir l'idée qu'une connaissance scientifique est construite, et que sa valeur est déterminée par les arguments qui la justifient. Du point de vue de la motivation des élèves, elle permet d'éviter le risque de découragement face à une image du savoir comme « coup de génie » d'un scientifique, et par conséquent inaccessible à une personne « normale ». L'accès à la logique du cheminement menant à ce savoir peut être de plus un facteur d'intérêt en lui-même pour le contenu. Du point de vue de l'apprentissage, la démarche de reconstruction peut contribuer à favoriser le dépassement des idées du sens commun, en explicitant un raisonnement légitimant une conception scientifique, et les raisons pour lesquelles cette conception se détache du sens commun. Enfin, l'insistance sur la mise en évidence des arguments qui justifient une idée est également en phase avec un enjeu de formation de l'esprit critique.

L'utilisation de l'histoire de la gravitation permet de mettre en avant deux autres aspects épistémologiques, considérés comme particulièrement fondamentaux. D'une part, l'idée que la construction d'une théorie physique articule des réflexions théoriques,

hypothèses et faits expérimentaux, dans le but de répondre à un problème. D'autre part l'idée qu'un apport fondamental d'une théorie consiste à mettre en relation des phénomènes considérés auparavant comme distincts. L'unification entre phénomènes terrestre et céleste de la théorie newtonienne a de plus un statut particulier, en tant qu'elle apporte une justification à la notion même d'Univers, et ainsi par la suite la recherche d'autres lois universelles.

En se concentrant sur ces deux enjeux, l'approche proposée laisse de côté certains éléments de l'histoire de la théorie newtonienne, pouvant pourtant se prêter à illustrer d'autres aspects épistémologiques intéressants. Par exemple la présence d'aller-retours entre théorie et expérience dans la construction d'une théorie (en particulier avec l'impact des différentes mesures du rayon terrestre dans la démarche de Newton), ou encore la présence d'interaction et de controverses entre scientifiques (la polémique entre Newton et Hooke sur la loi en $1/r^2$). Une réflexion ultérieure pourrait permettre d'intégrer certains de ces aspects à la progression proposée. Ces intentions sont cependant à équilibrer avec la contrainte d'être suffisamment synthétique pour éviter la surcharge d'information et la dilution des idées centrales, autant au niveau épistémologique que conceptuel.

Un point pouvant apparaître comme une limite de l'approche proposée est son caractère a priori essentiellement transmissif. En effet de par la complexité du cheminement permettant d'aboutir à la force gravitationnelle, il semble particulièrement difficile ou ambitieux de faire en sorte que les élèves puissent « retrouver par eux-mêmes » les hypothèses et les étapes du cheminement de Newton, dans un idéal constructiviste d'apprentissage par l'activité. Il est cependant possible d'envisager une présentation majoritairement transmissive qui ne soit pas « dogmatique » pour autant, dans la mesure où une attention forte est prêtée à la justification de chaque élément introduit.

Cette approche partage la contestation exprimée par Viennot (2009) vis-à-vis de la réprobation généralisée des composantes d'enseignement transmissives :

« Afin de faciliter l'apprentissage conceptuel, devrions nous ne compter que sur des activités sous forme de résolution de problème ? [...] Bien sûr il est possible de présenter un épisode classique de cours comme une phase de préparation, pour une activité ultérieure de résolution de problème. Mais il pourrait être plus utile de simplement accepter que « transmettre » est une phase légitime et nécessaire de l'enseignement, dans la mesure où « enseigner signifie agir sur d'autres esprits qui réagissent en retour » (Ogborn et al. 1996 : 141). Chercher à comprendre ce que dit ou montre quelqu'un est une façon d'apprendre, même s'il y a d'autres conditions qui doivent être remplies afin d'optimiser « une compréhension significative et des réactions d'apprentissage » (Guidoni, 2004 : 224). Parmi les facteurs pouvant les faciliter figure la possibilité de discuter avec des pairs, ou avec un enseignant agissant comme un médiateur rendant explicite et discutant les différents points de vue en compétition. » (Viennot, 2009) (notre traduction)¹⁷

¹⁷ « In order to facilitate conceptual learning, should we rely only on activities framed as guided problem-solving ? [...] Of course, it is possible to present a classical episode of teaching as a preparation phase, for an ulterior problem solving activity. But it might be more useful simply to accept that 'telling' is a legitimate and necessary component of teaching, given that "to teach is to act on other minds which act in

Une réflexion sur la manière de susciter des questions et interactions chez les élèves vis-à-vis de la progression logique proposée est ainsi considérée d'une importance majeure. De même, la conception d'activités visant à favoriser l'appropriation de la logique de la reconstruction proposée est essentielle.

