

Comment justifier la notion d'attraction terrestre ? Apports épistémologiques d'une reconstruction conjointe de la dynamique et de la gravitation newtoniennes.

Maron, Valentin⁽¹⁾, Colin, Philippe⁽¹⁾⁽²⁾

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

⁽²⁾Université d'Artois - France

Résumé : Cette communication présente les aspects épistémologiques d'une approche d'enseignement de la dynamique et de la gravitation. L'une des intentions centrales est d'introduire les concepts et formules de la théorie newtonienne de manière justifiée, via un cheminement progressif permettant de les reconstruire. En particulier l'un des enjeux a été la justification de la notion d'attraction terrestre, relativement à l'idée commune que la chute soit un mouvement ayant lieu de lui-même. La considération des différentes interprétations de la chute libre dans l'histoire des idées – conçue comme un mouvement naturel pendant l'Antiquité – permet une introduction au concept newtonien de force, comme dépendant d'un autre mouvement naturel de référence, justifiant son lien à l'accélération. D'autre part, une explicitation du raisonnement menant à relier la révolution des planètes, de la Lune, et la chute sur Terre permet de justifier que la force associée à la chute libre soit liée à la présence de la Terre, et ainsi l'idée d'attraction terrestre. La reconstruction du cheminement menant à relier ces différents phénomènes permet également une justification de la formule quantitative de la force de gravitation, ainsi que la mise en avant du rôle d'unification d'une théorie physique. Une séquence d'enseignement a été développée à partir de cette approche et expérimentée avec des élèves de lycée et des étudiants en première année de physique à l'université. Un des résultats obtenus est le fort intérêt manifesté pour la démarche de justification.

Mots-clés : physique ; mécanique ; séquence d'enseignement ; épistémologie ; histoire des sciences

Contexte de la recherche

Cette communication présente les aspects épistémologiques d'une approche d'enseignement de la dynamique et de la gravitation, dont le développement et l'expérimentation sont exposés exhaustivement dans (Maron, 2015). L'une des intentions centrales de ce travail est d'introduire les concepts et formules de la théorie newtonienne de manière justifiée, via un cheminement progressif permettant de les reconstruire. Il s'agit de la volonté d'éviter autant que possible que la formulation du contenu implique d'imposer certaines notions par argument d'autorité.

Problèmes considérés

La majorité des approches existantes de la dynamique introduisent le concept de force comme ayant un sens autonome, avant d'apparaître dans les lois du mouvement (Weil-Barais et Lemeignan, 1993; Viennot, 1996; Tiberghien *et al.*, 2009). Ce sens 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 présentation a pour conséquence que la force associée à la chute, le poids – omniprésent dans l'étude de la dynamique – est identifié dès son introduction à une force *exercée par la Terre*. Or même si les élèves peuvent facilement retenir cette idée, celle-ci

reste très éloignée du sens commun. Une conception se retrouvant du primaire jusqu'à l'université consiste en effet à considérer que la chute soit un mouvement ayant lieu de lui-même, ne nécessitant pas de force (Halloun et Hestenes, 1985; Bliss et Ogborn, 1993). De plus, même lorsque l'idée d'une force associée à la chute est acceptée, il n'est pas évident pour les élèves que celle-ci soit associée à la présence de la Terre.

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

Une idée d'élèves répandue consiste notamment à penser que la chute serait liée à la présence de l'air, à la pression atmosphérique. Cela est en effet cohérent avec le fait que dans l'espace, les astronautes « flottent ». La chute ne semble ainsi avoir lieu que sur Terre, et pourrait donc être due aux circonstances de la surface terrestre, comme la présence de l'atmosphère (Kavanagh et Sneider, 2006). L'objectif est ainsi le suivant : dans la mesure où la notion d'attraction terrestre n'est pas une évidence pour les élèves, comment la reconstruire explicitement, de manière à la légitimer ?

Les idées centrales de l'approche proposée

La stratégie proposée pour justifier la notion d'attraction terrestre consiste à introduire conjointement la *dynamique* et la *gravitation* newtonienne, de façon à expliciter ce qui permet d'interpréter la chute libre via une *force exercée par la Terre*.

Dynamique

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 (Coelho, 2010; Klaassen, 2005). 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 naturel de référence*, et la première loi de Newton est alors présentée comme la *redéfinition du mouvement naturel 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. Ce nouveau sens justifie ainsi l'interprétation du mouvement de chute en termes de force, du fait de son caractère accéléré.

