

La mécanique newtonienne et son aura

Ce travail de thèse propose une manière d'aborder la dynamique et la gravitation newtonienne, pour l'enseignement secondaire ou le début de l'enseignement supérieur.

Une tradition académique consiste à introduire son travail en justifiant la valeur de ses enjeux. C'est l'occasion d'identifier ce qui a motivé la recherche effectuée, ainsi que ses orientations.

La mécanique newtonienne est fréquemment citée comme l'un des plus grands succès de l'histoire de la physique. Par sa conceptualisation du mouvement et des forces, elle permet la description et prédiction d'une grande variété de phénomènes par un petit nombre de lois. Son pouvoir prédictif est immense, comme en témoignent la généralité, l'efficacité et la robustesse de ses applications, de la construction de ponts à l'envoi d'astronautes dans l'espace.

La théorie de la gravitation quant à elle, représente la première des grandes unifications de la physique théorique. D'un point de vue historique, elle établit un lien explicite entre la chute des corps sur Terre et les mouvements de révolution des astres, pour la première fois dans l'évolution des idées. Ce lien est d'autant plus symbolique qu'il consacre l'idée même « d'*Univers* », en tant que monde *unifié* plutôt que séparé en zones distinctes. Cet accomplissement justifie l'impulsion pour la recherche de lois physiques à la fois universelles - valables partout - et unifiées, reliées entre elles par des principes de plus en plus généraux.

Cette révolution dans la façon de penser le monde, ainsi que la puissance et la simplicité

de la dynamique, sont à l'origine des premières émotions scientifiques de nombreux physiciens, ayant parfois contribué à leur vocation.

Mettre en évidence ces aspects profonds de la théorie newtonienne peut être considéré comme un des objectifs majeur de son enseignement. Son importance reste à comparer à celle d'autres enjeux - comme celui de l'efficacité opératoire - dont les priorités sont en définitive une question de choix, revenant pour une part importante aux décideurs politiques. La mise en avant des aspects fondamentaux de la mécanique est en tout cas un objectif partagé et argumenté par de nombreux chercheurs. Certains vont même jusqu'à étendre son importance pour une familiarisation avec la science d'une manière générale, avec des articles au titre aussi évocateur que « *Mechanics as the Logical Point of Entry for the Enculturation into Scientific Thinking* » :

« Force is well defined by a set of axioms that not only structures mechanics but science in general. [...] The central point of this article is that if we taught mechanics as the forum to discuss the nature of mechanics itself, then we would serve to better secure a learner's understanding and appreciation of both science and mathematics. » (Carson and Rowlands, 2005)

Ce point de vue était également exprimé par Galili en 1995, justifiant la place de la mécanique comme introduction à l'étude de la physique.

« A huge edifice, which today we call physics, consists of various domains. The importance of mechanics is more than just being one of these domains. It determines the 'rules of the game', defines the main tools in physics, presents the most imiversal laws of nature. It actually describes the method of the discipline of physics which is then applied in all other domains in this discipline. This is why mechanics always opens any physics curriculum. » (Galili, 1995b)

La théorie newtonienne est en effet la première des grandes théories physiques à laquelle les élèves sont exposés, allant servir plus tard de référence pour la construction de l'électromagnétisme, de la relativité ou encore de la mécanique quantique. La quantité et la nouveauté des concepts fondamentaux apparaissant dans l'introduction à la mécanique newtonienne lui donnent ainsi un statut particulier vis à vis de l'apprentissage de la physique. L'importance de cette introduction est soulignée notamment par les auteurs du célèbre cours de Berkeley dans leur manuel de mécanique :

« La première année de physique à l'université est de loin la plus difficile. Au cours de la première année, on développe beaucoup plus d'idées, de concepts et de méthodes nouveaux que dans les cours de licence avancés

ou de troisième cycle. Un étudiant qui comprend clairement la physique de base développée dans ce premier volume, même s'il n'est pas encore capable de l'appliquer facilement à des situations complexes, a mis derrière lui la plupart des vraies difficultés pour apprendre la physique. » (Kittel et al., 2001)

Ces difficultés dans l'apprentissage de la mécanique, les enseignants y font face régulièrement avec leurs élèves. Les régularités ressenties dans leurs erreurs et incompréhensions sont à l'origine de très nombreuses recherches en didactique, qui tentent de les identifier et de les interpréter, dans le but de mieux y remédier.

1.2 Un cheminement fondateur

1.2.1 Une insatisfaction comme impulsion initiale

Une des spécificités centrales de l'approche proposée résulte du cheminement de ma réflexion sur le sujet, et en particulier de son point de départ. J'ai commencé ce travail avec l'intention de m'intéresser essentiellement à l'enseignement de la gravitation newtonienne.