Une séquence d'enseignement complète a été développée sur la base de cette approche, d'une durée d'environ 6 heures, alternant des parties de cours (4h) et des activités (2h en tout). La synthèse de la partie cours est disponible dans (Maron, 2015, p.353). Les activités, en plus de faire travailler les élèves sur le cours, ont été conçues également pour avoir des premiers retours sur la séquence proposée, selon différents axes définis par les questions de recherche suivantes :

- Dans quelle mesure la séquence permet-elle aux élèves d'identifier les arguments justifiant les aspects non évidents pour le sens commun ?
- Dans quelle mesure la logique globale de la séquence est-elle compréhensible pour les élèves ? Y a-t-il des éléments posant particulièrement problème dans la progression présentée ?
- Comment les élèves perçoivent-ils l'approche proposée, en particulier relativement à leur expérience passée des cours de physique ?

Deux premières expérimentations de la séquence ont eu lieu, avec des étudiants de première année de physique à l'université (17) et des élèves de première et terminale S (13). Une description des activités conçues, de la méthodologie d'évaluation, et des premiers résultats obtenus est disponible extensivement dans (Maron, 2015).

Bibliographie

- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance*. Paris: J. Vrin.
- BALDY É. & AUBERT F. (2005). Étude de l'apprentissage du phénomène physique de la chute des corps en classe de 3ème française. *Didaskalia*, n° 27, p. 110-131.
- BLISS J. & OGBORN J. (1993). A common-sense theory of motion : issues of theory and methodology examined through a pilot study. In Black, P.J., & Lucas, A.M. *Children's informal ideas in science*, London & New York : Routledge, p. 120-133.
- CHAVE T. (2012). Newton : le mouvement circulaire, l'approximation circulaire et la loi de la gravitation. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 106, n° 945, p. 663-683.
- COELHO R. L. (2007). The law of inertia: how understanding its history can improve physics teaching. *Science & Education*, vol. 16, n° 9, p. 955-974.

response" (Ogborn et al. 1996 : 141). Trying to make sense of what is said or shown by someone else is a way to learn, even if there are other conditions to be fulfilled simultaneously in order to optimize "(...) a 'widely resonant understanding and learning re-actions" (Guidoni, 2004 : 224). Among the facilitating factors is the possibility of discussing with peers and/or with a teacher acting as mediator, thus making explicit and discussing views in competition. »

- COELHO R. L. (2010). On the concept of force: How understanding its history can improve physics teaching. *Science & Education*, vol. 19, n° 1, p. 91-113.
- COELHO R. L. (2011). Conceptual problems in the foundations of mechanics. *Science & Education*, p. 1-20.
- DEVELAKI M. (2012). Integrating Scientific Methods and Knowledge into the Teaching of Newton's Theory of Gravitation: An Instructional Sequence for Teachers' and Students' Nature of Science Education. *Science & Education*, vol. 21, n° 6, p. 853-879.
- DUHEM P. (1906). *Études sur Léonard de Vinci*. Paris : Éditions des Archives contemporaines.
- DUHEM P. (1913). *Le système du monde : histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*. Paris : Hermann.
- GIANCOLI D. C. (1993). *Physique générale : Mécanique et thermodynamique*. Bruxelles : De Boeck Supérieur.
- HALBWACHS F. (1979). Le poids et la masse : À propos des nouveaux programmes de sixième. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 73, n° 613, p. 869-873.
- HALLOUN I. A. & HESTENES D. (1985). Common sense concepts about motion. *American journal of physics*, vol. 53, n° 11, p. 1056-1065.
- HECHT E. (2003). *Physique*. Bruxelles : De Boeck Supérieur.
- HOSSON C. D. (2011). *L'histoire des sciences : un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique*. Université Paris-Diderot - Paris VII.
- JAMMER M. (1957). *Concepts of Force : a study in the foundations of dynamics*. Cambridge, Massachusetts : Harvard University Press.
- KAVANAGH C. & SNEIDER C. (2006a). Learning about Gravity I. Free Fall: A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, vol. 5, n° 2, p. 21-52.
- KAVANAGH C. & SNEIDER C. (2006b). Learning about Gravity II. Trajectories and Orbits: A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, vol. 5, n° 2, p. 53-102.
- KLAASSEN K. (1995). *A problem-posing approach to teaching the topic of radioactivity (CD-b Press)*. Utrecht.
- KLAASSEN K. (2005). The Concept of Force as a Constitutive Element of Understanding the World. In K. Boersma, M. Goedhart, O. de Jong, & H. Eijkelhof (Éd.), *Research and the Quality of Science Education* (p. 447-457). Dordrecht : Springer Netherlands.
- KOYRÉ A. (1968). *Études newtoniennes*. Paris: Gallimard.
- LAUNER D. (2014). Impesanteur et gravité, le casse-tête pédagogique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 108, n° 963, p. 591-617.
- LIJNSE P. (1994). La recherche-développement une voie vers une « structure didactique » de la physique empiriquement fondée. *Didaskalia*, vol. 1, n° 3, p. 93-108.