Une réflexion sur le rôle de mise en relation d'une explication mène ensuite à définir le concept de force comme *caractérisant les circonstances physiques associées à l'accélération*. L'utilisation de la notion de *circonstances physiques* présente plusieurs intérêts qui ne seront pas développés ici, elle permet en particulier une définition non circulaire d'un référentiel galiléen (voir (Maron, 2015, p.89 et p.107), ou (Maron, 2016) pour une présentation synthétique de cette formulation de la dynamique). Basé sur cette définition qualitative du concept de force, un raisonnement permet ensuite d'amener la deuxième loi de Newton comme la définition quantitative de la grandeur force, et la troisième loi comme une reformulation de la conservation de la quantité de mouvement.

Gravitation

La notion de force étant ainsi introduite, il s'agit alors 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. Il s'agit en premier lieu d'obtenir la dépendance de l'accélération des planètes à leur distance au soleil (en $1/r^2$), à partir de la troisième loi de Kepler. Cette dépendance peut être étendue aux satellites de Jupiter, pour lesquels la relation de Kepler est également valable. Il est ensuite possible de calculer la valeur *qu'aurait* l'accélération centripète de la Lune en supposant que celle-ci varie également en $1/r^2$, par analogie avec les satellites de Jupiter. On obtient alors la valeur de l'accélération de chute $9,8 \text{ m/s}^2$, ce qui met en évidence que les différentes accélérations considérées pourraient finalement être différents cas d'un même type de phénomène. Autrement dit, elles pourraient toutes être associées aux mêmes types de circonstances physiques.

La caractérisation des circonstances pouvant être associées aux différentes accélérations amène à reconstruire la formule de la force associée : $F = G m_A m_B / r^2$, où la présence de la masse provient de l'analyse de la chute sur Terre, la dépendance en $1/r^2$ vient de l'analyse du mouvement de révolution des astres, et la présence de la seconde masse est d'autre part justifiée par la troisième loi de Newton.

Les différentes étapes de ce raisonnement sont représentées sur le schéma de la figure n°1.

Apports épistémologiques

Ayant mis en évidence que l'accélération de chute et l'accélération de la Lune sont deux cas particuliers d'un même type de phénomène, alors l'accélération de chute terrestre ne peut plus être associée aux circonstances physiques présentes uniquement à la surface de la Terre, comme la présence de l'air. La seule circonstance qui reste commune aux deux mouvements : c'est la présence de la Terre, ce qui justifie la notion d'attraction terrestre.

Cette approche permet de plus de justifier la formule de la force de gravitation, qui est la plupart du temps donnée à admettre.

Elle permet enfin de mettre en évidence un aspect épistémologique fondamental : le rôle d'unification d'une théorie physique, c'est-à-dire le fait de relier des phénomènes considérés jusqu'alors comme indépendants. L'explicitation du cheminement menant à relier la chute sur Terre et la révolution des astres permet de comprendre ce qui a *unifié* les mondes terrestre et céleste, justifiant ainsi l'idée même d'*Univers*.

Perception de la démarche de justification par les élèves

N'est abordé dans cette communication que la question de recherche concernant la perception des élèves de la démarche de justification. Une séquence d'enseignement a été développée sur la base de cette approche, et expérimentée avec 13 lycéens (première et terminale S) et 17 étudiants de première année de physique à l'université. La séquence, durant environ 6 heures, alterne des parties de cours et des activités. Dans le but de travailler la logique du cheminement exposé dans le cours, l'une des activités consiste à reconstituer le schéma de la figure 1 (cf. figure n°2).

Un résultat particulièrement marqué a été obtenu vis-à-vis de la perception de l'état d'esprit global de l'approche proposée. Dans les interventions orales des élèves et leur réponses à un questionnaire, la majorité des élèves ayant suivi la séquence a exprimé un intérêt manifeste pour la compréhension de l'origine des concepts ou formules. Ce résultat est d'autant plus net qu'aucune question n'a été explicitement posée à ce sujet. Cet intérêt est par ailleurs exprimé par 13 sur 15 étudiants, dans un questionnaire donné deux mois après l'expérimentation de la séquence, témoignant que ce point les a suffisamment marqués pour ressortir à plus long terme.

L'intérêt pour la compréhension de la provenance des notions apparaît notamment lors de la question de la comparaison avec d'autres cours de physique suivis, notamment au lycée. De nombreux commentaires mentionnent péjorativement le fait que « d'habitude », « on ne sait pas d'où ça sort », les notions sont « jetées », ou encore « mises dans la tête ». En opposition, plusieurs niveaux d'intérêt apparaissent pour la démarche de justification. Certains élèves trouvent une telle approche « plus pratique, car on ne balance pas des formules que l'on doit admettre, on voit leur origine et cela facilite la compréhension ». D'autres ajoutent que « si on comprend d'où est-ce que ça vient, on retient les formules plus facilement ». Enfin certains expriment que « voir d'où viennent les choses aide à comprendre vraiment ce qu'elles veulent dire », et que « c'est quasiment ce qu'il y a de plus intéressant finalement, le cheminement qui mène à la formule ».