Ce choix avait pour origine subjective le souvenir révolté du contraste entre l'image donnée de cette théorie dans l'enseignement secondaire, et sa découverte par d'autres moyens extrascolaires. Comment un sujet aussi riche et fascinant pouvait-il être restitué de manière aussi appauvrie et fade ? Le temps a relativisé progressivement cette indignation par l'ouverture à d'autres expériences que la mienne, mais une certaine rancune pédagogique est tout de même restée enfouie : on m'avait menti par omission.

Après quelques années captivé par l'étude de la physique, cet intérêt c'est finalement éloigné de lui-même, laissant de l'espace à d'autres sensibilités. Plus tard, la découverte d'un champ de recherche sur l'enseignement raviva le souvenir d'anciennes réflexions suscitées par ma déception lycéenne. Ce terrain pouvait se prêter à faire germer les idées que mon insatisfaction avait engendrées. M'engageant dans cette voie, je découvris alors que j'avais beaucoup à apprendre sur ce genre de culture là.

La familiarisation avec les recherches en didactique m'a permis de réaliser l'étendue et la nature des difficultés des élèves, dans l'apprentissage des concepts associés à la gravité. J'y ai découvert également des pistes pour interpréter et appréhender les questions

associées, parmi lesquelles j'ai pu situer ma représentation du problème, l'ouvrir et l'enrichir.

1.2.2 Une approche de la gravitation

Tandis que l'on attribue au champ de la *pédagogie* les préoccupations d'ordre général pour les méthodes d'enseignement, une réflexion sur l'enseignement d'un contenu particulier, prenant en compte ses spécificités et les difficultés qui lui sont propres, est académiquement rattachée à l'appellation de *didactique*¹. La didactique de la physique, et plus précisément la réflexion didactique sur un contenu physique donné, exige ainsi une compréhension en profondeur de celui-ci, avant de pouvoir dire quoi que ce soit sur son enseignement ou son apprentissage.

Pour aborder le thème de la gravitation, il me fallait donc approfondir son étude, en particulier par une analyse de son histoire, et des questions épistémologiques associées. Cette imprégnation, ainsi que les idées initiales à l'origine de cette entreprise, ont particulièrement orienté la lecture des recherches sur les difficultés des élèves. La première réflexion articulant ces différents éléments a conduit à la mise en relation des trois points de vue suivants.

- Au niveau des élèves d'une part, de nombreuses idées a priori à propos de la gravité peuvent être reliées à la séparation dans la façon de considérer les phénomènes sur Terre et dans l'espace. Il s'agit par exemple des conceptions comme « la gravité nécessite la présence de l'air », « il n'y a pas de gravité dans l'espace » ou encore « les objets en orbite n'ont pas de poids » (Kavanagh and Sneider, 2006a,b).
- Or d'un point de vue historique, il se trouve que cette question des liens entre phénomènes terrestres et célestes est également au cœur de l'évolution des idées ayant mené à la théorie de la gravitation newtonienne. L'apport fondamental de celle-ci est en effet de permettre une description unifiée de la chute des corps et de la révolution des planètes, après presque deux mille ans de distinction entre monde terrestre et monde céleste.

1. La distinction entre les deux champs est par exemple bien exprimée dans cette formulation de Klaassen (1995) : « I do not focus on interpersonal teacher behaviour that is appropriate in order to create and maintain a classroom atmosphere that pupils appreciate as positive, but on content-oriented ways of planning and guiding that are appropriate in order to create and maintain a learning process that pupils appreciate as an internally coherent one with a certain direction, and in whose development with respect to content they take an active interest. »

- Au niveau institutionnel, d'une manière générale, les programmes et les manuels se focalisent surtout sur la formule mathématique quantifiant la force de gravitation. L'idée d'unification de la théorie est implicitement contenue dans le caractère universel de cette force. Cependant cette caractéristique étant posée comme un fait à admettre, il n'y a pas de stratégie pour aider à l'assimilation de cette idée, alors qu'elle semble justement liée à une difficulté majeure chez les élèves. D'autre part, la formule de la force de gravitation est généralement posée sans justification, c'est-à-dire également à admettre, par argument d'autorité du savoir scientifique établi.