- LIJNSE P. & KLAASSEN K. (2004). Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences? *International Journal of Science Education*, vol. 26, n° 5, p. 537-554.
- LINDEMANN É. (1999). *Mécanique : une introduction par l'histoire de l'astronomie*. Bruxelles: De Boeck Université.
- MAURINES L. & BEAUFILS D. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. RDST. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, n° 3, p. 271-305.
- MEN. (2008). Programmes de collège. In *Bulletin officiel du ministère de l'Éducation nationale*.
- MEN. (2010). Programme de physique-chimie en classe de seconde générale et technologique. In *Bulletin officiel du ministère de l'Éducation nationale*.
- MINSTRELL J. (1982). Explaining the "at rest" condition of an object. *The Physics Teacher*, vol. 20, n° 1, p. 10.
- NEWTON I. (1687). *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Dunod.
- ORANGE C. (2002). Apprentissages scientifiques et problématisation. *Les sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, n° 1, p. 25-42.
- PENOT J. P. & TEYSSANDIER, P. (1983). De la pesanteur à la gravitation. *Espace Information, bulletin périodique d'information et d'éducation spatiales*, n° 25, p. 1-27.
- SEGUIN M., DESCHENEAU J. & TARDIF B. (2010). *Physique XXI : Tome A, Mécanique*. Bruxelles: De Boeck.
- TIBERGHIE A., VINCE J. & GAIDIOZ P. (2009). Design Based Research, Case of a teaching sequence on mechanics. *International Journal of Science Education*, vol. 31, n° 17, p. 2275- 2314.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique. La Part du sens commun*. De Boeck.
- VIGOUREUX J-M. (2003). *Les pommes de Newton*. Paris: Albin Michel.
- WEIL-BARAIS A. & LEMEIGNAN G. (1993). *Construire des concepts en physique : L'enseignement de la mécanique*. Vanves : Hachette.
- WILLIAMSON K. E. & WILLOUGHBY S. (2012). Student Understanding of Gravity in Introductory College Astronomy. *Astronomy Education Review*, vol. 11, n° 1, p. 10105.
- X (2015). *Une reconstruction conjointe de la dynamique et de la gravitation newtoniennes. Conception et évaluation d'une séquence d'enseignement inspirée par l'histoire et l'épistémologie de la physique*. Thèse de doctorat. Université Paris Diderot.
- X (2017). Une réflexion sur la notion d'explication au service de l'enseignement de la dynamique. In C. Delaunay, *Epistémologie et didactique*, Besançon : Presses Universitaires de Franche-Comté.

Annexes

A. Comparaison à d'autres présentations utilisant un cheminement historique

Parmi les très nombreux cours existants sur la théorie de la gravitation, plusieurs suivent - dans une certaine mesure - un cheminement historique. Sept présentations du sujet ont été analysées en détail, pour leur proximité avec les intentions revendiquées dans ce travail. Il s'agit des présentations de Penot et Teyssandier (1983), Giancoli (1993), Lindemann (1999), Hecht (2003), Lindemann (1999) Vigoureux (2003), Séguin, Descheneau et Tardif, (2010) et Develaki (2012). Ces cours manifestent également une volonté de reconstruction progressive et argumentée de la théorie.