On relève de plus certains témoignages forts vis-à-vis de cet aspect, parmi les réponses à la question sur l'apport éventuel de la séquence sur l'image de la physique qu'ont les élèves :

« La physique se résume pas à une simple formule, il y a tout un travail derrière une formule qui paraît toute faite. » (Laviru – L1 physique)

« A présent j'ai une idée de ce que la recherche demande afin d'obtenir des conclusions convaincantes. » (Ilias – Terminale S)

Ces résultats encouragent à approfondir et expérimenter une nouvelle version de la séquence, prenant en compte les autres retours obtenus, en particulier vis à vis des difficultés ressenties à propos de certains aspects du cours et des activités (Maron, 2015).

Schéma des étapes du cheminement menant à la gravitation universelle

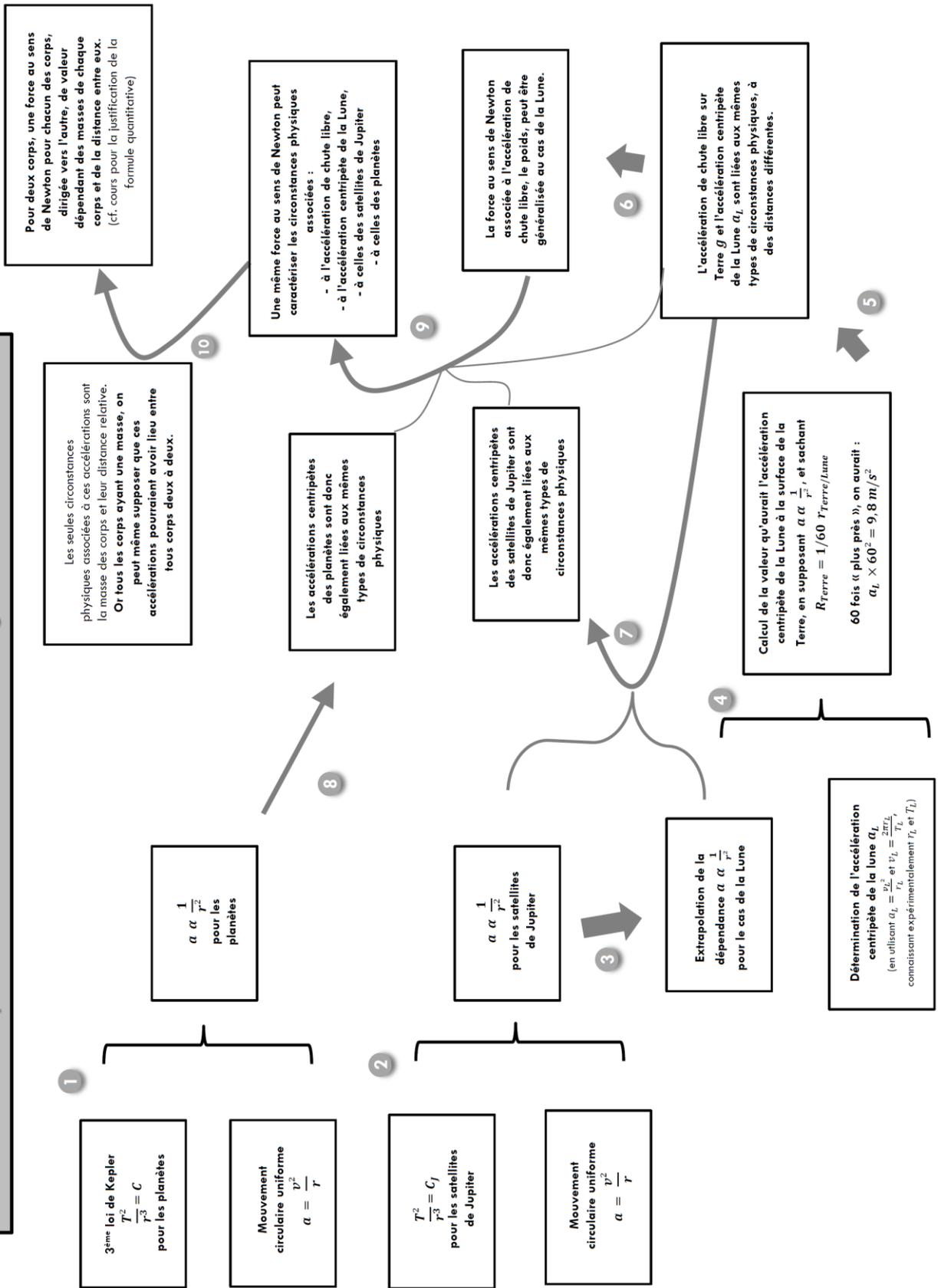


Figure n°1 : Schéma des étapes du cheminement menant à la gravitation universelle