A partir de ces constats et critiques, la proposition d'approche initiale se donnait le projet de prendre en compte les difficultés associées à la distinction entre les phénomènes sur Terre et dans l'espace, en s'inspirant de l'évolution des idées ayant mené à leur unification. La séquence d'enseignement basée sur cette approche était ainsi imaginé comme un cheminement heuristique de reconstruction de la théorie de la gravitation. La possibilité de reconstruire progressivement l'expression de la force gravitationnelle permet ainsi d'éviter l'argument d'autorité du savoir savant au profit de l'image d'un savoir construit.

C'est sur la base de ce projet que s'est développé mon travail de thèse, qui s'est élargi avec l'accroissement de ma culture en didactique, philosophie et histoire des sciences, et qui s'est reconfiguré au fil de nouvelles questions rencontrées en avançant dans cette direction.

1.2.3 Le rôle de la dynamique

Parmi ces reconfigurations, le statut des lois du mouvement dans la construction de la théorie de la gravitation s'est révélé un point essentiel. Cela peut être d'un certain point de vue évident : pour pouvoir arriver à la « force de gravitation », il faut déjà comprendre suffisamment comment est construit le concept physique de « force » et sa relation au mouvement.

Cependant il est possible d'éluder la question lorsqu'on fait le choix (implicite et souvent inconscient) de concevoir la notion de force indépendamment des lois du mouvement. La majorité des présentations de la mécanique expose le sujet de cette façon, ce qui est compatible avec une présentation de la gravitation à son stade final, si l'on ne se soucie du cheminement logique permettant d'y aboutir.

Lorsque l'on s'intéresse à ce cheminement, le lien entre dynamique et gravitation ap-

paraît comme inévitable. D'un point de vue historique, Max Jammer souligne même le rapport d'intentionnalité entre les deux, dans son livre de référence sur le sujet : *Concepts of Force : a study in the foundations of dynamics* (Jammer, 1957) :

« 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)

Ce lien entre dynamique et gravitation sera par la suite également au cœur de la relativité générale, comme le résume la célèbre phrase de John Wheeler :

« Spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve. »(Wheeler and Ford, 2000, p.235)

Pour en revenir à l'approche proposée de la gravitation, s'il s'agit d'aborder l'unification entre phénomènes terrestres et célestes, il faut commencer par poser le contexte antérieur à Newton, où monde terrestre et monde céleste étaient dissociés. Or dans ce contexte, la chute libre sur Terre et le mouvement de révolution des astres sont considérés comme des mouvements naturels, ayant lieu d'eux-mêmes sans l'intervention de forces. Ainsi avant de comprendre pourquoi il pourrait s'agir d'une même force dans les deux cas, il faut d'abord comprendre comment on en vient à interpréter ces mouvements en termes de force. Et cela est entièrement lié au cadre de la dynamique de Newton.

Ces considérations, ainsi que d'autres éléments qui seront développés plus loin, témoignent du fait que la présentation de la théorie de la gravitation est étroitement dépendante de la façon dont sont introduits les concepts et lois fondamentales de la dynamique. Ce fait en tête, l'étude didactique devait donc s'ouvrir au champ de l'enseignement et de l'apprentissage de la dynamique. Au fur et à mesure de l'approfondissement de la littérature particulièrement vaste sur ce sujet, et gardant à l'esprit les éléments de réflexion sur la théorie de la gravitation, l'enjeu initial s'est petit à petit déplacé.

Il s'agissait au départ essentiellement de concevoir une introduction au concept de force, adaptée à la reconstruction envisagée de la loi de la gravitation. Puis de la réflexion sur les problèmes d'apprentissage de la dynamique, a fini par émerger l'idée que, si aborder la dynamique était nécessaire à la présentation de la gravitation, l'étude du cas de la gravitation pourrait être profitable à la présentation de la dynamique, relativement aux importantes difficultés vis à vis des forces et du mouvement.

L'aspect central jugé potentiellement intéressant était celui de l'évolution de l'interprétation du phénomène de chute libre au cours de l'histoire des idées, en parallèle de la notion de mouvement naturel. En mettant en évidence le caractère conventionnel de la définition du concept de force, via son évolution historique relativement à la chute libre, il s'agissait d'appuyer la nécessité de sa construction explicite dans la physique newtonienne. L'explicitation de cette reconstruction avait pour but de favoriser la distinction entre le concept construit et les idées du sens commun sur les forces et le mouvement, dont la coexistence et l'amalgame est jugé comme une source majeure des difficultés d'apprentissage de la dynamique.

Au final, l'approche proposée de la dynamique est à la fois compatible avec et indépendante de celle proposée pour la gravitation. L'approche initiale - basée sur le cheminement menant à l'unification - nécessite quant à elle une adaptation complète pour intégrer la manière dont est formulée la dynamique.