Ces présentations de la théorie de la gravitation viennent de sources de différentes natures.

(Giancoli, 1993), (Hecht, 2003) et (Seguin, Descheneau, & Tardif, 2010) sont des manuels de physique américains (États unis et Canada) destinés à des étudiants de premier cycle universitaire.

(Lindemann, 1999) : « Mécanique : une introduction par l'histoire de l'astronomie » est un manuel basé sur un cours d'introduction à la physique pour des étudiants non scientifiques.

(Penot & Teyssandier, 1983) : « De la pesanteur à la gravitation », est un dossier paru dans « Espace information », le « bulletin périodique d'information et d'éducation spatiales » du CNES.

(Vigoureux, 2003) : « Les pommes de Newton » est un livre de vulgarisation scientifique et d'histoire des sciences.

(Develaki, 2012) : « Integrating Scientific Methods and Knowledge into the Teaching of Newton's Theory of Gravitation: An Instructional Sequence for Teachers' and Students' Nature of Science Education » est un article de recherche publié dans la revue *Science & Education*.

L'analyse détaillée de chacune de ces présentations ne sera pas exposée ici, pour aller directement à l'essentiel. Seuls seront présentés les aspects permettant de situer les choix faits dans l'approche proposée, qu'ils reprennent ou qu'ils soient en opposition avec ceux faits dans les différentes présentations ci-dessus.

A.1 - Comment une idée émerge VS comment une idée s'impose

Les présentations considérées abordent parfois la manière dont certaines idées sont apparues progressivement. Hecht (2003) par exemple aborde le lien entre magnétisme et gravité chez Gilbert (p.238), pour introduire une première idée du lien entre masse et pouvoir attractif. Il aborde également - de même que Penot et Teyssandier (1983), Giancoli (1993) et Develaki (2012) - différentes apparitions de la loi de décroissance en $1/r^2$, notamment chez Bouilliaud, ou chez Hooke, Halley ou Wren, justifiées par différents arguments, dont l'analogie avec la conservation de la puissance lumineuse pour une symétrie sphérique (la surface d'une sphère variant en r^2).

Ces considérations sur la genèse des idées, toujours très intéressantes du point de vue de l'histoire des sciences, n'ont cependant pas été retenues dans la présente proposition. Par souci de se restreindre au minimum nécessaire, seuls ont été gardés les éléments les plus décisifs, appuyés par l'expérience, et pouvant s'intégrer au raisonnement global. Dans la reconstruction, il s'agit donc plutôt de **présenter les arguments permettant à une idée de s'imposer, que de revenir à ce qui a fait émerger les premières occurrences de cette idée**. Par exemple, pour le cas de la décroissance en $1/r^2$, l'argument retenu et présenté est uniquement celui de Newton : la troisième loi de Kepler, $T^2 = C r^3$, contraignant l'expression générale de l'accélération centripète, $a = v^2/r$.

A.2 - L'usage du discours indirect

Dans quasiment chacune des présentations - hormis (Giancoli, 1993) et (Hecht, 2003) - on peut trouver un ou plusieurs éléments du raisonnement qui apparaissent uniquement sur le mode du discours indirect, c'est-à-dire qui sont uniquement mentionnés, plutôt que traités explicitement. Par exemple dans (Lindemann, 1999), si un argument est développé pour justifier la dépendance en $1/r^2$ (bien qu'incomplet), la dépendance en la masse est déclarée sans s'arrêter sur le raisonnement qui y mène.

« [Newton] *se rend compte* qu'il n'y a pas que la distance r qui intervient, mais que les masses jouent également un rôle. » (Lindemann, 1999, p.161) (c'est nous qui soulignons)

De même dans (Penot & Teyssandier, 1983), bien qu'une partie soit traitée formellement, le passage crucial concernant la comparaison entre la Lune et la gravité terrestre reste sur le mode de la description sans être traité explicitement.