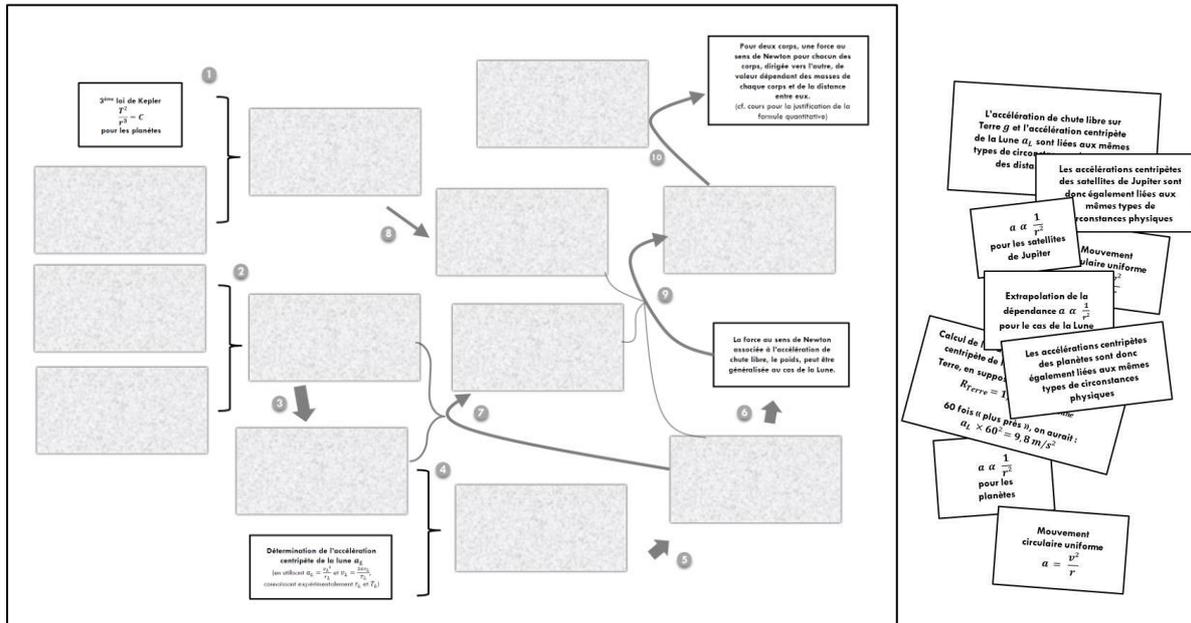


Figure n°2 : Activité de reconstitution du cheminement menant à la gravitation universelle. (Le schéma de la figure n°1 n'est pas présenté aux élèves pendant le cours.) Quatre éléments sont déjà positionnés sur le schéma à compléter, et l'ordre des étapes est indiqué. Après une première résolution individuelle, les élèves comparent en binôme leur schéma, et argumentent leur choix.

Bibliographie

- Bliss, J., & Ogborn, J. (1993). A common-sense theory of motion : issues of theory and methodology examined through a pilot study. In *Children's informal ideas in science* (pp. 120–133).
- Coelho, R. L. (2010). On the concept of force: How understanding its history can improve physics teaching. *Science & Education*, 19(1), 91–113.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53(11), 1056–1065.
- Kavanagh, C., & Sneider, C. (2006). Learning about Gravity I. Free Fall: A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, 5(2), 21–52. <http://doi.org/10.3847/AER2006018>
- 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 (Eds.), *Research and the Quality of Science Education* (pp. 447–457). Springer Netherlands.
- Maron, V. (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 - Paris 7.
- Maron, V. (2016). Une réflexion sur la notion d'explication au service de l'enseignement de la dynamique. In *Epistémologie et didactique* (Presses Universitaires de Franche-Comté). Christophe Delaunay.
- Tiberghien, A., Vince, J., & Gaidioz, P. (2009). Design Based Research, Case of a teaching sequence on mechanics. *International Journal of Science Education*, 31(17), 2275–2314.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique. La Part du sens commun*. De Boeck.
- Weil-Barais, A., & Lemeignan, G. (1993). *Construire des concepts en physique : L'enseignement de la mécanique*. Hachette.