Deux approches résultent donc de cette recherche :

- une approche de la dynamique, potentiellement autonome,
- une approche de la gravitation, intégrant et s'appuyant sur celle de la dynamique.

1.3 Problématique générale et méthodologie

Les deux approches développées, ainsi que leur justification centrale, peuvent être résumées dans le tableau suivant.

	Gravitation	Dynamique
Stratégie d'approche globale	L'utilisation d'un cheminement historique aboutissant à l'unification entre phénomènes terrestres et célestes.	L'utilisation de la notion de mouvement naturel via l'interprétation de la chute libre pour définir le concept newtonien de force.
Justification centrale	Pour tenir compte des difficultés relatives à la séparation entre la description des phénomènes sur Terre et dans l'espace.	Pour tenir compte du problème de la coexistence et de l'amalgame entre sens commun et sens physique de la notion de force.

Ces choix de stratégie d'approche reposent sur une réflexion théorique articulant des interprétations de résultats de la recherche en didactique sur les difficultés d'appren-

tissage, et une analyse historique et épistémologique du contenu en jeu, dont certaines grandes lignes ont été esquissées dans la section précédente.

Il s'agit, à partir de là, de questionner l'efficacité de cette approche globale de la théorie newtonienne - relativement à des enjeux précis et explicites - en passant par le développement d'une séquence d'enseignement basée sur ces idées, et son expérimentation avec des élèves.

La question de recherche générale de ce travail peut alors être formulée de manière assez simple ainsi : dans quelle mesure ces choix de stratégie d'approche pourraient favoriser la compréhension de la théorie newtonienne, relativement aux difficultés concernées ?

Pour chacun de ces choix, une explicitation précise des problèmes d'apprentissage en jeu et du type de compréhension recherché est nécessaire, ainsi qu'une explicitation de la raison pour laquelle tel choix pourrait être productif, relativement à telles difficultés et tels objectifs précis.

1.4 Contenu de la thèse

La conception d'une séquence d'enseignement s'appuie nécessairement sur une certaine vision de l'apprentissage et de l'enseignement, qu'il s'agit d'explicitier et de situer au préalable. Elle met également en jeu certains points de vue épistémologiques sur la physique en général. L'ensemble de ces positionnements didactiques et épistémologiques généraux feront l'objet du **chapitre 2**.

Le **chapitre 3** portera sur l'approche proposée de la dynamique. Après une revue des difficultés des élèves, les problèmes d'apprentissage considérés en particulier dans ce travail seront présentés. Une analyse de la théorie newtonienne, en particulier des problèmes conceptuels de ses fondements, mènera ensuite au développement et à la justification des solutions proposées.

L'approche de la gravitation sera présentée dans le **chapitre 4**, selon une structure similaire. Vis à vis de l'analyse de contenu, si l'éclairage choisi pour la dynamique est principalement épistémologique, celui utilisé pour la gravitation sera plutôt historique, pour des raisons qui seront explicitées.

Les deux approches ont donné lieu à une séquence conjointe, sur la dynamique et la gravitation newtonienne. Les questions de recherche et la méthodologie concernant l'expérimentation de cette séquence seront l'objet du **chapitre 5**. Enfin, les résultats

concernant l'approche de la dynamique seront présentés et discutés dans le **chapitre 6**, et ceux concernant l'approche de la gravitation dans le **chapitre 7**.

Chapitre 2

Positionnements didactiques et épistémologiques généraux

L'objectif est de concevoir et évaluer une séquence d'enseignement, avec comme points de départ les orientations présentées dans le chapitre précédent. Dans cette entreprise de conception, la recommandation suivante de Lijnse et Klaassen est entièrement partagée :

« In general, the design of teaching–learning sequences should start by making explicit and justifying one's view on teaching and learning, on science and on science education (Millar and Osborne, 1999). The reason for this is, of course, that neither education nor science are value-free processes and, thus, that we can only communicate and discuss our research results properly if they are placed within and judged from the value-laden context in which they are obtained. These value-laden choices are not only reflected in the goals that one wants to reach, but also in the ways they are aimed at. »
(Lijnse and Klaassen, 2004)

Ce chapitre est ainsi consacré à l'explicitation de différents points de vue généraux sur l'enseignement et l'apprentissage d'une part, en particulier le rapport au sens commun, et sur des considérations épistémologiques sous-jacentes à l'ensemble de ce travail.

Ayant pour but de se situer relativement à différents courants de la recherche sur ces points, il sera particulièrement riche en citations, parfois longues, lorsqu'il a été jugé que la formulation originale était suffisamment pertinente pour ne pas être paraphrasée.