« Et pour vérifier son hypothèse, Newton effectue le fameux test de la Lune. C'est-à-dire qu'il cherche à évaluer la force attractive que la Terre exerce sur la Lune dont l'effet est d'écartier celle-ci de la trajectoire rectiligne qu'elle aurait (dans un repère galiléen) si le mouvement était purement inertiel. Connue au niveau de la Terre, calculable au niveau de l'orbite lunaire, l'intensité de cette force peut-elle rendre compte de cet écart ? *Les résultats obtenus à partir de 1684 par Newton le prouvent de façon irréfutable.* » (Penot & Teyssandier, 1983, p.12) (c'est nous qui soulignons)

La volonté de reconstruire la théorie en faisant admettre le minimum de choses incite à expliciter chaque étape du raisonnement, plutôt que de décrire uniquement le rôle d'une étape, sans la formuler explicitement.

A.3 - Le poids identifié dès le départ à la force gravitationnelle

Dans la plupart des présentations analysées (Hecht, 2003), (Seguin, Descheneau, & Tardif, 2010), (Lindemann, 1999), (Giancoli, 1993), (Penot & Teyssandier, 1983), la force de poids sur Terre est directement définie par la force gravitationnelle universelle, avant d'exposer le cheminement conduisant à cette unification. Par exemple chez (Penot & Teyssandier, 1983), dès l'introduction du passage sur Newton.

« Et la chute des corps pesants ? C'est encore une manifestation de cette tendance de la matière à s'agglomérer : la Terre attire fortement les objets à son voisinage. Autrement dit, la pesanteur terrestre est un cas particulier de la gravitation universelle. » (Penot & Teyssandier, 1983, p.6)

Ou encore dans (Seguin, Descheneau, & Tardif, 2010) :

« La force de gravitation subie par les objets près de la surface de la Terre est une manifestation de la loi de la gravitation universelle » (Seguin, 2010, p.197)

Un tel type de présentation, exposant la conclusion dès l'introduction, peut prêter à confusion vis-à-vis du statut des éléments allant être utilisés dans le raisonnement. En particulier chez (Hecht, 2003), la loi de la gravitation universelle est présentée au premier abord, comme rendant compte du poids sur Terre et du mouvement des astres. Pour déterminer ensuite l'expression quantitative de la force de gravitation, il rassemble alors les caractéristiques de la force s'exerçant sur la Lune - la dépendance en $1/r^2$, obtenue par la comparaison des accélérations - et la dépendance en la masse via le poids.

« Comme le poids d'un objet est la force de gravité qui l'attire vers le centre de la terre, ($F_p = F_G$), nous en déduisons que $F_G \propto m$ » (Hecht, 2003, p.161)

Ce raisonnement, à l'apparence constructive, laisse au final implicite la logique permettant de conclure que les accélérations centripètes des astres et l'accélération de pesanteur sur Terre relèvent d'un même type de phénomène. C'est en présupposant l'unité que les caractéristiques de ce phénomène sont déduites, mais le cheminement menant à cette unité est absent. Plus précisément, il n'y a pas d'argument explicite pour justifier que les accélérations centripètes des planètes décroissent en $1/r^2$, qu'elles soient de même nature que celle de la Lune, et finalement de même nature que l'accélération de pesanteur. Le lien entre la force de gravité et le mouvement des planètes apparaît seulement plus tard, dans un ordre inverse de la logique présentée par Newton, comme on va le voir dans paragraphe suivant.

Afin d'éviter un tel risque d'inversion de statut entre les arguments et la conclusion, **la notion de poids a été au départ restreinte à la force associée à la chute, sans anticiper de lien avec la notion de force gravitationnelle. Cette appellation n'apparaîtra qu'à la fin du raisonnement, comme désignant la généralisation du poids**, après avoir relié explicitement les accélérations centripètes des astres et l'accélération de pesanteur.

A.4 - La “démonstration” des lois de Kepler, ou le cheminement à l'envers

Dans la présentation de (Hecht, 2003), de même que chez (Giancoli, 1993) et (Lindemann, 1999), l'argument pour la dépendance en $1/r^2$ dans la loi de la gravitation universelle est justifié uniquement par l'étude du cas de la Lune. Le lien avec le mouvement des planètes se fait après l'établissement de la loi, au moment de la “démonstration” des lois de Kepler. Par exemple chez (Hecht, 2003), cela a lieu p.253, soit 13 pages après la fin du cheminement amenant de l'expression de la force de gravitation, après avoir traité diverses autres applications. En particulier, le calcul classique consiste à utiliser l'expression de la force de gravitationnelle, avec l'accélération centripète d'un mouvement circulaire uniforme ($a = v^2/r$), pour obtenir la troisième loi de Kepler.

Deux problèmes se posent avec une telle démarche. D'une part, la justification de la loi en $1/r^2$ pour la force de gravitation est insuffisante, comme on l'a vu dans le paragraphe précédent. D'autre part, cela revient à inverser l'ordre du cheminement permettant la justification de l'expression de la gravitation, dont un élément clé est précisément la troisième loi de Kepler. Il est ainsi logique et de peu d'intérêt de constater que la conclusion finale, s'appuyant sur cet élément, permette de le retrouver.

L'approche proposée reste sur ce point fidèle à l'ordre présenté par Newton, c'est-à-dire l'utilisation de la troisième loi de Kepler en tant qu'élément dans la construction de la force de la gravitation, plutôt que comme une conséquence logique de celle-ci. C'est également le choix de Seguin, Descheneau et Tardif (2010) et Develaki (2012), qui est également évoqué par Vigoureux (2003) et Penot et Teyssandier (1983) (mais uniquement au discours indirect).

A.5 - L'absence de discussion de la généralisation finale

Dans la présentation de Vigoureux (2003), celui-ci insiste sur la dernière étape du raisonnement, consistant à extrapoler la force de gravitation - obtenue uniquement pour les astres et les objets sur Terre - à une attraction s'exerçant entre tous corps deux à deux.

« Cette généralisation de la loi de l'attraction à tous les objets quels qu'ils soient dans l'univers constitue une induction d'une extraordinaire audace : d'abord, parce qu'elle n'est pas du tout évidente sur Terre, où rien ne prouve, *a priori*, qu'une pomme attire une autre pomme ; ensuite, parce qu'elle n'apparaît pas non plus évidente dans le ciel où rien ne montre qu'une étoile attire une autre étoile. » (Vigoureux, 2003, p.271)

Il s'agit de la proposition VII du livre trois de Newton, pour laquelle Newton prend soin d'anticiper la critique qu'une telle attraction entre deux corps terrestres n'ait jamais été observée dans l'expérience courante.

Cette étape est la plupart du temps omise dans les présentations de la théorie de la gravitation. Parmi celles considérées ici - (Hecht, 2003), (Seguin, 2010), (Lindemann, 1999), (Giancoli, 1993), (Penot & Teyssandier, 1983), (Develaki, 2012) - aucune n'aborde explicitement cette dernière phase de généralisation, pourtant cruciale pour

aboutir au résultat final. Elle est parfois sous-entendue, comme par exemple dans (Develaki, 2012), où il est rappelé que le raisonnement basé sur les faits expérimentaux ne suffit pas pour aller jusqu'au résultat final, qui garde alors le statut d'hypothèse.

La discussion de la légitimité de l'extrapolation de la force gravitationnelle à tous les corps est un point abordé dans l'approche proposée. Elle constitue un passage nécessaire entre le point d'aboutissement du cheminement présenté (l'expression établie à partir de l'analyse du mouvement des astres et de la chute sur Terre), et la version finale de la loi de la gravitation universelle, s'appliquant pour tous les corps.

A.6 - Le statut des aspects épistémologiques

La séquence proposée par Develaki (2012) est orientée vers la mise en avant d'aspects de la nature de la science (« NOS »), mis en contexte avec la théorie de la gravitation. Plusieurs points ne sont donc pas développés en détail (comme par exemple le rôle des masses dans l'expression quantitative). La séquence conçue est censée s'ajouter à un enseignement traditionnel de la théorie, traitant plus en détail la partie conceptuelle et mathématique.

L'approche développée ici est considérée comme se substituant à l'enseignement traditionnel, avec le but de favoriser la compréhension des concepts en jeu. Les aspects épistémologiques ne sont pas traités explicitement, en ajoutant un vocabulaire particulier pour les identifier. Ils sont supposés apparaître globalement par la manière d'exposer le contenu. La présentation d'un cheminement de construction incarne l'idée qu'une connaissance soit le résultat d'une construction, et le fait que la théorie construite implique une unification témoigne du rôle d'unification des théories physiques.